

「新機能創出ガラスの加工技術開発プロジェクト／  
三次元光デバイス高効率製造技術」  
事後評価報告書

平成23年10月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

平成23年10月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
理事長 古川 一夫 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条の規定に基づき、別添のとおり  
評価結果について報告します。

## 目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 個別テーマに関する評価結果	1-21
2. 1 デバイス化加工用ガラス材料技術	
2. 2 三次元加工システム技術	
2. 3 三次元加工システム応用デバイス技術	
3. 評点結果	1-38
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料2 評価に係る被評価者意見	参考資料 2-1

## はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「新機能創出ガラスの加工技術開発プロジェクト／三次元光デバイス高効率製造技術」の事後評価報告書であり、第28回研究評価委員会において設置された「新機能創出ガラスの加工技術開発プロジェクト／三次元光デバイス高効率製造技術」(事後評価) 研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第29回研究評価委員会(平成23年10月14日)に諮り、確定されたものである。

平成23年10月  
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

「新機能創出ガラスの加工技術開発プロジェクト」

三次元光デバイス高効率製造技術」

事後評価分科会委員名簿

(平成23年6月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	やざわ てつお 矢澤 哲夫	兵庫県立大学大学院 工学研究科 物質系工学専攻 教授
分科会長 代理	すはら としあき 栖原 敏明	大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻 教授
委員	かどの こうへい 角野 広平	京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 物質工学部門 教授
	こんどう やすし 近藤 泰志	株式会社島津製作所 分析計測事業部 技術部 新規事業開発グループ グループ長
	にわ たつお 丹羽 達雄	株式会社ニコン 新事業開発本部 主幹
	みさわ ひろあき 三澤 弘明	北海道大学 電子科学研究所 所長・教授
	よこお としのぶ 横尾 俊信*	京都大学 化学研究所 教授

敬称略、五十音順

注\*：実施者の一部と同一大学であるが、所属部署が異なるため（実施者：京都大学大学院工学研究科材料化学専攻）「NEDO 技術委員・技術評価委員規程(平成23年7月7日改正)」第34条（評価における利害関係者の排除）により、利害関係はないとする。

## 審議経過

### ● 第1回 分科会（平成23年6月23日）

#### 公開セッション

1. 開会、分科会の設置、資料の確認
2. 分科会の公開について
3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について
4. プロジェクトの概要説明
5. 1～5. 3 プロジェクトの詳細説明

#### 非公開セッション

5. 4 プロジェクトの詳細説明
6. 全体を通しての質疑

#### 公開セッション

7. まとめ・講評
8. 今後の予定
9. 閉会

### ● 第29回研究評価委員会（平成23年10月14日）

## 評価概要

### 1. 総論

#### 1) 総合評価

フェムト秒レーザーによって、ガラスのマクロ構造にダメージを与えずガラス中の結合状態を変化させるというコンセプトは、材料創製プロセスとして先進的かつ独創的であり、チャレンジングな研究課題であるに拘わらず、基礎的な研究から、応用面の研究に至るまで、バランス良く研究が推進され、ホログラムを用いた画期的な三次元一括加工システム技術の開発により、バルク透明材料を用いた三次元光デバイスの製造の為の基盤技術を確立した。

また、開発項目の全てにおいて計算シミュレーションと実験を展開し、三次元光加工装置・技術開発で大きな成果を得るとともに、フェムト秒レーザーガラス高速加工に関する多くの知見を得たことは高く評価できる。さらに、活発な論文発表・学会発表、適切な特許出願を行い、若手技術人材育成に貢献したことも高く評価できる。

一方、光デバイスの加工に関しては、すでに金型加工や光リソグラフィー技術などにより極めて信頼性の高いデバイスが作製され、市場に供給されている。本プロジェクトで開発されたフェムト秒レーザー加工法がこれらにとって変わるほどの優位性があるか、明快に示されていない。既存の平面光波回路光デバイス技術では実現できないとか、価格あるいは性能の点で圧倒的に優位であるなどの特長を有していることが必要であり、その精査をきちんと行うべきである。

#### 2) 今後に対する提言

本プロジェクトで発展された3次元加工技術を実用的光デバイス作製技術として定着発展させるためには、この技術内での改善追求だけでなく、従来技術や開発中の競合他方式の光学デバイスの現状の調査研究を適切に行い、デバイス種や応用等を競争力のあるものに絞り込むことが必要である。

また、今回の成果を発展させ、実用化を拡大することは、プロジェクトの成功以上に重要なことである。実用化されている他の技術との比較検討を行って、光学ローパスフィルタのように、このプロジェクトで得られた技術でなければ実現できないような用途の探索を続けてほしい。

### 2. 各論

#### 1) 事業の位置付け・必要性について

ナノテク・部材イノベーションプログラムの下で、本プロジェクトは事業の必然性、公共性等を備えている。また、本プロジェクトの成果は光産業の基盤技術となる可能性を持っており、多方面への展開が可能な、先進的かつ汎用性の高い技術開発である。ガラス、フェムト秒レーザー加工、光デバイスの組合せのもとに相補的経験を有する研究者からなる体制を構成して総合的な実用化開発研究を推進することは NEDO プロジェクトとして意義があり、事業目的は極めて妥当である。

一方、長期間の開発の間には社会環境や技術環境の変化があり、当初計画で想定していた目標や応用用途が大きく変化したことに対して、中間段階で目標設定の見直しや絞り込みを行い、フェムト秒レーザーでしか対応できない産業応用の目標の順位付けが行われても良かった。

## 2) 研究開発マネジメントについて

目標に関しては達成すべき目標が具体的な数値に設定してあり、全体戦略は明確で概ね妥当と言える。また、各要素技術とプロジェクトの中での位置づけも、プロジェクトの目標に沿ったものであり、それに向かっての実施体制も適切であった。プロジェクトリーダーのイニシアチブもよく発揮されており、実用化を目指して積極的に特許出願やユーザとの連携を目指した努力がなされていることも評価できる。

しかし、目的とする事業規模を大きく捕らえすぎている部分がある。その技術がなければ実現できない部材についての事業規模であればよいが本技術の想定する事業規模はいずれも現状の代替市場であり、進歩を続ける内外の技術・市場動向等を踏まえて、開発目標を戦略的に更新し定量化・精密化してゆく努力が十分だったとは言えない。当該技術が他技術を圧倒する利点を再度整理し直して、それを前面に出した応用を見出す努力をすべきである。

## 3) 研究開発成果について

成果は、世界的な技術水準からみても、十分に満足のいくものであり、総合的に見て、目標を十分にクリアしている。ガラス材料技術では、屈折率変化値目標をほぼ満たす光学ガラスが見出され、目標をほぼ達成している。三次元加工システム技術では、ガラス・ホログラムの高度化および LCOS-SLM（空間光位相変調器）の高性能化とそれらを用いた汎用性の高い 3 次元露光装置・技術、およびホログラム設計技術取得を中心として目標を十分に達成しており、並列一括書き込みによる効率化を図り、実証したことは大きな意義がある。デバイス技術では、モアレ抑制フィルター（ローパスフィルター）で実現可能性をほぼ実証し、導波路デバイス技術では各種デバイスの試作試験がなされた。



さらに、知的財産の確保も適切に行われ、論文等、300件を超える外部発表を積極的に行っている。このプロジェクトと併設してレーザー加工の教室(NEDO特別講座)を開き、多くの技術者を教育したことは評価できる。

一方、本プロジェクトの主目的である実用的光デバイス製造技術開発の観点からは、本方法で光デバイス試作が可能なことを定性的に例示した段階に留まっており、試作された光デバイスの唯一性・優位性や競争力は示されていない。ガラス材料、加工システム技術、応用技術のそれぞれに掲げた目標が、全体として有機的に結合・機能しているのかという視点での検証が必要である。

#### 4) 実用化の見通しについて

本プロジェクトで高性能化されたガラス・ホログラムおよびLCOS-SLM(空間光位相変調器)とそれらを用いた3次元光加工装置・技術は高い自在性と実用性を有し、フェムト秒レーザー光加工や光デバイス作製だけでなく、汎用の3次元露光装置・技術として広く多くの応用可能性と発展性がある。今後の更なる高性能化と低下価格化により技術的波及効果が大いに期待される。

しかし、光通信用の多分岐デバイス、光学的オプティカルローパスフィルターなど応用デバイスについては、既存のデバイスとの定量的性能比較ができる段階に至っていない。また、応用用途が考えられる多くのデバイス例で、産業技術としての見極めと実用化にあまり近づけることができていない。ガラスの三次元デバイスが特段に活かせる応用分野を調査して、適用され易いターゲットで実用化の実績を積まれることが肝要である。

## 研究評価委員会におけるコメント

第29回研究評価委員会（平成23年10月14日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

## 研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所 属、役 職
委員長	西村 吉雄	学校法人早稲田大学大学院 政治学研究科 （科学技術ジャーナリスト養成プログラム） 客員教授
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 企画運営推進会議（オリンパス株式会社 未来創造研 究所） 副議長（コーディネーター）
	五十嵐 哲	工学院大学 応用化学科 教授
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員教授（専任）
	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 相談役
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授
	佐藤 了平	大阪大学大学院 マテリアル生産科学専攻 （システムデザイン領域担当） 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学大学院 新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	架谷 昌信	愛知工業大学 工学部機械学科 教授・総合技術研究所所長
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授

## 第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

## 1. プロジェクト全体に関する評価結果

### 1. 1 総論

#### 1) 総合評価

フェムト秒レーザーによって、ガラスのマクロ構造にダメージを与えずガラス中の結合状態を変化させるというコンセプトは、材料創製プロセスとして先進的かつ独創的であり、チャレンジングな研究課題であるに拘わらず、基礎的な研究から、応用面の研究に至るまで、バランス良く研究が推進され、ホログラムを用いた画期的な三次元一括加工システム技術の開発により、バルク透明材料を用いた三次元光デバイスの製造の為の基盤技術を確立した。

また、開発項目の全てにおいて計算シミュレーションと実験を展開し、三次元光加工装置・技術開発で大きな成果を得るとともに、フェムト秒レーザーガラス高速加工に関する多くの知見を得たことは高く評価できる。さらに、活発な論文発表・学会発表、適切な特許出願を行い、若手技術人材育成に貢献したことも高く評価できる。

一方、光デバイスの加工に関しては、すでに金型加工や光リソグラフィ技術などにより極めて信頼性の高いデバイスが作製され、市場に供給されている。本プロジェクトで開発されたフェムト秒レーザー加工法がこれらにとって変わるほどの優位性があるか、明快に示されていない。既存の平面光波回路光デバイス技術では実現できないとか、価格あるいは性能の点で圧倒的に優位であるなどの長を有していることが必要であり、その精査をきちんと行うべきである。

#### 〈肯定的意見〉

- フェムト秒レーザーの利点を生かし、欠点を補完する、三次元光デバイスの製造技術に関する **NEDO** プロジェクトが成功したことは、微細構造の三次元加工技術とガラス材料の可能性を大きく広げる成果であり、称賛をお送りしたい。  
また、長期にわたるプロジェクトを推進し、研究を成功に導かれた **PL, SL** の方々、研究員の方々のご努力に敬意を表します。
- フェムト秒レーザーを用いた、ある意味で原始的といえる逐次描画法から出発して、ホログラムを用いた画期的な三次元一括加工システム技術の開発に至り、バルク透明材料を用いた三次元光デバイスの製造の為の基盤技術を確立したことは評価するに値する。また、フェムト秒レーザーと物質（特にガラス材料）との相互作用に関して得た物理的および化学的現象についての多くの知見は非常に有用である。
- ガラス材料におけるフェムト秒レーザー加工による光デバイス製造技術に

関して総合的な開発研究に取り組み、開発項目の全てにおいて計算シミュレーションと実験を展開し、3次元光加工装置・技術開発で大きな成果を得るとともに、フェムト秒レーザガラス高速加工に関する多くの実験的知見を得たことは高く評価できる。いくつかの光デバイス例の試作でも技術蓄積がなされた。過半の項目で当初目標を完全にまたはほぼ達成できている。本プロジェクトで高性能化された空間光位相変調器（**LCOS-SLM**：**Liquid Crystal on Silicon - Spatial Light Modulator**）とそれを用いた3次元露光装置・技術は汎用性が高く波及効果が大いに期待される。極めて活発な論文発表・学会発表を行い、若手技術人材育成に貢献したことも高く評価できる。

- 本プロジェクトは、先に行われた「ナノガラス技術」の成果であるフェムト秒レーザを用いたデバイス作製技術を低コスト化、高精度化することにより実用レベルにより近づけることを目的としたものである。本プロジェクトに至るまでに、本PLによって推進された関連するプロジェクトとしては、上記「ナノガラス技術」の他に、これらのプロジェクトのルーツともいえる90年代半ばより実施されたJSTによるERATOプロジェクト、その後継で、「ナノガラス技術」とほぼ同時期に実施されたICORPプロジェクトがある。十数年間にわたり、本PLにより推進されたこれらの大型プロジェクトにおいて、その根本にあるのは高いエネルギー密度とコヒーレンス性をもつフェムト秒レーザと、物質、とりわけ非平衡材料であるガラスとの相互作用に関する研究であった。JSTプロジェクトでは種々の新規な現象の発見・抽出とその応用に力点が置かれ、NEDOプロジェクトではデバイス作製や3次元加工技術などプロセス技術への応用に力点が置かれているように思う。

フェムト秒レーザテクノロジーは、日本が世界に先駆けて大きく発展させた科学・技術と考えられ、それに関して、本PLが推進した一連のプロジェクトの寄与は誠に多大であり、心から敬意を表したい。

このような一連の流れにおいて、本プロジェクトの成果を眺めれば、それは、今後様々な方面にさらに展開していくなかでひとつのマイルストーンを形成したのではないかと評価される。

特にフェムト秒レーザテクノロジーの実用化という面では、今後さらなる研究開発は必要ではあるが、一括加工という手法が、コスト、精度などを含めた生産性という総合的な評価において、有効であるということは証明できたのではないかと考えられ、真の意味での実用化への研究開発を勇気づけたと思われる。

- 本プロジェクトにおいて、多くのチャレンジングな達成目標を全て達成し

たと判断します。そのことにより、フェムト秒レーザーとホログラムを使用した新しい加工法の可能性を一段と実用化技術に近づけたことは評価できる。

また、Si析出の新異質相形成の発見は基礎的な取り組みも並行して進めてきた開発の成果として評価する。論文等、300件を超える外部発表を積極的におこなっており、特許出願も適切に出している。このプロジェクトと併設してレーザー加工の教室を開き、多くの技術者を教育したことも評価できる。

- フェムト秒レーザーによって、ガラスのマクロ構造にダメージを与えずガラス中の結合状態を変化させるというコンセプトは、材料創製プロセスとして先進的かつ独創的であると思います。研究成果も人材育成まで含めて極めて豊饒なものと思慮されます。また、他のプロセスへの汎用性も高く波及効果の大きな技術開発だと思います。全体的に、チャレンジングな研究課題であるに拘わらず、基礎的な研究から、応用面の研究に至るまで、バランス良く研究が推進されてきたという印象を受けます。
- 本プロジェクトで進められたフェムト秒レーザー加工の描画方法などの技術的な改善は、今後、フェムト秒レーザーの産業応用が図られるとすれば、有用なものとなるであろうと思われる。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- フェムト秒レーザーを用いた三次元光デバイスの製造に関する重要な基盤技術を開発したわけであるが、それに伴って当該技術が万能ではなく、その限界も見えてきたのではないかと思われる。要するに、「三次元光デバイスがフェムト秒レーザーを用いた一括加工により製造できます」だけでは不十分で、既存の平面光波回路（PLC : Planar Lightwave Circuit）光デバイス技術では実現できないとか、価格あるいは性能の点で圧倒的に優位であるなどの特長を有していることが必要である。その精査をきちんと行うべきである。
- 光デバイスの加工に関しては、すでに金型加工や光リソグラフィー技術などにより極めて信頼性の高いデバイスが作製され、市場に供給されている。本プロジェクトで開発されたフェムト秒レーザー加工法がこれら全てにとって変わるほどの優位性があるか、また部分的であればその市場がどのぐらいの規模になるのかが明快に示されていない。実用化に資する基盤技術の開発としても NEDO のプロジェクトである以上、その点を明確にすべきと考える。
- 基礎技術開発に比べて、実用化開発については、実施する企業やユーザー

の状況、経済環境などに左右されるので、短期間で目途を立てるのは容易ではないと思われる。実用化については独立したチームやスタッフのサポートを検討された方が良いのではないかと考える。

- 本プロジェクトの主目的である実用的光デバイス製造技術開発の観点からは、モアレ低減フィルタ（ローパスフィルタ）を除いて、いくつかの既存光デバイスの試作が本方法でも可能なことを定性的に例示した段階に留まっている。光デバイス性能の目標設定はやや一面的で必要要件のバランスがとれた設定とは言えない部分もあり、また光デバイス関係の最新の技術動向等を踏まえて目標を更新・精密化する努力が十分になされたとは言えない。したがって試作された光デバイスの唯一性・優位性や競争力は示されていない。また実用化達成のための課題や方策が十分に明確にされたわけではない。予算規模に鑑みて高いコストパフォーマンスが得られたとは言えない。
- これまでの研究の流れから必然的に主に対象とする材料として「ガラス」が選ばれたこと、また「ガラス」であるがゆえに種々の技術的課題を克服できたことも理解できるが、他の材料との比較（長所、短所、相似点など）をもう少し厳密に、可能であれば定量的に行っておく必要があるかもしれない。  
おそらく、個別の研究開発の中では、他の材料との比較は必要に応じてなされていると思うので、それをいずれかの時点でまとめておくことは、基礎科学、応用面においても、ガラス（材料）を理解する上で役立つのではないと思われる。
- プロジェクトの題名が製造技術であるためか、実用化の可能性についての知見や掘り下げが少しもの足りない部分があった。

#### 〈その他の意見〉

- ・ ホログラムを利用した 3D 加工技術は、非常に素晴らしい先進的な技術開発だと思います。三次元光デバイスの応用面の展開がなされれば一層の発展が期待できます。
- ・ 評価資料の一部に専門的見地からは誤り、述語誤用、表現不適切、冗長と思われる部分があり、得られた性能の記述、従来技術との比較や実用化可能性の記述の一部に、具体性の欠如や論理の飛躍がみられる部分も散見される。プロジェクト内外の研究者の誤解や不適切な公表を避けるため、訂正や妥当な表現への書き直しまたは削除が望まれる。



## 2) 今後に対する提言

本プロジェクトで発展された 3次元加工技術を実用的光デバイス作製技術として定着発展させるためには、この技術内での改善追求だけでなく、従来技術や開発中の競合他方式の光学デバイスの現状の調査研究を適切に行い、デバイス種や応用等を競争力のあるものに絞り込むことが必要である。

また、今回の成果を発展させ、実用化を拡大することは、プロジェクトの成功以上に重要なことである。実用化されている他の技術との比較検討を行って、光学ローパスフィルタのように、このプロジェクトで得られた技術でなければ実現できないような用途の探索を続けてほしい。

### 〈今後に対する提言〉

- ・ フェムト秒レーザー照射ガラス変質に関する特性の解明と応用可能性を追求するため、拙速に応用開発に走ることなく、基礎的な検討を着実に続けることが望まれる。本プロジェクトで発展された 3次元露光技術を実用的光デバイス作製技術として定着発展させるためには、この技術内での改善追求だけでなく、従来技術や開発中の競合他方式の光学デバイスの現状の調査研究を適切に行い、本プロジェクトの結果を慎重に吟味して、実用化見極めが出来なかった項目の安易な継続を避け、デバイス種や応用等を競争力のあるものだけに絞り込むことが必要と思われる。
- ・ 先進的であるが故に、まだその基礎的なメカニズムの詳細は必ずしも明確にはなっていない所が多いと思慮されます。この部分を出来る限り解明し、それを今後の応用展開、特にホログラムによる 3D 加工に繋げるようなコンセプトで研究開発を行って頂ければと思います。ホログラムによる 3D 加工は、非常に魅力的な加工法と思慮されますので、ローパスフィルターなどの分野で実績を積み、三次元光デバイスへの展開を推進して頂けたらと思います。
- ・ 今回の成果を発展させ、実用化を拡大することは、プロジェクトの成功以上に重要なことと思われる。プロジェクトの関係者だけでなく、広く世間に今回の成果が享受できるような活動を進めていただけると企業関係者としてはありがたい。
- ・ しかし、他の委員の方からのご意見にもあったように、同じ目的を達成するための他の技術も存在し、その中には実用化されているものもある。このような他の技術との比較検討を行って、光学ローパスフィルタのように、このプロジェクトで得られた技術でなければ実現できないような用途の探索を続けていただきたい。
- ・ フェムト秒レーザーの産業応用を図る上で最も重要なことは、炭酸ガスレ

レーザーと同等程度の高いエネルギー変換効率を有するフェムト秒レーザーを開発することであり、我が国の光科学産業の国際競争力を高めるためにもそのような光源開発を国家として取り組むべき時であると考えます。また、そのようなフェムト秒レーザーが開発されない限り加工コスト競争において、フェムト秒レーザー加工がフォトリソグラフィなどの生産性の極めて高い従来技術に対抗することは困難である。むしろ、すでに実用化されている眼科手術のためのフェムト秒レーザー装置など、フェムト秒レーザーでしか実現できないナノメートルの精度で高品位な加工を必要とする医療への展開などを目指した研究開発を進めるべきと考えます。

- 本プロジェクトの一つの位置づけであるフェムト秒レーザーによる三次元造形・光加工という面は、現在既にレーザー加工においてフェムト秒レーザーが、特徴あるレーザーの一つとして、工業的に使用されつつある中、最も近い実用化の方向ではないかと思われる。

実際、評価委員会の冒頭でも PL よりいくつかの企業と実用化のための研究開発が進展しつつあるという説明があった。

このような実用化に向けて企業が主体となって進められる研究開発の芽は、できうる限り大事に育てられるように、手厚い支援制度が望まれる。

- 個別研究開発項目の最終目標と達成状況を見ると、三次元光回路導波路デバイス技術が○（達成）であることを除き、他はすべて◎（大幅達成）とある。であるならば、三次元光回路導波路デバイスを製造するための基盤技術がほぼ完成の域に達したということの意味する。ローパスフィルタ（LPF : Low-pass filter）は当該技術を用いた最初の製品となる可能性は高いと思われるが、このレベルの製品が当該プロジェクトの最終目標ではない。既存の PLC 光デバイスを凌駕する性能を有するとか、既存の PLC 光デバイスでは実現できない機能を有するデバイスの製造を可能にすることが必要である。そのためにはアクティブ回路を組み込んだ高機能光デバイス回路を製造できるとか、あるいは高集積化光回路デバイスを製造することができることが求められる。しかしながら、前者の場合異種元素を如何に供給するのかが問題となる。光回路を組み込むバルク材料に最初から必要な元素をすべて導入するのは限界がある。必要な場所へ必要な元素を如何に供給するかが当該手法の解決すべき大きな問題である。また、後者に関しては集積化度を上げれば上げるほどガラス内部に蓄積する内部応力は蓄積し、場合によっては破壊に至る。除歪技術の確立も重要である。
- 本技術は光導波路等へ実用化まではまだ時間はかかると思うが、技術の広がり大きい。
- 日本発の卓越した技術を実用化することで、より技術の持つ価値が向上す

る。このプロジェクトでは屈折率変化を中心に進められていたが、多くの波及効果をより一層進化させ、事業的にも価値ある技術に繋げて欲しい。

〈その他の意見〉

- ・ 目標に達してはいたが、目標の数値は実用化中の多くのあるパラメータの一つであり、全てではない。実用化についてはまだかなりの開発が必要と思われる。継続して商品化につなげて欲しい。

## 1. 2 各論

### 1) 事業の位置付け・必要性について

ナノテク・部材イノベーションプログラムの下で、本プロジェクトは事業の必然性、公共性等を備えている。また、本プロジェクトの成果は光産業の基盤技術となる可能性を持っており、多方面への展開が可能な、先進的かつ汎用性の高い技術開発である。ガラス、フェムト秒レーザー加工、光デバイスの組合せのもとに相補的経験を有する研究者からなる体制を構成して総合的な実用化開発研究を推進することは NEDO プロジェクトとして意義があり、事業目的は極めて妥当である。

一方、長期間の開発の間には社会環境や技術環境の変化があり、当初計画で想定していた目標や応用用途が大きく変化したことに対して、中間段階で目標設定の見直しや絞り込みを行い、フェムト秒レーザーでしか対応できない産業応用の目標の順位付けが行われても良かった。

#### 〈肯定的意見〉

- フェムト秒レーザーと物質との相互作用に関する基礎科学としての数多くの知見は、国内のいくつかの大学や公的研究所などに蓄積されており、プロジェクトを推進するにあたりこれらの公的な「知」を有効に活用することは妥当であったと思われる。
- ナノテク・部材イノベーションプログラムの下での位置づけは、ナノの材料開発を中心にすえている点で適切。また、このようなチャレンジングなテーマを企業が単独で進めるには大変であり、その技術の汎用性からも NEDO のプロジェクトとしての適切である。
- 大学、民間の共同開発事業を行う場合、国のバックアップがなければ関連機関が集結することは難しい。本事業のように長期に渡る研究期間が必要で、多方面からの技術を集結することが必要な場合、NEDO の事業として大学、民間を牽引していくことが望ましい。  
本プロジェクトの成果は光産業の基盤技術となる可能性を持っており、また多方面への展開が可能な技術であるので、国内の多くの大学、企業に公開して普及させていくことが望ましいと考える。
- ガラスは最も重要な光学材料のひとつでありフェムト秒パルスレーザー加工はユニークな 3次元加工方式として多くの可能性や利点が潜在している。一方、社会基盤高度化や IT イノベーションのため、導波路型光デバイスの実用化推進や低コスト化の要求が高まりつつある。ガラス、フェムト秒レーザー加工、光デバイスの組合せのもとに相補的経験を有する研究者からなる組織を構成して総合的な実用化開発研究を推進することは

NEDO プロジェクトとして意義があり、目的は極めて妥当である。

- 「ナノガラス技術」プロジェクトの後継として、そこで開発された成果をより実用化に近づけるためには、本プロジェクトは、事業の継続性、必然性、公共性等において、また、ナノテク・部材イノベーションプログラム/IT イノベーションプログラムのもとで実施するにおいて十分に必要であり評価できる。

また、これまでの PL が推進してきたフェムト秒レーザテクノロジーの科学・技術研究開発の流れの中で、当該分野における国際競争力のさらなる強化、技術開発動向を思えば、本事業は強力に推進する以外の選択肢はなかった。

また、成果を総合的に評価すれば、当初感じられた以上に、その必要性は、理解できる。(費用対効果においても評価できる。)

- ホログラムを用いた透明材料の一括加工技術の開発は、ガラスを含めた材料の革新的な加工技術であるのは間違いない。
- 先進的かつ汎用性の高い技術開発ですので、NEDO の事業としての妥当性には全く問題ないと思います。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- しかしながら、当該技術は残念ながら当初に予想したような万能な技術ではなく、三次元光デバイス回路中に平面光導波路 (PLC : Planar Lightwave Circuit) におけるような各種アクティブ素子を組み込むことはかなり難しいと予想され、そうであるならば石英系 PLC に取って代わることはかなり難しいのではないかと思われる。例えば、PLC では表面がある故にマッハツェンダー干渉計 (MZI : Mach-Zehnder interferometer) のアーム表面に薄膜ヒーターを配置して可変減衰器 (VOA : Variable Optical Attenuator) を構成したり、アレイ導波路回折格子 (AWG : Arrayed Waveguide Grating) のアレイ導波路部の一部を石英の熱特性と異なる樹脂で置き換えて温度無依存のアサーマル AWG を実現するというようなことが、ガラスブロックを用いた三次元デバイスではどう考えても困難である。PLC で取り扱っているような数百チャンネルの信号を同時に扱う場合、各チャンネルをトリミングする必要があるが、三次元光回路ではトリミングが非常に難しい。そうすると、2020 年頃に実用化を目指しているアクティブ回路を内蔵した小規模三次元多層光回路の実現は単なるアドバルーンのように思われる。また、光ファイバー接続を考えると光信号取り出しポートの間隔を小さく出来ないのでガラスブロックのサイズを小さくすることができない。当該技術の適

用が妥当なものと当該技術を適用しても乗り越えられない障害を伴うものを峻別することが必要と思われる。要するに、高い完成度に達している PLC 技術を置き換えることを狙うのではなく、PLC ではできないことを目指すべきと思われる。

- 現在のフェムト秒レーザーはエネルギー効率の悪いレーザーであり、入力した電気エネルギーに対して取り出せる光エネルギーは 0.1%を遙かに下回り、フェムト秒レーザー加工のエネルギー利用効率が数 10%に達することはない。極めて高いエネルギー変換効率を有するフェムト秒レーザーが出現しない限り、フェムト秒レーザー加工のエネルギーコストの低減は困難であり、その点において競争力を持たせることは極めて難しい。そのような視点に立ってフェムト秒レーザー加工の産業応用を考える必要があると思われる。たとえば、フェムト秒レーザーは、すでに眼科手術のツールとして利用されており、角膜など、生体組織に対する高品位な切断には必要不可欠となりつつある。このように、エネルギーコストが高くてもフェムト秒レーザーでしか対応できないといった産業応用を目指すべきであると思われる。
- 原理的な新規可能性の探究ではなく、実用的光デバイス製造技術開発を目的としたことに鑑みて、また既存技術や競合技術との比較において、投じた大型予算に十分に見合った成果を得ることが非常に重要である。
- 長期間の開発の間には社会環境や技術環境の変化があり、本プロジェクトにおいては 100 年に一度の不況が訪れた。当初計画で想定していた目標や応用用途が大きく変化したのではないかと思われる。難しいと思うが、中間段階で目標設定の見直しや絞り込みを行い、実用化がより短期間で行えるよう目標の順位付けが行われても良かったように思う。

#### 〈その他の意見〉

- ・ フェムト秒レーザーを利用した加工技術を投入したエネルギーの観点だけから省エネルギーとすることは難しい。本技術により沢山のプロセスコストが低減でき、トータルのコストで省エネになる観点のほうが適当である。
- ・ 本プロジェクトやその前段の「ナノガラス技術」の成果を活かした、その分野の人材育成と、実用化に向けた企業の技術開発等の支援のため、本プロジェクトに平行して「NEDO 光集積特別講座」を推進してこられたが、成果を広く社会に還元するという意味でその事業そのものも高く評価できるし、本プロジェクトと連携してこのような事業がなされた点は、プロジェクトの推進母体が、NEDO という公的な機関であるがゆえである。

- フェムト秒レーザー加工はフェムト秒レーザーパルスの発振が成功した直後から様々な物質の加工への展開が進められ、最も基本的な特許は米国ミシガン大学が有している。全てのフェムト秒レーザー加工はこの基本特許に抵触すると言われており、また、大学が保有する特許であるためクロスライセンス契約を締結することもできない状況で、フェムト秒レーザー加工の産業応用が進まない大きな理由とも言われている。国際競争力を有して実用化を図ることを念頭に置いたプロジェクトであれば、本ミシガン特許も含め 1990 年代の様々なフェムト秒レーザー加工に関する知的財産権に対してどのように対応するのかの視点を持つべきであると考ええる。

## 2) 研究開発マネジメントについて

目標に関しては達成すべき目標が具体的な数値に設定してあり、全体戦略は明確で概ね妥当と言える。また、各要素技術とプロジェクトの中での位置づけも、プロジェクトの目標に沿ったものであり、それに向かっての実施体制も適切であった。プロジェクトリーダーのイニシアチブもよく発揮されており、実用化を目指して積極的に特許出願やユーザとの連携を目指した努力がなされていることも評価できる。

しかし、目的とする事業規模を大きく捕らえすぎている部分がある。その技術がなければ実現できない部材についての事業規模であればよいが本技術の想定する事業規模はいずれも現状の代替市場であり、進歩を続ける内外の技術・市場動向等を踏まえて、開発目標を戦略的に更新し定量化・精密化してゆく努力が十分だったとは言えない。当該技術が他技術を圧倒する利点を再度整理し直して、それを前面に出した応用を見出す努力をすべきである。

### 〈肯定的意見〉

- 当初の全体戦略は明確でかつ概ね妥当であり、プロジェクトを総合的かつ並進的に進展させるためにマネジメント努力が継続してなされた。適切なガラス材料の探索と特性把握のための試験や実験、およびホログラム設計技術の習得と LCOS-SLM の性能改善などの 3次元露光装置・技術の開発は順調に推進され、概ね妥当な連携が行われた。実用化を目指して積極的に特許出願やユーザとの連携を目指した努力がなされていることも評価できる。
- 「ナノガラス技術」プロジェクトの後継という位置づけにおいて、そこで得られた成果を実用化につなげるために設定された大まかな目標・目的は妥当であった。また、各要素技術と、プロジェクトの中での位置づけも、プロジェクトの目標に沿ったものであり、それに向かっての実施体制も適切であった。  
PL は、先にも述べたように、世界的に見ても、常にフェムト秒レーザーテクノロジーをリードされてきており、本プロジェクトに至る種々の関連したプロジェクトを推進されてきたことから考えても適任であった。  
各要素技術の目標も具体的に設定されており、その点においては適切であったと思う。
- ホログラムによる波面制御技術を用いた透明材料内部へのフェムト秒レーザーによる直接一括描画技術は世界最先端の革新的な技術である。将来的には光学デバイスの重要な製造技術の一角を担うことになることは間違いない。



- 研究リーダーのイニシアチブもよく発揮されており、全く問題ないと思います。目標の設定の仕方も極めて妥当であり、必要な要素技術も適切に取り上げられていると思います。
- 目標に関しては達成すべき目標が具体的な数値に設定してあり、その目標を達成すれば実用化に近づく指標であり、評価する。研究体制としてもこの技術の発明者である平尾先生をプロジェクトリーダーとして据え、サブリーダ、研究員とも本開発を高いレベルで遂行できていたと判断します。
- 難易度の高い目標設定に対して、それを達成するための研究開発マネジメントが適切に機能していたと思われる。PL、SLの役割分担も適切に設定されていたと思われる。  
論文など発表件数はたいへん多く、成果を社会に発信すべき役割も果たせていたと思われる。
- 2000年代当初、国内のいくつかの大学の研究者がホログラフィックフェムト秒レーザー加工を試み、種々の成果を得ている。その観点から、本プロジェクトを立ち上げたことは妥当であると考えます。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- 成果の実用化についての戦略は、このプロジェクトの期間内では、時間的に難しかったのではないかとと思われる。プロジェクト完了後での参画機関の活動に期待したい。
- 光デバイスに関しては、既存技術によって信頼性が高く、かつ低コストのものが作製され市場に流通しており、本プロジェクトのホログラフィックフェムト秒レーザー加工を光デバイス（対象材料：ガラス）の加工にのみ適用することによって、国際的な技術の優位性が勝ち取れるのか疑問である。ドイツでは1990年代後半には、金属材料、セラミクス、生体材料など様々な材料に対するフェムト秒レーザー加工に関する国家プロジェクトが存在しており、特許戦略も含め戦略的にフェムト秒レーザー加工に関する開発を進めていた。他国で進められた国家プロジェクトの動向の調査も含め、研究課題は設定されるべきであろう。
- 当該技術が他技術を圧倒する利点を再度整理し直して、それを前面に出した応用を見出す努力をすべきと思われる。それと同時に、当該技術の限界を見極め、無益な挑戦から撤退すべきである。
- 進歩を続ける内外の光デバイス関係の技術・市場動向等を踏まえて、開発目標を戦略的に更新し定量化・精密化してゆく努力は十分になされていない。すなわち光デバイス特に光通信・光インターコネクション用光デバイスの技術動向を十分に把握して目標を上向修正し、競争力が見込めないデ

デバイスに関する見直しや実用化の観点からの絞り込みを適切に実施したとは言い難い。また光デバイス性能の目標設定はやや一面的で必要要件のバランスがとれた設定とは言えない部分もあった。このためプロジェクト終了時の目標達成度の測定・判断は曖昧で現在の技術水準に照らして妥当とは言えない部分もある。

事後評価資料の一部（6-329～6-353 等）で、根本的誤り、不正確や本プロジェクトに直接関係ない冗長な記述が見られることから、実施者の一部においては真に十分な技術力を有するとは言えず技術的な連携や錬成も十分になされたとは言えない。一部実施者（または外部受託者）の主張がプロジェクト内で専門的に十分に理解され吟味されることなく安易に受売りされている部分があることは問題である。

- デバイスサイドからも納得のいく目標設定、あるいは、目標の延長線上にそれがあるということ、あるいは、そのことのもう少し丁寧な説明がなされるべきであったように思う。

#### 〈その他の意見〉

- ・ 目的とする事業規模を大きく捕らえすぎている部分がある。その技術がなければ実現できない部材についての事業規模であればよいが本技術の想定する事業規模はいずれも現状の代替市場であり、それぞれ商品の機種により望まれる性能が異なり全てが置き換えられるとは考えることは難しい。今回見積もった応用以外も含めれば市場創出効果としてそれなりの大きさはあると思う。
- ・ 実用化の見通しについては、曖昧な文章や「問い合わせが X 社から来ている」などの主張が中心で、本プロジェクト成果と応用上の要求や既存・競合技術との定量的比較の提示はなく、妥当性を欠く数値等（資料 7-4 の 9/13 の左上）も含まれているので、信頼性や説得力があるとは言い難い。

### 3) 研究開発成果について

成果は、世界的な技術水準からみても、十分に満足のものであり、総合的に見て、目標を十分にクリアしている。ガラス材料技術では、屈折率変化値目標をほぼ満たす光学ガラスが見出され、目標をほぼ達成している。三次元加工システム技術では、ガラス・ホログラムの高度化および LCOS-SLM（空間光位相変調器）の高性能化とそれらを用いた汎用性の高い 3 次元露光装置・技術、およびホログラム設計技術取得を中心として目標を十分に達成しており、並列一括書き込みによる効率化を図り、実証したことは大きな意義がある。デバイス技術では、モアレ抑制フィルター（ローパスフィルター）で実現可能性をほぼ実証し、導波路デバイス技術では各種デバイスの試作試験がなされた。

さらに、知的財産の確保も適切に行われ、論文等、300 件を超える外部発表を積極的に行っている。このプロジェクトと併設してレーザー加工の教室(NEDO 特別講座)を開き、多くの技術者を教育したことは評価できる。

一方、本プロジェクトの主目的である実用的光デバイス製造技術開発の観点からは、本方法で光デバイス試作が可能なることを定性的に例示した段階に留まっており、試作された光デバイスの唯一性・優位性や競争力は示されていない。ガラス材料、加工システム技術、応用技術のそれぞれに掲げた目標が、全体として有機的に結合・機能しているのかという視点での検証が必要である。

#### 〈肯定的意見〉

- 一括加工技術の確立、LCOS-SLM の開発など第一級の成果が得られていると評価したい。将来的にさらに進化する技術である。知的財産権等の取得及び標準化の取組もしっかり成されているように思われる。成果の普及については学術的にはしっかり成されているように見受けられる。
- 目標値を全て達成しており評価できる。フェムト秒レーザーとホログラムを用いた方式に関して、新たな加工法の可能性を広げた。また、シリコンの析出など新しい発見もあった。論文等、300 件を超える外部発表を積極的に行っており、特許出願も適切に出している。このプロジェクトと併設してレーザー加工の教室を開き、多くの技術者を教育したことは評価できる。
- 成果は、総合的に見て、目標を十分にクリアしていると考えられる。また、世界的な技術水準からみても、十分に満足のものであったと思われる。知的財産の確保、成果の普及も適切に行われている。
- ①ガラス材料技術では、屈折率変化値目標をほぼ満たす光学ガラスが見出され、光パルス照射ガラス加工に関していくつかの新規で興味深い知見も得られていて、目標をほぼ達成しているが、いずれも基礎データの段階で

ある。②三次元加工システム技術では、LCOS-SLM 高性能化とそれを用いた汎用性の高い3次元露光装置・技術、およびホログラム設計技術取得を中心として目標を十分に達成している。並列一括書き込みによる効率化を図ってこれを実証したことは大きな意義がある。③デバイス技術では、モアレ抑制フィルタ（ローパスフィルタ）で実現可能性をほぼ実証し、導波路デバイス技術では各種デバイスの試作試験がなされたが、実用性や優位性を示すには至っていない。プロジェクト全体の目標達成は中程度である。

いずれの項目も論文発表は非常に活発になされ、特許出願や成果普及や広報活動や情報発信についても十分な努力がなされていることは高く評価できる。

- ほぼ全ての研究開発項目において目標値を大幅達成している。特に三次元光学デバイスの一括描画を行い、実際にデバイスを作製できたことは大きな成果であると評価できる。
- 目標も概ね達成されており、研究成果も順調に得られていると思慮されます。この間に発表された、特許、論文、口頭発表の件数も問題ないと思われれます。NEDO 特別講座を開催され、成果の普及とともに人材育成にも多大な寄与をされていることに敬意を表したいと思います。
- 設定された目標は、概ね達成できていると思われる。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- いずれの評価項目も実施者の自己採点では大幅達成または達成となっている。確かに、そのように受け取ってよい項目もあるが、大幅達成だったら直ぐに実用化してもよいはずなので、少し自己評価が甘いのかなという気がする。言い方を変えれば、目標設定が多少甘いというべきかもしれない。
- 目標ではないので当然ではあるが、新規な概念の創出や未知の発見は殆ど得られていない。

本プロジェクトの主目的である実用的光デバイス製造技術開発の観点からは、本方法で光デバイス試作が可能なることを定性的に例示した段階に留まっており、試作された光デバイスの唯一性・優位性や競争力は示されていない。また実用化達成のための課題や方策が十分に明確にされているわけではない。予算規模に鑑みてコストパフォーマンスは高いとは言えない。

- ホログラフィックフェムト秒レーザー加工は、2000年代当初、すでに本プロジェクト以外の国内の研究者によって研究が行われており、本プロジェクトが世界初ではないため、実用化のために必要十分な特許取得がなさ

れるのか、また今後、特許の登録が可能なのか疑問である。

また、フェムト秒レーザー加工は、本質的に熱的な緩和がほとんど起きないため、加工部位に大きな応力集中が生じる。そのため、極めて弱い衝撃によっても加工部位に大きな亀裂が入ることが知られている。実用化を図るためには、このような現象を避ける必要があるが、加工した光デバイスの機械強度を評価しておらず、それに対応する方法論の開発も行われなかったのは問題である。

- ガラス材料、加工システム技術、応用技術のそれぞれに掲げた目標が、全体として有機的に結合・機能しているのかという視点での検証が必要かもしれない。プロジェクトの期間中にそれぞれの目標のメリハリをつけることも、今後検討の余地があると感じた。

#### 〈その他の意見〉

- ・ このプロジェクトに限ったことではないが、数値目標は技術レベルの指標として有用だが一面に過ぎない場合が多いことに注意が必要である。単純に設定された数値目標の達成だけでなくバランスのとれた技術完成と評価が必要である。
- ・ フォトリソ、成膜など他の競合する技術に対する利点が明確でないところが一部あった。利点と欠点の二つの観点において比較することでより本方式の特質が明確化できたと思う。
- ・ ターゲットになっている応用分野を考慮しますと、勿論その実用化が最も重要ですが、今後、標準化、特に国際標準化への戦略的な取り組みを考慮されておかれればと思慮されます。
- ・ 本プロジェクトに平行して「NEDO 光集積特別講座」を推進してこられたが、成果の普及と進展、人材育成には、タイムリーな事業であり評価できる。

#### 4) 実用化の見通しについて

本プロジェクトで高性能化されたガラス・ホログラムおよび LCOS-SLM (空間光位相変調器) とそれらを用いた 3 次元光加工装置・技術は高い自在性と実用性を有し、フェムト秒レーザー光加工や光デバイス作製だけでなく、汎用の 3 次元露光装置・技術として広く多くの応用可能性と発展性がある。今後の更なる高性能化と低下価格化により技術的波及効果が大きいと期待される。

しかし、光通信用の多分岐デバイス、光学的オプティカルローパスフィルタなど応用デバイスについては、既存のデバイスとの定量的性能比較ができる段階に至っていない。また、応用用途が考えられる多くのデバイス例で、産業技術としての見極めと実用化にあまり近づけることができていない。ガラスの三次元デバイスが特段に活かせる応用分野を調査して、適用され易いターゲットで実用化の実績を積まれることが肝要である。

#### 〈肯定的意見〉

- 光学ローパスフィルタの実用化は具体的であり、実用化は近いと思われる。光学ローパスフィルタは大きな開口ではサイズも重量も大きくなるのでこれが薄く・軽量になることはカラーカメラにとって大きなメリットがある。速やかに実用化に向けた施策を講じていただきたいと思う。光インターコネクション、光結合器については、実用化への可能性が明らかになっており、将来に期待が持てる。
- 本プロジェクトの最終的な目標である「従来技術では不可能であった新しい機能を持つ光学デバイスの創製とその実用化」を達成するためには、もう少し時間が必要であるかもしれないが、本プロジェクトで開発された各要素技術を用いた様々な分野での実用化は比較的早くなされるのではないかと期待される。特に、評価委員会での PL のご説明にもあったように、フェムト秒レーザー加工の分野では、プロジェクト実施者の支援の元に、企業が主体となって研究開発が推進されるなど、早期の具体的な実用化が期待される。
- 成果の実用化へ向けた戦略も十分にビルトインされて研究を推進されていると思います。波及効果も大きいと思います。
- 本プロジェクトで高性能化された LCOS-SLM とそれを用いた 3 次元光加工装置・技術は高い自在性と実用性を有し、フェムト秒レーザー光加工や光デバイス作製だけでなく、汎用の 3 次元露光装置・技術として広く多くの応用可能性と発展性がある。今後の更なる高性能化と低下価格化により技術的波及効果が大きいと期待される。  
本プロジェクト実施が人材育成にも大いに貢献していることも高く評価

できる。

- 目的とする開発テーマ目標を全て達成しており、一段と実用化に近づいたといえる。
- 具体的な産業応用に関して（株）オハラと富士フイルムより提案がありその方向で実用化が進むものと期待できる。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- 様々な応用用途が考えられるプロジェクトの成果であるが、実用化を促進するためには実用化テーマを絞って集中すべきではないかという思いもある。実用化を検討するチームを独立して編成することも検討してはどうかと思う。
- 光通信用の多分岐デバイス、光学的オプティカルローパスフィルターなど具体的テーマでの可能性については近づいてはいるが、どの程度近づいたのかの尺度が見えない。既に製品として世にあるものを安く作成できる可能性を示す場合は、より具体的な指標が必要であった。
- 実用化の可能性に関する報告はいくつかはなされたが、具体的な企業名や開発をするデバイスについて確証があるものがなく、評価の対象として取り扱うことはできない。  
また、反射防止膜など、デジタルカメラに装着するナノメートルレベルの凹凸構造は、インプリントやステッパーを用いたリソグラフィーで大面積に作製することが可能であり、すでにパナソニックなどはそれらの技術によって作製した構造をデジカメに搭載している。フェムト秒レーザー加工でもできるということではなく、フェムト秒レーザーでしか加工できないという視点で実用化を図らなければ、市場の獲得は困難であると考える。
- 実用的な光デバイスの高効率製造の観点からは、多くの試験はなされたが既存のデバイスとの定量的性能比較ができる段階に至らず、多くのデバイス例で産業技術としての見極めと、実用化にあまり近づけることができているのが残念である。

#### 〈その他の意見〉

- ・ 本プロジェクトに平行して「NEDO 光集積特別講座」を推進するなど、成果の普及と進展、人材育成などを目的として活動も評価される。また、国際的な人的交流にも貢献した。
- ・ ここで開発した技術に関して波及効果についての報告もあったが、評価が出来る程度に詳しく報告できるものに限る必要がある。
- ・ ガラスの特性を活かしたホログラムによる三次元加工という今までにな

い先進的な技術を開発されました。今後は既存の技術とのデマケもさることながら、ガラスの三次元デバイスが特段に活かせる応用分野を調査されるとともに、まず多少、周辺領域になっても適用され易いターゲットで実用化の実績を積まれることが肝要かと思慮します。

- いくつかの項目の今後の課題欄に継続研究と書かれているが、既に公的大型予算が投入されたことに鑑み、本プロジェクトの結果を慎重に吟味して、実用化見極めが出来なかった項目の安易な継続を避ける必要がある。



## 2. 個別テーマに関する評価結果

### 2. 1 デバイス化加工用ガラス材料技術

#### 1) 成果に関する評価

成果は目標を達成しており評価できる。系統的試験により屈折率変化量の目標値 0.015 を超す  $\text{TiO}_2$  含有リン酸塩系ガラスが見出された。Al 添加多成分ガラスにおいて見出したフェムト秒光照射 Si ナノ微粒子析出現象、複合整形フェムト秒ビーム照射によるイオン移動分布の形状制御は、材料科学的な視点から非常に高く評価できる。

しかし、ガラスに限っても、シリカガラスや、他に様々な多成分系ガラスがあり、それぞれの代表的なガラス系において、どの程度の加工が可能であるか(屈折率変化と透過損失)などの技術的データの蓄積が必要である。

#### 〈肯定的意見〉

- 成果は目標値をクリアしてあり、異質相形成メカニズムの解明に対する基礎研究が十分に行われている。多点一括描画光導波路が行える材料についても目標性能を実現できる材料が確認できている。多点一括描画が行えることを実際に示すことができたことはたいへん意義があると思われる。
- 本研究開発の基盤をなす部分であり、フェムト秒レーザーによって、ガラスのマクロ構造にダメージを与えずガラス中の結合状態を変化させるというコンセプトは、材料創製プロセスとして先進的かつ独創的であると思います。また、他のプロセスへの汎用性も高いと思います。石英ガラスだけではなくにリン酸系ガラス等、実用性の高いガラスに対しても視野に入れて研究されている点も高く評価できます。
- 開発されたガラスはレーザー照射前後の屈折率差が、設定された最終目標に到達しており、評価できる。
- 光通信  $1.55 \mu\text{m}$  帯の光を導波する光導波路用ガラスと可視光用のガラスの両材料について、一括描画により、目標とする性能を示す加工ができた。併せて、屈折率変化をもたらす異質相の形成メカニズムを解明し、今後の展開を可能にする基盤技術を確立した。
- フェムト秒光照射ガラス構造変化ダイナミクスの観測による屈折率変化メカニズムと変化拡大策、フェムト秒光照射イオン移動のメカニズムに関する知見が得られ、光学ガラスの系統的試験により屈折率変化量の目標値 0.015 を超す  $\text{TiO}_2$  含有リン酸塩系ガラスが見出されたことは喜ばしい。また Al 添加多成分ガラスにおいて見出したフェムト秒光照射 Si ナノ微粒子析出現象、複合整形フェムト秒ビーム照射によるイオン移動分布の形状制御も興味深い知見である。論文発表と情報発信は大変活発に行われている

る。

- 成果は目標を達成しており評価できる。特に異質相の形成メカニズムの解明は、材料科学的な視点から非常に高く評価できる。論文発表も適切に行われている。
- 目標を全てクリアしている判断します。  
また、Si 析出の新異質相形成の発見は基礎的な取り組みも並行して進めてきた開発の成果として評価する。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- 本テーマの、プロジェクト全体の中での位置づけとして、材料面からみて、フェムト秒レーザーによる3次元光加工技術を実用化するにおいて、本質的な技術的課題を明白にし、それを解決しておくという視点も重要であったかと思われる。

具体的数値目標 ( $\Delta n > 0.015$ , 損失  $< 0.1 \text{ dB/cm}^{-1}$ ) を設定し、それがクリアできた点は、本技術が、材料面からは、デバイス創製技術として実用化できるということを示したと考えられ、それ自体は評価できる。

しかし、一方で、ガラスに限っても、シリカガラスや、他に様々な多成分系ガラスがあり、それぞれの代表的なガラス系において、どの程度の加工が可能であるか（屈折率変化と透過損失）などの技術的データの蓄積があっても良かったのではないかと思われる。そのようなデータは、本プロジェクトの成果を実用化する中で、まず材料面からの技術的課題について検討する場合に、必要になってくるとと思われる。

種々のガラスでの例えば屈折率変化については、測定されまとめられているようであるので、もし、系統的なデータがそろっているのであれば、上記のような観点で整理し、公表できれば良いのではないかと思います。

- 屈折率変化量の定義および測定結果の精度はやや曖昧であり、TiO<sub>2</sub> 含有リン酸塩系ガラスにおいて波長 633nm で 0.015 を超える屈折率変化が得られているが、他の波長での測定データは無いので、「400nm-760nm 域で屈折率差 0.015 以上取れる・・・」との目標を達成したとは言えない。
- フェムト秒レーザーの照射により、発生した衝撃波がサファイア内部を改質することは 2006 年には国内の研究者によって Phys. Rev. Lett.、Adv. Mater. や Phys. Rev. B などのインパクトファクターの高い科学誌に報告されており、透明誘電体の改質のメカニズムに衝撃波が強く関与すること、また衝撃波による内部改質ダイナミクスのシミュレーションについても知られていた。本プロジェクトによって進められたフェムト秒レーザー誘起衝撃波による内部改質の研究は、対象とした加工材料がガラスであるこ

と以外、新規性は特にはない。

- 特に、三次元光導波路デバイス用ガラス材料は  $1.55\ \mu\text{m}$  帯の光に対して  $0.1\text{dB/cm}$  以下の内部伝送損失が得られたとしても、これがデバイスの可能性を保証するものではない。
- 三次元光デバイスを実現する他の手段との比較において、今回の成果が優位に立てるような分野あるいは手段に向けて集中する必要性もあったかもしれない。

#### 〈その他の意見〉

- ・ フェムト秒光照射析出 Si ナノ微粒子の応用に関して「アクティブデバイスの可能性は確認した」など希望的観測を述べるのではなく、その可能性を議論するには、屈折率、光吸収・散乱や光励起発光のスペクトルなどの基礎的データ提示が必要である。
- ・ 先進的であるが故に、まだその基礎的なメカニズムの詳細は必ずしも明確にはなっていない所が多いと思慮されます。特にアルミニウム添加等による異質相の実態、形成メカニズム等について今後、さらに解明して頂きたい。大いに期待しています。
- ・ 難しい開発であるので致し方ないが、屈折率変化や内部損失に関して目標達成のぎりぎりのデータしか出せなかったのは、現在提案している実用化にかなりの距離を感じた。

## 2) 実用化の見通しについて及び今後に対する提言

材料技術の観点からは、三次元光デバイスの実用化についての可能性が確かめられており、今後様々な分野への展開が期待される。さらに、異質相形成メカニズムの解明は今後のガラス材料の開発に大きく貢献できると期待できる。

また、TiO<sub>2</sub>含有リン酸塩系ガラスはフェムト秒パルス光加工光デバイスのための代表的なガラス材料になる可能性があるため、安定性やコストを含めて競争力を高めることが望まれる。

一方、内部損失が0.1 dB/cm以下と目標のクリアはしているが、ぎりぎりの段階であり、再現性も含めると実用化にはまだ、十分な開発が必要である。TiO<sub>2</sub>含有リン酸塩系ガラスのフェムト秒パルス光加工感度とパルス幅依存性や屈折率変化量波長依存性など光デバイス材料としての特性を信頼性が高くユーザが使いやすい形に整備することが望まれる。

### 〈肯定的意見〉

- フェムト秒レーザー照射によって照射部位の元素分布を変化させられるガラスを開発したことは評価できる。
- 加工用ガラスとしては実用的な組成を選択されているので、実用化する際の問題点は、ガラス材料という観点からは、そう大きくはないと思慮される。
- LPF が実用化されれば、可視光用のリン酸塩ガラスの開発は意味のあるものとなる。
- 材料技術の観点からは、実用化を考慮した目標設定になっているので、それをクリアしているということは、実用化の可能性は高いと思われる。また、最終目標である3次元デバイス以外にも、材料中に3次元的に、異質層を形成したり、屈折率の変調を誘起することによって、マーキングや描画などに利用することができ、コストとの関係も考慮すべきであるが、これらの技術の実用性は高いと思われる。
- 三次元光デバイスの実用化についての可能性が確かめられており、今後様々な分野への展開が期待されると思われる。異質相形成メカニズムの解明は今後のガラス材料の開発に大きく貢献できると期待できる。
- 新異質相形成により、本技術もアクティブな素子の用途が新たに提供できたことを評価する。局所的なイオン交換や屈折率分布を作り出せることは、本技術の用途を大きく出来ると思う。
- TiO<sub>2</sub>含有リン酸塩系ガラスはフェムト秒パルス光加工光デバイスのための代表的なガラス材料になる可能性があるため、安定性やコストを含めて競争力を高めることが望まれる。各種ガラスにおけるフェムト秒パルス光

照射効果の知見は興味深いが産業技術としての実用化の可能性を議論できる段階ではない。しかし該当分野の研究の活発化と大学における人材育成に貢献していることは高く評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 内部損失が  $0.1 \text{ dB/cm}$  以下と目標のクリアはしているが、ぎりぎりの段階であり、再現性も含めると実用化にはまだ、十分な開発が必要である。
- $\text{TiO}_2$  含有リン酸塩系ガラスのフェムト秒パルス光加工感度とパルス幅依存性や屈折率変化量波長依存性など光デバイス材料としての特性を信頼性が高くユーザが使いやすい形に整備することが望まれる。
- $1.5 \mu\text{m}$  帯三次元光導波路デバイス用ガラス材料の開発は、何を指すかに依存するので、まだまだ先は遠い。
- 各材料（ガラス系）による特性の違いについても、系統的な調査がなされた方が良かったのではないか。
- 今回の成果でなければ実現できない用途へ注力することも検討すべきであったかもしれない。
- フェムト秒レーザー異質層を形成させることによって得られる元素分布の変化が産業応用としてどのようなデバイスや製品に有効なのかが明確に示されないと、基盤技術としての波及効果は限定的であると思われる。

〈その他の意見〉

- ・ 屈折率差の大きな開発したガラスのデータがひとつだけであり、実用化に当たってはピンポイントではなく広がりのあるデータにする必要がある。

## 2. 2 三次元加工システム技術

### 1) 成果に関する評価

本プロジェクトの中核をなす部分であり、ホログラムによる3D高速加工技術の開発は本研究開発の独創的な手法である。従来より100倍の加工速度を達成し、十分に目標値をクリアしている。数億個という大幅な画素数拡大とゼロ次光の影響がなく従来比で数千倍の高速加工を実現した高性能なガラス・ホログラムを使用した波面制御3次元加工システム技術では、数種類の光デバイス例を試作して基本的動作を確認し、本技術の有効性を確認した。また空間光変調器三次元加工システム技術では、大幅な画素数拡大と変調速度の高速化およびパルスレーザー光耐性の大幅改善により当初目標を十分に達成した。またこれを用いてフェムト秒レーザー波面制御モジュールおよび波面制御実験装置を完成し、その有効性を実証するとともに本プロジェクト全体の進展に貢献した。

但し、試作されたいくつかの導波路デバイスは、光デバイスとしての新規性は乏しく、いずれも既存デバイスの性能と比較できる定量的な性能データを得る段階には達していない。また、量産性やコストに関する知見も示されていない。

今後、本技術を使わないと出来ないような三次元光デバイスの探索や、シーズ発信にも力を入れるべきである。

#### 〈肯定的意見〉

- 空間光変調器に関しては、超短パルスの発生やマスクレスレーザー加工への展開が可能であるため、これまで耐光性の高い装置の開発が待たれていた。本プロジェクトによってそれが実現したことは高く評価できる。今後、高度分析技術や安価な光精密加工へ寄与できる基盤技術になるものと期待できる。
- 波面制御3次元加工システム技術では、ホログラム設計技術と電ビーム(EB)露光・反応性イオンエッチング(RIE)によるガラスレリーフホログラムの作製技術で順調な技術確立が得られた。また直線導波路、円形導波路、交差導波路結合器、交差導波路干渉計、方向性結合器などの光デバイス例を試作して基本的動作を確認している。空間光変調器三次元加工システム技術では、キーデバイスであるフェムト秒レーザー加工用LCOS-SLMの開発に取組み、従来のLCOS-SLMに比べて大幅な画素数拡大と変調速度の高速化およびパルスレーザー光耐性の大幅改善により当初目標を十分に達成した。またこれを用いてフェムト秒レーザー波面制御モジュールおよび波面制御実験装置を完成し、その有効性を実証するとともに本プロジェクト全体の進展に貢献した。高技術水準で発展性と汎用性のある優れた成果

として高く評価できる。

- 本プロジェクトの中核をなす部分であり、ホログラムによる 3D 高速加工技術の開発は本研究開発の独創的な手法と考えます。従来より 100 倍の加工速度を達成し、十分に目標値をクリアーしていると思慮される。
- ホログラムを利用した透明材料に対する三次元一括加工技術は画期的である。例えば、逐次描画では分岐点で“trouble zone”が発生するが、一括描画ではそれは生じない。当該プロジェクトで開発された自在に波面を制御可能な LCOS-SLM とのコンビネーションは複雑な三次元デバイスの構築に威力を発揮するものと期待される。
- 設定された目標は達成されており評価できる。  
いくつかの基本デバイスが試作され、アクティブ化のための基本技術が達成されている点は、材料のもつ可能性を具体的に示すという観点から高く評価できる。
- 成果は目標値をクリアしていると考える。  
LCOS-SLM の開発と光波面制御モジュールの開発は汎用性に富んだ成果であると評価できる。  
今後の発展も期待でき、成果が市場拡大につながると考える。
- 全ての項目で目標を達成していると判断する。  
ホログラムを利用した精度の良い多点書きの可能性を示しており、評価できる。  
一括露光の導波路の特徴を活かし、アクティブな素子の実証実験は本技術の応用を広げている。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- 市場において光デバイスの 3 次元化に関する強いニーズが存在するのか、また 3 次元化しなければ現在の光デバイスでは対応できない大きな障害が存在するのかの観点をより明確にする必要があるものと考えられる。
- 前にも述べたように、三次元光導波路デバイスが既存の光通信の PLC デバイスを置き換えることは困難と思われるので、その一部あるいは光通信系以外の用途を探索した方が賢明と思われる。その意味で、ガラス LPF はよい適用例と思われる。当該技術を利用すれば比較的簡単に作製できるような三次元光デバイスの探索を行うべきである。そのためのシーズ発信にも力を入れるべきであろう。
- 試作されたいくつかの導波路デバイス例は、光デバイスとしての新規性は乏しく、いずれも既存デバイスの性能と比較できる定量的な性能データを獲得段階には達していない。また量産性やコストに関する知見は示されて

いない。すなわち優位性や優位性を獲得するための方策は示されていない。「三次元形状計測技術」の記述は<その他の意見>に述べる問題があるうえ、示された図やグラフを含む多くの部分は本プロジェクト課題と直接関係のない演習問題的内容である。正しく妥当な内容に全面的に書き改めるか全面的に削除する必要がある。

- ホログラム設計には大量の計算が必要であり、現時点でのコンピュータの能力では若干不足していると思われ、実用化のためにはさらにコンピュータの性能向上を待つ必要があると思われる。
- 本技術を使わないと出来ないような製品に繋がる実験の事例が少なかったように感じた。

#### <その他の意見>

- ・ ホログラムの作成にリソグラフィーで作成した位相マスクとエルコス方式 (LCOS : Liquid crystal on silicon) の二通りで開発がなされていた。ROM と RAM の差はわかるが、それ以外の観点からの検討がほしかった。
- ・ ホログラム設計・計算時間が従来比何倍で表現されているが、主要な例について所要時間の開示が望まれる。ホログラムの回折効率に関する記述がないが重要なパラメータなので開示することが望まれる。

「三次元形状計測技術」の記述は、教科書的知識の断片的で不正確な転載、教科書的知識を誤解した説明、述語誤用や論旨・意味の不明な表現が多く、光学の基礎知識に反する内容や、根本的な誤りを含んでおり、データも信頼できるものではない。特に「3次元屈折率差測定機能付形状測定器」の機能・性能の表現は全く妥当性を欠いている。分科会後に提出された「事項評価に係る補足説明」の関連記述「三角光路干渉計」の測定精度について」は曖昧な文章でありこの問題点を解決するものではない。添付された「詳細説明資料」のうち資料1,2,3は本プロジェクトとは関係のない内容であり、資料4も本プロジェクトのレーザ光照明光学系には適切でない部分的コヒーレント光照明結像系に関する教科書的知識の断片的転載と誤解説明で冗長である一方、本題論点に関しては「今回紙面の都合上添付していません。」や「これらは全て計測可能な値です。」などの曖昧な文章がいくつかあるだけで全く論旨が通っておらず、根拠のない主張にすぎない。



## 2) 実用化の見通しについて及び今後に対する提言

開発されたガラス・ホログラムを使用した波面制御 3次元加工システム技術では、大幅な加工速度の改善がなされ、実用化におけるコストダウンが見込まれる。開発された技術は、対象材料としてガラス、プラスチック、金属、半導体などへの適用が期待でき、幅広い製品分野で活用されるものと期待する。また、LCOS-SLM（空間光位相変調器）とこれを用いた波面制御装置は、フェムト秒パルス加工光デバイス製造以外に、広く 3次元露光・加工装置として多くの応用があり、画素数や速度および光耐性の更なる改善や光波長域の拡大および低価格化などの努力により、将来の産業技術としての可能性は高く、市場への技術的、経済的な波及効果は大きいものと評価できる。

一方、基本デバイス作製技術が完成した段階で、それらの組み合わせや、適切な材料の選択などにより、より高機能なデバイス（例えば、光増幅、光スイッチなど）の試作、あるいは、デバイスサイドとの議論などをもとに、真に、本プロジェクトの材料と技術の特徴を活かすことができ、他の材料や手法では不可能なデバイスの試作まで行うことができれば、より成果をアピールできる。

また、本加工法の至適な適用分野について、当該研究開発の成果を周知される過程で各種業界からの提案、見解等を広く求めることが望まれる。

### 〈肯定的意見〉

- 当該技術で作成したガラス製の LPF が水晶製の LPF を駆逐できるかどうか、当該技術が産業技術として認知されるかどうかを決する第一ステップとなろう。これに成功すれば、いろいろなニーズが出てくるに違いない。
- 本法は新規な加工法であるので、至適な適用分野があれば、充分実用化の見込みはあると思慮される。
- 将来の産業技術としての可能性は高く、市場への技術的、経済的な波及効果は大きいものと評価できる。将来に向けての課題についての検討も行われているので、プロジェクト完了後の参画企業の活動に期待が持てると思う。
- 既に LCOS を利用した加工システムは製品化しており、ピークパワーの高い領域で持ち変えるようにした改良は評価できる。本装置は高ピークパワーが必要な加工領域を開拓する。
- 開発された LCOS-SLM とこれを用いた波面制御装置は、フェムト秒パルス加工光デバイス製造以外に、広く 3次元露光・加工装置として多くの応用があり、波及効果が大きいと期待される。画素数や速度および光耐性の更なる改善や光波長域の拡大および低価格化などの努力により、社会で広く役立つデバイス技術としての発展が大きいと期待される。

- 空間光変調器、それを用いた光波制御モジュール、またホログラム作製技術は、いずれも実用化の見通しが高いのではないかと評価される。
- ホログラフィックフェムト秒レーザー加工に必要な要素技術としての最適化は進められており評価できる。

#### 〈問題点・改善すべき点〉

- 三次元光導波路デバイスに関しては、既存の PLC では 400 チャンネル以上の導波路が形成可能であるので、目指す先は遙かであるといわざるを得ない。また単純に三次元化すれば有利であるということにならないことにも注意すべきであろう。
- 時間的な制約があったかもしれないが、基本デバイス作製技術が完成した段階で、それらの組み合わせや、適切な材料の選択などにより、より高性能なデバイス（例えば、光増幅、光スイッチなど）の試作、あるいは、デバイスサイドとの議論などをもとに、真に、本プロジェクトの材料と技術の特徴を活かすことができ、他の材料や手法では不可能なデバイスの試作まで行うことができれば、より成果をアピールできたかもしれない。
- フェムト秒レーザーにより 3 次元加工され、屈折率変化した部位には応力集中が生じ、衝撃に対して脆弱であることが知られている。描画速度のみならず、描画後のパターンの機械的強度を計測し、屈折率変化を保持したままクラック形成を避ける技術開発を進めなければ、産業応用を図ることは難しいと考える。
- 本プロジェクトで試作された光導波路デバイスを関連応用分野の現状に照らして現時点で見直しと位置づけを明確にする必要がある。そのうえで現技術や競合技術に対する性能上または製造コスト上で本作製法の優位性が見出されればそのデバイスに焦点を絞った研究を行い、見出されない場合には適切な研究方向転換を検討する必要がある。
- 現時点ではまだ可能性を議論する状況であることが残念であると、将来は技術環境、経済環境も整って、市場拡大に向かっていけると考える。

#### 〈その他の意見〉

- ・ 材料の研究開発の面からみれば、例えば、60  $\mu\text{m}$  四方の範囲内に 100 個以上の異質相を空間的に配置を制御して析出させる技術は、新たな機能材料を創製するという意味で、非常に魅力的な技術に思う。今後の展開が期待される。
- ・ アクティブな基本技術については、加工が出来るかどうか、まずは大きな観点であったので、光の強度などの具体的な数値データは充分でない

ころが有った。これからは期待する。

- 本加工法の至適な適用分野について、当該研究開発の成果を周知される過程で各種業界からの提案、見解等を広く求められては如何でしょうか。
- 「3次元屈折率差測定機能付形状測定器」の機能・性能および実用化可能性に関する記述内容には専門的に見て多くの誤りがあり全く妥当性を欠いている。

## 2. 3 三次元加工システム応用デバイス技術

### 1) 成果に関する評価

フェムト秒パルス光加工ガラス光デバイスの実用化の候補として 2 次元格子状構造をもつ撮像デバイス用ローパスフィルタを提案し、理論計算と実験でモアレ低減機能を確認したことは評価できる。今回の成果によって、光学ローパスフィルタの軽量・小型化が実現でき、カラーカメラの性能向上に大きな貢献が期待できる。市場性も高く、有用な技術であるので、実用化を促進することを期待する。

但し、ローパスフィルタはモアレ除去性能だけでなくカラー撮像デバイスとの整合性、色彩忠実度への影響、分解能やコントラストの劣化の程度などを数値的に明らかにして実用性を確かめる必要がある。

#### 〈肯定的意見〉

- 三次元光デバイス技術でフェムト秒パルス光加工ガラス光デバイスの実用化の候補として 2 次元格子状構造をもつ撮像デバイス用モアレ低減用フィルタ（ローパスフィルタ）を提案し、理論計算と実験でモアレ低減機能を確認したことは評価できる。  
三次元光導波路デバイス技術では 3 次元一括レーザ加工システムを用いて立体的分岐導波路の試作を行って可能性を実証している。
- 設定された目標は達成されており評価できる。  
特に 3 次元光導波路が実際に作製された点は、プロジェクト全体の目標が達成できたことを示す具体的な証拠と考えられ、高く評価される。
- 耐光性の高い空間光変調器を導入し、比較的高レーザー光強度を導入できるシステムを用いてマスクレスで加工できることを示したことは評価できる。
- 本研究開発の出口の部分、見える部分である、目標値は充分達成されていると思慮されます。
- アクティブ回路を必要としない LPF のようなデバイスの実用化は、コストと性能が既存の製品のそれらを凌駕することが出来れば、市場を席卷することは可能であり、その可能性は高い。それだけの高い技術を含んでいる。
- 目標は全て達成していると判断する。  
深さ方向の多点書きなどホログラムでないと出来ない加工法を実現しており、新しい加工法の領域を開拓できる可能性を具体的に示したと判断します。
- 今回の成果によって、光学ローパスフィルタの軽量・小型化が実現でき、

カラーカメラの性能向上に大きな貢献が期待できる。市場性も高く、有用な技術であるので、実用化を促進することを期待する。

〈問題点・改善すべき点〉

- 光導波路関連技術に関しては、既存の PLC 技術を超えるような水準には全く達していないし、その優位性も認められない。新たな応用分野を開発すべきと思われる。
- 三次元光回路導波路については、目標が高かったこともあり、達成度が若干低くなっている。テーマについてのメリハリをつけて、三次元光回路導波路の最終目標についての検討が必要であったのかもしれないと思う。
- 本プロジェクトで取り扱ったホログラフィックフェムト秒レーザー加工を含め、集光レーザービームを用いる加工においては、光軸方向の加工分解能が光軸に垂直方向の加工分解能に対して2～3倍程度悪くなる本質的な問題を有することが広く知られている。本プロジェクトにおいてもその問題は解決されておらず、フェムト秒レーザーにより光導波路などをガラス中に描画しても光伝搬損失が偏波に対して異なることが既知である。本問題の解決は、産業応用を図るために不可避な課題であり、実用化を視野に入れるのであれば、そのような本質的な問題にも取り組むべきと考える。
- ローパスフィルタはモアレ除去性能だけでなくカラー撮像デバイスとの整合性、色彩忠実度への影響、分解能やコントラストの劣化の程度などを数値的に明らかにして実用性を確かめる必要がある。この回折型ローパスフィルタは水晶式フィルタに比べて材料費は低いが、同様の回折型デバイスはフェムト秒光加工でなくても通常のリソグラフィとエッチングまたはエンボス加工による表面レリーフ構造で実現でき、製造コストでは個別作製の前者より複製方式の後の方がはるかに有利であると思われるので、本プロジェクトの方式の優位性は明確ではない。  
立体的分岐導波路は利点があるものの新しい概念ではなく、各種の高性能多分岐導波路が既存であることを考えると、立体的分岐を必要とする応用が示されていないので成果の意義と優位性は明確ではない。
- ホログラムでないと出来ない加工法だけでなく、本方式でないと出来ないような製品応用の観点での実験例が欲しかった。

〈その他の意見〉

- ・ これからの課題になると思うが、デバイスやシステムサイドとの連携を強化し、本技術を、実際のシステムの中で応用できる3次元デバイス作製技術にまで展開されることを期待します。
- ・ ターゲットとしておられるローパスフィルターですが、本方法でも充分作

製可能であると思慮されます。既存の技術との棲み分けのようなものができれば、当該技術開発の特長がさらに明確化されたのではないのでしょうか。

## 2) 実用化の見通しについて及び今後に対する提言

光学ローパスフィルタについては、実用への可能性が高く、特性の評価や耐久性、コストなど産業応用に必要な検討を迅速に進めることで、競争力のある、市場性の高い技術として期待できる。

但し、本方式ローパスフィルタの実用性見極めおよび表面レリーフ型等のより低コストな作製法との客観的な性能・価格比較を行うことが望まれる。また、3次元光導波路デバイス技術は優位性不明であり実用化に向けての課題抽出と解決法が示されているとは言えない。

多くの会社から引き合いがあることから、各種業界からの提案、見解等を広く求め、新規なデバイス開発や新しいレーザー加工方法の可能性に繋がることを期待する。

### 〈肯定的意見〉

- 内容は秘密の部分が多く判定は難しいが、光学的ローパスフィルタ（OLPフィルタ）などのプロジェクト成果を継続開発する会社が多くあり、短期的な面は良く見えないが高い可能性を秘めていると思う。また、本報告では詳しく述べられていないが、ガラスの屈折率変調だけでない新しいレーザー加工方法の可能性を感じる。
- 本研究開発は新規な加工法に基づくデバイス開発であるので、至適な適用分野の更なる探索があれば、充分実用化の見込みはあると思慮される。
- 光導波路の分岐に関する描画条件を精細に検討し、スムーズな描画パターンを実現したことは評価できる。
- 現在の段階で実用化の見通しが立っているのはLPFしかないが、アクティブ回路を含まない光学デバイスのニーズの発掘に努力する必要がある。当該技術でしか製造できないものを発掘するのが望ましい。
- まだ見極めが出来ていないので楽観は許されないが、2次元格子状構造をもつ撮像デバイス用モアレ低減用フィルタ（ローパスフィルタ）の実用化と低価格化を期待したい。
- モアレ除去フィルタなど実用に近い成果もあり、それについては継続的に研究がなされつつあることなど評価できる。
- 光学ローパスフィルタについては実用への可能性が高いので、特性の評価や耐久性、コストなど産業応用に必要な検討を迅速に進めることで、競争力のある、市場性の高い技術として期待できると考える。

### 〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化の可能性が高い用途に対しては、独立したグループによる実用化検

討を強化してもよかったのではないかと思われる。

- フェムト秒レーザー加工は、本質的に熱的な緩和が殆ど起きないため、加工部位に大きな応力集中が生じる。そのため、極めて弱い衝撃によっても加工部位に大きな亀裂・損傷が入ることが知られている。実用化を図るためには、加工した光デバイスの機械強度を評価するとともに、このような現象を避ける方法論の開発も行われなければ実用化への道のりは遠いと言わざるを得ない。
- 本方式ローパスフィルタの実用性見極めおよび表面レリーフ型等のより低コストな作製法との客観的な性能・価格比較を行うことが望まれる。3次元光導波路デバイス技術は優位性不明であり実用化に向けての課題抽出と解決法が示されているとは言えない。
- OLP フィルターは現在のデジカメに多量に使用されている。コスト以外の特性が十分に検討されておらず、実用化までの進行の度合いが良く見えない。
- 三次元集積化光回路デバイスについては、既存の PLC デバイスを置き換えるということではなく、PLC 技術ではできない三次元光学デバイスを早急に探索する方が良いと思われる。非常に高いレベルに到達している PLC デバイス技術のあるものは、レーザを用いた一括描画では絶対に達成できないし、また多層化が必ずしもデバイスにとって有利とはならない。

#### 〈その他の意見〉

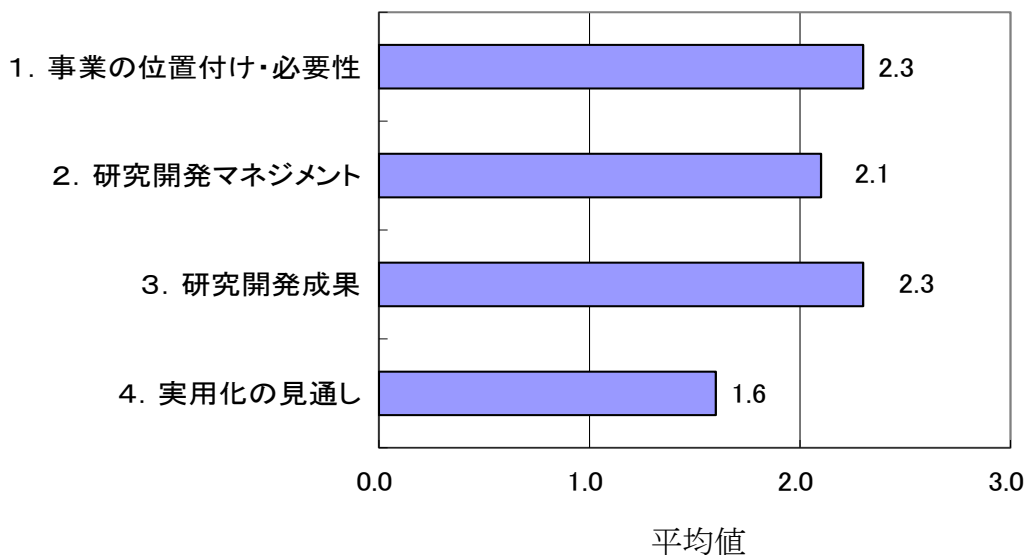
- ・ 内容は秘密の部分が多く判定は難しいが多くの会社から引き合いが多くあるとのこと。屈折率変調だけでない新しいレーザー加工方法の可能性を感じる。  
コスト計算は限られた項目だけで試算しており、もう少し現実的な試算が必要であると思う。
- ・ 本研究開発の成果を周知される過程で各種業界からの提案、見解等を広く求められては如何でしょうか。既存のデバイスとのデマケというよりも、ガラスでしかできない全く新規なデバイス開発に繋がれば素晴らしいと思います。
- ・ 本プロジェクトの背景と位置づけとして述べられているオール光情報処理や光接続の展望と本プロジェクトの成果とはかなりの乖離があると言わざるを得ない。光通信や光接続のための光導波路デバイスは多くのものが開発済で実用化もされていることを考えると、本プロジェクトの目標は実用化の観点から十分に高く妥当であった（または妥当性を保つため見直しがなされた）とは言えない。



本プロジェクトで得た成果を、さらに3次元光デバイス作製技術の可能性を高め、広げていく方向により強力に展開していくことが重要であると思われる。

### 3. 評点結果

#### 3. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	B	B	C	B	A	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.3	A	A	B	B	C	B	A	
2. 研究開発マネジメントについて	2.1	B	A	B	B	C	B	A	
3. 研究開発成果について	2.3	A	A	B	B	C	B	A	
4. 実用化の見通しについて	1.6	B	A	C	C	C	C	B	

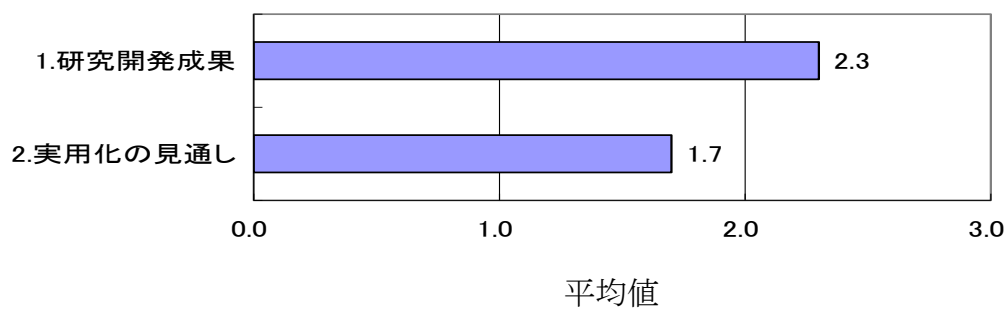
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

#### 〈判定基準〉

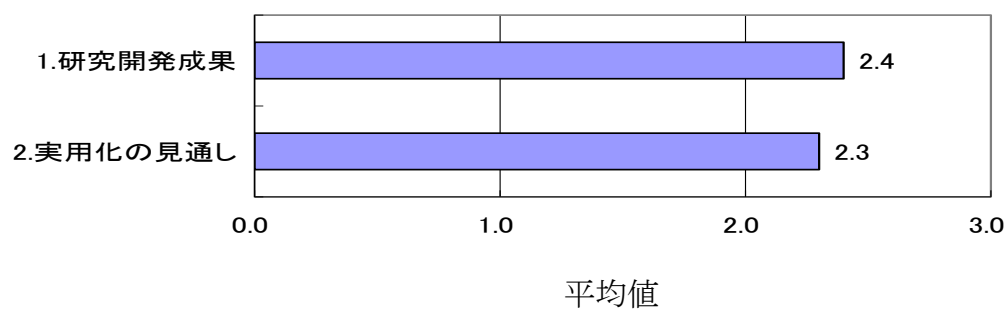
1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

### 3. 2 個別テーマ

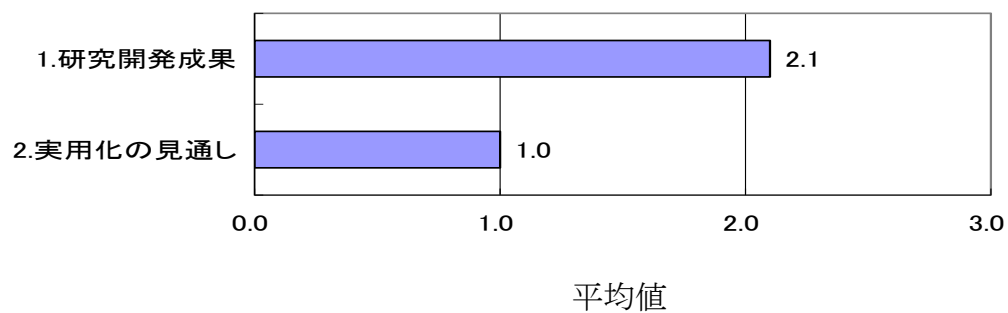
#### 3. 2. 1 デバイス化加工用ガラス材料技術



#### 3. 2. 2 三次元加工システム技術



#### 3. 2. 3 三次元加工システム応用デバイス技術



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
3. 2. 1 デバイス化加工用ガラス材料技術									
1. 研究開発成果について	2.3	B	A	B	B	C	A	A	
2. 実用化の見通しについて	1.7	B	A	D	B	B	C	B	
3. 2. 2 三次元加工システム技術									
1. 研究開発成果について	2.4	B	A	B	A	B	B	A	
2. 実用化の見通しについて	2.3	A	A	B	A	C	B	B	
3. 2. 3 三次元加工システム応用デバイス技術									
1. 研究開発成果について	2.1	A	A	C	B	C	B	A	
2. 実用化の見通しについて	1.0	B	B	D	C	D	C	C	

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について

- ・非常によい
- ・よい
- ・概ね適切
- ・適切とはいえない

2. 実用化の見通しについて

- A ・明確
- B ・妥当
- C ・概ね妥当であるが、課題あり
- D ・見通しが不明

## 第2章 評価対象プロジェクト

## 1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

# 「三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」

## 事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--------------------------------------------

概 要  
プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

- 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性……………6-20
  - 1.1 NEDOが関与することの意義……………6-20
  - 1.2 実施の効果(費用対効果)……………6-22
- 2. 事業の背景・目的・位置づけ……………6-27

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標……………6-34
- 2. 事業の計画内容……………6-51
  - 2.1 研究開発の内容……………6-51
  - 2.2 研究開発の実施体制……………6-55
  - 2.3 研究の運営管理……………6-59
  - 2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性……………6-62
- 3. 情勢変化への対応……………6-64
- 4. 中間評価結果への対応……………6-65
- 5. 評価に関する事項……………6-66

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果……………6-67
- 2. 研究開発項目毎の成果……………6-83

IV. 実用化の見通しについて

(実用化の見通しについて)

- 1. 実用化の見通しについて……………6-377
- 2. 波及効果……………6-377

V. 成果リスト

- 1. 論文リスト:査読付き……………6-378
- 2. 講演・口頭発表リスト……………6-381
- 3. 雑誌投稿リスト……………6-388
- 4. 展示会、プレス発表……………6-391
- 5. 受賞実績……………6-392
- 6. 特許リスト……………6-392
- 7. 学会発表特記事項……………6-393

VI. その他資料

- 1. イノベーションプログラム基本計画……………6-394
- 2. プロジェクト基本計画……………6-396



3. 技術戦略マップ(分野別技術ロードマップ).....	6-406
4. 事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント募集の結果).....	6-410

## 概要

		最終更新日	平成 23 年 6 月 23 日
プログラム（又は施策）名	ナノテク・部材イノベーションプログラム/ITイノベーションプログラム		
プロジェクト名	三次元光デバイス高効率製造技術	プロジェクト番号	P06029
担当推進部/担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 坂井数馬（平成 23 年 06 月現在） ナノ部 担当者氏名 坂井数馬（平成 19 年～平成 23 年 06 月）		
0. 事業の概要	<p>ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化、省エネ化等のニーズに対応するためには、今後ますます高機能化が求められる。ガラスは結晶材料に比べ、組成の選択範囲が連続的で広く、かつ構造の自由度が大きい。このため組成と構造の多くの組み合わせが可能で、それに伴い種々の潜在的特性・機能があると考えられる。しかし従来技術は、組成の制御と熱処理等、マクロな構造制御に終始しており、ごく一部の特性や機能しか実現できていない。ガラスが本来有している潜在的な特性や機能を有効に引き出すためには、ガラス母材とはその物性の異なった異質相をガラス内部に作製し積極的に新たな機能をガラスに誘起する必要がある。このような基盤技術の開発は「ナノガラス技術」プロジェクト(H12～H17)で実施されてきた。</p> <p>本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトで得られた基盤技術を実用的な加工技術へと発展させるものであり、ホログラム等の波面制御素子による空間光変調技術を確立し、フェムト秒レーザーとの組合せによりガラス中に三次元造形を高精度かつ高速に一括形成できる加工プロセス技術を開発する。またこの技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。</p> <p>今回開発を行う技術によって、光情報処理の基本デバイス(光スイッチ、光増幅器、合分波)の開発が加速化されるとともに、近い将来には、集積化された光回路デバイスの実用化が可能となり、中長期的な光技術の競争力の確保につながる。また、デジカメのレンズ等の従来の光学デバイスの中に機能を付加することが可能となり、より高機能な性能を持つ部材開発を加速する。</p> <p>具体的な事業内容は次のとおり、</p> <p>【研究項目①デバイス化加工用ガラス材料技術】</p> <p>【研究項目②三次元加工システム技術】</p> <p>【研究項目③三次元加工システム応用デバイス技術】</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>【NEDOが関与する意義】</p> <p>本プロジェクトで開発するホログラムを用いたガラス内部への加工技術は、ニューガラスフォーラムが2003年9月に国内の学会で初めて報告、以降、米国の国際学会でも報告する等、我が国が世界をリードしているところであるが、将来における当該分野の競争力を確保するためには、ガラス内部に数十ナノメートルオーダーで一括加工する技術を世界に先駆けて確立することが必要であり、複数の研究機関及び企業の知見を集結する必要があるため、民間企業の自主的な取り組みでは難しい。従って、NEDOの関与により「産業化を視野に入れた基盤技術の開発」といった、市場原理のみでは、戦略的・効果的に達し得ない領域の研究開発を、重点的に実施する(科学技術基本計画)ことが必要である。</p> <p>【実施の効果（費用対効果）】</p> <p>費用:【開発予算】に記載。</p> <p>効果:本プロジェクトの成果による民間需要創出効果(平成 27 年:2015 年)は 2015 年で約 1 千</p>		

	<p>300 億円、2020 年には 2 千億円を上回るものとする。また、現プロジェクトでの本加工システムの有効性の実証対象としている導波路型デバイスと光学デバイスの市場は、三次元光デバイスの市場のほんの一部であり、そのマーケットは数兆円と見られている。従って、実証対象としているデバイス以外の市場での適用も考えられ、また材料としてガラス以外でも使用できるために、新たなその他の大きな市場を期待でき、本プロジェクトの事業規模を 16.6 億円(平成18年度から平成22年度までの総予算額)としていることから、本プロジェクトは投資より大きな需要を創出するものと見込まれる。</p> <p><b>【事業の背景・目的・位置付け】</b></p> <p>本プロジェクトは経済産業省が策定した「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の情報通信領域・光デバイス・三次元光デバイスに位置付けられ、製造業の国際競争力強化の為にナノテクノロジーの確立に必要な共通基盤技術の開発に位置付けられている。</p> <p>また、本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。</p> <p>また、「三次元光デバイス高効率製造技術」は総合科学技術会議において革新的技術戦略における高速大容量通信網技術・オール光通信処理技術の一部として登録された。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。</p>
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p><b>【事業の目標】</b></p> <p>平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工技術と空間光変調器三次元加工技術を確立する。また具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性の実証を行う。</p> <p>尚、本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。これ等を本プロジェクトの広義での全体目標とする。</p>																		
<p>事業の計画内容</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="427 1749 619 1809">主な研究開発実施事項</th> <th data-bbox="619 1749 770 1809">H18fy</th> <th data-bbox="770 1749 946 1809">H19fy</th> <th data-bbox="946 1749 1129 1809">H20fy</th> <th data-bbox="1129 1749 1305 1809">H21fy</th> <th data-bbox="1305 1749 1423 1809">H22fy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="427 1809 619 1883">デバイス化加工用ガラス材料技術</td> <td data-bbox="619 1809 770 1883">→</td> <td data-bbox="770 1809 946 1883"></td> <td data-bbox="946 1809 1129 1883"></td> <td data-bbox="1129 1809 1305 1883"></td> <td data-bbox="1305 1809 1423 1883">→</td> </tr> <tr> <td data-bbox="427 1883 619 1955">三次元加工システム技術</td> <td data-bbox="619 1883 770 1955">→</td> <td data-bbox="770 1883 946 1955"></td> <td data-bbox="946 1883 1129 1955"></td> <td data-bbox="1129 1883 1305 1955"></td> <td data-bbox="1305 1883 1423 1955">→</td> </tr> </tbody> </table>	主な研究開発実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	デバイス化加工用ガラス材料技術	→				→	三次元加工システム技術	→				→
主な研究開発実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy														
デバイス化加工用ガラス材料技術	→				→														
三次元加工システム技術	→				→														

	三次元加工システム応用 デバイス技術					→
	成果とりまとめ					→
開発予算 (会計・勘定 別に事業費 の実績額を 記載)(単 位:百万 円)	会計・勘定	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy
	一般会計	372	356	340	313	235
	特別会計 (電源・需給の 別)					
	加速予算(成果 普及費を含む)	20	19			
	総予算額	392	375	340	313	235
	契約種類: ○をつける (委託(○) 助成( ) 共同研究 (負担率 ( ))	(委託) (助成) :助成率△/□ (共同研究) :負担率△/□				
開発体制	経産省担当原 課	製造産業局住宅産業窯業建材課				
	プロジェクト リーダー	(※プロジェクトリーダーが交代した場合は、前任者の所属・氏名も記載) (※サブプロジェクトリーダーやグループリーダーを設置している場合はその所 属・氏名を記載) 国立大学法人 京都大学 平尾 一之教授 サブプロジェクトリーダー:三浦清貴(京都大学)、原 勉(浜ホトニクス)、 田中修平(ニューガラスフォーラム)				
	委託先(*委 託先が管理 法人の場合 は参加企業 数および参 加企業名も 記載)	国立大学法人京都大学 浜松ホトニクス株式会社 社団法人ニューガラスフォーラム				
情勢変化への 対応	<p>・ 内閣府(総合科学技術会議)において革新的技術戦略(平成20年4月10日)における高速大容量通信網技術-オール光通信処理技術-の一部として「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトが登録された。この革新的技術により、スイッチ・経路処理を含め、ネットワークのオール光化技術により、爆発的に増大する情報を処理可能とする一方で、ネットワークにおける電力効率を数十倍程度向上した超高速基幹ネットワークの構築が可能となる。また、次世代イーサネット規格等の国際標準の獲得をも目指した技術確立等により、我が国の国際競争力が強化される。</p> <p>これに対応すべく、三次元光デバイス高効率製造技術の研究開発を従来以上に活発に進めていく。</p> <p>・ フェムト秒レーザー加工をより高性能化するには、レーザーの高出力化により異質相形成のメカニズムを解明する必要があることが分かり、加速資金にて京大におけるフェムト秒レーザーの高出力化を行い、異質相形成のメカニズムの解明に役立たせた。</p>					

	<ul style="list-style-type: none"> <li>定期的に開催する研究推進・業務委員会にてその他の情勢変化やその対応を議論・検討した。</li> </ul>	
中間評価結果への対応	<p>(中間評価を実施した事業のみ)</p> <p><b>京都大学</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 基礎的な技術開発にも注力すること。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・“LCOS-SLM を利用し、曲線導波路、分岐導波路を一括描画するためのホログラム作成方法の基礎検討（アルゴリズム等）を行った。</li> </ul> </li> </ul> <p><b>浜松ホトニクス</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 該当なし。</li> </ul> <p><b>ニューガラスフォーラム</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 光集積回路の実現においてアクティブ素子を如何にして実現するか。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・アクティブ素子実現のための基礎実験を行った。</li> <li>・フェムト秒レーザーの照射部のみが発光する条件を発見した。この現象を利用するとレーザー発振の可能性がある、これには数センチメートル以上の長さの光導波路が必要である。これはホログラムを使用した一括描画で作製できる。</li> </ul> </li> <li>● ホログラフィック加工に並行してその他の要素技術をどうするか。 <p>下記の種々の技術を開発した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高速長尺ホログラフィック加工による穴あけ技術の要素技術を開発した。</li> <li>・ホログラフィック加工と光学系を組合せた加工システム技術を開発した。</li> <li>・レーザー光の入射方向への伸びを抑える技術を開発した。</li> <li>・レーザー光を有効に使用できる材料作製技術を開発した。</li> </ul> </li> <li>● 基礎的な技術開発にも注力すること。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・レーザー光とガラス材料との反応の素過程を考察し、上述の入射方向への伸びの少ない加工技術を開発した。また、これらの考察を基に低エネルギーで加工できる技術を開発した。</li> <li>・デバイス作製時の加工エネルギーが少ない新型光学素子の基礎的検討と素子の試作を行いその機能を確認した。</li> </ul> </li> </ul>	
評価に関する事項	事前評価	平成 17 年度実施 担当部 ナノテクノロジー・材料技術開発部
	中間評価	平成 20 年度 中間評価実施
	事後評価	平成 23 年度 事後評価実施予定
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>ホログラムによる三次元でのミクロンレベルの一括加工が可能であることが世界で初めて実証された。また、プロジェクトの全ての目標は達成され、一部の成果は実用化に向けて展開されている。</p> <p>以下に個別テーマ毎に記す。</p> <p><b>研究開発項目①デバイス化加工用ガラス材料技術</b></p> <p><b>(1)デバイス加工用ガラス材料技術(国立大学法人京都大学、社団法人ニューガラスフォーラム)</b></p> <p>フェムト秒レーザーの集光照射により誘起される異質相の形成メカニズムを解明することで、異質相形成のガラス材料依存性を明らかにし、データの体系化を行った。また、新規な異質相形成としてガラス内部からの Si 析出や元素分布形成とその形状制御に成功すると共に、これら新しい現象のメカニズムも明らかにした。一連の研究により、ガラス材料内部加工の基礎を確立することができた。</p> <p><b>(2)三次元光学デバイス用ガラス材料技術(社団法人ニューガラスフォーラム)</b></p> <p>ホログラムを用いた一括加工での加工条件の最適化の検討を行った。具体的には、逐次</p>	

照射加工でガラス母材と異質相との屈折率差が 0.015 以上を確認されたガラスに対して、ガラス・ホログラムを用いた一括加工により～0.01 秒以下の照射時間でライン状の加工ができることを確認した。これにより、光学デバイス用の加工に適用できることが原理的に確認できた。また、上記ガラスとは別に、以前と同じ逐次レーザー加工において 75%のエネルギーで  $\Delta n=0.015$  を実現するガラス母材を開発した。

### (3)三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術(国立大学法人京都大学、社団法人ニューガラスフォーラム)

空間光変調器を利用した一括加工光学システムおよびホログラム作成プログラムを構築し、ダンマングレーティングおよび Y 分岐導波路の一括形成を各種ガラスにて試みた。その結果、Au 含有ガラスにおいて比較的低閾値にて分岐が可能な素子が得られることを確認した。また、複数の光導波路の一括描画を試み、最終達成目標である内部伝送損失が 0.1 dB/cm 以下の光導波路が描画可能であることを確認した。

## 研究開発項目②三次元加工システム技術

### (1)三次元加工システム技術目標(社団法人ニューガラスフォーラム)

異質相の更なる多層化や高集積化について改善した手法を基に設計したホログラムを用いて、一辺が 60 $\mu$  m の立方体のガラス内に 100 個の異質相を三次元に形成できるレーザー一括加工を目指し、従来比 100 倍以上の高速加工を実証した。さらに三次元ホログラムの応用例として、長焦点深度ホログラムを設計し、これを用いて厚さ 500 $\mu$  m のシリカガラス基板に微細貫通穴あけ加工(射出面穴径 1 $\mu$  m)を実現した。

フェムト秒レーザーを使用した三次元光デバイス加工システムの改良を行った。このシステムと、次項(2)で述べるホログラムの設計と作製技術を用いて作製されたガラス・ホログラムを用いることで光軸方向への伸びを制御した加工を実現し、ガラス内部の一辺 60 $\mu$  m の立方体内に三次元に分布する 100 点の異質相を一括で加工することに成功した。これらの実験により、作製したデバイスの基本情報からホログラムとデバイス設計に必要な加工基礎データを取得した。

ガラス・ホログラムを使用して、ガラス内部に長さ 1cmの直線導波路を作製し、1550nm の導波路を確認した。また、直線導波路を組み合わせて、2x2結合器、マツハツエンダー型干渉計等のデバイスを試作し、基本性能の確認を行った。

ガラス内部に形成した異質相の屈折率を非破壊で測定するため、三角光路をもつ透過型干渉計を開発した。これで得られた干渉縞に位相増幅法とでコンボリューションアルゴリズムによる超解像処理とを適用しナノオーダーが測定できるサブフリンジ計測が可能となった。これを用いて数十ナノの光路長差測定により屈折率差を求めた。

### (2)波面制御三次元加工システム技術(社団法人ニューガラスフォーラム)

ホログラム設計では、異質相の更なる多層化や高集積化における改善を行い、一辺が 60 $\mu$  m の立方体のガラス内に100個の異質相を三次元に形成できるホログラムを作製した。またホログラム設計環境に、最新のGPUコンピューティングシステムを導入し、よりスケラブルなシステムへと拡張した。

ガラス・ホログラム作製プロセスの精度改善を引き続き行い、段幅 2.5 $\mu$  m以上の階段状テストパターンでは、段幅と段の深さが最終目標である製作精度 $\pm 40$ nm 以下であることを確認した。一括加工用ガラス・ホログラムにおいても、ピクセルサイズと段の深さは製作精度 $\pm 40$ nm 以下で作製可能であることを確認した。また、複数枚のガラス・ホログラムを同時に作製するプロセスを構築した。

### (3)空間光変調器三次元加工システム技術(浜松ホトニクス株式会社)

本研究開発項目における最終目標を全て達成した。すなわち、空間分解能45万画素以上の高精細化、変調速度50 Hz、光位相変調度 $2\pi$  ラジアン以上(256レベルの中間値制御も可

能)、50 GW/cm<sup>2</sup>(100 fs、1 KHz)のフェムト秒レーザーパルスへの耐光性を有するフェムト秒レーザー光波面制御モジュールを実現した。また、フェムト秒レーザーによる高機能三次元加工のためのLCOS-SLMによる波面制御技術の開発を行い、当該加工に必要な波形成形、収差補正を実現した。

**研究開発項目③三次元加工システム応用デバイス技術**

**(1)三次元光学デバイス技術(社団法人ニューガラスフォーラム)**

改善されたホログラムと材料を用いて、光学ローパスフィルタの一括描画に取り組み、最終目標の方向無依存のモアレ低減機能を一括描画により実現するための要素技術確立の確認を行った。作製したフィルタのサイズは最終目標値の 2.5mm 以上、フィルタ厚は 0.3mm 以下であった。

さらに、実用化に向けての実製品への搭載実験を行い、異質相色味の映りこみという実用化のための新たな課題も抽出してホログラム開発とガラス材料開発に対してフィードバックをした。また、これまでの当 PJ での回折格子とは異なる異質相配置の方式の光学ローパスフィルタについても試作検討を行った。

**(2)三次元光回路導波路デバイス技術(国立大学法人京都大学、社団法人ニューガラスフォーラム)**

ホログラフィック三次元加工システム(フェムト秒レーザー+LCOS-SLM)を構築し、複数の光導波路の一括描画、2~6 分岐三次元光導波路の描画、グレーティング型分岐回路の描画を試みた。その結果、内部伝送損失が 0.1 dB/cm 以下の光導波路が描画可能であることを確認した。また、分岐ロスとなる 0 次光を入射光の 3%以下に抑えることに成功し、導波路型分岐回路にて設定した最終達成目標と同等以上の特性を有する 1×16 グレーティング型分岐回路の描画が可能であることを確認した。

投稿論文	「査読付き」50 件、「その他」41 件
特 許	「出願済」27 件、「登録」0 件、「実施」0 件（うち国際出願 7 件）
その他の外部発表（プレス発表等）	講演・口頭発表 120 件、展示会・プレス発表 17 件・米国レーザー学会ホームページで 2 カテゴリーにて取り上げ。

IV. 実用化の見通しについて

**(1) 三次元光学デバイス(光学ローパスフィルタ)**

モアレの低減が確認できた。更に改善した一括加工化を進めると同時に、モアレ以外の光学特性をも含めて実用化の観点から問題点の抽出を継続研究で行い、問題が無ければ実用化の検討を行っていく。

**(2) 光インターコネクション**

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光インターコネクション用として発展させ、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

**(3) 光結合器**

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光結合器などとして発展させて、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

**(4) LCOS-SLM**

開発してきた LCOS-SLM で適応できる分野での実用化を検討する。

**(5) プロジェクトで開発してきた下記についても早期に市場に出るように努力したい。**

- ・ホログラムシミュレータ・ホログラム加工プロセス
- ・三次元屈折率差測定機能付き形状測定器

	<p>(6)ホログラムを使用した<b>特殊材料の高速、微細加工</b>の問い合わせがきており、新規分野が開拓できる可能性が高い。</p> <p>(7)ホログラムとフェムト秒レーザーを使用した加工に興味を持ち、その<b>市場開拓に協力</b>を申し出られている企業が複数でてきている。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 18 年 3 月 作成
	変更履歴	平成 20 年 07 月 イノベーションプログラム基本計画の制定により (1) 研究開発の目的の記載の改訂



プロジェクト用語集

	用語	説明
あ	アッペ数： $\nu_d$	分散に対する屈折度の比を示した光学媒質の定数。異なった波長の光を異なった方向へ屈折させる度合いであり、アッペ数が高い媒質は、異なる波長に対する光線の屈折の度合いによる分散が少ない。
い	異質相	ある物質の内部に存在する、母材とは異なる物性（屈折率、密度など）を持つ相のこと。本プロジェクトでは、フェムト秒レーザーで形成する。
い	位相増幅法	周期構造を持つ干渉縞に特殊な画像処理を行い、あたかも短い波長を用いたように干渉縞の本数を増やす方法。
い	一括加工	多点を或いは加工したい形状を一度に加工する方法。
い	異方性結晶	ある結晶構造のX、Y、Z軸の長さが異なっている状態。例えばある方向にだけ長い針状の結晶など。ゼロ膨張結晶化ガラス（膨張しないガラス）などは異方性のある結晶を析出させ、その軸方向の膨張率の違いを利用して膨張を抑えている。
え	HPC	High Performance Computing の略で、自然現象のシミュレートや構造解析などの非常に計算量が多い計算処理のこと。スーパーコンピュータを使う手法や多数のコンピュータを利用するグリッドコンピューティングなどの手法が研究されている。
え	NA	開口数ともいい、顕微鏡対物レンズにおいて入射瞳が物点となす角度の正弦で表す。この値が大きいほど二点分解能が高くなる。Numerical Aperture の略。
え	エッチング	エッチング (etching) とは、化学薬品などの腐食作用を応用した塑形ないし表面加工の技法。使用する素材の必要部分にのみ防食処理を施し、腐食剤によって不要部分を除去することで目的形状のものを得る。
え	MCM(マルチチップモジュール)	基板の上に、ベアチップと呼ばれるむき出しのシリコンチップ複数個を搭載したモジュールのことである。立体的構造がとれるので、従来のパッケージよりも面積を節約することができる。あるいは、異なる製造プロセスを使用した素子を搭載することができる。
お	オートフォーカス	ピントを合わせるのに人間の目によらずメカニズムや電気素子を持ち自動的にした機構。
か	開口絞り	開口絞り（カイコウシボリ：aperture stop、aperture diaphragm） ①レンズを通過するのを可能にする軸上光線束の直径を制限して、良くレンズ保持具とも言われる物理的な束縛具。②二次的に調節可能な虹彩絞り。通常、透過光型の顕微鏡のサブステージ集光器の真下に配置されている。開口絞りを調節すると、光の強さや対物レンズに入る光の錐角が変わる。③カメラレンズの虹彩絞りも同様な役目をする。明るさ絞りとも言う。
か	回折	回折（カイセツ：diffraction） 光のある波面が開口や不透明な刃先を通るとき、その刃先で二次的な弱い波面が発生すること。これら二次的波面は初めの波面に影響を与え、相互に色々に打消し合ったり強め合ったりする回折パターンを作るようになる。つまり、不透明物体の刃先で光波が曲げられてしまうことになる。円形の開口を通して見たり、投影された光の点は、この回折によって、常に光の輪で囲まれた中心の明るい像として現れる。
か	回折格子	光の回折を利用してスペクトルを得る素子。多数の細長い刻み（隙間）を等間隔で並行に並べたもので、回折格子に平行光線を入射させ、各溝で回折される光を干渉させることにより特定波長の光を特定方向に反射（分散）するようにしたもの。
か	回折効率	回折光学素子への入射光強度に対する回折光強度の比率である。通常、回折効率は入射光の波長や偏光の状態によって変化する。
か	可変整形ビーム描画方式	電子銃（エミッタ）から発せられる電子線を成形アパーチャーと呼ばれる矩形の穴を何段か通すことにより電子線形状を矩形に変え、X-Y ステージの移動に同期させながら連続照射してパターン描画を行うことを特徴とする。

き	Q 値	Q 値は主に振動の状態を現す無次元数。弾性波の伝播においては、媒質の吸収によるエネルギーの減少に関係する値である。
く	空間光変調技術	光の位相や強度を2次元あるいは3次的に制御する技術で、デバイスとしてはガラス、フィルム（パターン固定）や空間光変調器（パターン可変）が使用される。
く	空間光変調器 （空間光変調デバイス）	アドレス材料と光変調材料から構成され、読み出し光の位相や強度の空間分布を、書き込み情報によって変調させるデバイス。
く	屈折率	屈折率（クッセツリツ：index of refraction、refractive index） ある与えられた波長で、屈折媒質中の光の速度に対する真空中の光の速度の比。
く	屈折率差： $\Delta n$	フェムト秒レーザーなどの照射によりガラス内部に形成された異質相とガラス母材との屈折率差
く	屈折率： $n_d$	d 線（波長：587.562 nm）の屈折率。
け	軽薄短小	重厚長大（じゅうこうちょうだい）とは、鉄鋼、セメント、非鉄金属、造船などの産業、またそれら産業の特質を指す経済用語。扱う製品が重く、厚く、長く、おおきことから、それらの頭文字を取った造語。その反対語が、「軽薄短小」。電気機器などが軽量化、薄型化、小型化すること。
こ	光路長	光路長（コウロチョウ：optical path length） 屈折率が一定の媒質内で、二点間のある経路に沿って進む光線について、経路に沿っての幾何学的な長さ（距離）と屈折率との積。光は光路長を最短時間で進むような経路を通る。
こ	光線追跡	光線追跡（コウセンツイセキ：ray tracing） 光学部品や光学系を通る光線の道筋の数学的な計算。基本的には、スネルの法則と三角方程式とを用いて、光学系を通る光線の経路を計算し、決定すること。三角関数を用いることから光学設計者は、この追跡作業を三角追跡とも言っている。
こ	高速フーリエ変換	高速フーリエ変換（コウソクフーリエエンカン：fast Fourier transformation、FFT） 離散フーリエ変換を計算機で高速に計算するアルゴリズム。
こ	光学的異方性	水晶が最もわかりやすい。きれいに研磨した水晶を通して新聞の文字などをみると2重に見える。これは、X軸方向とY軸方向とで屈折率が異なるため、光の進行速度が違い、人間の目には2種類の文字が見えることにある。このように方向によって屈折率などの光学物性が異なる場合を光学的異方性という。
こ	固体撮像素子	CCD、C-MOSなどのイメージセンサー半導体素子の製造技術を用いて集積回路化された光電変換素子。ファクシミリや複写機で用いられるリニアイメージセンサ（一次元イメージセンサ）と、テレビカメラやデジタルスチルカメラなどで用いられるエリアイメージセンサ（二次元イメージセンサ）とがある。
こ	光学ガラス	光学ガラス（コウガクガラス：optical glass） レンズなどの光学製品に用いられるガラス。 透過率の波長依存性が少ないことや屈折率が高いこと、さらに熱歪みが少ないことなどが求められる。 製造中、光学的な用途を十分に満たすために、成分、溶解、熱処理その他の工程を、また光学特性を維持するために、屈折率、分散、透過率、分光透過率、均質性、無複屈折性、永久性などの性質を注意深く調整・制御したガラス。
こ	構造制御技術	原子や分子ナレベルでのミクロな意味で高い集合・配向状態で組織されている構造を人為的に制御する技術。
こ	コヒーレント光	コヒーレント光（Coherent light） 位相の揃った波形が空間的、時間的に十分に長く保たれている干渉性（コヒーレンス）をもつ光を言う。
さ	三次元光回路	光を増幅、導波、分波、合波、スイッチ等の機能を持つ素子を三次元的に配置した回路。

さ	三次元光回路形成用材料	光を増幅、導波、分波、合波、スイッチ等の機能を持つ素子を三次元的に配置した回路素子を作製できる材料
さ	散乱パターン法	マッチングオイル中に浸漬した試料をレーザーで照射し、散乱角度より屈折率を求める方法。空間分解能は使用波長以下と極めて高い。
さ	三次元測定器	物体の三次元的な寸法や形状・位置などを計測するための機器。
し	CCD カバーガラス	固体撮像素子の画素を保護するためのガラス
し	シリカガラス	SiO <sub>2</sub> を主成分とするガラス
し	シリコンフォトニクス	Si 基板上に光素子を形成する技術。従来は光素子の材料に GaAs や InP といった化合物半導体を用いていたが、Si 系材料を使えば製造コストを安価にできる。CMOS 技術で LSI に光素子を集積することで、例えばチップ間のデータ伝送のために光配線を用意して、データ転送速度を高めたり、配線遅延を抑えたりする効果が期待できる。
す	スキュー光線	スキュー光線（スキューコウセン：skew ray） 回転対称光学系で、光学系の軸を含む面（メリジオナル平面）内に含まれない光線。メリジオナル光線と異なり、光学系を一平面内だけでなく、三次元的に通過する光線。従って、この光線によってできる面は光軸を含まない。
す	スキューレー追跡	一つの平面で行う子午的光線の追跡と立体的な光線の追跡とがあり、後者をスキューレー追跡と呼ぶ。
す	スマートフォン	スマートフォン（Smartphone）は、携帯電話・PHS と携帯情報端末（PDA）を融合させた携帯端末。通常の音声通話や携帯電話・PHS 単独で使用可能な通信機能だけでなく、本格的なネットワーク機能、PDA が得意とするスケジュール・個人情報の管理など、多種多様な機能を持つ。
せ	整形ビーム描画方式	ある特定形状の開口を複数個形成したマスクをアパーチャーとして使用し、マスク内に各所で使用されている同一形状のパターンを低加速電子ビームで露光する代わりにショット数を削減し高速化する非可変成形ビーム露光方式。
せ	赤外線カットフィルター	CCD、C-MOS イメージセンサー、フォトダイオードに使用されているシリコンの受光素子の感度は、400nm 付近から近赤外領域までの広い範囲に渡っており、人間の視感度（400～700nm）に合わせるために、700nm 以上の光を除去するフィルタ。主に、多層膜によるものと、ガラスの吸収によるものがある。
そ	走査型電子顕微鏡	電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象から放出される二次電子、反射電子、X 線等を検出することで対象を観察する。
た	多波長合分波フィルター	異なる波長の光を 1 つの光導波路に集めたり、その逆を行う光回路。1 本の光ファイバに多数の波長の光を伝播する光波長多重通信に用いる。
た	対物レンズ	望遠鏡・顕微鏡などに使用されるレンズ・光学系。光学系として拡大や縮小を行うことができる。
ち	超短パルスレーザー（フェムト秒レーザー）	連続発振のレーザーと異なり、時間幅（パルス幅）がフェムト秒（10 <sup>-15</sup> 秒）領域と非常に短い光パルスを生じさせるレーザー。通常、パルス幅が 100 フェムト秒（10 <sup>-13</sup> 秒）以下のパルスレーザーを言う。時間的かつ空間的に狭い範囲にエネルギーを集中させることができるため、非常に強い光電場を生じさせることができる。
ち	逐次描画法	一点作っては試料を移動させ、移動を終えたら次の一点を作製する方法。コストと時間がかかる。
ち	超高密度波長多重通信	高密度波長多重通信を DWDM（Dense Wavelength Division Multiplex）と呼んでいる。DWDM は、1 本の光ファイバーに何種類かの違った波長に信号を乗せて通信するものです。

ち	逐次加工	一点ずつ加工する方法。
て	点描画方式	電子銃（エミッタ、またはカソード）から発せられる電子線の断面形状が円形をしており、偏向器（デフレクタ）およびX-Yステージの移動に同期させながら連続照射してパターン描画を行うことを特徴とする。
て	定量位相顕微鏡	定量位相顕微鏡 [QPM: Quantitative Phase Microscopy] 定量位相顕微鏡は光干渉技術を用いて測定試料の厚みや屈折率に基づいた定量情報を測定が出来る、いわゆるホログラフィー顕微鏡です。 定量位相イメージング技術が顕微鏡に組み込まれたものであり、空間的干渉光学像から定量的な位相像が測定される。
て	テラヘルツデバイス (THzデバイス)	テラヘルツとは、周波数 1THz（波長 300 μm）前後の電磁波を指す。範囲についての明確な定義はないが、周波数 100GHz~10THz（波長 30 μm~3mm）としたり、電波を波長で 10 倍ごとに分けたときに簡潔な名称がない、ミリメートル波の次に短波長の周波数 300 GHz~3THz（波長 100 μm~1mm）帯を指したりする。この周波数領域で使用されるデバイスをテラヘルツデバイスと呼ぶ。
て	テラビット情報通信 の国際統合網	現在の各国の光通信は少しずつ伝送方式や伝送能力が異なり、ファイバーでの接続時にトラブルや地域格差が生じやすい。今後、情報伝送容量の大幅な伸びが予想される中で、世界中の伝送方式と容量を統一する動きがある。これを国際統合網と言い、今のところ 2015 年までに幹線で 10 テラビット/秒の伝送速度と確保しようとしている。
で	デコンポリューション アルゴリズムによる 超解像処理法	レンズを通った像は正規結合位置より外れるとボケてしまう。この逆計算を行い、レンズを通る前の状態に戻し劣化した画像をより鮮明にする画像処理技術
で	電子線描画	回路のパターンを電子線により基板に転写する技術。電子線は光に比べてより微細な領域へ粒子（光）を絞り込むことができる。これにより微細加工においても所望のパターンを転写することが可能。電子線リソグラフィとも言う。
で	デジタルカメラ	デジタルカメラ (Digital camera) とは、写真として撮影した静止画をデジタルデータとして記録するカメラ装置である。本来「デジタルカメラ」は、デジタルスチルカメラ (Digital still camera) 及びデジタルビデオカメラ (Digital video camera) の総称である。ただし一般的にはデジタルスチルカメラを指す事が多いようである。現在ではスチル撮影機能を搭載したデジタルビデオカメラや、反対に動画撮影機能を搭載したデジタルスチルカメラが一般的となっており、双方の性能の向上も手伝って、その差異が徐々に無くなりつつある。 略称は一般に「デジカメ」であるが、「デジカメ」は三洋電機株式会社の登録商標である。
で	デジカメ	デジタルカメラの略称
で	データベース	特定のテーマに沿ったデータを集めて管理し、容易に検索・抽出などの再利用ができるようにしたもの。狭義には、コンピューターによって実現されたものを言う。
と	透過照明	光学顕微鏡の照明法の一つで試料の下側より照明し、試料を透過した光を顕微鏡へ導くようにした照明法。明視野透過照明と暗視野透過照明とがある。
ど	ドライエッチング	反応性の気体（エッチングガス）、イオン、ラジカルによって材料をエッチングする方法。
な	ナノガラス	ナノメートル・オーダーの構造制御技術で創出されたガラス

な	ナノレベル	大きさがナノメートル ( $10^{-9}\text{m}$ ) すなわち $1\text{m}$ の 10 億分の 1 のオーダーであること。原子・分子と同程度の大きさで、ナノレベルでの構造制御とは物質を原子・分子レベルで制御することとなる。
な	ナノ CMM	Nano Coordinate Measuring Machine の略 マイクロマシンやナノ光学部品の寸法や位置を三次元的に測定する装置。
に	入射瞳	入射瞳 ( ニュウシャヒトミ : entrance pupil ) レンズを物体側から見たときの開口絞りの像。つまり、開口絞りの前にあるすべての光学素子によって物体空間中に形成された開口絞りの像。この用語は、光学系内に有限の絞りが無い場合、対物レンズの口径そのものを表す言葉としても使われる。
ね	ネマチック液晶	等方性の液体に一次元の配列の規制が加わった相を有する液晶。液晶表示デバイスなどによく用いられている液晶である。
ば	バイオチップ	DNA、たんぱく質、糖鎖などのバイオ分子や、これらを有する細胞などを基板上に多数固定したもの。それぞれ DNA チップ、たんぱく質チップ ( プロテインチップ )、糖鎖チップ、細胞チップと呼ばれる。チップ上のバイオ分子と特異的に相互作用する標的分子や化合物などを、大量かつ同時並行的に分析できる。DNA チップが代表的。
は	反射率	媒質の境界面で入射する波の強度と反射する波の強度の比。
は	波長	波の一周期の長さ。単位は長さの単位となる。
は	波面制御技術・素子	光の位相を 2 次元あるいは 3 次元的に制御することで結果として波面を制御する技術。ガラスやフィルム ( 固定の波面を作る )、空間光変調器 ( 波面を可変できる ) が用いられる。
は	波面制御技術	レーザー光の位相の空間分布を制御する技術であり、任意な形状のレーザー光を生成する波形成形技術と、レーザーの伝搬する光路の歪や収差を補正する波面補償技術がある。
は	波長分散フィルター	「波長分散」とは、光の波長毎に光の速度や屈折角度などが異なる際に用いる言葉で、「波長分散フィルター」は、その現象を利用して光を波長順に分けたり、光信号を特定な形に整えたりする際に用いる。
ひ	光回路素子	光回路素子 ( ヒカリカイロソシ : optical circuit element ) レーザー、光検出器、光変調器、光偏向器、光減衰器、光モード変換器、光周波数変換器、光アイソレーター、フィルター、光分波器、ビームスプリッター、ビームエキスパンダー、光遅延回路、偏光子、光結合器などが含まれ、光の強さ、位相、周波数、偏光状態、進行方向、ビーム径などに種々の操作を与える素子。電気・電子回路的に組み合わせることから、この用語が生まれた。
ひ	光伝送損失	通信回路を伝送される光信号の劣化度合いのことを指す。波長によって異なる特性を示し、通信波長帯は、この損失の低いところで行われる。単位は <u>デシベル</u> ( dB )。
ひ	光ファイバー	光ファイバー ( Optical fiber ) は、離れた場所に光を伝える伝送路である。その構造はコア ( core ) と呼ばれる芯とその外側のクラッド ( clad ) と呼ばれる部分、そしてそれらを覆う被覆の 3 重構造になっている。クラッドよりもコアの屈折率を高くすることで、全反射や屈折により出来るだけ光を中心部のコアにだけ伝搬させる構造になっている。コアとクラッドはともに光に対して透過率が非常に高い石英ガラスまたはプラスチックでできている。
ひ	光導波路、光導波デバイス	光導波路 ( ヒカリドウハロ : optical waveguide ) 屈折率の高いコアとコアの周囲を屈折率の低いクラッドを持ち、この材料界面での全反射により光を閉じこめて任意の方向に導く素子。基板上に光ファイバーのような構造を作成したもの。 放射を一定領域に閉じ込め、そのエネルギーの流れを経路の軸に平行に案内して伝送する能力を持った回路、もしくは線路。 光導波デバイスは、低損失高屈折率ガラス薄膜を利用した導波路用デバイス。

ひ	光集積回路	光集積回路（ヒカリシュウセキカイロ：integrated optical circuit、optical integrated circuit） 同一の基板上に光導波路を作り、信号処理を直接光で行う集積回路。構成的には、発光器（半導体レーザーなど）、光変調器、フィルター、屈折媒体、ビームスプリッター、ミラー、光スイッチ、受光器などの種々の光回路素子を単一の基板上に光導波路を介して結合集積化して情報伝達、処理機能が行えるような光回路系。
ひ	光 IC	光 IC（ヒカリアイシー：optical integrated circuit） 光集積回路と同義語。
ひ	光インターコネクション	光により電子回路ボードや光回路を結合させる技術。
び	ビームプロファイラ	CCD受光素子を持ち、レーザー等の光量の様子を観察する機器。
ぴ	piezo素子	圧電体に加えられた力を電圧に、電圧を力に変換する圧電素受動素子。電気石やチタン酸バリウムなど様々な材料が開発されている。
び	ピークパワー密度	パルスレーザーにおいて、ピークパワー密度 ( $W/cm^2$ ) は次で表される。 ピークパワー密度 = 1パルスあたりのエネルギー (J) / パルス幅 (秒) / 集光面積 ( $cm^2$ )
び	微小レーザー	レーザーとは、ある閉じこめられた空間内で光が往復することで光の強度が強められる現象を利用しているが、その閉じこめる領域を非常に小さくしたレーザーを「微小レーザー」といい、例えば数ミクロンの粒子。
び	微小化学分析チップ	従来の化学実験室を、例えば切手程度のチップ上に集積化する試み。微小化により単に持ち運びが容易になるだけでなく、迅速かつ効率的な溶液の混合ができる。高価な試薬の消費量を減らせて経済的、温度サイクルの高速化が可能、並列化によるハイスループット化等の利点がある。 $\mu$ TAS、Lab-on-a-Chip、微小化学分析システムとも言われる。
ふ	フレネル・キルヒホッフ回折積分	フレネルの重ね合わせの原理と同じ考えであるホイエンス原理「波動の伝播を考える時に先端の上の各点が中心となる球面波ができ、その包絡面が新しい波動の先端となる。」とこの波の関数を変形したキルヒホッフの近似を用いた回折に関する式のこと。多重積分を用いる。
ふ	フレネル回折	フレネル回折（フレネルカイセツ：Fresnel diffraction） 近視野回折として知られる。光源もしくは観測スクリーンが、回折開口や障害物から有限の距離にある時に得られる回折。 回折を起こす物体に対して有限の距離にあり、入射波又は回折波が平面波とみなせない場合の回折現象。
ふ	フラウンホーファー回折	フラウンホーファー回折（フラウンホーファーカイセツ：Fraunhofer diffraction） 回折物体から無限遠の距離で観測される平行光の回折。回折を起こす物体に対して無限遠の距離にあり、入射波又は回折波が平面波とみなせる場合の回折現象。回折物体と回折像の関係はフーリエ変換の関係がある。
ふ	フーリエ変換	フーリエ変換（フーリエヘンカン：Fourier transform） 関数変換を行う線形作用の一種。周期関数を三角関数の和で表せるように、非周期関数を展開する変換方法。 一組の直交波形（三角関数）の係数に信号を分解する方法。関数 $f(t)$ に対して $-\infty$ から $+\infty$ までの $f(t) \exp(itx)$ の $t$ での積分の $1/\sqrt{2\pi}$ 倍に等しい関数 $F(x)$ への変換。
ふ	フレネルレンズ	通常のレンズは材料の厚さを制御し光の屈折を利用したものであるが、光の回折を利用した平面型のレンズがフレネルレンズである。ある規則に従って、屈折率の高低あるいは明暗の輪帯から構成される。

ふ	フェムト秒レーザー	パルス幅がフェムト秒 ( $10^{-15}$ 秒) オーダーのパルスレーザー。通常、加工には 100 フェムト秒程度のパルス幅を利用し、超短パルスレーザーとも呼ばれる。
ふ	フォトニック結晶	光の波長程度の大きさで誘電率 (屈折率) が周期的に大きく変化するように作製した人工結晶。 フォトニック結晶 (photonic crystal) とは屈折率が周期的に変化するナノ構造体であり、その中の光 (波長が数 100-数 1000nm の電磁波) の伝わりかたはナノ構造によって制御できる。基本研究とともに応用開発がさかんに進められており、商業的な応用も登場している。
ぶ	プロセス	製造工程全体のこと
ほ	ホイヘンスの原理	ホイヘンスの原理 (ホイヘンスノゲンリ: Huygens principle) 波の伝搬の課題に対して用いる解析。光の波面上の各点は、その次の二次波の源となるという原理。これらの二次波の包絡面が、その後のある時間における波面の位置を決める。
ほ	ホログラム	光は波の性質を持っているため振幅と位相を持っている。加工したい形状の回折像の位相や振幅を計算し、この位相や振幅を書き込んだものは計算機ホログラム (Computer-Generated Hologram: CGH) と呼ばれる。ガラスに位相又は/及び振幅の CGH を持たせたガラス・ホログラムと、可変位相の CGH を持たせることのできる空間光変調器がある。これに可干渉性のレーザーを照射することにより実像を得ることができる。
ぼ	ボロシリケートガラス	$B_2O_3$ と $SiO_2$ を主成分とするガラスで硼珪酸ガラスとも呼ばれる。
ぼ	硼珪酸ガラス	硼珪酸ガラス (ホウケイサンガラス: borosilicate glass) ほぼ 380nm から 2000nm までの波長の光を透過し、強靱で、熱にも強く、最低 5% の三酸化二硼素 ( $B_2O_3$ ) を含んだ屈折率が約 1.5 程度のガラス。ショットコードで BK7 ( $n_d=1.51633$ , $\nu_d=64$ ) のガラスはその代表例。
ぼ	ポアソン比	ポアソン比 (Poisson's ratio) は、弾性限界内で、例えば引張りを加えた時に荷重方向の伸び (ひずみ%)、と荷重に直角方向の寸法の縮み (ひずみ%) の比をいう。無次元数の一つ。ポアソン比 = 横ひずみ (%) / 縦ひずみ (%) である。ポアソン比の逆数をポアソン数という。 体積が変化しない場合 (液体のような場合) のポアソン比が 0.5 となる。(断面積は直角方向の寸法の 2 乗で変化するので、伸びの 1/2 で体積一定である。) 通常の固体は体積が変化するので、(体積弾性率) ポアソン比が 0.3 ぐらいの材料が多い。
ま	$\mu$ TAS	従来の化学実験室を、例えば切手程度のチップ上に集積化する試み。微小化により単に持ち運びが容易になるだけでなく、迅速かつ効率的な溶液の混合ができる。高価な試薬の消費量を減らせて経済的、温度サイクルの高速化が可能、並列化によるハイスループット化等の利点がある。Lab-on-a-Chip、微小化学分析システム (チップ) とも言われる。
ま	曲がり導波路	導波路をできるだけコンパクトかつ高密度に形成し、効率よく信号処理するために、小面積でわん曲させた導波路のこと。微小な三次元光回路を実現するためには、回路を構成する基本素子を微小領域に造り込む必要があり、これらを複雑に結合させるためにはこのような導波路が必要となる。
ま	マッチングオイル	ガラス含む透明材質の屈折率と同じにした透明油。インデックスマッチングオイルの略
め	面ダレ	ガラス研磨時にガラス端面部での研磨圧力が多くなるため意図されずに多く削られた状態。
め	MEMS	MEMS (メムス、Micro Electro Mechanical Systems) は、機械要素部品、センサー、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料など

		の上に集積化したデバイスを指す。プロセス上の制約や材料の違いなどにより、機械構造と電子回路が別なチップになる場合があるが、このようなハイブリッドの場合もMEMSという。主要部分は半導体集積回路作製技術を用いて作製されるが、半導体集積回路が平面を加工するプロセスで作製されるのに対し、立体形状を形成する必要があり、半導体集積回路の作製には使われない犠牲層エッチングと呼ばれる可動構造を作製するプロセスが含まれる。現在、製品として市販されている物としては、インクジェットプリンタのヘッド、圧力センサー、加速度センサー、ジャイロ스코プ、DMD(プロジェクター)などがある。市場規模も拡大しつつあり、応用分野も多岐にわたるため期待される市場は大きい。そのため第二のDRAMとも言われている。
め	メリジナル光線	メリジナル光線 (メリジナルコウセン : meridional ray) 光軸を含む面内にある光線。サジタル光線も参照。
や	ヤング率	ヤング率 (Young's modulus、縦弾性係数) は、弾性範囲で応力に対するひずみの値をきめる定数である。単位は応力と同じ Pa、tf/m <sup>2</sup> など。 [ひずみ $\varepsilon$ ] = [応力 $\sigma$ ] / [ヤング率 E] (フックの法則) より、 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ である。 一方向の引っ張りまたは圧縮応力の方向に対するひずみ量の関係から求める。ヤング率は、縦軸に応力、横軸にひずみをとった応力ひずみ曲線の直線部の傾きに相当する。 結晶の原子間距離の変化に対する抵抗というモデルがイメージである。原子間の凝集力が弾性的性質をきめる。したがって応力と変形の機構が同じ種類の材質間では、融点と弾性係数の間にはある程度の相関がある。応力がある大きさ (比例限度) をこえると、結晶の不完全な部分が不可逆的にうごくことによって変形することになるので、応力とひずみの関係はリニア (線形) ではなくなり、応力を取り除いても元の寸法に戻らなくなる。この現象を降伏という。
ゆ	誘電体多層膜ミラー	高い屈折率と低い屈折率の材料を交互に光学的厚さ (幾何学的厚さ × 屈折率) $\lambda/4$ ずつ基板上に繰り返し積層することで 100%に近い反射率のミラーを作成することができる。
ら	落射照明	光学顕微鏡の照明法の一つで顕微鏡レンズを通して試料に光をあてる照明法。明視野落射照明と暗視野落射照明がある。
ら	1 : 1 L/S パターン	照射部と未照射部とが等間隔で並んだパターン
ら	Lab-on -a-Chip	従来の化学実験室を、例えば切手程度のチップ上に集積化する試み。微小化により単に持ち運びが容易になるだけでなく、迅速かつ効率的な溶液の混合ができる。高価な試薬の消費量を減らせて経済的、温度サイクルの高速化が可能、並列化によるハイスループット化等の利点がある。μTAS、微小化学分析システム(チップ)とも言われる。
り	量子化	連続的な量を離散的な数値で表すこと。
り	量子サイズ効果	固体中の電子の波長と同程度であるナノスケールの空間に電子が閉じ込められると、電子の波動性により、そのエネルギーが離散的になる。これを量子サイズ効果という。
り	流体回路	流体回路. fluid circuit 水や空気などの流体を利用して、電気回路のスイッチングと同様の作用を行うことを目的とした部品の総称
れ	レジスト	スピンコーターやスリットコーター等で薄膜状に塗布し、光や電子線との反応を利用して不要な部分を除去する。
ろ	ローパスフィルタ	所定の周波数より低い周波数の波を透過させるデバイス。
わ	ワークディスタンス	顕微鏡対物レンズの特性を表すための言葉で顕微鏡対物レンズの先端からピント面までの距離。



わ	ワークステーション	個人用の高性能のコンピューター
---	-----------	-----------------

出典：OPTRONICS 光技術用辞典 他

## I. 事業の位置づけ・必要性について

### I. 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

#### I. 1. 1 NEDOが関与することの意義

(社)ニューガラスフォーラム、京都大学、浜松ホトニクス(株)が連携し、ガラス波面制御素子(ホログラム)等による空間光変調技術(光の立体像を空間に描画する技術)を確立し、我が国が強みを有する光技術をさらに強化するため、ガラス中に三次元の光回路を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性を確認する。

具体的な事業内容は次のとおり。

- ①デバイス別ガラス組成の最適化検討をおこない、レーザー加工用ガラスの作製
- ②波面制御素子設計用シミュレータを開発し、これを用いて波面制御素子の作製
- ③三次元加工システム技術に必要な波面制御三次元加工システム技術並びに空間光変調器三次元加工システム
- ④光デバイスの試作

今回開発を行う技術によって、光情報処理の基本デバイス(光スイッチ、光増幅器、合分波)の開発が加速化されるとともに、近い将来には図I-1に示す様な集積化された光回路デバイスの実用化が可能となり、中長期的な光技術の競争力の確保につながる。また、デジカメのレンズ等の従来の光学デバイスの中に機能を付加することが可能となり、より高機能な性能を持つ部材開発を加速する。

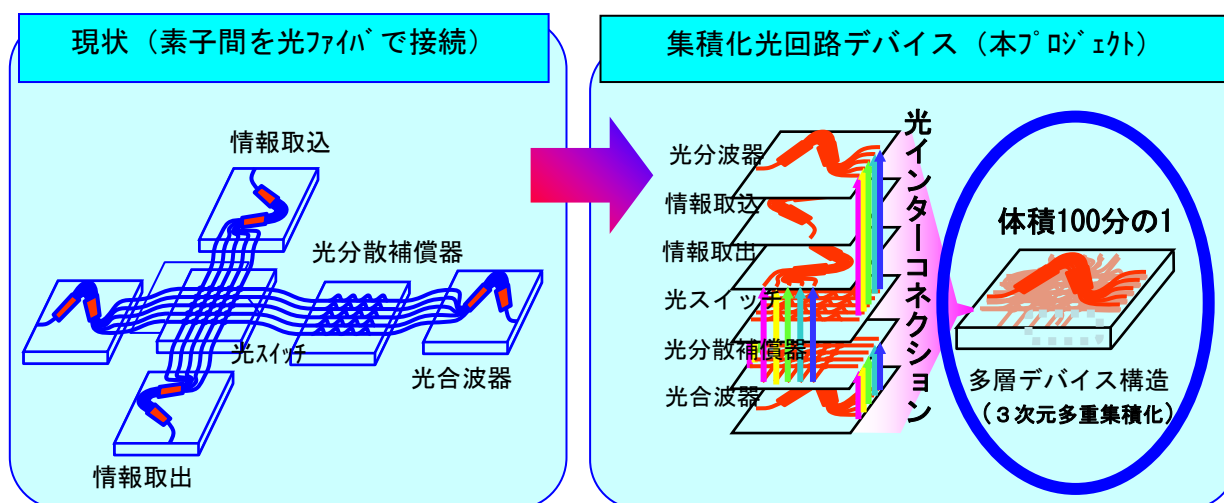


図 I-1 光インターコネクト集積化光回路デバイス

ガラスは通信・情報家電分野を始め社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化等のニーズに対応するためには、高機能化が求められている。また、ますます増加する情報量の処理に対応するためには、次世代の光回路部材・光学部材の開発が必須であり、光回路の三次元化を低コストで可能とすることが期待されている。

本プロジェクトで開発するホログラムを用いたガラス内部への加工技術は、ニューガラスフォーラムが2003年9月に国内の学会で初めて報告、以降、米国の国際学会でも報告する等、我が国が世界をリードしているところであるが、将来における当該分野の競争力を確保するためには、ガラス内部に数十ナノメートルオーダーで一括加工する技術の世界に先駆けて確立することが必要であり、複数の研究機関及び企業の知見を集結する必要があるため、民間企業の自主的な取り組みでは難しい。従って、図I-2に示す様にNEDOの関与により「産業化を視野に入れた基盤技術の開発といった、市場原理のみでは、戦略的・効果的に達し得ない領域の研究開発を、重点的に実施する（科学技術基本計画）」ことが必要である。

本技術開発は、我が国を代表するガラスメーカーで構成されるニューガラスフォーラムに集中研を設置し、民間企業、大学など産学の関係者が一体となって、研究開発を行っている。このことで、今後も拡大する通信・情報家電分野の市場を我が国が占有することが期待される。

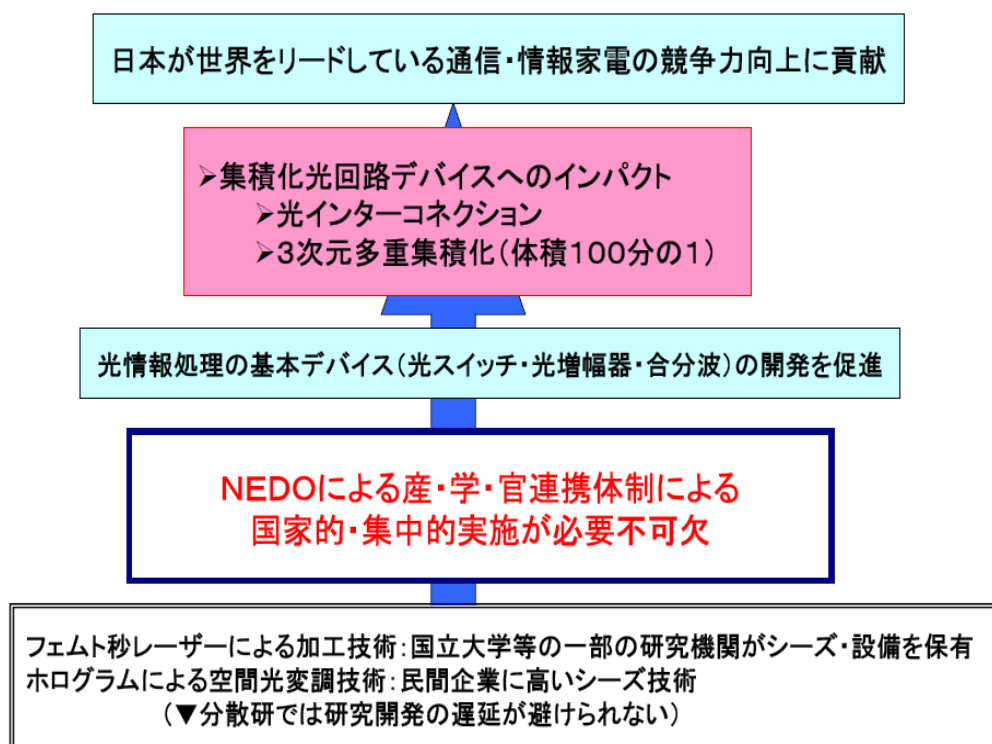


図 I-2 NEDOが関与することの意義

### I.1.2 実施の効果（費用対効果）

費用：5年間で約16.6億円。

効果：本プロジェクトの成果による民間需要創出効果（平成27年：2015年）は次の(2)2015年での本プロジェクトによる市場創出（費用対効果）に示すように、約1千300億円と考えられる。2020年には2千億円を上回るものとする。また、本加工システムは、現在プロジェクトでシステムの有効性の実証対象としている導波路型デバイスと光学デバイス以外の市場での適用も考えられ、また材料としてガラス以外でも使用できるために、新たなその他の市場を期待でき、本プロジェクトの事業規模を16.6億円（平成18年度から平成22年度までの総予算額）としていることから、本プロジェクトは投資より大きな需要を創出するものと見込まれる。

#### (1) ナノテク関連国内市場（2005年～2030年）

ナノテク関連の国内市場は2030年には26兆円、その普及時期は2020年と予測されている<sup>1)</sup>。その中でも、本プロジェクトでの成果が適用されるナノガラスの関連は2020年頃に本格的な普及期に入ると見られている。これらを、図I-3に示した。

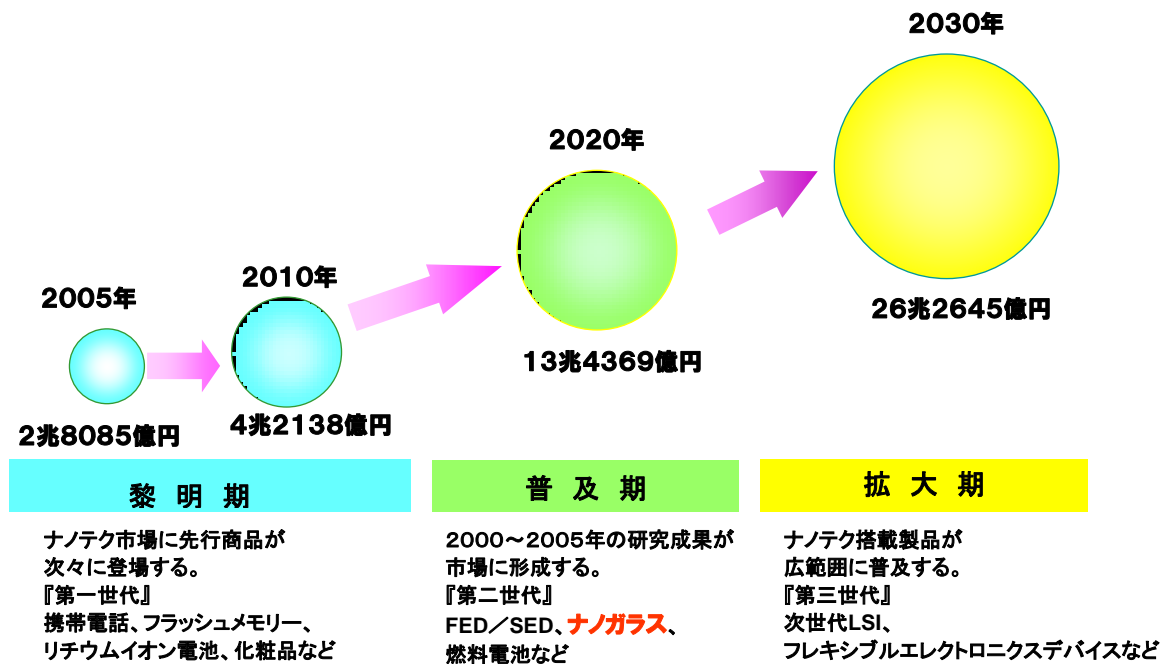


図 I-3 ナノテク関連市場予測（2005年～2030年）<sup>1)</sup>

出展：半導体産業新聞 2006.7.5 <経済産業省調査（ナノテクノロジー・材料戦略室）>

これらのニューガラス（ナノガラス）<sup>2)</sup>として開発された種々のデバイスの一部は、インターネットや高度情報通信ネットワーク分野、入出力分野、レーザー加工分野他で使用される。これ

らの分野での市場規模は膨大で、光産業技術振興協会の調査によると、2009 年度実績が対前年度比 9.5%減の 7 兆 5843 億円だったのに対し、2010 年度見込みは 8.4%増の 8 兆 2242 億円と V 字回復を遂げるとした。図 I-4 に光産業国内生産額の推移を示した。

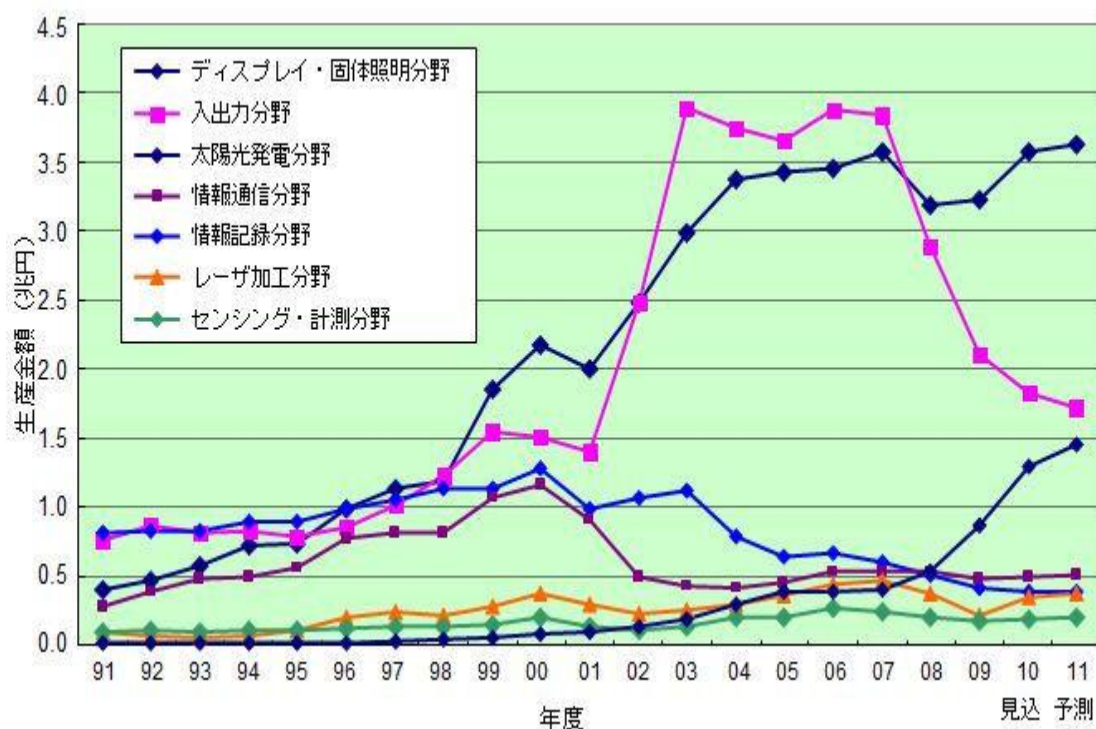


図 I-4 光産業国内生産額の推移<sup>3)</sup>

2011 年度予測は東日本大震災前の調査による。出典：光産業技術振興協会

## (2) 2015 年での本プロジェクトによる市場創出（費用対効果）

本プロジェクトで開発する加工システムの有効性を調べるために、導波路型デバイスと光学デバイスとを想定している。導波路型デバイスとしては、スプリッタを取上げている。光学デバイスとしては、光学ローパスフィルタを具体的に取上げている。以下において夫々に関係する市場の規模を検討する。

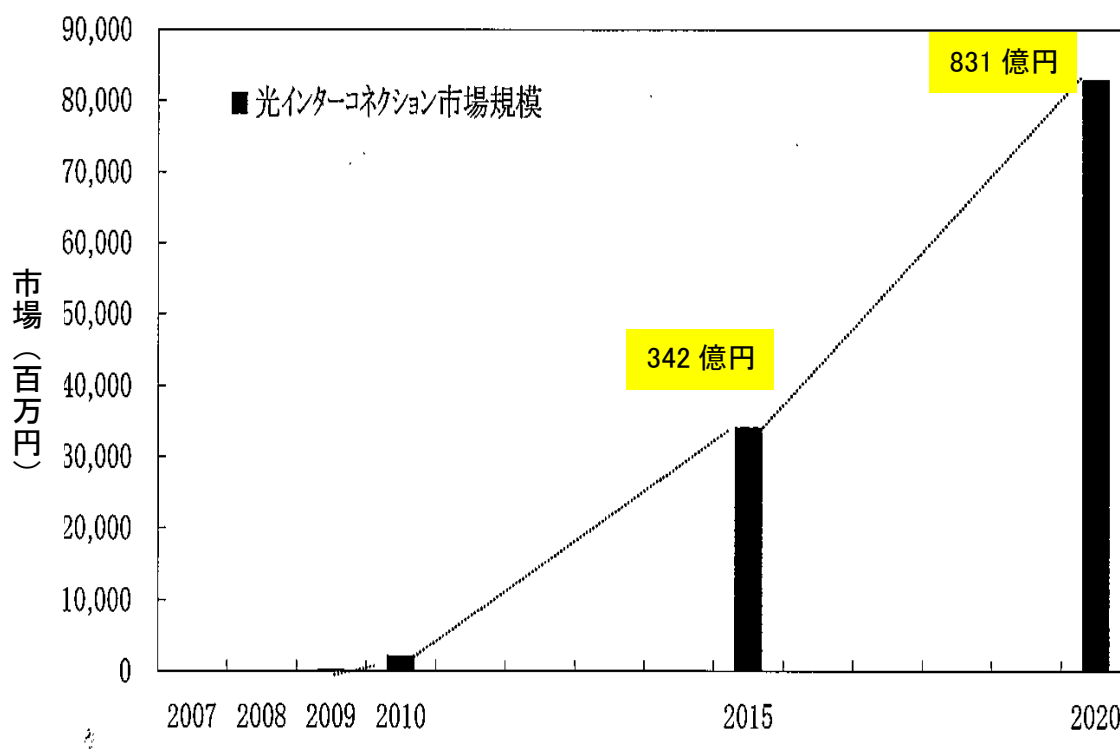
### 1) 光導波路型デバイス

財団法人光産業技術振興協会の調査によると、光産業の国内生産額の中の導波路型デバイスが関与する光回路部品及び微小光学部品での 2006 年での市場は 537 億円、光受動部品は 391 億円、光コネクタは 231 億円で、全体で 1,159 億円である<sup>3)</sup>。

本開発と直接関係が深い光インターコネクションについて、以下に簡単に記す<sup>4)</sup>。光インターコネクションを類別すると、接続距離の長い順に記すと、装置間（架間）、装置内（ボード間、

バックプレーン)、ボード内(チップ間、MCM)、チップ内(オンチップ配線、Si フォトニクス)となる。接続距離の一番長い10~100mである装置間(架間)では、2007年後半以降に需要が集中している状況である。これにより光伝送システムが向上し、ハイエンドサーバーの消費電力が従来に比べて40%程度低減していると言われており、CO<sub>2</sub>削減に寄与している。本プロジェクトが主に寄与できるのは、これよりも接続距離が短い領域である。

これ等の領域での市場規模は、2015年で約342億円、2020年では831億円と言われている<sup>4)</sup>。これ等を図I-5に示した。特に、2015年では携帯電話やスマートフォンに凡そ76%が使用され、スパコン/HPC、サーバーは13%、計測器は5%である。2020年になると、携帯電話やスマートフォンは63%になり、スパコン/HPC、サーバーは7%、計測器は24%となる。これ等を図I-6に示した。

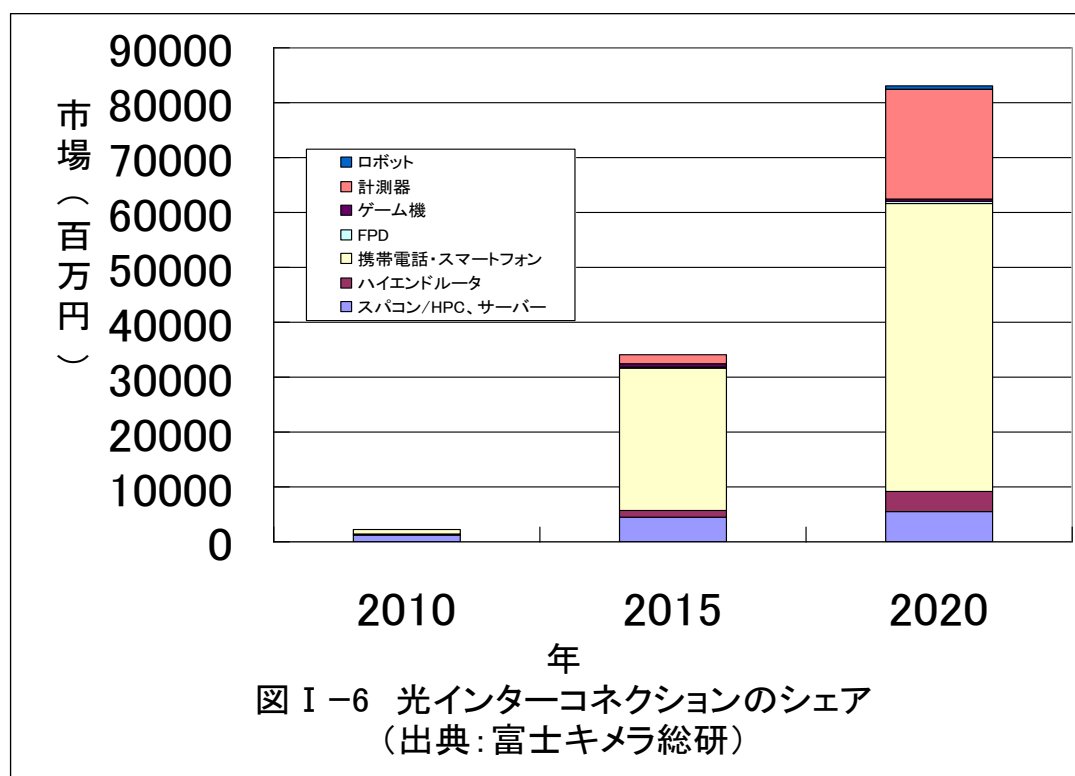


図I-5 光インターコネクション市場規模 (出典:富士キメラ総研)

## 2) 光学ローパスフィルタ

光学デバイスとして取上げた光学ローパスフィルタは普及が進んでいるデジタルカメラに使用されている。最近では、携帯電話にまで装着されマーケットが膨らんでいる<sup>5)</sup>。図I-7にそのマーケット規模を示した。2015年には、出荷台数が1億5千万台を突破し、その出荷金額は3兆5千億円を超えるまでに成長する。

表 I-1 に 2005, 2010, 2015 年における出荷台数、表 I-2 に 2005, 2010, 2015 年における出荷金額を示した<sup>5)</sup>。また、100%装着時の光学ローパスフィルタ分の価格を示した。本プロジェクトで開発している軽く、薄い光学ローパスフィルタができれば、軽薄短小が強く要求され、また益々画素数が増大している携帯電話には大きく取り上げられるであろう。また、低価格で作製できる本プロジェクトで開発している光学ローパスフィルタができれば価格の低減が要求されている一眼レフタイプカメラへの適用が増えるであろう。実際の装着は 2015 年では、一眼レフタイプカメラで 100% (556 億円)、車載カメラと監視カメラで 100% (246 億円)、そしてレンズ一体型のコンパクトデジカメで 80% (115 億円) を上回るであろう。表 I-3 に各カメラ種におけるフィルタ 1 式の価格、装着率を示した。これ等と表 I-1 の出荷台数を使用してフィルタの占める金額を算出した。その合計は 917 億円である。これは、カメラ単価の 2.6% で合理的な値である。



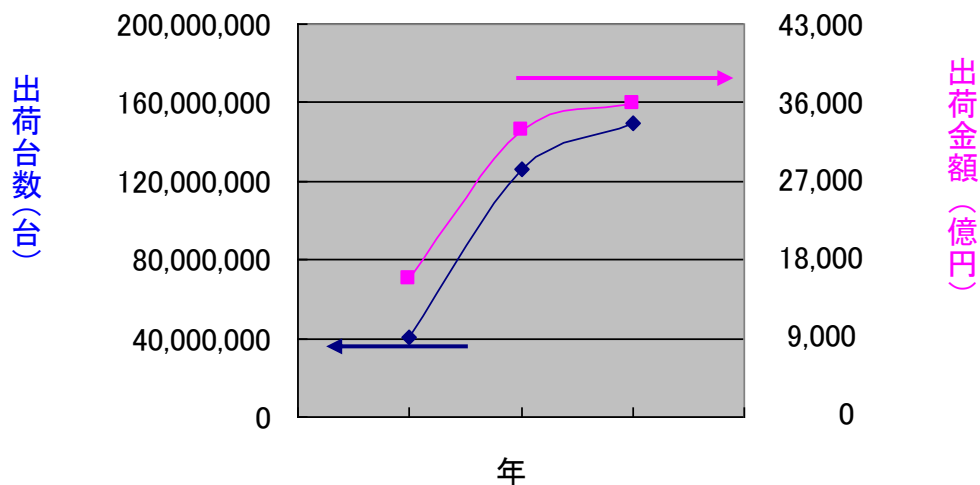


図 I-7 デジタルカメラの出荷台数・金額推移<sup>4)</sup>  
 出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA)、  
 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA)、  
 (株)矢野経済研究所

表 I-1 デジタルカメラの出荷台数<sup>5)</sup> (台)

年度	コンパクトデジカメ	一眼レフタイプカメラ	車載&監視用カメラ	合計
2005	33,000,000	3,230,000	4,000,000	40,230,000
2010	101,398,200	11,212,000	13,884,800	126,495,000
2015	119,649,800	13,230,000	16,384,000	149,263,800

出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA) 「光産業・光技術動向調査 2004」と 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA) 統計、および(株)矢野経済研究所市場予測の集荷台数および出荷金額予測<sup>5)</sup>。

表 I-2 デジタルカメラの出荷金額<sup>5)</sup> (億円)

年度	コンパクトデジカメ	一眼レフタイプカメラ	車載&監視用カメラ	合計
2005	11,012	3,235	1,339	15,586
2010	22,953	6,753	2,760	32,466
2015	25,065	7,374	3,014	35,453

出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA) 「光産業・光技術動向調査 2004」と 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA) 統計、および(株)矢野経済研究所市場予測の集荷台数および出荷金額予測<sup>5)</sup>。

表 I-3 デジタルカメラ用光学ローパスフィルタの 2015 年出荷金額予想 (億円)

年度	コンパクトデジカメ	一眼レフタイプカメラ	車載&監視用カメラ	合計
2015	25,065	7,374	3,014	35,453
フィルタ1式価格:円	120	4,200	1,500	
フィルタ装着率	80	100	100	
フィルタ分金額	115	556	246	917

出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA) 「光産業・光技術動向調査 2004」と 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA) 統計、および(株)矢野経済研究所市場予測 の集荷台数および出荷金額を元にフィルタ分を NGF 予測した<sup>5)</sup>。



## I.2. 事業の背景・目的・位置づけ

### I.2.1 事業の背景

#### (1) 社会的背景

21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として、本プロジェクトを実施する。

本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトの基盤技術として得られたデバイスをより高精度でより低コストで実用的なデバイスとして作製できる加工技術の基盤技術を開発するのが目的である。具体的には、フェムト秒レーザー等とホログラム技術（波面制御技術）を組み合わせ、三次元デバイスにおける加工の高精度化によるデバイス特性の向上と加工の高速化による製造コストの大幅な低減を目指すものである。

また本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている<sup>6),7)</sup>。

本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。

更に、光インターコネクタの分野では、『光インターコネクション技術の国際標準化』が日本を中心（日本メンバーが凡そ60%を占める）に進められている。Optp-electric assemblies (Opticalcircuit board, optical backplane)が対象になっている。石英ファイバフレキシブル光配線板の詳細規格（JPCA-PE02-01-01S-2008）が日本で2008年に作成された。詳細は、<http://www.jpca.net/hikari/pdf/jpca-pe02-01-01s-2008.pdf>に、IEC（International Electrotechnical Commission）の情報と共に記載されている。

## (2) 技術的背景

近年レーザーパルス圧縮技術の向上に伴い、超短パルスレーザー光を利用したガラス材料を始めとした透明材料の加工が盛んに報告されており、特にパルス幅がフェムト秒レベルのレーザー光はそのピークパワーの強さから多光子吸収過程を利用して透明材料内部に三次元的に母材と屈折率の異なる異質相を形成することが可能であり、この屈折率変化等を利用した光導波路や回折格子などの光学素子作製技術としての応用が提案されてきたが、実用までは程遠い状況である。その背景として、図 I-8 に示すように、デバイスの作製にはフェムト秒レーザーパルス光を加工形状に合わせてなぞりながら照射し加工する方法が取られており、多大の加工時間を必要とし、加工コストが高く実用化には程遠かった。また、長時間に及ぶ加工によりレーザービームの照射位置と強度を安定に制御することが不可能であった。従って、精度の良い高性能なデバイスを作製することができなかった。

従って、フェムト秒レーザーを使用した現状のデバイス作製技術では実用に耐えるデバイスを製作することは不可能で、これをブレークスルーする高度な技術の開発が望まれている。

### 一点ずつをレーザーショットで作製

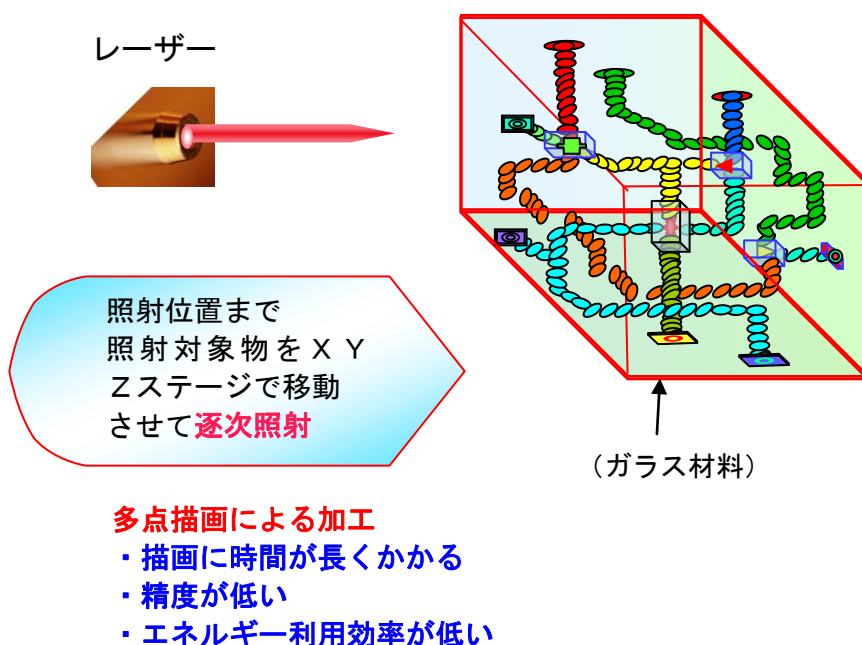


図 I-8 フェムト秒レーザー加工の課題

## I.2.2 事業の目的及び意義

本プロジェクトでは、

- (1) デバイス化加工用ガラス材料技術として、三次元光学デバイス用並びに三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術
- (2) 三次元加工システム技術に必要な波面制御三次元加工システム技術並びに空間光変調器三次元加工システム技術
- (3) 三次元加工システム応用デバイス技術として、三次元光学デバイス技術並びに三次元光回路導波路デバイス技術を開発し、具体的なデバイスを作製することにより、ガラス材料と三次元加工システムの有効性を確認する。

これ等により、日本が世界をリードしている通信・情報家電分野の部材の高機能化・低コスト化を図る為の基盤技術を構築することを目的とする。(図 I-9)

- 光情報処理の基本デバイス(光スイッチ等)
- 新しい機能を持つ光学デバイス(デジカメのレンズ)
- 集積化光回路デバイスへのインパクト



ガラス中に三次元の光回路を高精度に一括形成できるプロセス技術の開発



### 従来工法の問題点

フェムト秒レーザーを使用した従来の加工法はガラス材料をXYZステージで移動させながら1点ずつレーザ加工をする逐次多点描画法であり、加工時間が長い・精度が低い・エネルギー利用効率が低い。

図 I-9 事業の目的及び意義

ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料であり、建築、輸送機材、情報通信、医療、バイオ、さらにはマイクロ化学などの様々な分野で、今後ますます高機能化が求められるため、研究開発の重点化と加速化が必須である。しかしながら、従来からの均一な構造を制御する研究のアプローチでは世界をリードする革新的技術の発見に繋がる可能性は低く、従来にない新たなガラスの特性や機能を効果的に引き出すためには、ナノレベルでの構造制御技術の開発が不可欠である。また、このような構造制御されたデバイスの効率的な作製法の研究は殆ど成されていないのが現状である。さらに、これらの課題に関連企業が散逸的に取り組んでいては世界的競争に勝ち抜くことは困難である。したがって、NEDO のリーディングのもと、基盤技術の形成に資する技術開発に、産学の連携研究体制のもと関連企業、及び関連企業が集中研究方式で課題に取り組む本プロジェクトの実施意義は非常に大きい。

更には、本プロジェクトで開発する三次元光デバイス高効率製造技術は、対象材料をガラスのみならず、有機材料、ガラス以外の無機材料、例えば半導体材料にも適用できる汎用性の高い加工技術で、将来幅広い産業分野で利用される製造技術になることが見込まれる。

### I.2.3 事業の位置付け

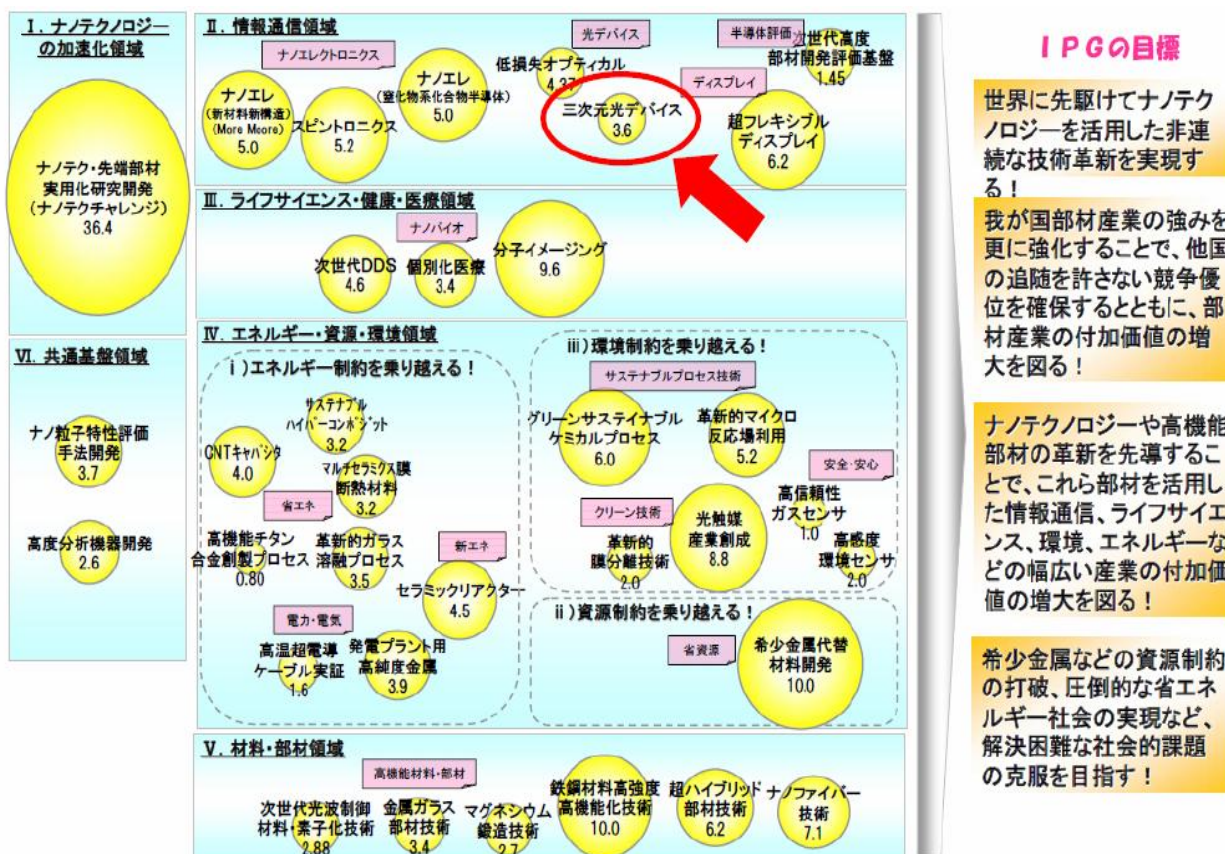
#### (1) 国の政策における位置づけ

経済産業省の全ての研究開発プログラムは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」IT、ナノテク・部材、ロボット・新機械、健康安心、エネルギー、環境安心、航空機・宇宙産業の下で体系的に推進されている。また、ナノテク・部材IPGにはナノテク加速化領域、情報通信領域、ライフサイエンス領域、エネルギー・資源・環境領域、材料・部材領域、共通基盤領域の6項目に分類され、あらゆる分野に対して高度化、不連続な革新をもたらすナノテクノロジー、革新的部材技術を確立すべく位置付けられている。(図I-10)



図I-10 研究開発プログラムにおけるナノテク・部材イノベーションプログラムの位置付け

また、図 I-11 に示すように本プロジェクトは『ナノテク・部材イノベーションプログラム』においては情報通信領域・光デバイス・三次元光デバイスに位置付けられ、ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行うことで幅広い産業の付加価値の増大を図ることを目標としている。



**IPGの目標**

世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する！

我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに、部材産業の付加価値の増大を図る！

ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る！

希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す！

図 I-11 ナノテク・部材イノベーションプログラムにおける本プロジェクトの位置付け

また、光デバイスに関しても取上げられており、光回路分野ではナノ加工によるチップ内やチップ間のインターコネクションやそれに必要な光導波路が各所で取上げられている。また、フェムト秒レーザーによる光デバイスも取り上げられている。更に、同『技術戦略マップ 2008』<sup>6),7)</sup>にて述べられているネットワーク分野の導入シナリオにおいて、その共通基盤技術として光集積技術が挙げられ、2011年から2016年にかけて進展するとロードマップに述べられている。また、ネットワークを構成するデバイス技術の一つに光インターコネクト分野が挙げられている。その内でも高速の光インターコネクション (1Gb/s~100Gb/s) が2011年から2016年に

かけて進展するとロードマップに述べられている。図 I-12 に、平成 17 年度に策定された「ナノテクノロジー分野のロードマップ（02 電子情報 光デバイス）」における本プロジェクトの位置付けを示した。このなかの光導波路・光伝送・合分波の領域・機能において三次元加工システム・三次元光デバイス・三次元光導波路用デバイスの開発・作製が位置付けられている。

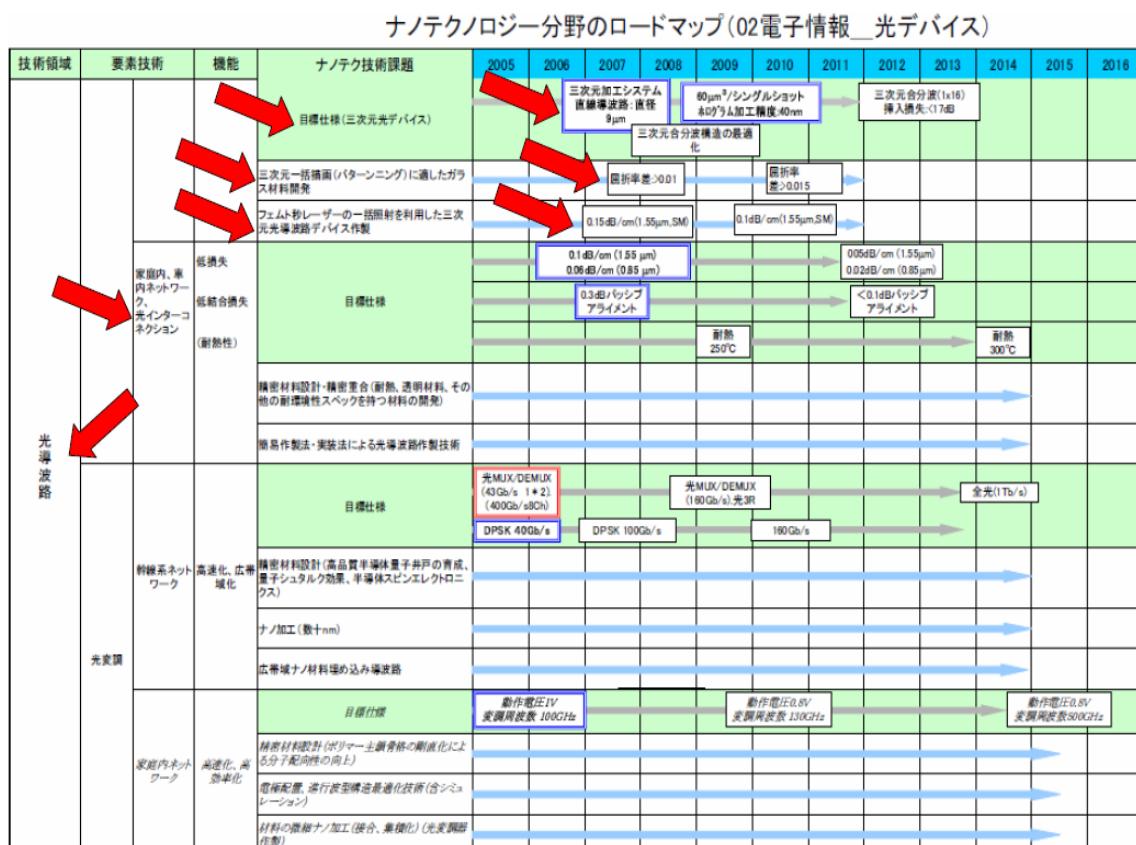


図 I-12 ナノテクノロジー技術戦略マップにおける本プロジェクトの位置付け

また「三次元光デバイス高効率製造技術開発」は、内閣府(総合科学技術会議)において検討中の革新的技術戦略(平成20年4月10日)における高速大容量通信網技術ーオール光通信処理技術ーの一部として登録された<sup>8)</sup>。この革新的技術により、スイッチ・経路処理を含め、ネットワークのオール光化技術により、爆発的に増大する情報を処理可能とする一方で、ネットワークにおける電力効率を数十倍程度向上した超高速基幹ネットワークの構築が可能となる。また、次世代イーサネット規格等の国際標準の獲得も目指した技術確立等により、我が国の国際競争力が強化される。

尚、革新的技術とは、他国の追随を許さない世界トップレベルの技術であり、持続的な経済成長と豊かな社会の実現を可能とするものである。我が国としては、グローバル化の進展の中で、

世界との競争に打ち勝つため、経済社会に大きな波及効果をもたらすと期待されるこれらの革新的技術を強力に推進してその強みを更に発展させ、資源・環境等の制約要因を転じて成長力につなげることが不可欠である。

## (2) 関連する国内外の研究開発の動向、その中での位置付け

電子情報通信学会（2008年3月）において、2015年頃から光インターコネクションのデバイス・モジュールが製品化され、光化が進み始めるとの発表があった。当技術の展開が十分に期待できる分野であり、早期に当プロジェクトでも対応する必要が出てきている。

高精度の光デバイスの効率的生産を可能とするプロセス技術については、情報家電用デバイスや光学デバイスを製造している産業界から次のような意見がある。従来の光学技術では実現できない、超短パルスレーザーを使用した新規デバイスを将来製品化したい候補があるが、現状の加工プロセスではコスト高となり、製品化が困難である。そのため、低コストの新規デバイス加工技術が開発できれば情報家電分野や光学分野に大きく寄与できる。

しかしながら、これらの技術開発の研究は殆どなされていないのが現状で早期に当プロジェクトでも対応する必要が出てきている。

## 参考文献

- 1) プレス発表、「ナノテク関連市場予測」：経済産業省調査（ナノテクノロジー・材料戦略室）、2006.7.5、半導体産業新聞
- 2) プレス発表、「2015年のニューガラス市場」、平成17年6月7日、化学工業日報
- 3) 財団法人光産業技術振興協会による光産業国内生産額に関する調査結果（2008年3月6日）、<http://www.oitda.or.jp/>
- 4) 富士キメラ総研【調査報告書】2008年版 光配線基盤；電気光混載基盤の技術・市場の将来展望、2008年2月22日。
- 5) 財団法人 光産業技術振興協会（OITDA）「光産業・光技術動向調査2004」と有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会（CIPA）統計、および株矢野経済研究所市場予測の集荷台数および出荷金額を元にフィルタ分をNGFが予測した。
- 6) 技術戦略マップ2008（ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他）、平成20年3月、経済産業省
- 7) 技術戦略マップ2008（ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他）、平成20年4月22日、NEDO
- 8) 革新的技術戦略、平成20年5月19日、総合科学技術会議

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

### Ⅱ. 1 事業の目標

#### Ⅱ. 1.1 全体目標

平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工技術と空間光変調器三次元加工技術を確立する。また具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性の実証を行う。

尚、本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。これ等を本プロジェクトの広義での全体目標とする。

以下に研究項目ごとに最終目標と目標値を記す。図Ⅱ-1.1-1 に中間目標と最終目標の内容を示す。

#### Ⅱ. 1.2 最終目標

##### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

三次元光学デバイスの作製は、ガラス内部に三次元的に異質相を作製することにより形成される。異質相の三次元形状は、従来フェムト秒レーザーの照射スポットを三次元的に移動させながらガラス内部に作製された。本研究開発ではレーザーの照射スポットによる点描に代えて、ホログラム等を使用した一括照射で三次元造形を高速に行うものである。その結果として精度のよい三次元造形を低コストで実現できる技術を開発する。以下においては、この技術を試用するデバイス用ガラスの開発に関するものである。

##### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

##### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

三次元光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400nm～760nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

##### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つである光導波路を、ガラス内部に本プロジェクトで開発する三次元加工システムで、シングルモードでの光伝搬損失として0.1dB/cm以下（導波路サイズ：直径9μm以下、波長：1.55μm）を達成できるガラス材料を開



発する。

## 研究項目②「三次元加工システム技術」

### ②- (1) 三次元加工システム技術目標

従来のフェムト秒レーザーによるガラス内部の三次元加工は、レーザー光を一点に集光させ、試料を置いたステージの三次元移動によって行っていた。本手法は、ステージの移動による三次元加工ではなくホログラム等による波面制御により一括で三次元造形を行うもので、レーザーの照射エネルギーを有効に使用でき、従来比100倍以上の高速加工を実現する。

具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 $\mu\text{m}$ 以上の立方体の中に、直径が10 $\mu\text{m}$ 以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する。

### ②- (2) 波面制御三次元加工システム技術

加工精度として40nm以下を実現する。また、波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計ができる技術を開発する。なお、従来技術では64万画素での処理におよそ100時間が必要である。

### ②- (3) 空間光変調器三次元加工システム技術

空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10Hzの変調速度を50Hzに高める。光位相変調度として $2\pi$ ラジアン以上を実現すると同時に0から $2\pi$ までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで50GW/cm<sup>2</sup> (100fs、1kHz) を達成する。

## 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

### ③- (1) 三次元光学デバイス技術

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmから10mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。

本研究開発では、一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。これにより、光学ローパスフィルタ機能を、従来の3枚から1枚に削減し、フィルタ厚0.3mm以下の光学ローパスフィルタを実現する。また、従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、0.236°であり、本フィルタではこれ以上の開き角度を実現する。また解像度を維持し、モアレを抑制することを確認する。

### ③- (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つは、光導波路である。光導波路は、異質相をガラス内部に作製することにより実現できる。異質相の形状は適用デバイスにより異なり種々雑多であるが基本的なものは直線導波路である。そこで、基本的な直線導波路として、シングルモードで光伝搬損失：0.1dB/cm以下（導波路サイズ：直径9 $\mu\text{m}$ 以下、波長：1.55 $\mu\text{m}$ ）を開発する。また、本加工システムの加工機能・性能を確認するために分岐面が互いに直交した1×16の三次元光カプラ（スプリッタ）導波路について、挿入損失：17dB以下、反射減衰

量：45dB以上（波長：1.50～1.60μm）が作製可能であることを確かめる。

# 研究開発項目別目標値

研究開発項目	中間目標	最終目標
①デバイス加工用ガラス材料技術	(1)デバイス加工用ガラス材料技術共通目標 自主目標：データの体系化(異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性)	異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.015$ 可視光領域 (400-760nm)
	(2)三次元光学デバイス用ガラス材料技術	異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.01$ 可視光領域 (400-760nm)
	(3)三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55μm @Single Mode 直線導波路(レーザー照射条件最適化)； 直線導波路(三次元加工システムで作製)
②三次元加工システム技術	(1)三次元加工システム技術目標	100倍以上の高速加工を実現 100個以上の球状異質相 or 棒状異質相 $\rightarrow \leq 10\mu\text{m}$ 60μm×60μm×60μm
	(2)波面制御三次元加工システム技術	2層以上の球状異質相 or 棒状異質相 $\rightarrow \leq 10\mu\text{m}$ 60μm×60μm×60μm ホログラム 加工精度 $\leq \pm 40\text{nm}$ 設計速度 $\geq \times 10$ (従来比)
	(3)空間光変調器三次元加工システム技術	変調速度30Hz 光位相変調度 $\geq \pi\text{rad}$ 耐光性 $\geq 30\text{GW/cm}^2$ (100fs、1kHz) 空間光変調器： 変調速度50Hz 光位相変調度 $\geq 2\pi\text{rad}$ (0~2πで制御可) 耐光性 $\geq 50\text{GW/cm}^2$ (100fs、1kHz)
③三次元加工システム応用デバイス技術	(1)三次元光学デバイス技術	一括描画で確認 光学LPF(3→1枚) $\geq 0.5\text{mm}$ $\rightarrow$ $\leq 0.3\text{mm}$ 2光軸開き角 $> 0.236^\circ$ モア抑制の確認
	(2)三次元光回路導波路デバイス技術	波面制御法(ホログラム)で直線導波路 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55μm @Single Mode 直線導波路 光伝搬損失 3次元光カプラ: 1×16 挿入損失 $\leq 17\text{dB/cm}$ 反射減衰量 $\geq 45\text{dB}$ 波長1.50~1.60μm

図II-1.1-1 中間目標と最終目標の内容

## II. 1.3 中間目標

マイルストーンとして、下記のように別途中間目標を設定した。なお中間目標の設定にあたっては、プロジェクトリーダーと協議するとともに、有識者（外部技術評価委員）の評価を受けた。

本プロジェクトでは、外部意見を取り入れ成果の実用化を促進するため、途中成果をナノテク展示会にて積極的に公表し、来場者からの意見を参考に早期の実用化のための加工システムとそれを適用したデバイス例の方向付けを行なうこととした。

以下に中間目標の具体的内容を示す。

### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

#### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

#### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

可視光領域（400nm～760nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

#### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

レーザー照射条件（パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等）の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失：0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。

### 研究項目②「三次元加工システム技術」

#### ②-(1) 三次元加工システム技術

加工形状寸法として、直線導波路で直径9 $\mu$ mの加工を確認する。また、その加工精度として、0.9 $\mu$ mを確認する。

1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 $\mu$ mの立方体の中に、直径が10 $\mu$ m以下の球状あるいは棒状の異質相を2層以上形成し、三次元基本加工機能を確認する。

#### ②-(2) 波面制御三次元加工システム技術

波面制御素子を従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発する。

#### ②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術

変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として $\pi$ ラジアン以上を確認する。耐光性として、30GW/cm<sup>2</sup>（100fs, 1kHz）を達成する。

### 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

#### ③-(1) 三次元光学デバイス技術

光学シミュレーションにより、方向無依存機能を達成するための形状を検討する。また、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認し、フィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認する。

#### ③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失：0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。

同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせる。

## Ⅱ. 1.4 中間目標の設定理由

ナノテクノロジー・材料技術開発部では、最終目標に対してH20年度末における研究管理上のマイルストーンとして中間目標を設定し研究開発を実施し、目標通りの結果を得た。中間目標と最終目標の設定理由を記載する。表Ⅱ-1.4-1に最終目標設定の理由をまとめた。

### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

#### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

プロジェクトで開発する一括加工システムの確認用としての「光学デバイス」（例として、光学ローパスフィルタ）と「光回路導波路デバイス」（例として、スプリッタ）に加えてその他のデバイスやより広い分野で使用できるように、即ち開発する一括加工技術をより広く適用できる分野を広げるために本共通目標を置き、より優れたガラス材料のデータを系統的に調べる。

#### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

低コストで材料を加工するためには、レーザーパワーを効率良く使用することが重要となる。このためには、ガラスの加工閾値はできる限り低いことが好ましい。また、加工精度を良くするためには、低いパワーの加工においても異質相と母材の屈折率差が大きくなることが好ましい。また、同一の形状で屈折率差を大きくすることができれば、加工する領域のコンパクト化に繋がり、強いてはデバイスのコンパクト化に繋がる。そこで本研究の中間目標として、可視光領域（400nm～760nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発することとした。最終目標は、デバイスとして具体的に光学ローパスフィルタを想定してきめた。即ち、ガラスの屈折率差が0.015あれば厚みが数10 $\mu$ mの光学ローパスフィルタを作製できることから最終目標値を決めた。

#### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

光導波路は通信用光デバイスにおいて非常に重要な役割を担っている。現在、光通信帯域の主流は1.3と1.55 $\mu$ m近傍であり、将来的な大容量光通信を見越したとしてもその波長域は1.2～1.7 $\mu$ mである。既に実用化されている光導波路には、石英系ガラスを基材とするものと、PMMA（ポリメチルメタクリレート）、ポリイミドやシリコーン樹脂等のポリマ材料を基材とするものがある。フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。加えて、本技術により開発する三次元光デバイスにおいては集積化することで従来デバイスより導波路長は短くなるのが想定され、伝搬損失のデバイス性能への影響は更に少なくなることから、一括描画による実用レベルの導波路形成を確認することは三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発において十分な目標と思われる。また、光通信においては光導波路との接続にシングルモード光ファイバーを用いるケースが最も多く、導波路デバイスとしてもシングルモードタイプが作製可能であることを確認する必要がある。そこで本研究の中間目標として、レーザー照射条件（パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等）の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と

構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失：0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定することとした。最終目標としては、一括描画による光伝搬損失：0.1dB/cm以下の実用レベルの直線導波路形成を確認することとし、三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発を行うこととした。

表 II-1.4-1 最終目標の設定理由

テーマ名	目標	設定理由
①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標	異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。	開発する一括加工技術をより広く適用できる分野を広げるために本共通目標を置き、より優れたガラス材料のデータを系統的に調べる。
①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術	可視光領域(400nm~760nm)でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。	ガラスの屈折率差が0.015あれば厚みが数10μmの光学ローパスフィルタを作製できる。尚、光学ガラス以外のガラスで得られている屈折率変化は0.01程度である。
①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	光伝搬損失:0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。	フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。一括描画による実用レベルの導波路形成を確認することは三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発において十分な目標と思われる。
②-(1) 三次元加工システム技術	ホログラム等による波面制御技術を開発し、三次元造形を従来比で100倍以上の高速加工を実現する。 具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺60μmの立方体中に、直径10μm以下の球状或いは棒状の異質相を100個以上形成する。	最終目標では、中間目標の成果を適用して、更なる微細化と更なる高速化を目的として、微細で高精度な三次元デバイスを作製するために必要な技術開発を設定している。この目標達成により、より高精度なデバイスをより高速で作製することが可能となる。また、この目標で得られた技術と最終目標で開発する材料技術との組み合わせにより、より高精度で、より高速でデバイスを作製できる技術が確立できる。他のテーマで得られた技術を組み合わせると、従来比で10,000倍の高速加工が実現できると考えられる。
②-(2) 波面制御三次元加工システム技術	波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計できる技術を開発する。精度40nm以下の波面制御素子を作製する。	64万画素のホログラム設計に現状では100時間掛かる。これを最終目標として1/10にし、少なくとも1日で計算できるようにする。波面制御素子の高精度化は中間評価時に既に達成している。これにより更なる高精度ホログラムを作製する。
②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術	変調速度を50Hzに高め、光位相変調度として $2\pi$ ラジアン以上を確認する。耐光性として、50GW/cm <sup>2</sup> (100fs,1Hz)を達成する。	変調速度はピコレート以上でパターンが書き換えできるように決めた。光位相変調度は波面制御のためのホログラムを表現するために必要な特性を目標とした。耐光性では、ガラスに100点以上の異質部を一度に形成するのに十分な値として設定した。
③-(1) 三次元光学デバイス技術	一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。フィルタ厚みを0.3mm以下で実現する。	従来の水晶式と性能的に同等以上に、形状的には対抗できるように決めた。厚みは従来に比べて桁違いに薄く、使用枚数は1/3に、厚みは1/10以下に決めた。尚、従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmの厚さを持つ。
③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術	波面制御法で直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失:0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証し、これを使用して1×16のスイッチを試作する。挿入損失で17dB以下、反射減衰量45dB以下を目標とする。	フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。このような光導波路を使用して最終目標のスプリッタを実現する。

## 研究項目②「三次元加工システム技術」

### ②- (1) 三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを、高精度で高速に作製するにはホログラムを使用して一括で異質相を形成する方法が有効である。これにより、従来の逐次形成法に比べて高精度で高速に三次元的に異質相を形成することが可能となる。

適用デバイスの代表的なものとして光導波路がある。ここでは、高精度の光導波路を高速で実現することを念頭に目標を定めた。また、三次元基本加工を確認するための目標を中間目標に、最終目標としては実用化に向かっての更にその高度化を目標として設定した。また、他の開発項目の成果をも総合化することにより従来比 10,000 倍の高速化を予想して最終目標を設定した。

### ② - (2) 波面制御三次元加工システム技術

三次元加工システムに使用されるホログラムの設計には多重積分を多用し、この演算は現在 64万画素で約100時間がかかる。これは 1 画素あたりの積分に500msかかることになる。高速演算アルゴリズムを開発することにより最低でも50ms以下にすることが必要である。中間目標としては、従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発することとした。最終目標としては、実用化レベルを考慮して更なる高速化を考え10倍以上を設定した。

### ②- (3) 空間光変調器三次元加工システム技術

最終目標達成のためには、フェムト秒レーザー光波面制御モジュールに関し、画素数に関してはレーザービームを100点以上に分岐することおよび折り返しにより10波長以上の波面を表現できることを念頭においた。また速度はビデオレート以上でパターンが書き換えできれば実用上問題がないこと、および外部回路との整合性も考慮した。位相変調度は波面制御のためのホログラムを表現するために必要な特性を目標とした。さらに耐光性では、ガラスに100点以上の異質部を一度に形成するのに十分な値として設定した。そこで中間目標としては、最終目標達成への足掛かりを具体的に固めるべく、フェムト秒レーザー光波面制御モジュールとして、変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として $\pi$ ラジアン以上を確認する。また耐光性として、 $30\text{GW}/\text{cm}^2$  (100fs, 1kHz) を達成することとした。

## 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

### ③- (1) 三次元光学デバイス技術

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。従って、コンパクト化のためには、一枚の薄い材料内部に二次元または三次元で形成された異質相により二方向に光線分離できることが必要である。従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 $0.236^\circ$  という固有の値であり、光線分離幅は水晶の厚みによって制御せざるを得ない。

一方、低コストでの製造を考えると、一括照射技術を用いてできる限り広い領域に加工できることが要求される。しかしながら、現状は従来の一括照射技術では数mmオーダ一角の領域に加工するためには数百 $\mu\text{m}$ オーダ一角の加工領域を走査機構にて広い領域に加工する必要がある。以上の理由から、上記の問題点を解決するための最終目標に対して、中間目標としては、光学シミュ

レーションにより方向無依存機能を達成するための形状を検討し、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認しフィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認することとした。

### ③ - (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

近年、通信や情報処理等、様々なシステムの光ネットワーク化が急速に発達し、それに伴い低コスト、高性能で光集積化が容易な導波路型の合分岐や合分波器は益々重要になっている。更に、三次元化による小型・高集積化による機能集約や多機能化といった要望もあるが、フォトリソグラフィとドライエッチングによる従来の技術では三次元構造を高精度で作製することは困難である。そこで、本三次元加工システムの有効性を確認するための三次元光回路導波路デバイスとして光カップラを選定した。更に、既に実用化されている光カップラの性能を三次元光デバイスとしての形態において実現することができれば、本三次元加工システムの実用性を確認できるとともに、他の光デバイスの三次元化による機能集約や多機能化にむけた波及効果を期待することができる。以上の理由により、本研究の中間目標としては、開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失：0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせることとした。以上の結果を用いて、具体的な光カップラを作製し、本技術の有効性を最終目標として確認することとした。

## II. 1.5 研究開発項目毎の詳細計画内容

### 研究項目 ① デバイス化加工用ガラス材料技術

ガラスの原子・分子レベルの構造を制御すれば、従来のマクロな構造制御では実現できなかったガラス材料の光学的、電磁氣的、機械的及び化学的等の優れた特性や機能を、有効に引き出すことが期待できる。

そのために、従来のマクロな構造制御とは異なった新たな手法、つまり、外部場（光、イオン、電子、電界、熱及び圧力等）をガラス材料に作用させることによって、母材の組成変化を起さずに、1～数百nmレベルの屈折率を変えた領域（以下において異質相と呼ぶ）の形状と配列を適正に制御することが可能となる。外部場の例としては、フェムト秒レーザーやイオンや電子ビーム等が挙げられる。従って、これらの外部場と相互作用を効率よく行えるガラス材料が必要となる。一方、このような材料で作製するデバイスに使用できることが必須の条件となる。例えば、光学デバイスにあっては、可視光での光に対して透明であることが必須である。また、光通信用の光デバイスにあっては、波長が1.2から1.7 $\mu\text{m}$ の通信帯域で光情報を低伝搬損失で伝送できることが重要である。

近年レーザーパルス圧縮技術の向上に伴い、超短パルスレーザー光を利用した透明材料の加工が盛んに報告されており、特にパルス幅がフェムト秒レベルのレーザー光はそのピークパワーの強さから多光子吸収過程を利用して透明材料内部に三次元的に母材と屈折率の異なる異質相を形成することが可能であり、この屈折率変化等を利用した光導波路や回折格子などの光学素子作製技術としての応用が提案されてきたが、実用までは程遠い状況である。その背景として、例えば、加工される材料自身が有する光学特性による収差の影響や、加工方法が未確立であり加工時間が

かかることによる加工コストの課題が挙げられる。また、上記異質相とはレーザーの強電場により誘起される分子構造の変化(密度変化)や空洞、結晶化、微粒子成長、カラーセンター生成、コロイド生成、クラック発生などであり、材料成分と異質相形成のメカニズムについては未だ明らかになっていない部分も多い。

従って、デバイスから要求されるガラス母材と外部場で異質相が形成できる材料とが一致する必要がある。このようなデバイスに適したガラス材料を作製する必要がある。

本研究では、世の中で広範囲に使用され適用範囲の広いと考えられる光学デバイスと光回路光導波路デバイスの作製に適した材料を開発する。

また、デバイス用ガラス材料におけるデータの体系化をも行う。

## 【共通】

### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」と連携をとりながら研究を進める。具体的には、光学デバイスの代表的な光学ローパスフィルタと光回路デバイスの代表的な光回路導波路デバイスを作製するために必要なガラス材料を開発する。

これらの開発を通して得られたデータと異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べたデータとの体系化を最終年度までに行う。

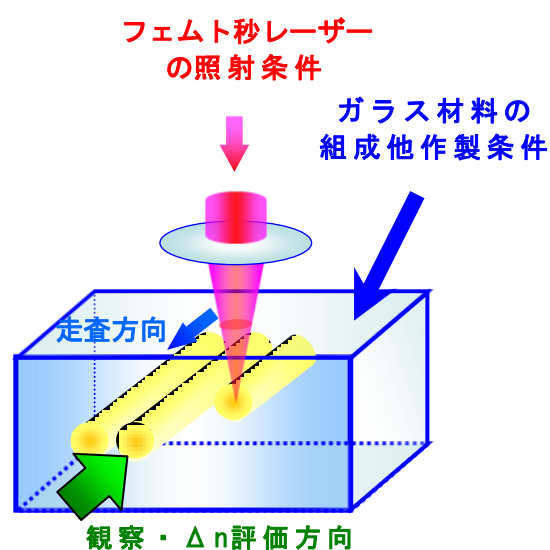
## 【デバイス用ガラス材料】

### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

本研究では、光学ローパスフィルタを想定して、三次元光学デバイス用ガラス材料を開発する。

従来のデジタルカメラに搭載されている光学的ローパスフィルタは水晶が用いられており、CCDなどの固体撮像素子前面にはCCDを保護するためのカバーガラスや赤外線カットフィルタとともに光路中に配置される。近年、撮像素子の小型化が進むにつれて、カバーガラスを使用せず、水晶ローパスフィルタをカバーガラスとして兼用する光学系が採用されているカメラも出始めている。

このような状況を鑑み、加工用部材としては水晶やCCD前面のカバーガラス

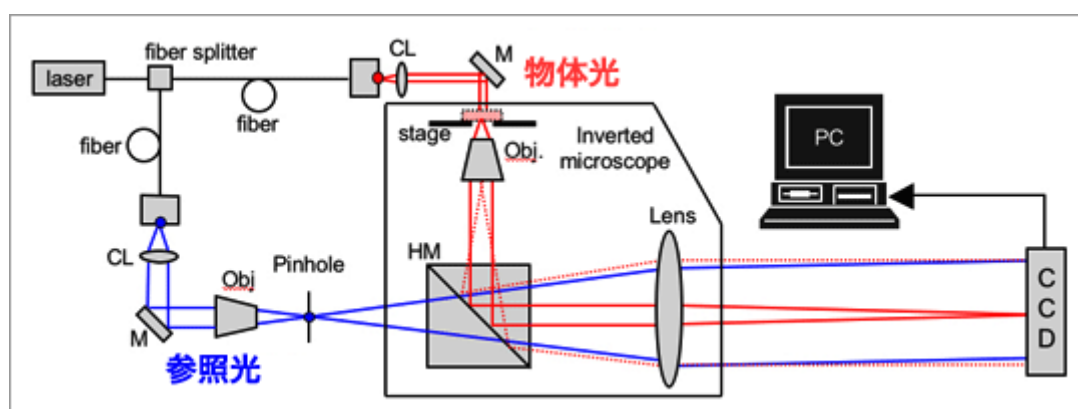


図Ⅱ-3 ガラス内部に作製した異質相



と同等な光学特性（屈折率 $n_d=1.45\sim 1.55$ 程度）である部材、あるいはそれに限らず、各種レンズ等に用いられるより屈折率の高い( $n_d>1.55$ )光学ガラスに対して、異質相形成の閾値、異質相形状の加工性、異質相の波長分散特性、着色、偏光特性、残留歪、ステージ走査速度（照射回数）やサイズ（加工体積）のガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

また、ガラス組成と異質相の関係が明らかになっていない部分が多く、上記の体系化の段階でどの種類に属するかも見極めていく必要がある。一方で、光学デバイスとしての利用を想定すると、着色による透過率の損失は好ましいとは言えず、また加工設計のし易さの観点から異質相領域の屈折率変化は連続的であることが好ましい。従って、これらの観点から本研究では密度変化による異質相利用を基本とし、必要に応じて異質相の種類を選択、組み合わせることにより屈折率差が0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。さらには、形成した異質相の屈折率差の評価方法についても検討を行う。図Ⅱ-3にガラス内部に作製した異質相、図Ⅱ-4に屈折率変化量の測定の方法を示した。



図Ⅱ-4 ガラス内部に作製した異質相の屈折率変化量の測定

### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

本研究では、三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料および一括描画に適した誘起構造を開発する。

光導波路デバイス形成で材料に求められる重要な要素は、フェムト秒レーザーにより誘起される構造変化領域の屈折率、散乱強度、吸収強度（使用波長域での）、構造変化閾値及び変化領域の形状・サイズの制御性である。しかしながら、構造変化機構と変化領域の物性については明らかにされていない部分が多く、系統的に研究された例も殆ど無いのが現状である。

三次元光導波路デバイス用として適したガラス材料を開発するにあたってはフェムト秒レーザーによる構造変化の系統的なデータの取得とその体系化を実施する必要がある。これらの研究において、ガラス内部にフェムト秒レーザーを集光照射した際に起こる現象をピコ秒オーダーの時間スケールで観測（図Ⅱ-5参照）し、その現象をシミュレーションすることで、代表的な異質相であるガラスの密度変化に起因する屈折率変化のメ

カニズムの解明や、レーザー照射により発生する圧力波の屈折率変化に及ぼす影響を調べる。

更に、レーザー集光点をガラス材料に対して相対移動させる従来法での光導波路描画と波面制御技術（研究項目②）による光導波路描画とでは形成される導波路の微細構造が異なることが想定され、例えば光の干渉による導波路の構造不整等が生じる可能性がある。そこで、ガラス材料開発の段階で光導波路形成における波面制御技術の問題点を抽出し、先の体系化したデータベースと照らし合わせることで、最終的に波面制御技術により高精度で高速加工が可能なガラス材料を開発する。

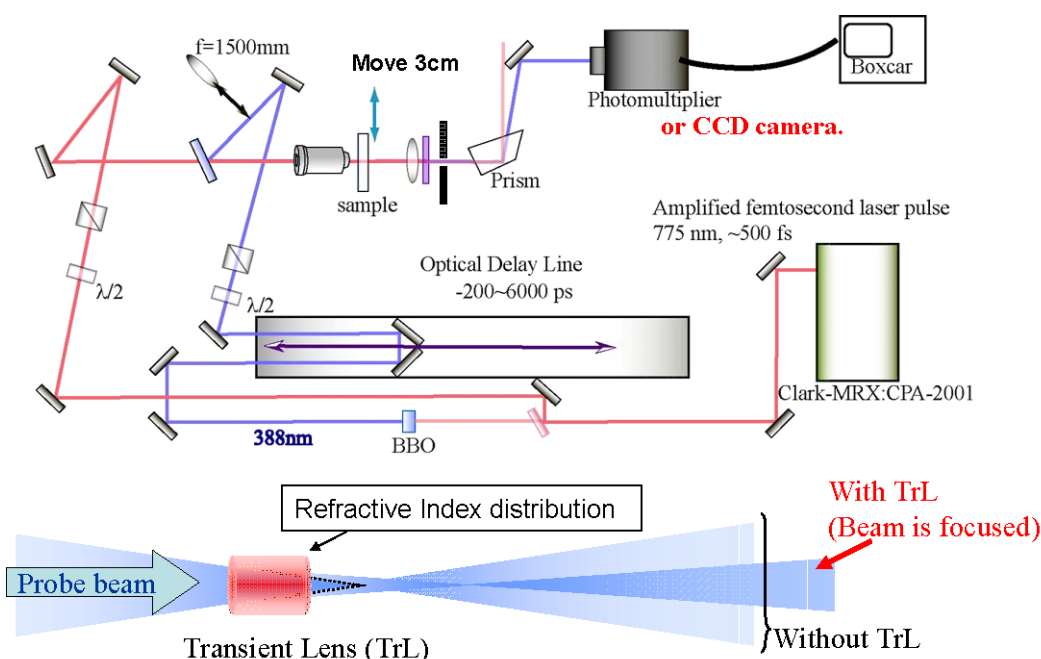


図 II-5 ダイナミクス観測用光学系

## 研究項目 ② 三次元加工システム技術

[加工システム]：ホログラムによる三次元加工システムとガラス加工

### ②-(1) 三次元加工システム技術目標

#### a) 加工メカニズムの解明と機構及び光学システムの構築

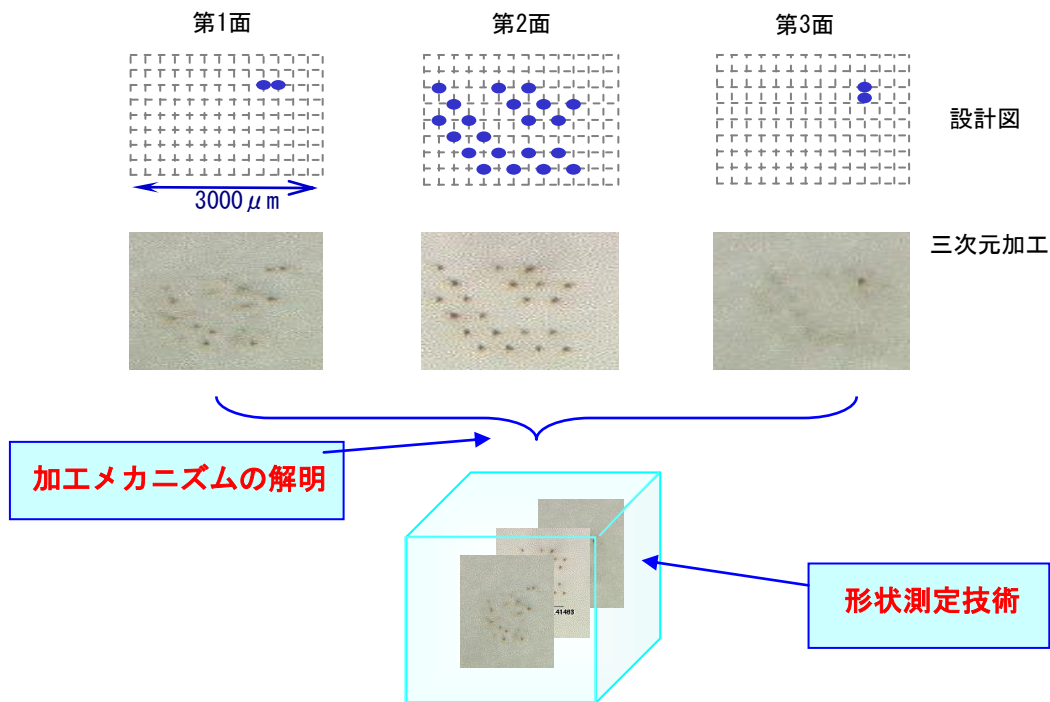
ガラス・ホログラムや空間光変調器を用いた三次元加工を行うためには、フェムト秒パルスレーザーを中心とした光学系・加工系のシステムを検討し、これを用いてレーザー光の強度、パルス幅などと加工形状などとの関係の加工基礎データを収集し、これらのデータから加工のメカニズムを検討し、より高性能に加工できる三次元加工システムを構築する。

## b) 形状計測技術

ガラスの中に作製した三次元導波路などのデバイスの形状やデバイス部の屈折率の評価が必要となってくる。この際に問題となるのは透明体であるガラスに微小な屈折率の変化に基づいてその形状を評価する必要がある。電子顕微鏡を用いる方法もあるが破壊検査となり、また電子顕微鏡でガラス内部の形状を測定することが困難であり、非破壊で形状測定を行える技術を開発する。これには屈折率差を逆に利用する波面位相差検出方式若しくは微分検出方式のいずれかの方法を用い検出能力を上げる。さらにハードのみでなく画像処理のソフトも含んで開発する。

## c) デバイス加工

別途開発するホログラム設計技術を用いてホログラムを設計し、この設計に基づいて別途開発のホログラム作製プロセスにてホログラムを作製し、これにフェムト秒レーザー光を照射し、ガラス中に三次元デバイスを作製する。作製したデバイスは形状計測技術にてその構造を計測し、またその特性を光学的他に関しても評価する。図Ⅱ-6 に加工例を示した。



図Ⅱ-6 CGH を用いた三次元デバイスの作製

〔波面制御〕：ホログラム設計技術、ホログラムの作製技術

## ② - (2) 波面制御三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを、高精度で高速に作製するにはホ

プログラムを使用して一括元的に異質相を形成することが可能となる。このための高精度三次で異質相を形成する方法が有効である。これにより、従来の逐次形成法に比べて高精度で高速に三次元加工システムに必要な高精度ホログラムの製作、ホログラム設計用高速シミュレータ、形状計測技術、等を開発する。

#### a) ホログラムの設計技術 —ホログラム設計の高精度・高速化—

ホログラムを用いて一括照射で三次元導波路を作製するが、ホログラムを効率よく早く作製するためにはホログラム原版の設計も早く行わなければトータルスループットが上がらない。従来の方法では計算機を多数配置し並列処理をしている。それでも100時間程度が見積もられており原版作製からホログラム像を作成するまでに時間がかかった。またフィードバックをかけるにも演算処理が遅いためフィードバックがかけられない状態であった。PCの計算時間が早くなったとはいえ、演算アルゴリズムそのものを変革しなければ設計時間の短縮は望めない。このため高速演算アルゴリズムを開発しトータルスループットを上げる。さらに計算機を並列配置しさらに高速化を図る。図Ⅱ-7にホログラム設計の概念図を示した。



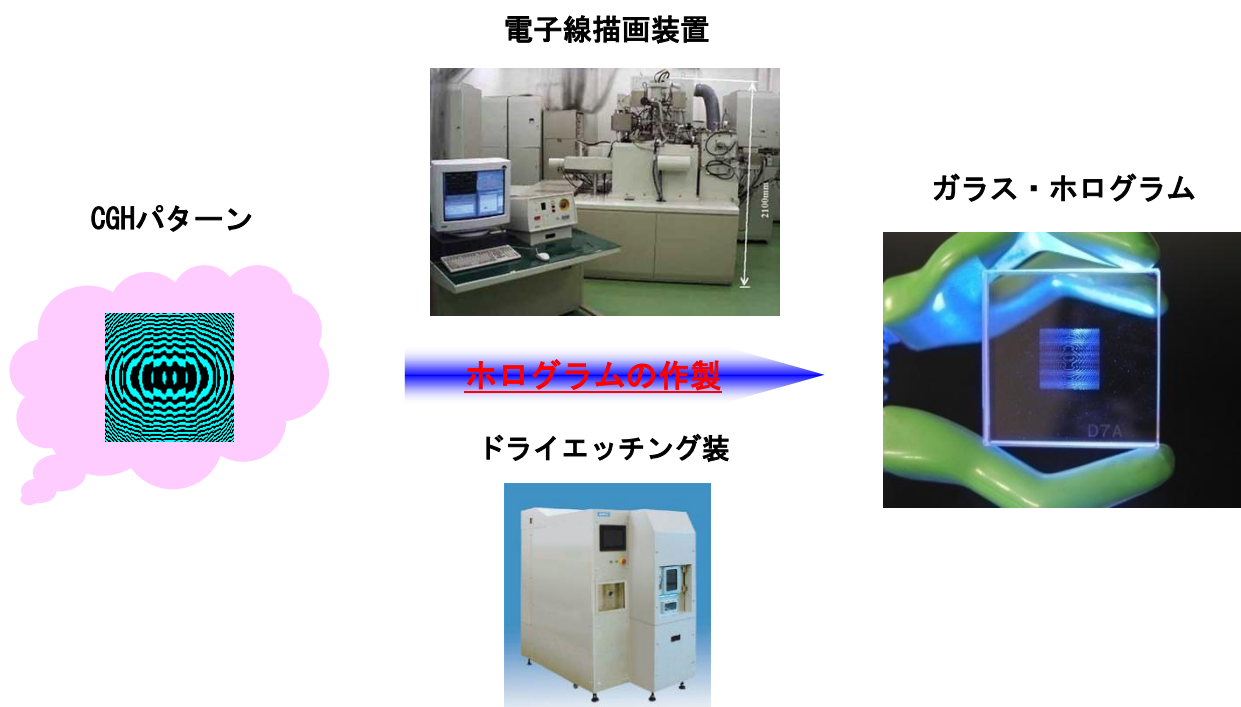
図Ⅱ-7 ホログラムの設計

#### b) ガラス・ホログラムの作製技術 —ホログラム設計の高精度・高速化—

三次元導波路などの繊細なパターンを再生するためのホログラムの性能はかなり高いものが要求される。高精度なホログラムを安定して作製するためには、EB描画によるリソグラフィ技術やドライエッチング技術等の半導体微細加工技術が有効な手段である（図Ⅱ-8）。また、位相情報は階調化して（多段構造として）深さ方向に記録する必要がある。計算によって求めた位相情報から各段のデータを生成し、数回に分けてEB描画とエッチングを繰返し、構造を形成する技術である。これにより高い回折効率を得ることができる。波長に対してホログラムの干渉縞が微細なほど、回折される3次元像の強度分布の均一性が向上し、特に導波路のような境界面の

滑らかさが要求される素子において、その重要性は高まる。

作製したホログラムの形状観察と、ビームプロファイラーによるホログラムによる実像（デバイス形状）観察、および実際にフェムト秒レーザーによるガラスの加工実験を通してその性能を評価し、更なる高性能・高効率化のための方策を検討しながら高性能ホログラムの実現を行なう。



図Ⅱ-8 ガラス・ホログラムの作製

### ②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを作成する場合、三次元的に成形された加工用ビームを順次形状を変化させながら作成する必要が生じる。この場合に有効なレーザーパターンを順次変更できる可変型の三次元加工システムのため、フェムト秒レーザーの高エネルギーパルスに適合しかつ高精細・高変調速度を有する位相変調型液晶空間光変調器（LCOS-SLM）、LCOS-SLMと最適な光学系を融合した光波面制御モジュール、および空間光変調器を用いた波面制御技術を開発する。

フェムト秒レーザー光波面制御モジュールは、フェムト秒レーザー光の位相空間分布を動的に制御するための光学モジュールであり、図Ⅱ-9のように、LCOS-SLM、レンズ、ミラーを組み合わせ構成される。この動的位相制御技術によって、加工面におけるビームパターン生成・ビームの品質向上・焦点位置制御などを行い、加工の速度・精度・機能を向上させようとするもので

ある。LCOS-SLMは波面を制御するデバイスであり、本モジュールの中核部品である。その他のレンズやミラーは、本モジュールを加工システム本体と円滑に光学接続する為のものである。本モジュールの開発に当たっては、これらの構成要素全てがフェムト秒レーザー加工に適した性能（耐光性、応答速度、解像度）を持つ必要がある。特に、本研究では耐光性と応答速度の向上を図る。

現在の基本 LCOS-SLM では、フェムト秒レーザー加工において、反射面が光吸収のあるアルミ電極をミラーとして用いるため、レーザー耐光性が低いという問題がある。アルミ電極上に誘電体多層膜ミラーを用いることでこの問題を解決できると考えられる。加工に用いるフェムト秒レーザーは波長帯域が通常のレーザーよりも広いため、誘電体多層膜ミラーはその全域をカバーする広帯域性と高反射率が必要である。同時に、基本 LCOS-SLM の有する光学的・電気的特性を劣化させない必要がある。このような条件を満足する誘電体多層膜ミラーを製造する技術を開発し、LCOS-SLM のレーザー光耐力を高める改良を行う。また、レンズやミラー等モジュールの他の光学部品のレーザー耐力の向上も行う。

上述のように多層膜ミラーをはじめとした薄膜の研究開発がポイントとなる。LCOS-SLM 用の機能薄膜は LCOS-SLM の電気特性を損なうことなくその光学特性を向上させる必要があるが、このような目的の薄膜研究は文献では見あたらず、開発に成功すれば国際競争力の高いユニークな技術に育つ可能性があると考えられる。この実現には、低温プロセスで、緻密な高屈折率を有する薄膜を作成することが必要である。また、応答速度の向上や位相変調度の向上のために、液晶層や CMOS 回路部の設計や試作、さらに LCOS-SLM の駆動回路についても検討を行っていく。

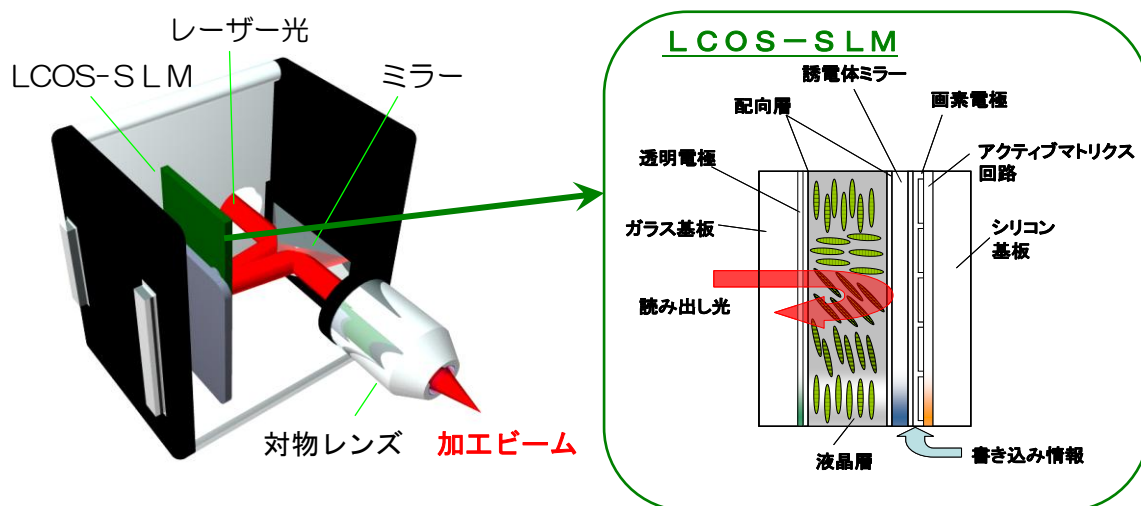


図 II-9 光波面制御モジュールの概念図

### 研究項目 ③ 三次元加工システム応用デバイス技術

三次元光学デバイスと三次元光回路導波路デバイスを、デバイス化加工用ガラス材料と本加工システムにより作製することによりその有効性を確認する。

#### ③-1) 三次元光学デバイス技術

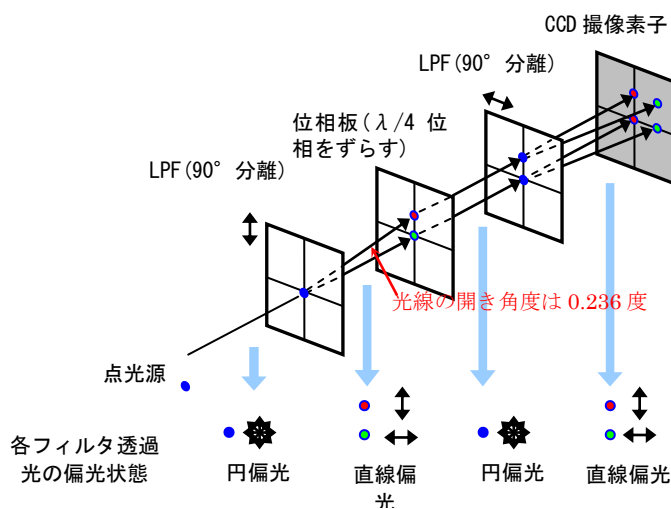
屈折率が母材と異なる異質相を、フェムト秒レーザー照射等によって母材の内部に、二次元あ

るいは三次元状に周期的に、微細、高精度で高速に形成する技術を開発する。これにより超薄型で、低コストで製作可能な光学ローパスフィルタを試作し、本三次元加工システムの有効性を確認する。

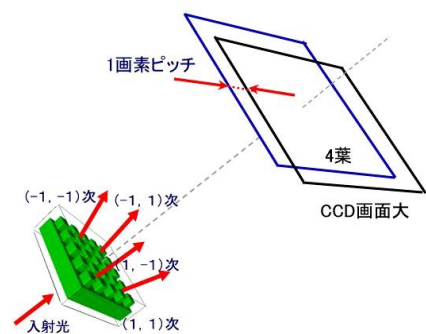
近年、デジタルビデオカメラやデジタルスチルカメラの普及に伴い、光学系のコンパクト化と画素の高密度化が進んでいる。このような固体撮像素子を備えた光学機器では、被写体像を光学的に空間サンプリングすることにより、被写体像の各画素に対応する撮像出力を得ており、取り扱うことのできる絵柄の細かさは撮像素子のサンプリング周波数で決まり、この周波数の半分のナイキスト周波数よりも高い空間周波数成分が上記被写体像に含まれると、折り返しによる偽信号が発生し、被写体の色と無関係な色や、本来見えるはずのない周期模様などが現れる。そこで、被写体の高空間周波数成分を制限するために、水晶の複屈折を利用して被写体像を僅かに分離することにより、低い空間周波数成分に対して極力高いコントラストを維持し高い空間周波数成分のコントラストを下げるようにした光学的ローパスフィルタが使用される。

従来の光学的ローパスフィルタでは、水晶の複屈折が利用されており、一枚の水晶板では一方の光線のみが分離される。一方、デジタルカメラ等では平面に画素が上下左右方向に配列されているため、撮映像を上下方向と左右方向の2方向に分離する必要がある。即ち、図II-10のように直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために1枚の位相板が必要となりフィルタの厚みは数mmとなる。撮像素子の更なるコンパクト化には、これを薄くするためのブレークスルー技術を開発する必要がある。

そこで、従来の光学的ローパスフィルタに用いられている水晶の代わりに、屈折率が母材と異なる異質相を、フェムト秒レーザー一括照射によって固体撮像素子のカバーガラスの内部に、ドット状あるいは円柱状の異質相を二次元あるいは三次元状に周期的に形成し、これにより超薄型の光学ローパスフィルタを試作する。光学的ローパスフィルタの構造は、光学シミュレーションにより異質相形状と光線分離能の相関をとりながら開発する。提案するローパスフィルタの1例を図II-11に示す。



図II-10 2枚の水晶ローパスフィルタと位相板による光線分離の模式図



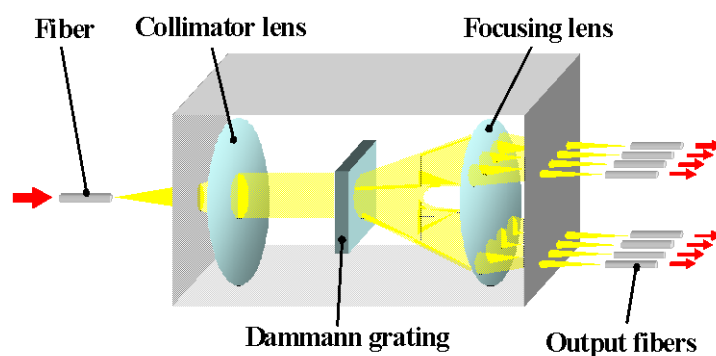
図II-11 提案ローパスフィルタの1例

### ③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

ガラスの中に導波路やそれらの結合した三次元光回路導波路デバイスの一例として光カプラ（スプリッタ）導波路をフェムト秒レーザー照射で作製し、本三次元加工システムが光回路デバイスの作製に有効であることを確認する。

通信や情報処理等、様々なシステムの光ネットワーク化が急速に進展し、本格的な立ち上がりが始まっている光加入者系への各種サービスの早急な対応が求められている今日、低コスト、高性能で光集積化が容易な導波路型の合分岐や合分波器は必須の光デバイスである。

カプラには指向性カプラ、T-カプラ、スターカプラ、対称反射カプラや波長分割多重カプラ等、用途に合わせて様々なものが開発されている。これらのカプラには導波路型平面回路（PLC）を利用したものと融着延伸光ファイバーを利用したものがある。PLCは光の発振・増幅・分岐・スイッチ等の光部品のコストダウンを可能にできる有力手段として注目されているが、フォトリソグラフィとドライエッチングによる従来の技術では立体的な三次元構造を高精度で作製することは困難である。一方、融着延伸光ファイバーでは、3×3の立体的な方向性結合器を用いた干渉計が知られており、干渉計アームの位相変化方向を計測できる等、三次元的な配置をとることで二次元にはない機能を付与させることができる。しかし、光回路構成の柔軟性や量産性を考えた場合、形態としては光導波路で集積されたものが望ましい。フェムト秒レーザーの集光照射によりガラス内部に三次元的な光導波路回路が形成できることが知られているが、従来の逐次描画法では量産性や加工精度に問題が残る。本研究では、これらの問題を解決するために、従来法である逐次描画法により作製されていた導波路、Y分岐導波路、Dammann型回折格子、フォトニック結晶構造やバイナリーレンズ等を同一ガラス内部に一括描画（図Ⅱ-12参照）することで、量産性に優れた三次元光カプラの作製し、本三次元加工システムが光回路デバイスの作製に有効であることを確認する。



図Ⅱ-12 三次元光回路イメージ



## II. 研究開発マネジメントについて

### II. 2 事業の計画内容

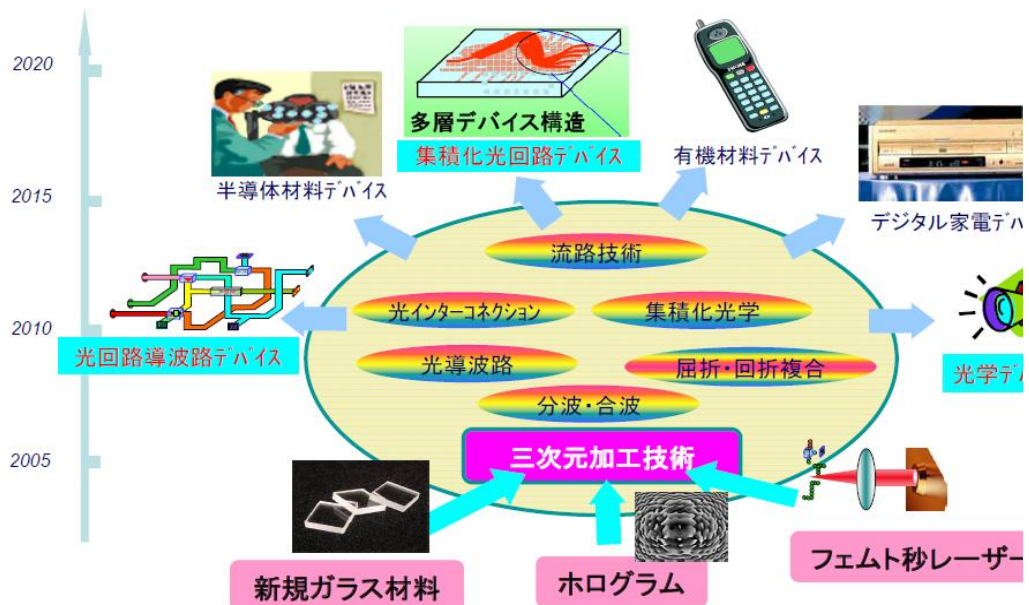
#### II. 2.1 研究開発の内容

##### II. 2.1.1 事業全体の計画内容

ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化、省エネ化等のニーズに対応するためには、今後ますます高機能化が求められる。ガラスは結晶材料に比べ、組成の選択範囲が連続的で広く、かつ構造の自由度が大きい。このため組成と構造の多くの組み合わせが可能で、それに伴い種々の潜在的特性・機能があると考えられる。しかし従来技術は、組成の制御と熱処理等、マクロな構造制御に終始しており、ごく一部の特性や機能しか実現できていない。ガラスが本来有している潜在的な特性や機能を有効に引き出すためには、ガラス母材とはその物性の異なった異質相をガラス内部に作製し積極的に新たな機能をガラスに誘起する必要がある。このような基盤技術の開発は「ナノガラス技術」プロジェクトで実施されてきた。

本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトで得られた基盤技術を実用的な加工技術へと発展させるものであり、フェムト秒レーザー等と波面制御技術等を組み合わせ、加工の高精度化によるデバイス特性の向上と加工の高速化による製造コストの大幅な低減を目指すものである。また本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持

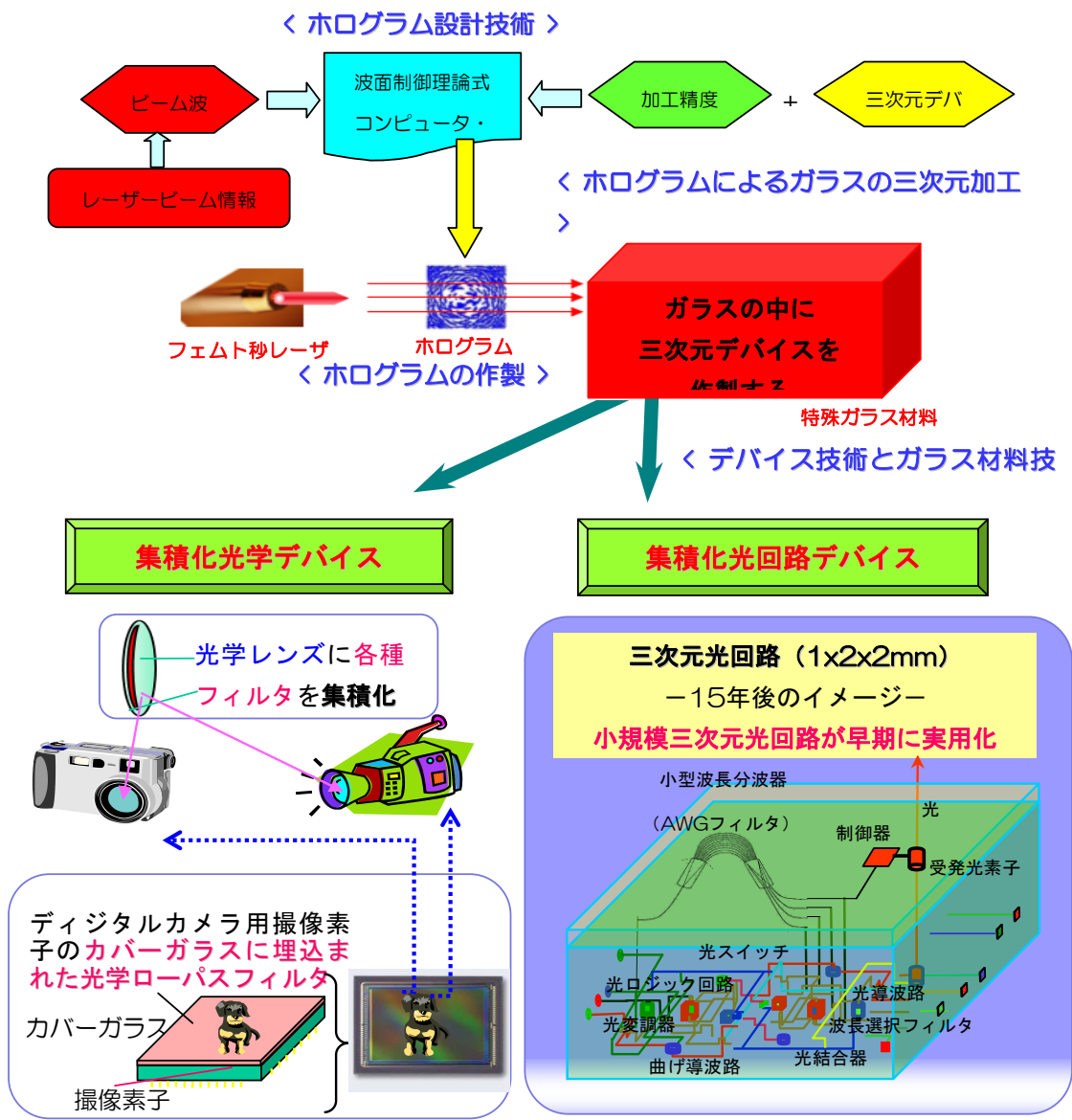
### フェムト秒レーザー・一括加工による製品イメージ



図II-2.1 プロジェクトの全体イメージ

つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。プロジェクトの全体イメージを図Ⅱ-1.1に示す。事業全体の計画としては、平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、①デバイス化加工用ガラス材料技術、②三次元加工システム技術として、波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術等を確立する。また具体的なデバイスへの適用を前提に、③三次元加工システム応用デバイス技術として、三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性を実証する。

本研究開発の三次元加工システム技術の内容を図Ⅱ-1.2に示した。図において、超短パルスレーザーであるフェムト秒レーザーを波面制御素子であるホログラムに照射し、これによってできた三次元形状の実像をガラスの中に作成する。結像した部分のガラスの屈折率が変化し、ガラスの内部に三次元形状を作ることができる。フェムト秒レーザーを用いると原子・分子が振動する一瞬の時間で加工できるために熱の影響を受けにくく高精度な加工ができる。またホログラムを用いることにより一度に大きなエリアを加工することができ、三次元光デバイスを高精度に低コストで効率よく造ることができる。



図Ⅱ-2.2 フェムト秒レーザーによる三次元一括加工概要

## Ⅱ. 2.1.2 全体スケジュールと予算

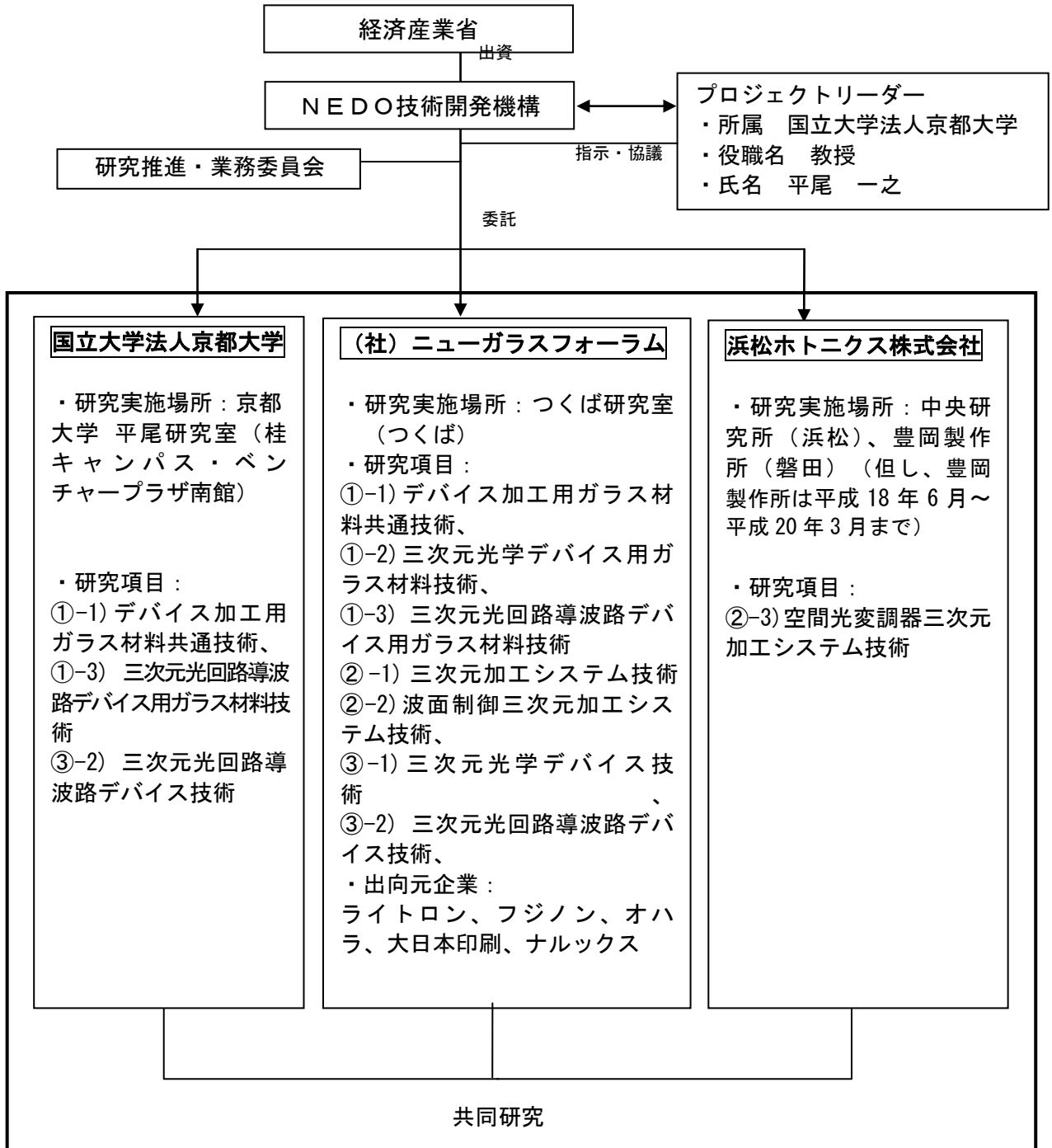
(内数)：追加予算

研究開発項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	計
①デバイス化加工用ガラス材料技術	89	90 (+18)	62	57	40	338
(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標	各種ガラスのレーザー加工性の検討とそのデータベース化					
(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術	→					
(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	デバイス別ガラス組成の最適化検討・試作		デバイス動作確認によるガラス組成の再検討・試作			
②三次元加工システム技術とデバイス	247	226	173	166	115	927
(1) 三次元加工システム技術	→			→		
	加工システムの構築 加工基本情報の取得			加工システムの改良		
(2) 波面制御 三次元加工システム技術	→			→		
	ホログラム設計技術の開発 ガラス・ホログラムの作製プロセスの開発			ホログラム設計技術の改良 ホログラム作製プロセスの高精度化		
(3) 空間光変調器 三次元加工システム技術	→			→		
	空間光変調器と波面制御モジュールの試作			空間光変調器と波面制御モジュールの改		
③三次元加工システム応用デバイス技術	56	59	105	90	80	390
(1) 三次元光学デバイス技術	→			→		
	光学ローパスフィルタの設計と試作による基本動作の確認			一括加工システムによるデバイスの作製及びその性能の確認と改良		
(2) 三次元光回路導波路デバイス技術	→					
	光導波路の基本性能の確認					
開発予算 (単位：百万円)	392	375	340	313	235	1655

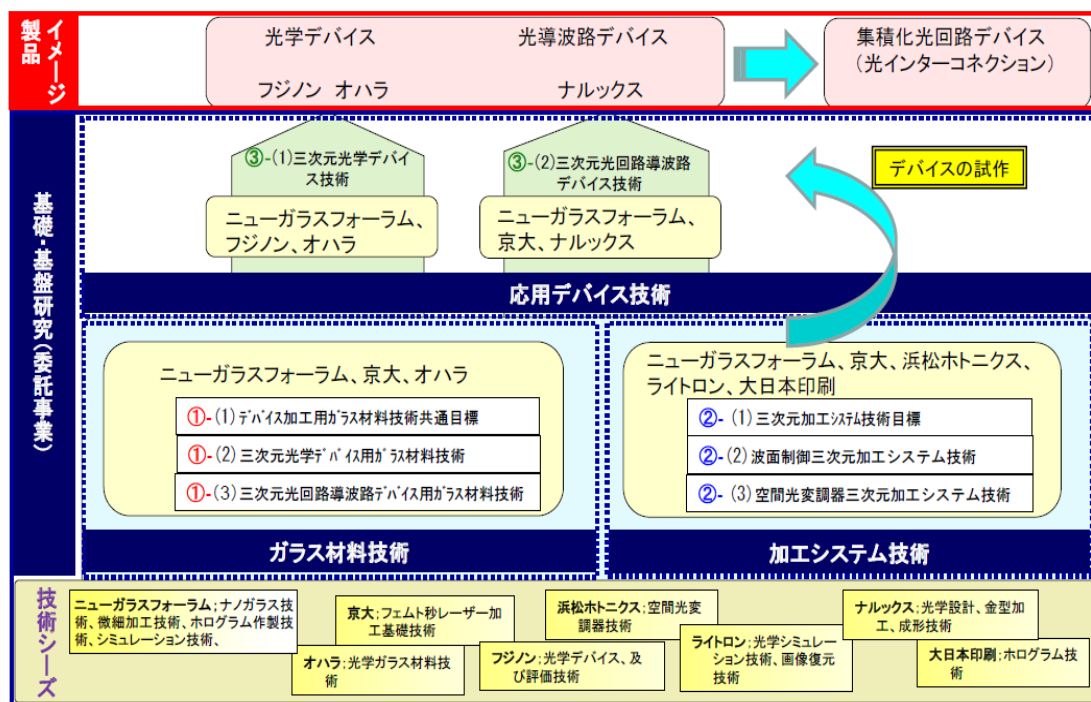
プロジェクト推進における重点化について：平成 18, 19 年度のプロジェクト前半は材料技術を、平成 21, 22 年度後半には加工システムの高性能化とデバイスの試作を重点化して研究開発を進めた。

## II. 2.2 研究開発の実施体制

### II. 2.2.1 実施体制



研究開発項目①～③の位置付けを図Ⅱ-13に示す。



図Ⅱ-13 研究開発項目①～③の位置付け

## Ⅱ. 2.2.2 共同研究先と出向元企業のプロフィール

### [大学]

#### 国立大学法人京都大学大学院工学研究科材料化学専攻

京都大学では早くよりフェムト秒レーザーの高いピークパワーに着目し、フェムト秒レーザーをガラスのような透明材料内部の加工ツールとして利用する研究をスタートさせた。その結果、フェムト秒レーザーとガラス材料との相互作用により生じる屈折率変化、イオンの価数変化、金属、半導体や非線形結晶の析出等、多くの構造変化をガラス内部に誘起させることに成功している。

更に、近年ではフェムト秒レーザー照射直後のガラス状態を調べることで、構造改質のオリジンを明らかにする研究も行っており、フェムト秒レーザーの集光照射により焦点近傍では光イオン化によって生じたプラズマの消失による急激な温度と圧力の上昇、およびそれに伴う圧力波の発生を世界に先駆けて確認している。これらの研究実績と経験・知識は本技術の遂行において非常に有効であると考えられる。

### [企業]

#### 浜松ホトニクス株式会社

本プロジェクトで使用する空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) の研究開発を1980年代初期から長年に亘り行ってきた。その間に、光電面をアドレス部とし、光変調

部として電気光学結晶板(LiNbO<sub>3</sub>)を用いた真空管方式の空間光変調管(MSLM: Microchannel Spatial Light Modulator)やアモルファスシリコン(a-Si)をアドレス部として用い、液晶分子を基板に平行に配向したネマチック液晶層を光変調部とした平行配向液晶空間光変調器(PAL-SLM: Parallel Aligned nematic Liquid Crystal Spatial Light Modulator)を開発した。引続き、液晶ディスプレイ(LCD)とPAL-SLMを最適設計された光学系で結合し、画素間の非連続性を光学的手法により除去した光利用効率の高い電気アドレス型空間光位相変調器モジュール(PPM: Programmable Phase Modulator)を開発した。

## 【社団法人ニューガラスフォーラム出向元企業】(アイウエオ順)

### 1) 株式会社オハラ

主に溶融急冷法によりガラスの試験溶解を行い、レンズ光学系用途の光学ガラスや、各種新規用途の結晶化ガラス材料の組成開発を行っている。

フェムト秒レーザーの集光照射によりシリカガラス内部に形成された微小空洞を利用した微小光デバイスの研究において、照射パルス光強度と微小空洞形成に関して、また空洞を利用した回折格子の光波伝播特性の挙動の解明に関する研究を行っていた。

### 2) 大日本印刷株式会社

最先端半導体製造技術フォトマスクを製造しており、超微細な合成石英加工技術を蓄積している。最近では、種々フォトマスク構造が用いられるため、多段構造の加工技術も備わっている。このような技術は、もともと社内で展開しているホログラムの原版の製造へも展開されている。

また、(社)ニューガラスフォーラム向け3次元加工ホログラムの試作を行い、2002年秋の応用物理学会にてその結果が公表されている。

### 3) ナルックス株式会社

光学設計、光学薄膜などの技術をシーズに高度化する市場要求に対応した商品開発量産実績や次世代の商品や要素技術課題について産官学連携の研究を多数行い、数々の新しい市場や技術を創出リードしている。本研究の出口テーマの1つである光通信分野においても当社の技術シーズである各種の光学、形状設計技術や金型加工/成形技術を用い例えばRa数nm精度の量産技術を確立し次世代の光結合分波素子やWDM光通信用波長分散補償システムなどの市場投入を実現している。

### 4) フジノン株式会社

ホログラムの応用については以前から、非球面形状測定、光記録などへの応用を考慮した研究を行っており、光学デバイスの評価に関しては長年の蓄積技術がある。本研究で必要となるモアレ測定などの高額評価技術を所有している。また、モアレ対策で使用されるカメラの光学部品などの製造も行なっている。

ガラスについては、その使用に当たって材料分析、光学特性解析などを行っている。

## 5) ライトロン株式会社

光学関係の製品及びソフトウェアの開発を行ってきた。ソフトウェアでは光のシュミレーションソフトであるPARTIALというソフトを開発し販売してきた。この中に回折演算を行う部分があり、多重積分を短時間で演算できる。今回のホログラムを用いた方法では、多重積分をいかに早く演算するかにかかっているため、この技術を十分に応用できる。また、画像復元のアルゴリズムを持っており、三次元デバイスの形状測定技術の開発に寄与できる。

## 6) 社団法人ニューガラスフォーラム

ニューガラスに関する技術開発等に関する情報の収集・提供、調査研究、国際交流、並びにニューガラスに関する、特にナノガラスに関する研究を進めている。2000年度から始まったナノガラス技術プロジェクトにおいては、12サブテーマの多分野に及ぶ基盤技術の研究を進めてきた。これらの研究の一部を早期に実用化できるように本プロジェクトではその実用化に必要な基盤技術の研究開発を推進している。また、これ等の研究のために専任の研究員を雇用し成果を早期に世の中に普及できるように努力している。

この他にも「ガラス構造データベース」や「革新的省エネルギー溶解技術」などの国家プロジェクトを提案、受託しており、特にガラスデータベースは INTERGLAD と称し、ニューガラスの開発を支援するツールとして1991年からバージョンアップを重ね世界中に配布を続けている。



## II. 2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権を持つNEDOは、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに、本プロジェクトの目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させた。

NEDOが実施・管理を行う当該プロジェクトの、より効率的な研究開発の推進を図るため、研究開発の現場において指示・指導・調整の任にあたる研究者であり、実施者の一員として自ら研究開発に携わる他、研究開発計画原案の策定、研究成果のとりまとめ等の役割を担う研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として京都大学 平尾一之教授のもと、本プロジェクトを推進した。

本研究開発を効率的に実施するため、国立大学法人京都大学、浜松ホトニクス株式会社、及び社団法人ニューガラスフォーラムとの間でそれぞれ包括的な「共同実施契約」を締結し、有機的に結合し研究を実施した。なお社団法人ニューガラスフォーラムは、株式会社オハラ、大日本印刷株式会社、ナルックス株式会社、フジノン株式会社、ライトロン株式会社からの出向研究員による集中研究室を構成し、自らも研究員ならびに研究補助員を雇用して研究開発にあたった。

まず、プロジェクトリーダーの役割を以下に挙げる。

### 1. 組織関係

- (1) 研究体の研究室の設置、廃止等の組織構成の決定。
- (2) 研究体の室長、研究リーダーの選任と解任。

### 2. 研究体所属研究者関係

- (1) 京都大学、浜松ホトニクスおよびニューガラスフォーラムが提出する研究者候補リストの中からの研究体所属研究者の選任。
- (2) 研究体所属研究者の任期の設定および変更に関する調整。
- (3) 研究体所属研究者の担当研究項目の決定。
- (4) その他研究体所属研究者の総合的な統括。

### 3. 予算、研究場所、研究設備および装置等

- (1) 実施時における予算の配分の調整。
- (2) 研究体の活動に割り当てられた研究場所の配分、模様替え等の調整。
- (3) 研究設備および装置等の使用範囲等の調整。

### 4. 研究計画および報告

- (1) 年度毎概算要求案の策定。
  - ① 年間研究計画書案の策定。
  - ② 実施計画書案の策定。
- (2) 研究計画の変更
  - ① 実施計画書変更申請案の策定。

(3) 軽微な研究計画の変更

- ① 実施計画書変更届出書の策定。

(4) 研究経過の報告

- ① 成果報告書案の策定。  
② その他必要に応じた研究報告書案の策定。

(5) 研究終了報告

- ① 研究終了報告書案の策定。

5. 研究評価

- (1) 研究内容の研究体内での評価。  
(2) 研究者の研究体内での評価。

6. 研究成果

- (1) 別途定める研究体運営規則の施行およびその遵守に関する指導管理。  
(2) 論文発表等による公開を、知的所有権による保護に優先させるか否かの判断。

7. 第三者との共同研究、研究者等の招聘

- (1) 第三者との共同研究の実施と管理。  
① 共同研究および共同研究契約に対する要望事項の取り纏め。  
② 共同研究契約書案の策定。  
③ 各種報告書案の策定。  
(2) 外部研究者の調整および選任。

8. その他

- (1) 研究体の研究活動推進のための総合調整。  
(2) 経済産業省、NEDO、京都大学、浜松ホトニクスおよびニューガラスフォーラムに置かれた各種関係会議への対応、総括。  
(3) ワークショップ、シンポジウム等、関連事業計画の策定および実施。

また、上述したプロジェクトリーダーのミッションの一部は、以下のように京都大学、浜松ホトニクス、及びニューガラスフォーラムなどと連携し、実施されてた。

【研究計画の策定】

「研究推進・業務委員会」を設置し、本プロジェクトの年間計画を策定した。委員長をプロジェクトリーダーとし、委員は共同研究先である京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラム、およびニューガラスフォーラムで集中研を構成する株式会社オハラ、大日本印刷株式会社、ナルックス株式会社、フジノン株式会社、ライトロン株式会社の代表者から構成した。プロジェクトリーダー、及び京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラムを代表する3名のサブ・リーダーとが年間研究計画の原案を作成し、それについて研究推進・業務委員会で討議し、策定した。

#### 【研究の評価・管理】

- ① R&D 検討会を年3回定期的に開催し、京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラム集中研の各研究担当者が担当分野の報告を行った。これに対してプロジェクトリーダー、サブ・リーダー、研究リーダーが研究担当者と研究成果について議論し、進捗チェックと研究の方向付けを行った。
- ② 原則年2回の「研究推進・業務委員会」で研究体運営管理に係る情報交換、研究開発状況、外部成果発表実績等を報告し、計画に対する進捗を確認した。
- ③ プロジェクトリーダーは、必要に応じ適宜、電話、e-mailにてサブ・リーダー、研究リーダー、及び研究者から情報を受け、それに対して指示した。
- ④ 予算作成時、プロジェクトリーダーは、サブ・リーダーと相談し予算を作成した。

#### 【成果報告】

- ① プロジェクトリーダーが、京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラムの各サブ・リーダーから研究成果報告を受けその内容をチェックした。その後、各サブ・リーダーを中心に「研究成果報告書」として纏めた。
- ② 論文、新聞発表に際しては、プロジェクトリーダーが承諾の最終判断をした。

#### 【その他】

出向元には、研究成果を出来るだけ早く実用化する契機を造ることを目的に、研究リーダーをおいた。これにより、早期実用化を進めて行った。また、研究リーダーとサブ・リーダーとの定期的な会合をもった。

## Ⅱ. 2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

### 1. 成果の実用化可能性

#### (1) 三次元光学デバイス（光学ローパスフィルタ）

モアレの低減が確認できた。更に改善した一括加工を進めると同時に、モアレ以外の光学特性をも含めて実用化の観点から問題点の抽出を継続研究で行い、問題が無ければ実用化の検討を行っていく。

#### (2) 光インターコネクション

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光インターコネクション用として発展させ、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

#### (3) 光結合器

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光結合器などとして発展させて、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

#### (4) LCOS-SLM

開発してきた LCOS-SLM で適応できる分野での実用化を検討する。

#### (5) プロジェクトで開発してきた下記についても早期に市場に出るよう検討したい。

- ・ホログラムシミュレータ・ホログラム加工プロセス
- ・三次元屈折率差測定機能付き形状測定器

#### (6) ホログラムを使用した特殊材料の高速、微細加工の問い合わせがきており、新規分野が開拓できる可能性が高い。

#### (7) ホログラムとフェムト秒レーザーを使用した加工に興味を持ち、その市場開拓に協力を申し出られている企業が複数でてきている。

### 2. 波及効果

プロジェクトで得られた成果は、

- ①三次元ホログラムの設計法、
- ②ガラス・ホログラムを使用した高耐光・高速一括加工法、
- ③光軸方向に伸展しないホログラム加工法、
- ④レーザー加工の容易なガラス材料、
- ⑤高速加工が可能な光学デバイス設計法、
- ⑥低光エネルギー加工が可能な加工法

などが挙げられる。これ等は汎用性があり、今後いろいろな分野での応用展開が期待できるものである。

その対象として、1. 実用化の見通しについてに記載した(1)から(5)は勿論のこと、(6)、(7)への適用が挙げられ、従来 デバイス加工が不可能と言われていたものも低コストでの作製が可能となる。

更に、上述の得られた成果①から⑥の内、半数以上はホログラム加工とは独立に利用できるものであり、より汎用性の高い技術であり、様々な分野に波及するであろう。

### II. 3 情勢変化への対応

日本経済の活性化を目指す、内閣府(総合科学技術会議)において検討中の革新的技術戦略(平成20年4月10日)における高速大容量通信網技術—オール光通信処理技術—の一部として「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトが登録された。この革新的技術により、スイッチ・経路処理を含め、ネットワークのオール光化技術により、爆発的に増大する情報を処理可能とする一方で、ネットワークにおける電力効率を数十倍程度向上した超高速基幹ネットワークの構築が可能となる。また、次世代イーサネット規格等の国際標準の獲得も目指した技術確立等により、我が国の国際競争力が強化される。

これに対応すべく、三次元光デバイス高効率製造技術の研究開発を従来以上に活発に進めていく。

・平成19年度(18,000千円)(加速財源)

三次元光デバイス高効率製造技術では、可能な限り広い領域において一括加工できるガラス材料(ガラス種や組成比)や加工システムの開発が重要な課題の一つである。京大では一括描画に適したガラス材料と描画方法を中心とした基礎検討を実施している。これらの検討課題においては、実際に数ミリ角以上の面積を加工しながらガラス材料とレーザーとの相互作用プロセス解明や異質相形成の閾値測定等を実施する必要がある。そのためには、可能な限り(パルスエネルギーが大きくなれば加工面積は広がるが、僅かに集光しただけで容易にブレイクダウンを起こし、大気中でのビームの取り扱いが困難となる。)大きなパルスエネルギーを有するフェムト秒レーザーが必要であり、平成19年度はF21からの移管物品であるフェムト秒レーザーシステムのバージョンアップ(エネルギー増幅装置追加)を実施した。その結果、繰り返し:10Hz、パルス幅:100fs、波長:800nmにおいて100mJ(従来の100倍、パワー換算にて1TW)のパルスエネルギーを確保することが可能となった。

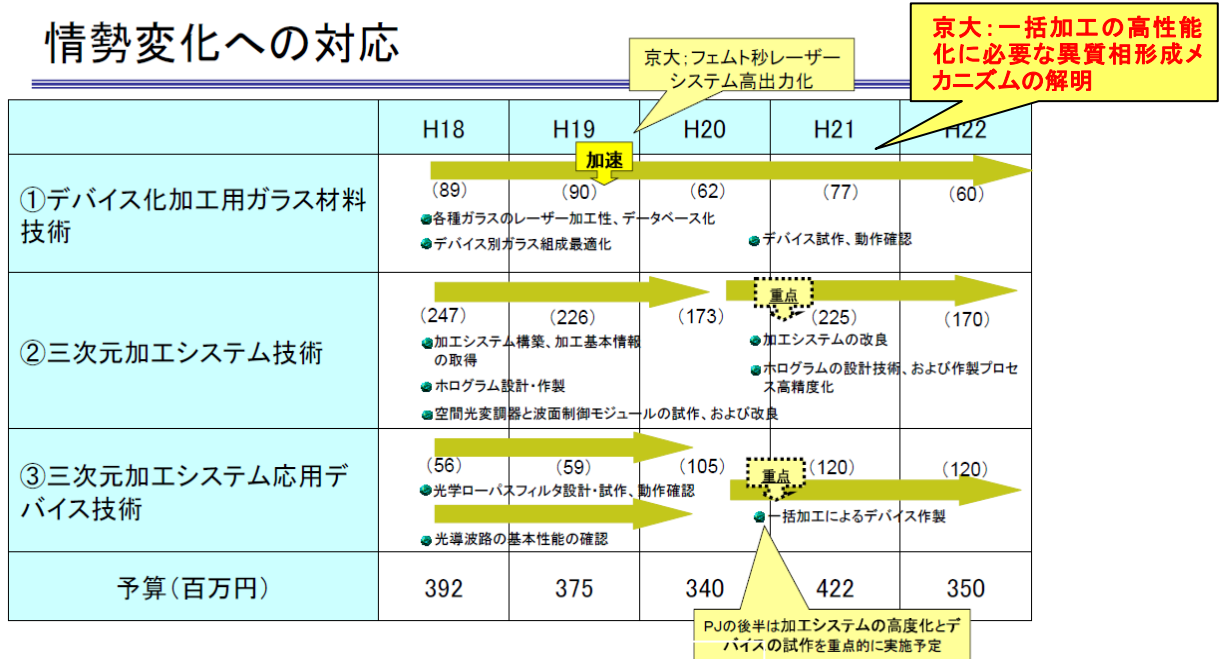


図 II-15 情勢変化への対応

#### 4. 中間評価結果への対応

中間評価時の指摘事項とそれに対する実績の概要を以下に示した。

##### 指摘事項 1. 基礎的な技術開発にも注力すること。

###### ●京都大学 対応

- ・“LCOS-SLM を利用し、曲線導波路、分岐導波路を一括描画するためのホログラム作成方法の基礎検討（アルゴリズム等）を行った。

###### ●ニューグラスフォーラム 対応

- ・レーザー光とガラス材料との反応の素過程を考察し、上述の入射方向への伸びの少ない加工技術を開発した。また、低エネルギーで加工できる技術を開発した。
- ・デバイス作製時の加工エネルギーが少ない新型光学素子の基礎的検討と素子の試作を行い、その機能を確認した。

##### 指摘事項 2. 光集積回路の実現においてアクティブ素子を如何にして実現するか。

###### ●ニューグラスフォーラム 対応

- ・アクティブ素子実現のための基礎実験を行った。
- ・フェムト秒レーザーの照射部のみが発光する条件を発見した。この現象を利用するとレーザー発振の可能性があるが、これには数センチメートル以上の長さの光導波路が必要である。これはホログラムを使用した一括描画で作製できる。

##### 指摘事項 3. ホログラフィック加工に並行してその他の要素技術をどうするか。

###### ●ニューグラスフォーラム 対応

下記の種々の技術を開発した。

- ・高速長尺ホログラフィック加工による穴あけ技術の要素技術を開発した。技術の適用先としては電気インターコネクションや光インターコネクション等に使用される。
- ・ホログラフィック加工と光学系を組合せた微細三次元加工システム技術を開発した。
- ・レーザー光の入射方向への伸びを抑える技術を開発した。
- ・レーザー光を有効に使用できる材料作製技術を開発した。

## Ⅱ. 5 評価に関する事項

NEDO は、国の定める技術評価に係わる指針及び NEDO が定める技術評価実施要領に基づき、技術的及び実用化の観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 20 年度、事後評価を平成 23 年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

### 参考文献

#### Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

- 1) 技術戦略マップ 2008 (ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他)、平成 20 年 3 月、経済産業省
- 2) 技術戦略マップ 2008 (ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他)、平成 20 年 4 月 22 日、NEDO
- 3) 革新的技術戦略、平成 20 年 5 月 19 日、総合科学技術会議
- 4) 平尾一之他：機能性ナノガラスの最新技術と応用、シーエムシー出版、東京、4 (2003) .
- 5) 田中修平：「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス高効率製造技術」へ、NEDO 特別講座第 1 回シンポジウム、平成 18 年 9 月 27 日
- 7) 田中修平：「ナノガラス技術」の光デバイスへの実用化展開— 三次元光デバイス高効率製造技術 —、日本光学会第 37 回研究会、予稿集、平成 19 年 4 月 20 日



### Ⅲ. 研究開発成果について

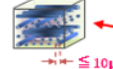
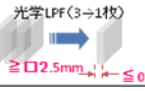

#### 1. 事業全体の成果

##### 1.1 研究成果の目標、研究開発成果、達成度

研究は、順調に進捗し、最終目標を達成した。表Ⅲ-1に、研究開発項目毎の最終目標に対して得られた成果、達成度、及び今後の課題を示す。従来の論文等で報じられていない成果も得られ、世界に先駆けてフェムト秒レーザーと波面制御技術による三次元一括加工システムを構築した。さらに、加工システムを検証するための2つの応用デバイステーマのうち、1デバイスに関しては関連業界の企業から採用を考えた引合いがあり、早期実用を念頭に置いた展開が必要になった。これに関しては、て実用化に更に近づけるための継続研究を実施することとなった。この成果については、ナノテク2007及び2008（国際ナノテクノロジー総合展・技術会議）において展示発表するとともに新聞発表を行った。また、ベルギーで開催された国際会議14<sup>th</sup> Microoptics Conference (Brussels-Belgium)にて Best Paper Awardを、“Three dimensional holographic micropatterning inside silica glass by single pulse femtosecond laser”の発表に対して、受賞した。その他、プロジェクト後半では、ホログラムによる加工技術が知られるようになり、海外で開催された国際会議での発表を国内で発表するように要請されたり、国内での発表を聴講した国内企業から具体的案件で実用化に関する問い合わせがくるようになった。

また、内閣府（総合科学技術会議）において検討された革新的技術戦略に「三次元光デバイス高効率製造技術開発」が「高速大容量通信網技術－オール光通信処理技術」に登録された。

表Ⅲ-1 研究開発項目毎の最終目標に対する達成度

研究開発項目	最終目標	成果 / 達成度	今後の課題		
①デバイス加工用ガラス材料技術	(1)デバイス加工用ガラス材料技術共通目標	<b>自主目標:</b> 異質相形成メカニズムの解明、データの体系化(異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性)	メカニズム解明。異質相形成の材料依存性を確認/◎	新規異質相(元素分布形成等)の可能性探索	
	(2)三次元光学デバイス用ガラス材料技術	 異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.015$ 可視光領域(400-760nm)	$\Delta n = 0.015$ を實現と同様に従来比1/8の短時間加工を實現/◎	モレ除去用光学ローパスフィルタ用ガラス材料の実用化を検討(継続研究)	
	(3)三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	 9µm 直線導波路(三次元加工システムで作製)	光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55µm ◎Single Mode	多点一括描画光導波路において0.1 dB/cm以下の光導波路描画が可能である材料を選定/◎	更なる低損失、低閾値が期待できるガラス材料の探索。
②三次元加工システム技術	(1)三次元加工システム技術目標	60µm × 60µm × 60µm  100個以上の球状異質相 球状異質相 球状異質相 ≦10µm	100個以上の高速加工を實現	100個の点状異質相を一边60µmの立方体内に50f以下で實現。100倍以上の高速加工を實現/◎	レーザー照射方向への伸長が2µm以下に制御できた。今後、各種デバイスの実現に適用する。(継続研究)
	(2)波面制御三次元加工システム技術	 ホログラム 加工精度 $\leq \pm 40\text{nm}$ 設計速度 $\geq \times 10$ (従来比)	加工精度 $\leq \pm 40\text{nm}$ 設計速度 $> 12$ /◎	更に高精度で複雑なホログラムの設計と製作(継続研究)	
	(3)空間光変調器三次元加工システム技術	空間光変調器: 変調速度 50Hz 光位相変調度 $\geq 2\text{mrad}$ (0~2mで制御可) 耐光性 $\geq 50\text{GW/cm}^2$ (100fs, 1kHz)	左記の目標仕様を有する空間光変調器を内蔵する光波面制御モジュールとそれを用いた波面制御技術を實現した/◎	特になし	
③三次元加工システム応用デバイス技術	(1)三次元光学デバイス技術	光学LFF(3→1枚)  ≧□2.5mm ≦0.3mm	一括描画で確認 2軸軸開き角 $> 0.236^\circ$ モアレ抑制の確認	10 × 8 × 0.26mmのガラス基板に作製、モアレ抑制効果を確認/◎	更なる高速加工の實現と実用化を検討(継続研究)
	(2)三次元光回路導波路デバイス技術	直線導波路  9µm	光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55µm ◎Single Mode 三次元光カプラ: 1 × 16 挿入損失 $\leq 17\text{dB/cm}$ 反射減衰量 $\geq 45\text{dB}$ 波長1.50~1.60µm	内部伝送損失が0.1 dB/cm以下の光導波路が描画可能であることを確認。1 × 16グレーティング型分岐回路作製/◎	グレーティング型分岐回路の回折ロスから最終目標と同等以上の性能が期待できるので、実装評価を行う。

◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

## 1.2 事業全体の概要

詳細は「2.研究開発項目毎の成果」で述べるが、その概要は以下のとおりである。

### 【研究項目①デバイス化加工用ガラス材料技術】

#### 1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

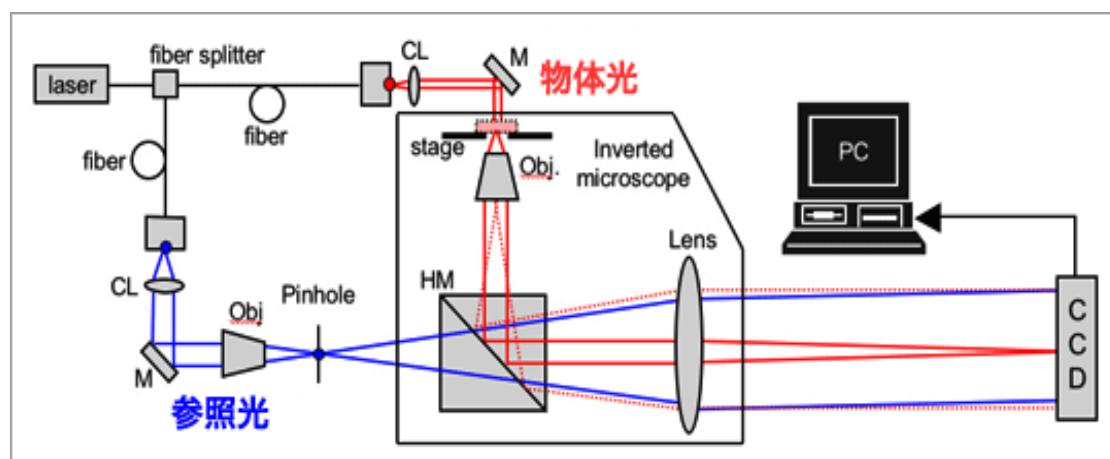
密度変化による異質相形成（屈折率変化）のメカニズム解明に引き続き、元素分布形成による屈折率変化の屈折率制御の可能性とメカニズムの解明を実施した。その結果、元素分布の様子はガラス材料を構成している元素の組み合わせにより変化し、SiO<sub>2</sub>を主成分とするシリケートガラスにおいてはSiが中心に集まる傾向にあることがわかった。Si濃度の増加は、結果としてレーザー照射領域中心が低屈折率化することを意味する。そこで、網目形成酸化物が異なる様々な組成のガラスについて元素移動を系統的に調べ、リン酸塩ガラスとホウ酸塩ガラスにおいて、中心が高屈折率化可能であることを確認した。元素分布が形成される領域はガラスが融液に近い領域であり、閉じられた空間における高温かつ急峻な温度勾配が元素分布形成において重要であることを確認したので、この知見をベースにシミュレーションを実施することで、メカニズムの解明を実施した。高繰り返しフェムト秒レーザー照射中に、集光点近傍の温度が数千°C以上に上昇し、かつ1 μmあたり数十°C以上の急峻な温度勾配が生じていることを確認し、この温度勾配の結果をもとにシミュレーションを行った。結果、分子動力学法において温度勾配を支配的な駆動力としたシミュレーションを行うことで、実験結果における元素分布の特徴が非常に良く再現できることが確認でき、元素分布形成メカニズム解明における重要な指針を示すことができた。

To investigate the energy dissipation process after a femtosecond laser irradiation inside various glasses, the refractive index dynamics in the laser focal region were observed. On the basis of the results, the mechanism of the refractive index change with a femtosecond laser was clarified. These results will be important indicator for the development of suitable glass compositions as well as the construction of the basic data. When a lot of laser pulses are focused at high repetition rate (more than several hundred kHz), the released heat is accumulated around the photoexcited region. Under such a condition, the elemental distribution of a ring shaped pattern can be formed in a glass. It was shown that the refractive-index can be controlled by the formation of element distribution. It was concluded that steep temperature gradient, localized high-pressure, and the generation of the shock wave should be considered important components for the formation of the elemental distribution. We found that the tendency in the elemental distribution depended on the strength of the bond between cations and oxygen ions. This migration phenomenon might largely be due to the thermomigration (Soret effect).

#### 2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

本研究では、光学ローパスフィルタをターゲットデバイスとした光学デバイス加工用材料

の開発を目的としている。フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に形成される異質相の母材との屈折率差 ( $\Delta n$ ) とその分布の情報を光学デバイスの加工や設計にフィードバックするためには、それらを高精度で測定する必要がある。中間評価までの検討において、定量位相顕微鏡 (図 PP 測定波長: 633nm) は、 $\Delta n$  の符号も含めて評価できる上、サブミクロン以下の面分解能で、かつ  $\Delta n$  の測定精度が  $0.001 \pm 0.0005$  以下で測定できる。<sup>1), 2)</sup> また、60x レンズを使用した  $\Delta n$  の実測において  $0.001 \pm 0.002$  で測定できることを確認した。



図PP 定量位相顕微鏡の光学系の模式図

$\Delta n$  とガラス組成に関する基礎的な知見を得るために、市販の光学ガラスに対して、ガラス内部に異なる集光状態のレンズ 10x (0.3) と 40x (0.85) を使用して、逐次照射加工でライン状異質相を形成し、ラインの断面方向から  $\Delta n$  を評価した。結果として、パワーの増加に伴い  $\Delta n$  の絶対値は増加する傾向が見られた。10x レンズの加工では、比較的均質な異質相が得られ易いことが確認された。一方、40x レンズの加工では、パワーの増加にともない、異質相内の  $\Delta n$  の高低が大きくなり不均質になった。 $\Delta n$  はガラスによってプラス/マイナス側への変化のし易さの傾向が異なり、 $\text{TiO}_2$  を含有するケイ酸塩系ガラスにおいてマイナス方向に比較的大きな  $\Delta n$  となる ( $|\Delta n| > 0.01$ ) ことが分かった。更にその結果を基に、 $\text{TiO}_2$  を含有するリン酸塩系ガラス (ガラス A) について調査したところ、 $\Delta n$  が 0.015 を越えることが確認された。より詳しくは次のとおりである。図 XX (a) にガラス A 内部の異質相周辺部の定量位相顕微鏡による  $\Delta n$  測定画像を示す。また、図 XX (b) は異質相部の  $\Delta n$  のラインプロファイルである。 $\Delta n$  はマイナス側に変化しており、ピーク値で -0.016 程度であった。また、このガラスは可視光領域 (波長 400-760nm) で透明であった。図 YY に  $\Delta n$  の最大/最小値の絶対値 ( $|\Delta n|$ ) をピークパワー密度に対するプロットを示す。ガラス A では、 $8.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  で  $\Delta n = 0.015$  を越え、従来のシリカガラスの場合の  $6.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  よりも 1/8 程度のエネルギーで実現した。本研究で開発された光学ガラスを光学デバイスに応用することにより、光学デバイスの薄型化が期待できる。更に、ホログラムを使用した高効率製造技術に適用することにより、高精度な光学デバイスを低コストで作製することが可能となるであろう。

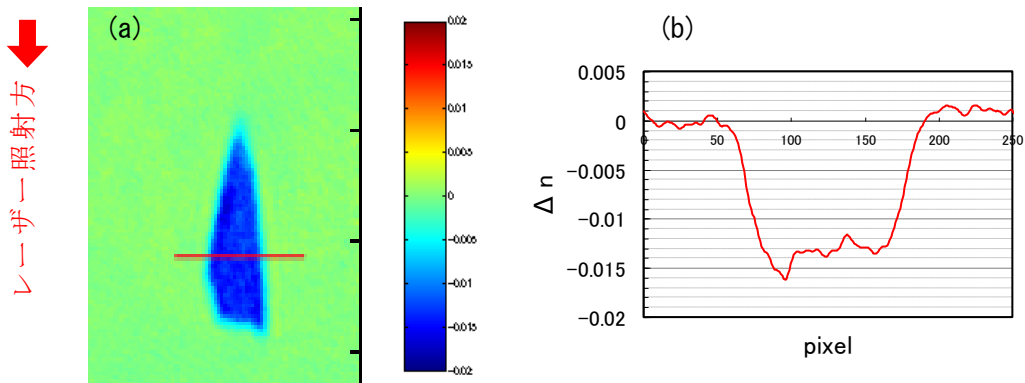


図 XX 異質相ライン断面の  $\Delta n$  測定画像 (a) と画像 (a) 内の  $\Delta n$  のラインプロファイル (b)。レーザー照射方向は画像の上→下方向 (赤矢印)、焦点走査方向は画像の垂直方向。

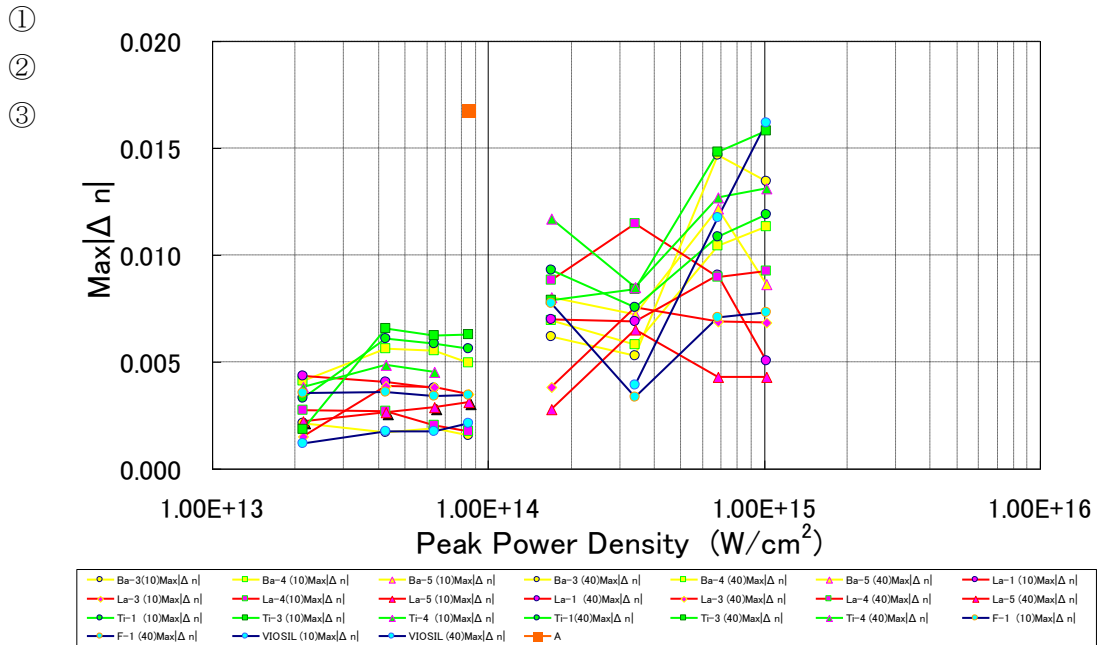


図 YY フェムト秒レーザー照射により形成されたライン状異質相  $\text{Max}|\Delta n|$  のピークパワー密度に対するプロット。 $\text{Max}|\Delta n|$  は  $\Delta n$  の最大値 (プラス側) / 最小値 (マイナス側) の絶対値。

参考文献

- 1) 浜松ホトニクス株式会社HP ;  
[http://jp.hamamatsu.com/rd/publication/nature/na\\_0611.htm](http://jp.hamamatsu.com/rd/publication/nature/na_0611.htm)
- 2) 池田貴裕, 「フィードバック系及びコモンパス光学系により安定化された定量位相顕微鏡, Proceedings of 39th Meeting on Lightwave Sensing Technology, June. 2007.

In this study, our goal is developing the glass material which is suitable for the optical device fabrication regarding Optical low-pass filter as a target device. In order to feed back the information to the fabrication or design of the optical device, it is necessary to measure the refractive index difference,  $\Delta n$ , precisely, which is between the mother glass and modified region formed by the irradiation of the focused femto second laser pulse beam. The Qualitative Phase Microscopy(QPM) technique has been selected so far and used for the  $\Delta n$  measurement because of its superior spec of which sub-micron of plane resolution and high measurement accuracy of  $\Delta n = 0.001 \pm 0.0005$ . In our own measurement, we found that the  $\Delta n$  was measurable within an accuracy  $\Delta n = 0.001 \pm 0.002$  by QPM technique with 60x objective lens. In order to obtain the basic knowledge on the  $\Delta n$  and glass composition, we investigated the  $\Delta n$  for the variety of commercially available optical glasses. The lines were written inside the glass with step-by-step irradiation of laser through different objective lenses 10x(N.A.=0.3) and 40x(N.A.=0.85). The  $\Delta n$  was measured from direction which is perpendicular to the created line. As results, the absolute value of  $\Delta n$  seemed to be increased with increasing input power. When using 10x objective, the profile of  $\Delta n$  was relatively uniform. On the other hand, using 40x objective, the profile of  $\Delta n$  become un-uniform. Whether the  $\Delta n$  increase or decrease was seemed to be different from glass systems. The silicate glass containing  $\text{TiO}_2$  as metal oxide showed the relatively large decrease of the  $\Delta n$  ( $\Delta n < 0.01$ ). On the basis of the results, we investigated phosphate glasses containing  $\text{TiO}_2$ , and found that a glass (Glass\_A) showed relatively large decrease of the  $\Delta n$  ( $\Delta n < 0.015$ ). The detail is as follows.

Fig.XX(a) shows the  $\Delta n$  profile of around the modification inside the Glass\_A which was measured by the QPM technique. Fig.XX(b) shows the line profile of the  $\Delta n$  across the modified region in Fig.XX(a). The  $\Delta n$  of the modification for Glass\_A decreased, and it was found that the peak value of the  $\Delta n$  was around -0.016. The glass was transparent in the wavelength of the visible range (400-760 nm). Fig.YY shows plot of the maximum  $|\Delta n|$  value against the peak power density. Here, the maximum  $|\Delta n|$  means the absolute value of the maximum or minimum  $\Delta n$ . In Glass A, the  $\Delta n$  over 0.015 was observed at peak power density of  $8.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ , which was 1/8 of the case in silica glass,  $6.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ . The glass developed in this study should be useful for making the device thinner. Moreover, the manufacturing cost would be reduced by applying the one shot fabrication method with the holographic element.

### 3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

光伝送損失因子の特定とその低減化検討により、合成石英ガラスおよび一部のホウケイ酸塩ガラスにおいて光伝播損失 : 0.1 dB/cm の材料を実現し、中間目標を達成した。また、元素分

布形成により、光導波路構造が形成可能であることを確認した。分岐デバイスとして空間光変調器を利用した一括加工光学システムおよびホログラム作成プログラムを構築し、ダンマングレーティングおよび Y 分岐導波路の一括形成を各種ガラスにて試みた。その結果、Au 含有ガラスにおいて比較的low閾値にて分岐が可能な素子が得られることを確認した。分子動力学法において温度勾配を支配的な駆動力としたシミュレーションを行うことで、実験結果における元素分布の特徴が非常に良く再現できることを確認するとともに、元素分布形成を利用することで、光導波路構造が形成可能であることを確認した。さらに LCOS-SLM モジュール（本プロジェクトにて浜松ホトニクス株式会社が開発）を利用した高繰り返し（250kHz）レーザーと低繰り返し（1kHz）レーザーとの同時多点照射システムを構築し、このシステムによりシミュレーション結果をもとに温度分布形状を変化させることで、元素分布形状を制御することに成功した。

As a temperature change in the material causes a refractive index change, the temperature distribution change due to the thermal diffusion was observed. The observed results can be explained by the thermal diffusion model, and the initial temperature distribution and the thermal diffusion rate can be obtained. It was clarified that the control of the temperature distribution are important for the waveguide writing with the combination of femtosecond laser and spatial light modulation. By specifying the factors behind waveguide loss and investigating ways of reducing that loss, a synthesis silica-glass and borate glass waveguide with a loss under 0.1 dB/cm have been obtained and an intermediate goal has been achieved. It was confirmed that a waveguide structure can be formed by refractive-index control technology based on the formation of element distribution.

## 【研究項目②三次元化加工システム技術】

### 1) 三次元加工システム技術目標、2) 波面制御三次元加工システム技術

#### (a) ホログラム設計用ソフトウェアシステム技術とホログラム設計技術

本研究の目的は、三次元一括加工を実現するためのホログラム設計技術を提案・構築することである。具体的には、①大規模計算のためのソフトウェアシステムを構築すること、②三次元物体を表現するホログラム設計方法を開発すること、③ホログラム設計の高速化を実現することである。

ホログラムの設計に必要な環境として、高性能 CPU を搭載した計算機器による HPC (High Performance Computing) 基盤システムを構築した。ソフトウェアに関しては、波面計算（回折積分）の計算領域を適切に絞り込むことで効率的な設計時間の短縮化を実現した。これを基に、最終目標であるガラス内部で 1 辺  $60\mu\text{m}$  の立方体内に直径  $10\mu\text{m}$  以下の球状異質相を 100 個以上、三次元で形成するためのホログラムを設計した。その他の設計事例としては、直線形状や三次元螺旋形状、光軸平行直線、マルチレベル強度分布形状などがある。

実際に設計したホログラムを基にガラス・ホログラムを作製し、フェムト秒レーザー加工によってガラス内部への三次元一括加工を実現できたことから、開発したホログラム設計技術は有効な研究成果である。また計算領域を適切に絞り込む計算手法により、最終目標の従来比 10 倍以上の高速化を達成した。図 2-2-1-a-1 は、その計算時間測定の結果である。

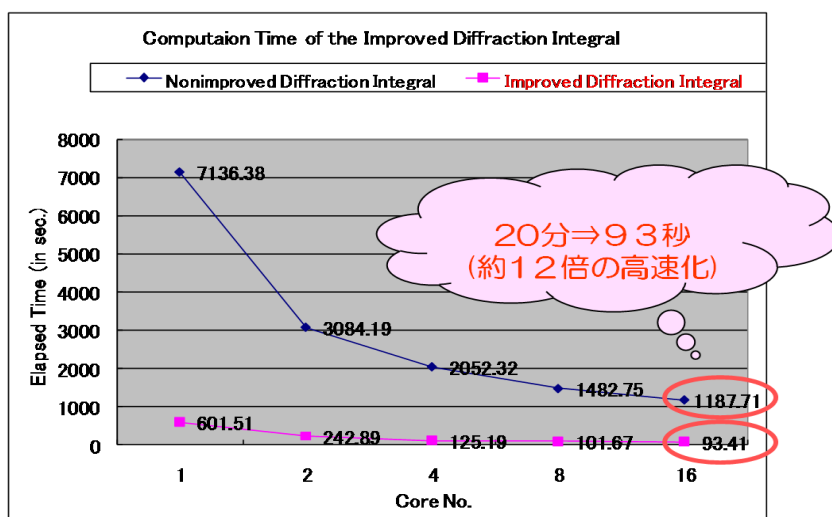


図 2-2-1-a-1. 回折積分 1 回あたりの計算時間測定の結果

Fig.2-2-1-a-1. the result of measurement of wave-front calculating time

The purpose of this research is to develop hologram design technology for three-dimensional (3D) processing by one-shot laser pulse. Actually the works on hologram design are threefold: (1) to build software system for large scale calculation, (2) to develop an effective hologram design method to generate 3D structure, (3) to speed up the calculation time for hologram design.

As hologram design environment, we built the HPC (High Performance Computing) system with computers on high-powered CPUs. We implemented a speed up routine to effectively cut down the design time by appropriately narrowing down the wave-front calculating (diffraction integral) area. We designed the hologram to fabricate 3D dot array of 100 elements inside the sample glass of 60 $\mu$ m cubic. This hologram design is final goal of this project. As other examples of hologram design, we had line, 3D spiral, line parallel optical axis and multilevel intensity elements.

Since we could practice 3D processing by one-shot femtosecond laser pulse using fabricated glass-hologram based on designed hologram pattern, we showed that our hologram design technology is effective. We achieved more than 10 times speed up calculation time for hologram design as compared with existing methods. Fig.2-2-1-a-1 shows the result of measurement of wave-front calculating time.

## (b) 光デバイスと光情報処理用ホログラムの設計技術

直線導波路や曲線導波路をフェムト秒レーザー一括加工により作製するための位相ホログ

ラムの設計方法について検討を行った。計算機ホログラフィを基に直線、半円、円を再生する位相ホログラムを設計することができた。また、個々の位相ホログラムを合成する方法について検討し、1つのホログラムで2本以上の線を再生可能であることを確認した。

We developed design method for a phase type hologram which generates straight line beam and curved-line beam. Using the hologram, we will fabricate straight-line waveguides and curved-line waveguides in a glass at one-shot exposure of femtosecond laser. Based on the computer-generated holography, we calculate a phase type hologram which reproduces straight line, half ring, or ring. The holograms can successfully generate straight line, half ring or ring beam, when we illuminate femtosecond laser on it. We also discussed how to combine two holograms and confirmed that they could generate two lines simultaneously.

### (c) ガラス・ホログラム作製技術

ガラス・ホログラム作製プロセスを構築した。ここでは、短期間でガラス・ホログラムを作製することに重点を置いた。作製プロセスの大半を占める電子線描画の描画時間を約35%に短縮し、作製期間の大幅な短縮を行うことができた。ガラス・ホログラム作製プロセスの問題点の検討を行い、作製プロセスの改良を行った。プロセス改良後、4段のテストパターンでは段幅 $2.5\mu\text{m}$ 以上において設計段幅 $\pm 40\text{nm}$ 、設計段の深さ $\pm 40\text{nm}$ で作製できることを確認した。また、作製した位相4段、ピクセルサイズ $5\mu\text{m}$ のガラス・ホログラムにおいても、パターン幅と段の深さが設計値 $\pm 40\text{nm}$ で作製できることを確認した。これらの結果から、最終目標である「波面制御素子の作製精度 $\pm 40\text{nm}$ 」を達成した。今回作製したガラス・ホログラム作製プロセスでは、ピクセルサイズ $1\mu\text{m}$ ( $\approx$ フェムト秒レーザー波長)、位相8段、ホログラムサイズ $13\text{mm}\times 13\text{mm}$ のようなガラス・ホログラムも作製可能となった。

We developed fabrication process of glass-hologram. The glass-hologram fabrication process was required to be as short as possible, for higher productivity. An electron beam (EB) lithography occupied much time in the glass-hologram fabrication process. We modified and improved EB lithography condition, and consequently the EB writing time was reduced to about 35%.

We identified problems in the glass-hologram fabrication process and solved them. After improving the fabrication process, we could fabricate 4-level test pattern of  $2.5\mu\text{m}$  width, within pattern design width and depth  $\leq \pm 40\text{nm}$ . We also confirmed that a 4-level glass-hologram with pixel size of  $5\mu\text{m}$  was fabricated within an accuracy of  $\pm 40\text{nm}$ , in terms of pattern width and depth. These satisfy the criterion of glass-hologram fabrication accuracy within  $\pm 40\text{nm}$ .

In the fabrication process, we fabricated various glass-holograms with  $1\mu\text{m}$  pixel size, 8-level, or  $13\text{mm}\times 13\text{mm}$  area.

### (d) ホログラム加工に及ぼす設計技術の寄与と三次元加工例

高精度な設計技術に基づき設計したホログラムは、空間的に任意の三次元形状を形成でき



る。直線形状を形成するホログラムを用いた回折格子製作と、逐次加工による回折格子製作の対比から、ホログラム加工の有効性と、その要素技術である設計技術の寄与を示す。

実際に製作した回折格子の仕様は、2mm×4mm（格子定数：80μm）で、長さ2mmの直線形状を50本加工することで実現した。回折格子の光学的な性能（±4次光まで入射光の分離）は、ほぼ同等である。表2-2-1-f-1は、ホログラム加工と逐次加工のフェムト秒レーザー加工条件を比較した表である。

表2-2-1-f-1. 回折格子製作のためのフェムト秒レーザー加工条件の比較

	ホログラム加工	逐次加工
波長	800nm	800nm
パルス幅	30fs	30fs
繰り返し周波数	1kHz	1kHz
入射パワー	3.44W	0.005W
直線1本の加工時間	0.005秒	1秒

ホログラムを用いることで、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間は、わずか0.005秒で済んだ。逐次加工の場合は、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間が1秒である。これにより、ホログラムを用いることで、加工時間が1/200程度に削減できたことを確認した。正確に設計された直線ホログラムの寄与は大きいと考える。

図2-2-1-f-1は、最終目標である60μm立方体内への異質相100個加工を実現した三次元加工例である。複雑で高密度化した三次元ドット配列を1つのホログラムで一括加工により実現した。この加工例においてもホログラム設計技術の寄与は大きい。

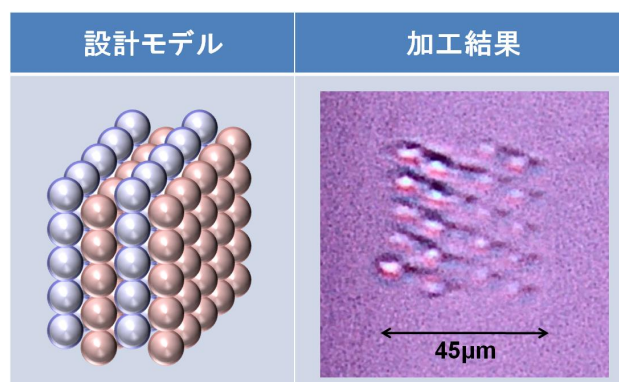


図2-2-1-f-1. 異質相100個の三次元格子配列の加工結果

直線ホログラムによる回折格子製作や、異質相100個の三次元格子配列加工の結果から、正確に設計したホログラムの役割は非常に大きい。このため、ホログラム設計技術の開発は、三次元一括加工の発展させる上で重要なテーマである。

The hologram designed based on high-precision technology is able to generate an arbitrary spatial 3D structure. In this section, we show the effectiveness of hologram

processing and the contribution of design technology by comparing line-hologram processing with direct-writing in grating fabrication.

The size of the designed grating was 2mm x 4mm, and the grating constant was 80 $\mu$ m. We fabricated two gratings by 50 repetition of processing 2mm line-structure. The gratings had even optical performance with 4th order diffraction beam.

Tab.2-2-1-f-1. Comparison line-hologram processing with direct-writing in grating fabrication

	Hologram processing	Direct-writing
Wavelength	800 nm	800 nm
Pulse duration	30 fs	30 fs
Repetition rate	1 kHz	1 kHz
Input power	3.44 W	0.005 W
Processing time per a line	0.005 sec	1 sec

Tab.2-2-1-f-1 shows the laser processing conditions about line-hologram processing and direct-writing in grating fabrication. In the grating fabrication based on line-hologram, it took only 0.005sec to write a 2mm line. Roughly speaking, the line-hologram reduced the throughput time by about 0.5%, since it took 1sec to direct-write a 2mm line. We found out that the contribution of precisely designed line-hologram was great enough.

Fig.2-2-1-f-1 is the result of 3D hologram processing for 3D dot array of 100 elements inside the sample glass of 60 $\mu$ m cubic. We fabricated the complicated and high-density 3D dot array using one hologram by one shot femtosecond laser pulse. The contribution of hologram design technology was great enough in this example of 3D processing.

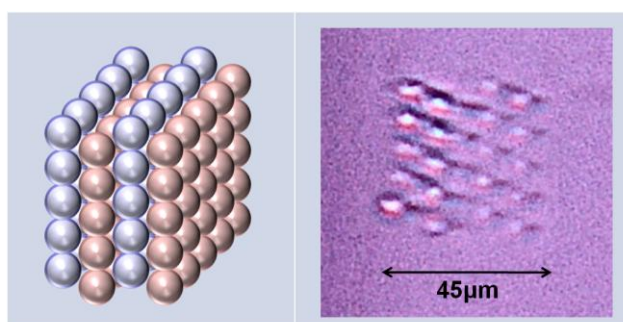


Fig.2-2-1-f-1. 3D hologram processing for 3D dot array of 100 elements

Through grating fabrication using line-hologram and 3D hologram processing for 3D dot array of 100 elements, we showed that the precisely designed hologram was very useful. So it is very important for 3D processing by one shot femtosecond laser pulse that we have developed hologram design technology.

### (e) 光デバイスと光情報処理用 T E G の作製

ガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工により、全長 1 cm の直線導波路、半径 0.5mm~3mm の半円導波路、半径 10 $\mu$ m や半径 1mm の円等を合成石英内部に作製した。ここでは、ホログラムが生成する直線や曲線を合成石英内部に結像して導波路を作製した。作製した 1cm の直線では、波長 1550nm のレーザー光の導波を確認した。また、作製した半径 1mm 以上の半円導波路では、波長 635nm のレーザー光の導波を確認した。これらの導波路を組み合わせて、結合器や Macha-Zehnder 型干渉計等を試作した。これらの基本的機能を確認した。

We fabricated 1cm-long straight line waveguides, half ring waveguides of 0.5mm~3mm radius and rings of 10mm and 1mm, inside fused silica, with one-shot exposure of femtosecond laser. Here we fabricated the waveguides inside fused silica, with directly focusing the femtosecond laser beam shaped by the glass-hologram. We confirmed 1550nm light propagation through the fabricated 1-cm long straight line waveguide and the propagation of 635nm light via half-ring waveguides whose radius was greater than 1mm.

With multi-shots exposure using these holograms, we fabricated optical devices, such as coplers, Mcha-Zehnder interferometer, etc. We confirmed basic functionality of the fabricated devices.

### (f) ホログラムを用いた光学ガラスの加工

光学デバイス加工用ガラス材料技術で開発された材料に対して、ガラス・ホログラムを用いた加工の適用について検討する。より具体的には、前項においてレンズを用いた逐次照射加工により屈折率差  $\Delta n > 0.015$  となる材料の検討を行い、従来よりも  $\sim 1/8$  程度の比較的低エネルギーで  $\Delta n > 0.015$  となるガラス材料（ガラス A）を開発した。一方で、光学デバイスを高速に加工するためには、開発中のホログラム加工を適用する必要があると、検討を行った。図 XX に示されるようにガラス・ホログラムと対物レンズ 40x(0.55) を配置して加工を行った。レーザー加工条件は、波長：800nm、パルス幅：200fs、照射時間は 0.005 秒とした。

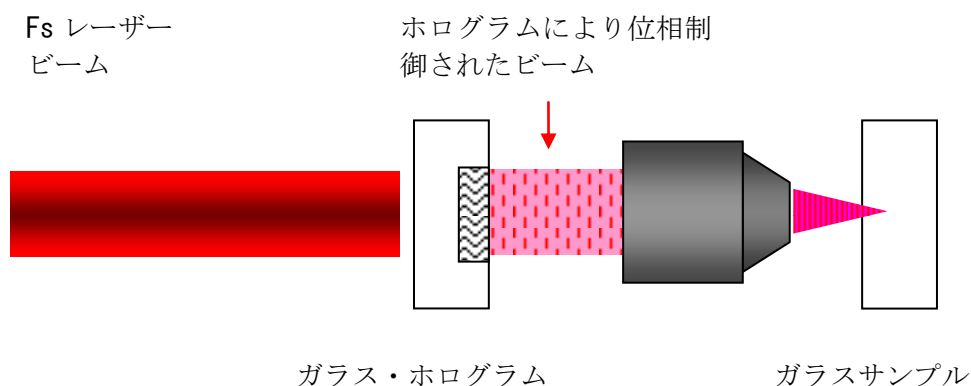


図 XX ガラス・ホログラムを用いてレンズを併用する加工の配置の模式図。

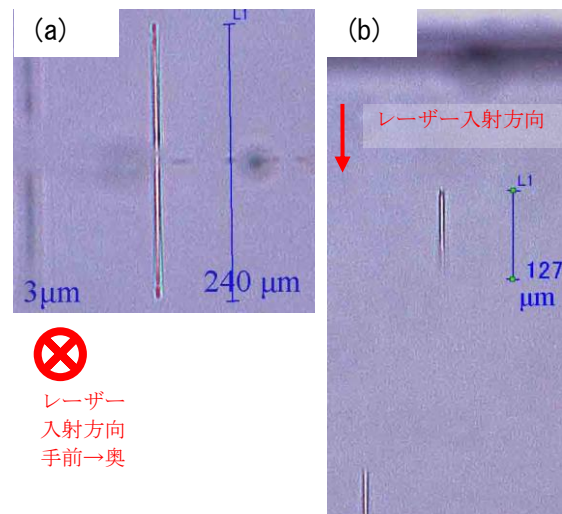


図 YY 照射時間 0.005 秒のときの異質相光学顕微鏡像。  
 (a) レーザー入射面から、(b) ライン断面方向から観察

In this section, we investigate the possibility to apply the one-shot fabrication method with holographic element to the developed optical glass, which showed  $\Delta n > 0.015$ . In order to fabricate the optical devices, it is necessary to use the one shot fabrication method which is developing in this project. As shown in Fig.XX, the holographic element and the objective lens were placed in such geometry. The irradiating condition is as follows, wavelength:800 nm, pulse duration :200fs, time for one shot:0.005s. Fig.YY, shows the optical microscope image of the fabricated line. The line which length was 250  $\mu\text{m}$  was fabricated within 0.005s. The length along the direction of laser propagation was around 100 $\mu\text{m}$ , and which was shorter than a target length of 300  $\mu\text{m}$ . Fig.ZZ shows the  $\Delta n$  profile of the cross-sectional view of fabricated line. The  $\Delta n$  showed decrease in the modified region and the  $\Delta n$  over 0.015 was observed.

### (g) 三次元形状計測技術

#### a) ガラス内部の形状測定

使用した三次元測定器は市販の表面反射により表面形状を測定する非接触式の装置である。このままでは透明体内部の異質相と母材の屈折率差が少なく境界面よりの反射光強度が弱い  
 ため、ガラス等の透明体内部の形状測定はできなかった。屈折率差が小さい試料での測定を  
 可能とするため、三次元測定器に改良を加えることにより形状測定が可能となった。すなわ  
 ち試料の下面にミラーを配置し、レーザー結像点がミラー面となるようにし、この反射像位  
 置を検出するようにした。これによりレーザーの光路中にある異質相の屈折率差に応じた光  
 路長変化により形状を検出できるようになった。

The three-dimensional measuring instrument can measure shape by non-contact with surface reflection. When we measure the part which there is a slight refractive index difference of the glass inside, the light to reflect from there is very weak. So we cannot measure the inside shape of it. We improved this measuring instrument and succeeded in measuring it.

#### **b) ガラス内部の屈折率の非破壊測定**

三種類の異なった方法によりガラス等の透明体内部の異質相の屈折率差を非破壊で測定する方法を開発した。すなわち、異質相の構造や大きさにより異なる方法を用いた。光路長が10 $\mu$ m程度までの円柱構造体ではスキューレイ追跡を行い、三次元測定器より測定した光路長差と一致させる方法を用いた。光路長が更に短い球状もしくは円柱状構造体の場合には干渉計による干渉縞の変化を測定し、これに位相増幅処理と超解像処理を行う方法を用いた。OLPF (Optical Low Path Filter) のような層状構造体の場合には、ダブルスリットによる干渉縞の変位を測定する方法を用いた。

We developed three different methods to measure about a refractive index difference of the glass inside.

- 1) To optimize a refractive index to accord with a measurement result with a three-dimensional measure in ray tracing algorithm.
- 2) To measure the quantity that interference fringes is made to be displaced because the refractive indexes of the double slit aperture are different.
- 3) To make phase amplification processing and super-resolution processing on interference fringes image by the interferometer.

By these methods, we succeeded in measuring the difference of the refractive index of the glass inside in non-destructiveness.

#### **3) 空間光変調器三次元加工システム技術**

本研究開発の目的は、三次元光デバイスの製造技術のひとつである可変型の三次元加工システムの要素技術となる、フェムト秒レーザー光の位相の空間分布(波面)を動的に変化させるフェムト秒レーザー光波面制御モジュール、およびそれを用いた波面制御技術を開発することである。

そのため、下記の研究開発を進めた。

##### **(i) 三次元加工システム用フェムト秒レーザー光波面制御モジュールの開発**

- ・フェムト秒レーザー加工用位相変調型液晶空間光変調器(LCOS-SLM)の開発
- ・LCOS-SLMを内蔵するフェムト秒レーザー光波面制御モジュールの開発

(ii) 高機能三次元加工のための LCOS-SLM による波面制御技術の開発

並行して、社団法人ニューガラスフォーラムおよび国立大学法人京都大学の「三次元光回路導波路デバイス技術」グループと連携して、上記フェムト秒レーザー光波面制御モジュールの評価実験とそれによる検討・改良をおこなった。

これにより本研究開発項目において最終目標を達成できたことを確認した。すなわち、空間分解能45万画素以上の高精細化、変調速度50 Hz、光位相変調度 $2\pi$ ラジアン以上（256レベルの中間値制御も可能）、50 GW/cm<sup>2</sup>（100 fs、1 KHz）のフェムト秒レーザーパルスへの耐光性を有するフェムト秒レーザー光波面制御モジュールを実現した。また、フェムト秒レーザーによる高機能三次元加工のためのLCOS-SLMによる波面制御技術の開発を行い、当該加工に必要な波形成形、収差補正を実現した。

Our goal of this project is to develop the programmable phase modulator module for 3-D femto-second laser processing and the optical wavefront control technology.

In order to approach the above mentioned goal, we have been developing the following device and technology.

- ・ Liquid crystal on silicon spatial light modulator (LCOS-SLM) which stands up to intense femto-second laser pulse.
- ・ Optical wavefront control module which consists of LCOS-SLM and optical components such as mirrors and lenses.
- ・ Optical wavefront control technology for waveform shaping and aberration correction by using hologram technology.

We have developed the optical wavefront control module, which consists of the LCOS-SLM and associated optical components. This module has 800\*600 pixels, modulation speed of 50Hz, and phase modulation depth of over  $2\pi$  radian with 256 levels. And the device can withstand intense femto-second laser pulses of 50 GW/cm<sup>2</sup> (100fs, 1KHz) . Also we have developed optical wavefront control technology, and 3D laser processing in glass was performed by using functions of waveform shaping and aberration correction. As a result, we gained our ends of the project.

### 【研究項目③三次元加工システム応用デバイス技術】

#### 1) 三次元光学デバイス技術

本プロジェクトでは、高速・高精度にフェムト秒レーザー照射によりガラスに異質相を形成する技術を開発した。異質相とは、ガラス母材と屈折率の異なる部分と呼ぶ。

ここでは、異質相を利用したデバイスの有効性の確認のため、一例として、ガラス光学ローパスフィルタの開発について報告する。光学ローパスフィルタとはデジタルカメラで生

じるモアレを低減する部品である。

通常の光学ローパスフィルタは水晶製であるが、水平垂直両方向のモアレを低減するためには貼り合わせが必要であり、価格と厚みに課題があった。

しかし、我々は、異質相で市松状の回折格子を形成すれば、貼り合わせなく水平垂直両方のモアレを低減する光学ローパスフィルタを実現できると考えた。

そこで我々は、試作検証が容易なデジタルカメラとして、25万画素の CCD カメラを選別した。そのカメラに最適なガラス光学ローパスフィルタ用異質相回折格子の設計を行い、回折格子のピッチと格子の長さを決めた。フェムト秒レーザー加工により異質相回折格子の形成を行い、ガラス光学ローパスフィルタの試作を行った。

試作したガラス光学ローパスフィルタを装着したデジタルカメラでチャートを撮影して、貼り合わせなしで水平垂直両方向がモアレを低減されていることを確認した。

試作したガラス光学ローパスフィルタの正味の厚みは 0.3mm であり、用いたデジタルカメラにもともと装着されていた厚み 1.5mm の水晶ローパスフィルタより薄くできた。

最後に、本プロジェクトで開発したホログラムによる異質相の一括加工により異質相回折格子を作製した。今後の実用化のための課題として、更なる加工時間の短縮と異質相の無色透明化を抽出した。

In this project, the technology that formed the heterogeneous phase in the glass with femto second laser irradiation in high-speed and high accuracy was developed. The part where the refractive index is different from the glass mother material is called the heterogeneous phase.

Here, it reports on the development of a glass optical low-pass filter as one example for the confirmation of the effectiveness of the device using the heterogeneous phases. The optical low-pass filter is the part that decrease the moire caused with the digital camera.

A usual optical low-pass filter is made of crystal. It is necessary to stick it together to decrease the moire of horizontal, vertical both direction by crystal optical low-pass filter. The crystal optical low-pass filter has a problem in the price and the thickness. But we think that an optical low-pass filter can be achieved by forming the diffraction grating in the state of Ichimatsu with the heterogeneous phases.

Then, we selected CCD camera of 250,000 pixels, the pitch and length of the heterogeneous phase diffraction grating for the glass optical low-pass filter the best for the camera was designed, and were decided. The heterogeneous phase diffraction grating was formed with femto second laser beam machining, and the glass optical low-pass filter was made for trial purposes.

We took a picture of the chart with the digital camera that installed the glass optical low-pass filter made for trial purposes and confirmed that the moire was decreased in horizontal, vertical both direction by the glass optical low-pass filter without sticking together.

The thickness of the net of the glass optical low-pass filter for trial purposes is 0.3mm. We were

able to thin the glass optical low-pass filter more than the 1.5mm thickness crystal low-pass filter which installed properly in the digital camera used.

Finally, the heterogeneous phase diffraction grating was made by holographic high-speed and high accuracy femto second laser technology of this project and It was confirmed to apply to the glass optical filter. Shortening further processing time and a colorless transparent making of the heterogeneous phase have been extracted as a problem for the practical use in the future.

## 2) 三次元光回路導波路デバイス技術

逐次描画による直線導波路において、レーザー照射条件制御により、目標であるコア径  $9\mu\text{m}$  の直線導波路を描画し、 $\pm 1\mu\text{m}$  の加工精度で伝送損失  $0.1\text{dB/cm}$  の導波路を描画することができた。空間変調素子を中心とする波面制御光学系を用いた一括描画システムを用いて多ライン同時加工で 16 分岐回折光学素子を作製、その光伝搬損失および加工精度を確認した。さらに、二次元描画用ホログラムにフレネルレンズのホログラムを合成することで三次元一括描画が可能なホログラフィック加工システム（フェムト秒レーザー+LCOS-SLM）を構築した。このシステムにより、複数の光導波路の一括描画、2分岐～6分岐の光導波路を描画し、これらが分岐回路として機能することを確認することで、構築したホログラフィック加工システムが三次元光デバイスの作製において有力なツールとなることを実証した。

Holographic femtosecond laser processing system with two-dimensional, arbitrary and variable patterning features was fabricated by utilizing the combination of a femtosecond laser and spatial light modulation techniques, which were achieved by using a liquid crystal on silicon device (LCOS) displaying the CGH. A holographic laser processing system was constructed to fabricate optical branching devices. This system is being used to test the formation of straight waveguides, Y-branch waveguides and 1:4x4 beam splitters (DOE). The internal losses of these optical devices are currently under investigation. The laser processing system with a Liquid-Crystal on Silicon: Spatial Light Modulator (LCOS-SLM) has been developed to fabricate three-dimensional optical devices with high efficiency. We applied the system to (1) Parallel writing of multiple bent waveguides, and Fabrication of three-dimensional splitter waveguides inside transparent materials without any movement of a specimen, and specific control methods for sample movement and hologram switching for were developed. In addition, new methods for calculation of phase holograms have been developed to improve the spatial distributions of amplitude and phase around light spots which are generated on the Fourier plane of the hologram. The developed calculation method can be applied very easily, because only one constraint is added to the conventional calculation method. We demonstrated that the new calculation method was very powerful and essential for producing optical devices inside transparent materials with high efficiency.



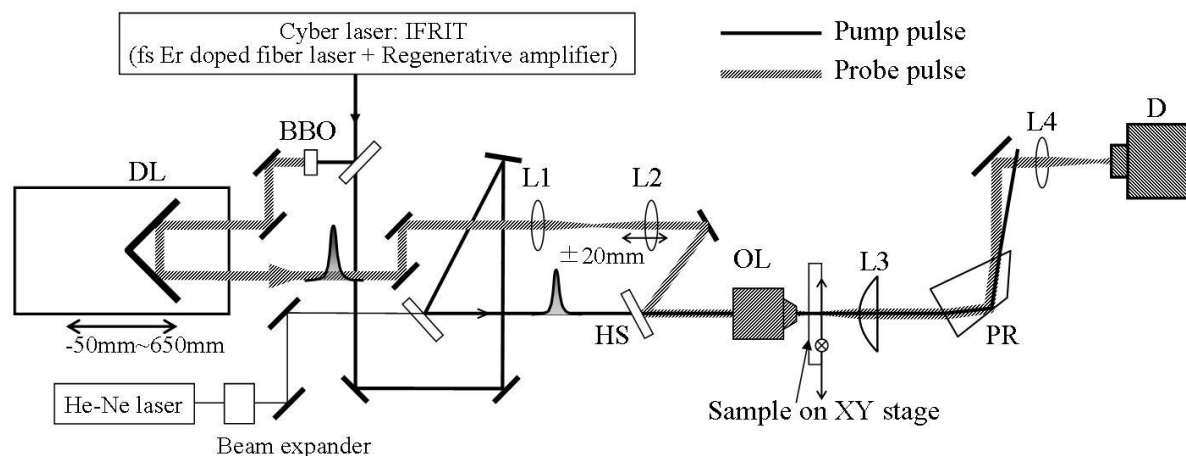
## 2. 研究開発項目毎の成果

### 【研究項目①デバイス化加工用ガラス材料技術】

#### 1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

##### a) 密度変化による屈折率変化のメカニズム解明

フェムト秒レーザーは、非常に高い電場強度が容易に得られることから、多光子吸収等の非線形過程を経てレーザーの波長に対して透明なガラス材料においても相互作用を起こさせることが可能である。その際、内部構造の自由度が大きいガラスでは、その構成元素（組成）とレーザー照射条件との組み合わせにより通常の光励起では観測されない構造変化を誘起させることができる<sup>1-14)</sup>。また、フェムト秒レーザーによるガラスの構造変化は、ガラス構成成分と組成比に依存する諸特性（光学的、熱的、機械的、化学的等）により変化閾値、種類、速度、サイズや形状が異なる。更に、これらの構造変化はレーザー照射条件（エネルギー密度、繰り返し周波数、パルス幅、波長や集光方法）依存性もあり、フェムト秒レーザーと波面制御技術（ガラス・ホログラムや空間位相変調素子の利用）とを組み合わせることで三次元光デバイスを高品質・高効率で製造できるガラス材料を開発するためには、異質相形成（構造改質）のメカニズム解明を含めた各種基礎検討が重要な意味をもつ。そこで、レーザー照射によりガラス内部へのフェムト秒レーザー集光照射における構造変

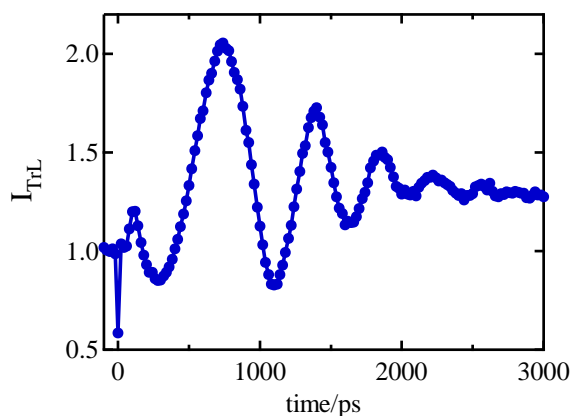


図Ⅲ①(1)-1 メカニズムの解明のために構築したダイナミクス観測用光学系

DL：ディレイレンズ、L1, 2, 3, 4：レンズ、ポンプ波長：800 nm、HS：ハーモニックセパレーター  
 プローブ波長：400 nm、D：ディテクター、OL：対物レンズ、PR：プリズム

化の動的過程（ダイナミクス）を観測・シミュレーションすることで、構造変化のメカニズム解明を試みた。具体的には、図Ⅲ①(1)-1に示す光学系を構築し、ポンプ-プローブ法の一つである過渡レンズ法により、フェムト秒レーザー集光照射によりピコ秒～ナノ秒領域においてガラス内部でどのような現象が起こっているのかを調べた。

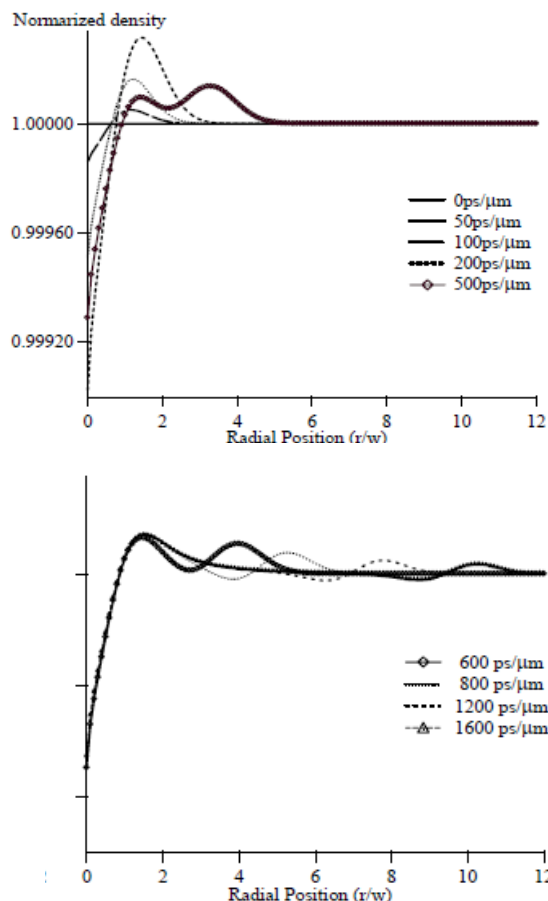
図Ⅲ①(1)-2 は、石英ガラスに  $0.2\mu\text{J}$ 、 $200\text{fs}$ 、 $780\text{nm}$  のレーザーパルスをもつ対物レンズで集光照射した照射領域にプローブ光を入射して得られた過渡レンズ信号である。フェムト秒レーザーをガラス内部に集光照射すると、集光点付近では光イオン化によって生じたプラズマの消失によって温度が急激に上昇する。急激な温度上昇は集光点に大きな熱歪みを生じさせ、この歪みの緩和過程が、図中の過渡レンズ信号振動を引き起こすと考えられる。そこで、ガラス内部での急激な温度上昇の結果発生する密度分布の時間変化を、弾性力学に基づいて次式に従って計算した。結果を図Ⅲ①(1)-3 に示す。



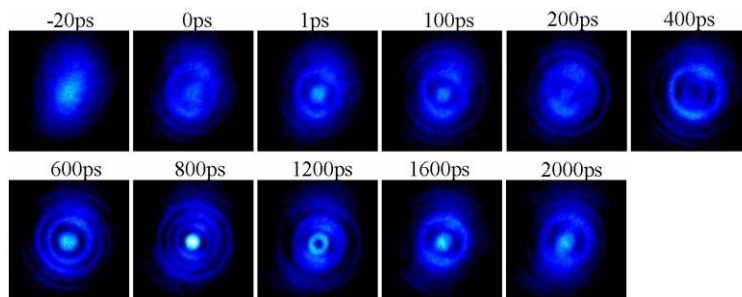
図Ⅲ①(1)-2 メカニズムの解明のために構築したダイナミクス観測用光学系

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = \frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right) - \frac{E\beta}{3(1-2\sigma)} \frac{\partial T(r)}{\partial r}$$

ここで、 $t$  は時間、 $r$  は対称中心からの距離、 $\rho$  は密度、 $u_r$  は変位の動径成分、 $E$  はヤング率、 $\sigma$  はポアソン比、 $\beta$  は熱膨張係数、 $T(r)$  は温度分布を表す。温度分布はガウス関数形で急激に変化すると仮定し、 $T(r) = T_0$  ( $t \leq 0$ )、 $T(r) = \Delta T \exp[-(r/w)^2] + T$  ( $t > 0$ 、 $T_0$ : 光励起前の温度、 $T$ : 上昇温度、 $w$ : 温度分布の幅) として計算している。

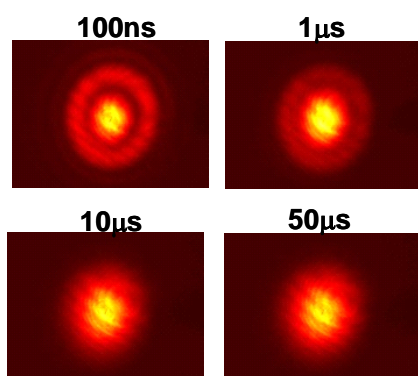


図Ⅲ①(1)-3 密度分布の時間変化をシミュレーションした結果

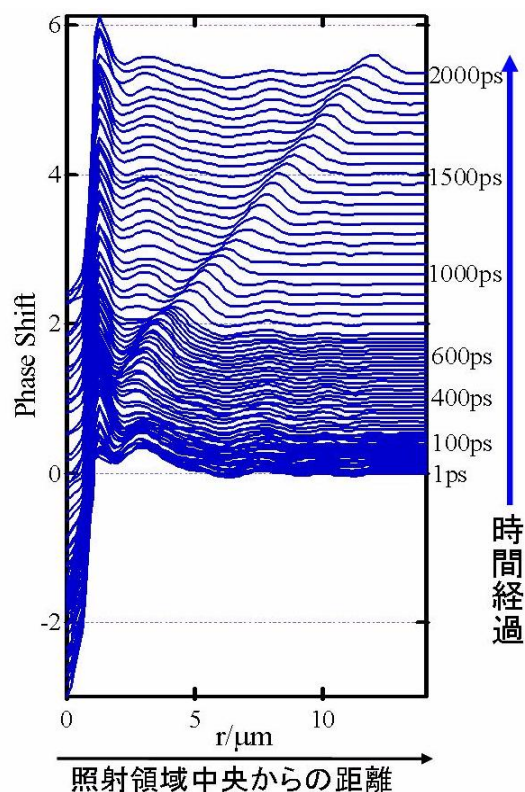


図Ⅲ①(1)-4 プローブ光強度分布の時間変化

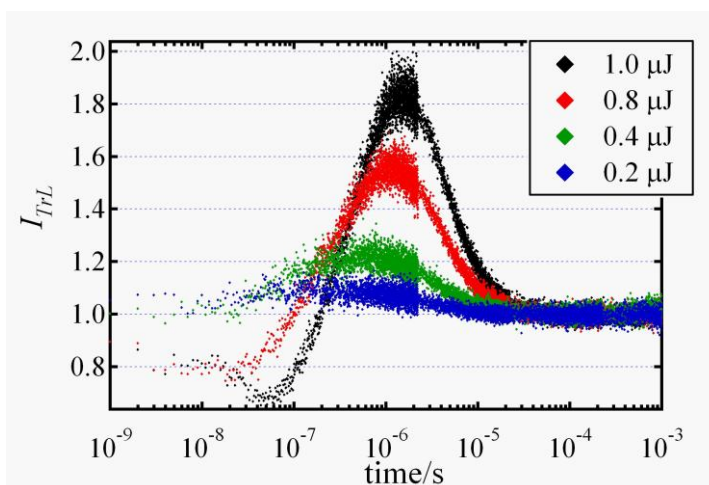
図Ⅲ①(1)-3 から、温度分布幅:  $w$  が  $1\mu\text{m}$  の場合では、励起後 300ps まで中央の密度が徐々に減少すると同時に、中央から  $1\mu\text{m}$  の領域において密度が上昇し、レーザー照射領域中心から遠ざかるように高密度領域が発生し、ガラス内部での音速に近い速度 ( $6\mu\text{m}/\text{ns}$ ) で圧力波として伝播することが確認できた<sup>15-17)</sup>。プローブ光の強度分布と屈折率分布によるプローブ光の位相分布変化は一対一の関係があるので、プローブ光の強度分布の時間変化(図Ⅲ①(1)-4)を測定し位相回復法によって解析することで、屈折率分布を反映した位相分布変化の時間変化(図Ⅲ①(1)-5)を知ることができる。その結果、レーザー照射によりガラス内部に発生する圧力波は、レーザー集光点中心から周囲に向かって同心円状に伝搬し、焦点中心の温度は半径  $1\mu\text{m}$  の領域においてシングルパルス照射後 1 ps 以内に数千 K 以上に、圧力は 1 GPa 程度まで上昇することを確認した<sup>15-16)</sup>。ナノ秒レーザー照射では、圧力波が伝播する時間よりもはるかに遅い速度で熱歪みが生じるようになるため、大きな熱歪みが形成される前に応力緩和がほとんど終わってしまい、ガラスの破壊を伴わずに圧力波を発生させることは困難である。ガラス内部での瞬間的な高温・高圧状態実現による圧力波発生が、フェムト秒レーザー集光照射の大きな特徴であり、フェムト秒レーザー加工と他のレーザー加工との決定的な違いを生む要因であることがわかった。



図Ⅲ①(1)-6 ナノ秒からマイクロ秒領域におけるプローブ光の強度分布の時間変化



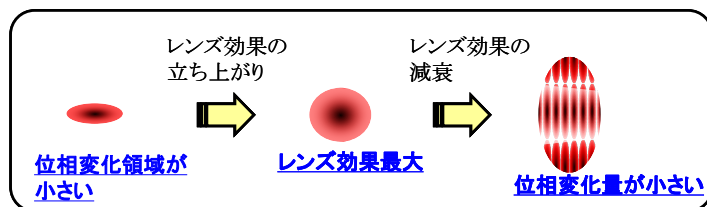
図Ⅲ①(1)-5 プローブ光の強度分布より計算した位相変化分布の時間変化



図Ⅲ①(1)-7 ナノ秒からマイクロ秒領域における過渡レンズ信号のパルスエネルギー依存性

急激な温度上昇による熱歪みの緩和により観測される図Ⅲ①(1)-2 の過渡レンズ信号の振動は 3 ns 程度で消失するが、プローブ光の強度分布は実際にはその後も緩やかに変化する(図Ⅲ①(1)-6 参照)。この現象はレーザー照射により生じた熱エネルギーの拡散過程によるものである。

図Ⅲ①(1)-7 にシリケートガラスに異なるパルスエネルギーで照射して得られた過渡レンズ信号を示す。照射エネルギーが大きいほど強度変化は大きい、いずれの場合も数百ナノ秒で信号強度が立ち上がり、数マイクロ秒で減衰していることがわかる。この信号変化は、レーザー照射直後の高温



図Ⅲ①(1)-8 プローブビーム径に対する熱拡散による位相変化領域の影響

領域が熱拡散により広がることで、それに伴う位相変化領域と変化量がプローブビーム径に対して変化するためと定性的に解釈することができる(図Ⅲ①(1)-8)。そこで、以下の式で表される熱拡散方程式の解を用いて異なる位相での過渡レンズ信号をシミュレーションした。

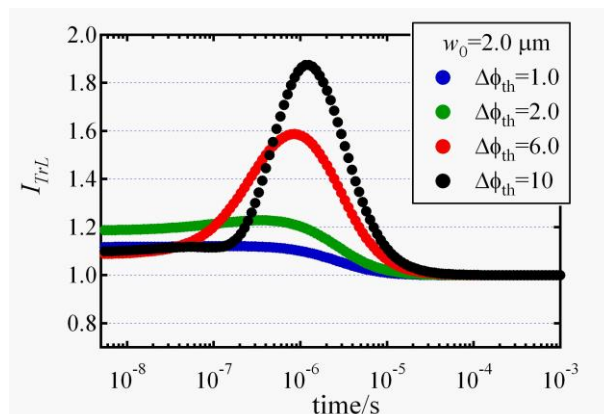
$$\Delta\phi(r,t) = \Delta\phi_{th} \left[ \frac{(w_{th}/2)^2}{(w_{th}/2)^2 + 4D_{th}t} \right] \exp\left[-r^2 / \left\{ (w_{th}/2)^2 + 4D_{th}t \right\}\right]$$

ここで、 $\phi_{th}$  は温度上昇に由来する屈折率変化による位相変化の大きさ、 $w_{th}$  は熱拡散が起こる前の温度分布(高温領域)の幅、 $D_{th} (= \kappa / \rho C_p)$ ;  $\kappa$ : 熱

伝導率、 $\rho$ : 密度、 $C_p$ : 熱容量) はガラス中の熱拡散係数である。図Ⅲ①(1)-9 にシミュレーション結果を示す。この結果は図Ⅲ①(1)-7 の過渡レンズ信号の立ち上がりから減衰を比較的良く再現していることから、ナノ秒からマイクロ秒の領域においては、レーザー照射により発生した熱エネルギーの拡散が起こっていることが確認でき、熱緩和には 10 $\mu$ s 程度の時間を要することがわかる。以上の結果は、熱の蓄積効果を積極的に利用する場合には繰り返し周波数が 100 kHz 以上のレーザーが必要であり、逆に数十 kHz 以下のレーザーを用いれば熱蓄積が関与しない加工が可能であることを意味する。また、位相変化  $\Delta\phi_{th}$  と屈折率変化  $\Delta n$  との次式の関係から屈折率変化  $\Delta n$  と温度上昇  $\Delta T$  を見積もることができる。

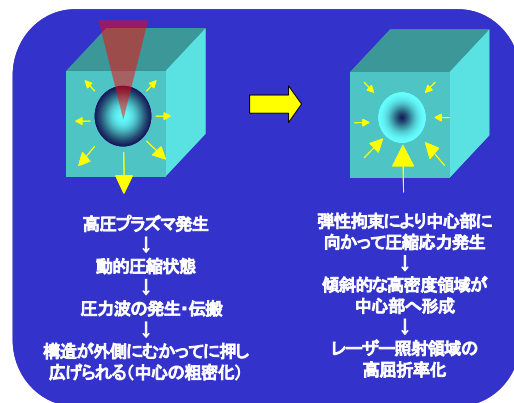
$$\Delta\phi_{th} = 2\pi \frac{\Delta n l}{\lambda} = 2\pi (dn/dT) \Delta T \frac{l}{\lambda}$$

ここで、 $(dn/dT)$  はガラスの屈折率の温度係数、 $l$  は温度上昇した範囲の光軸方向への長さである。例えば、石英ガラスに 0.6 $\mu$ J のレーザーパルス照射した場合、 $\Delta n \sim 0.029$ 、 $\Delta T 3600^\circ\text{C}$  となり ( $l = 50\mu\text{m}$ )、この結果はレーザー照射 1 マイクロ秒後に中心温度が 3600 $^\circ\text{C} \rightarrow 280^\circ\text{C}$  程度まで下がる(熱拡散前の高温領域幅  $w_{th} = 1.2\mu\text{m}$  で熱拡散係数  $D_{th} = 1.1\mu\text{m}^2/\mu\text{s}$ ) ことを意味し、その



図Ⅲ①(1)-9 位相変化が温度上昇に比例すると仮定してシミュレーションした過渡レンズ信号 ( $w_0 = 2\text{mm}$ 、 $D_{th} = 1\text{mm}^2/\text{ms}$ )

際の冷却速度は  $10^9$  °C/秒にも達する<sup>17-19)</sup>。以上の結果より、フェムト秒レーザー集光照射によるガラス内部の構造改質では、圧力波の発生・伝搬とともに、局所領域における高温状態からの超急冷によるガラス構造の瞬間的な凍結が重要な意味を持ち、以下に示すメカニズム(図Ⅲ①(1)-10 参照)により異質相が形成されることを明らかにした。つまり、レーザー集光照射により、音速に近い速度で内部を伝搬する圧力波によりガラス構造が中心から周囲へと押し広げられ、レーザー照射を止めた時点で、圧縮応力がレーザー集光焦点の中心に向かって働く。結果として、傾斜的な高密度領域がガラス内部へ形成され、その状態が超急冷により瞬間的に凍結されることで密度分布が形成される(密度分布に相当する屈折率変化が生じる)。



図Ⅲ①(1)-10 異質相形成メカニズム

表Ⅲ①(1)-1 ガラスサンプル (HOYA 製光学ガラス)

	LAC14	TAF3	E-FD4	TAFD25	BACD5
ヤング率(GPa)	110.8	124.8	90.8	113	87
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.67	4.65	3.23	4.63	3.27
ポアソン比(g/cm <sup>3</sup> )	3.67	4.65	3.23	4.63	3.27
音速(km/s)	6.31	5.99	5.84	5.72	5.67

このメカニズム故に、フェムト秒レーザーによる屈折率変化は、特定のガラスに限定されるUVレーザー照射による欠陥生成に起因した屈折率変化とは全く異なり、石英ガラスを含む酸化物ガラスをはじめ、フッ化物ガラスやカルコゲナイドガラス等、一般に知られている殆どのガラスにおいて誘起させることが可能である。なお、多くのガラスにおいては、仮想温度 (fictive temperature) が高いほど密度が低くなるため急冷効果の高密度化への寄与は小さいと予測されるが、石英ガラスにおいては仮想温度が高くなることで密度が高くなることから、高温融液からの超急冷効果(3員環や4員環といった小さなリング構造の割合が大きい高温状態が凍結される)も高密度化に関与している可能性が高い。最終的に形成される屈折率分布はレーザーの照射条件とガラスの種類に依存し、パルスエネルギーが強すぎる場合には中心の疎密化や空洞化現象(ボイド形成)も起こる。

この異質相の形成メカニズムから、屈折率変化量を大きくする、換言すれば圧力波により大きな密度変化を起こさせるためには、ガラス材料のヤング率およびポアソン比が重要なファクターであることが示唆され、実際に表Ⅲ①(1)-1 に示したガラスにおける過渡レンズ信号の測定と屈折率変化量から、酸化物ガラスにおいてはヤング率やポアソン比が大きいガラスほど屈折率変化閾値が低く、より大きな屈折率変化が起こる傾向にあることが実証できた<sup>18,19)</sup>。

さらに、本技術の検討を通して、フェムト秒レーザー照射(繰り返し周波数 100kHz 以上)により局所的なイオン交換(イオン移動)およびそれに伴う屈折率分布の形成が可能であることを新たに発見した<sup>20)</sup>。この現象は、本プロジェクトにおいても利用できる可能性があり、加えて波及効果も

期待できることから、今後はレーザー照射によるイオン移動を利用した屈折率制御についても検討した。

### b)イオン移動による元素分布形成メカニズムの解明

ガラスの組成は、密度・比熱・粘度・屈折率・熱伝導率・発光特性等、ガラスの様々な物性を支配する重要なパラメーターである。局所的な組成の制御は、局所的な物性の制御につながると考えられる。超短パルスレーザーは材料を局所的に改質させ機能化させる有力な手段として認識されてきた。近年、多成分ガラス内部への高繰り返しフェムト秒レーザー照射後、局所的な組成変化が生じることが報告され注目されている。これは、レーザー照射中にガラス内の元素が移動していることを意味し、これを利用することでガラス内部の組成分布を自由に換えられる可能性があることから基礎・応用の両面において興味深い。しかし、その元素の移動の駆動力について、レーザー照射中の衝撃波や圧力分布といった推測がなされているが、その証拠はまだ得られていない。駆動力の解明は最終的に形成される元素分布を予測する際の重要な指針を与えると考えられる。そこで、元素移動の駆動力の特定を試みた。具体的には、高繰り返しフェムト秒レーザー照射中の温度分布に基づいた拡散シミュレーションを行い実験結果と比較した。

図Ⅲ①(1)-11 は 50(mol%)CaO-50SiO<sub>2</sub> ガラス内部に 80 fs、800 nm、2.0 mJ、250 kHz の高繰り返しフェムト秒レーザーを空間的に離れた一点に照射、もしくは二点に同時照射、することにより

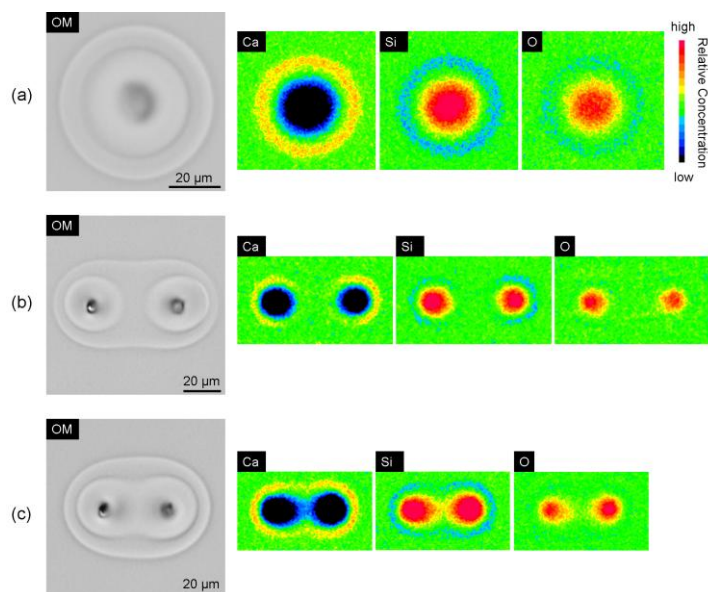
形成された構造変化の光学顕微鏡像

(左)、および元素分布(右)を表している。

まず、(a)の光学顕微鏡像中に二重の境界が存在しているのがわかるが、このうち外側の境界におけるレーザー照射中の温度は、このガラスのガラス転移温度に近く、ガラスの応力緩和により屈折率が上昇している。一方、内側の境界内部ではガラスを構成する Si, Ca, O の元素の濃度分布が変化していることがわかる。

屈折率は組成に依存するため、内側の境界が存在すると考えられる。次に元素の濃度分布を見ると、Si が照射点中心の高温領域で、Ca が照射外側の低温領域で多くなっていることがわかる。

一方、二点同時照射した場合の(b)(c)で特徴的な元素分布が見られる。(b)において、照射二点間においてカルシウムの高濃度領域(赤もしくは黄色の領域)が存在しておらず、また(c)のカルシウムの分布はひょうたん型の形状となりかつ二点間でのカルシウムの高濃度領域が薄くなっている。さらに、(c)のシリコンの分布は涙形の形状となっている。以上の特徴的な濃度分布は、



図Ⅲ①(1)-11 レーザー照射後の光学顕微鏡像と元素分布 (a)一点照射 (b) (c)二点照射

がわかる。一方、二点同時照射した場合の(b)(c)で特徴的な元素分布が見られる。(b)において、照射二点間においてカルシウムの高濃度領域(赤もしくは黄色の領域)が存在しておらず、また(c)のカルシウムの分布はひょうたん型の形状となりかつ二点間でのカルシウムの高濃度領域が薄くなっている。さらに、(c)のシリコンの分布は涙形の形状となっている。以上の特徴的な濃度分布は、

照射した二点間における相互作用を表していると考えられ、メカニズムの解明に大きなヒントを与えてくれる。そこで、濃度勾配と温度勾配によるイオンの拡散のみが現象を主に支配していると仮定し、拡散方程式に基づくシミュレーションを行った。二成分相互熱拡散二成分の系について考える。拡散種は SiO<sub>2</sub> と CaO と仮定した。温度勾配を駆動力とした拡散は、濃度勾配を駆動力とした拡散と同時に起こり、その成分 1、2 のフラックス  $J_1$ 、 $J_2$  は、一次元の系において、次式で表せる。

$$J_1 = -D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} - \frac{D_1 Q_1 C_1}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial x} + C_1 v$$

$D_i$ : 自己拡散係数、 $C_i$ : モル濃度、 $Q_i$ : *heat of transport*

$$J_2 = -D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} - \frac{D_2 Q_2 C_2}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial x} + C_2 v \quad R: \text{気体定数、} v: \text{mass flow の速度、} T: \text{温度}$$

上の二つの式中の第一項は濃度勾配を駆動力とした拡散、第二項は温度勾配を駆動力とした拡散、第三項は拡散によって発生する mass flow を表している。(今回、重力下での密度の空間的な不均一によって発生する対流の効果は無視した。)ここで、これらの式の間には、 $\Omega_1 J_1 + \Omega_2 J_2 = 0$ 、 $\Omega_1 C_1 + \Omega_2 C_2 = 1$  の関係が成り立つため、

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -\frac{\partial J_1}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \{(1 - \Omega_1 C_1) D_1 + \Omega_1 C_1 D_2\} \frac{\partial C_1}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ C_1 (1 - \Omega_1 C_1) \frac{D_2 Q_2 - D_1 Q_1}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right]$$

となる。シミュレーションにはこの式を用いた。また、温度分布は実験的に見積もられたものを用いている。

図 III ①(1)-12 はシミュレーションに使用した温度分布(a)-(c)と拡散後の Ca 濃度のシミュレーション結果(d)-(f)、および Si 濃度のシミュレーション結果(g)-(i)を表している。この結果から上述の特徴的な元素分布が非常に良く再現されていることがわかる。計算で考慮しているのは濃度勾配と温度勾配による拡散のみであり、特に前者は、できた濃度分布を均一にする方向へ働くため、元素分布形成の原因は主に温度勾配が原因であると特定できた。以上のシミュレーション結果から、二点照射時の特徴的な元素分布のメカニズムを予測することができる。

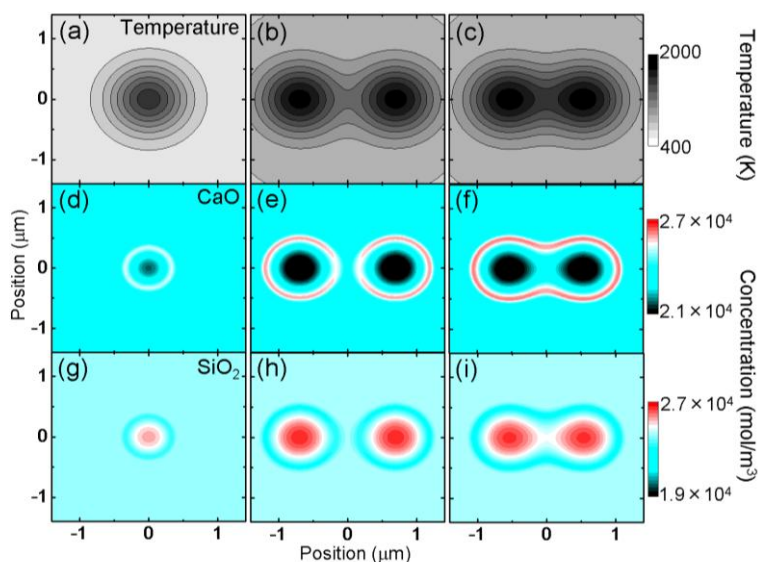
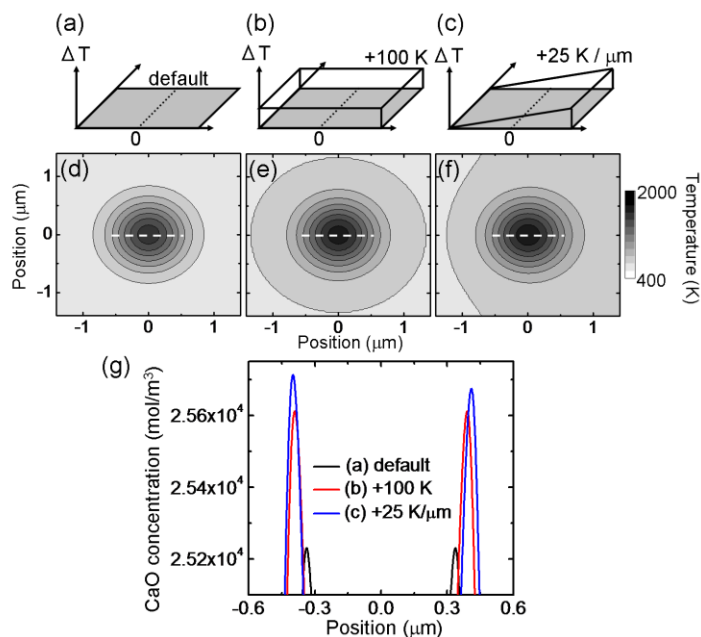


図 III ①(1)-12 シミュレーション結果(a)-(c)計算に用いた温度分布(d)-(f) Ca の元素分布(g)-(i) Si の元素分布

具体例として、図Ⅲ①(1)-11 (b)において二点間で Ca の高濃度領域が存在しなかったが、これについて考察を試みた。一点照射を仮定し、図Ⅲ①(1)-13 (a)(d)の温度分布を初期値としてそこに全体的に 100 K の温度上昇を加えた場合(図Ⅲ①(1)-13 (b)(e))と 25 K/ mm の温度勾配を加えた場合(図Ⅲ①(1)-13 (c)(f))で、どのように Ca の温度分布が変化するかを計算した結果が図Ⅲ①(1)-13 (g)である。全体的に 100 K の温度上昇を加えた場合では元素分布の濃度のピークはより大きくなっていることがわかる。

一方、温度勾配を加えた場合には、右側の方が濃度のピークが小さくなっていることがわかる。平均的な温度は中心より右側で高いため濃度のピークは高くなるはずであるが、この場合小さくなっているということは温度勾配が中心より右側で緩やかであるために濃度分布ができにくくなっていると言える。以上から図Ⅲ①(1)-11 (b)において二点間で Ca の高濃度領域が存在しなかった理由は、照射二点間での熱の干渉によって温度勾配が緩やかになり元素分布が形成され難くなったためと考えられる。



図Ⅲ①(1)-13 追加温度下で Ca の元素分布。(a)-(c) 追加した温度の模式図 (d)-(f) 温度分布 (g) Ca の濃度分布 ((d)-(f)における白い点線上の値)

高繰り返しフェムト秒レーザー照射時の元素移動現象が主に温度勾配が駆動力となり生じていることを明らかにした。また、今回提示した二点同時照射による元素分布の形成は今後、ガラス内部にレーザーを多点で同時照射し、一括で任意の元素分布を形成する際の最も基礎的なデータである。ガラスの組成はガラスの様々な物性に寄与するため、この現象は光導波路やマイクロレンズアレイ等、様々な光デバイスへの応用が期待できる。

#### 参考文献

- 1) K M. Davis, K Miura, N. Sugimoto and K Hirao, Opt. Lett. 21 (1996) 1729.
- 2) K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, and K. Hirao, Appl. Phys. Lett., 71 (1997) 3329.
- 3) J. Qiu, K. Miura, and K. Hirao, Jpn. J. Appl. Phys., 37 (1998) 2263.
- 4) K. Hirao and K. Miura, Jpn. J. Appl. Phys., 37 (1998) 49.
- 5) K. Miura, H. Inouye, J. Qiu, and K. Hirao, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B141(1998) 726.
- 6) K. Miura, J. Qie, T. Mitsuyu, and K. Hirao, Proc. SPIE, 3618 (1999) 141.



- 7) K. Hirao, J. Qiu, K. Miura, T. Nakaya, and J. Si, *United Approaches to Materials Science*, 29, No.1 (2004) 3.
- 8) J. Qiu, K. Miura, and K. Hirao, *Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering* 5061 (2003) 82.
- 9) K. Miura, J. Qie, T. Mitsuyu, and K. Hirao, *Opt. Lett.* 25 (2000) 408.
- 10) K. Miura, J. Qiu, S. Fujiwara, S. Sakaguchi, K. Hirao, *Appl. Phys. Lett.*, 80 (2002) 2263
- 11) Y. Shimotsuma, G. P. Kazansky, J. Qiu, and K. Hirao, *Phys. Rev. Lett.*, 91, (2003), 247405.
- 12) Y. Yonesaki, R. Araki, K. Miura, K. Fujita, and K. Hirao, *Journal of Non-Crystalline Solids* (2005) 885.
- 13) J. Qiu, Y. Shimotsuma, K. Miura, P. G. Kazanski, and K. Hirao, *SPIE*, 5713 (2005) 137.
- 14) Y. Shimotsuma, K. Hirao, J. Qiu, and K. Miura, *J. Non-Cryst. Solids* 352, 646-656 (2006).
- 15) M. Sakakura, and M. Terazima: *Phys. Rev. B.* 71 (2005) 024113.
- 16) K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Hamabe and K. Hirao, *Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering* 6413, 64130K-1-13 (2006).
- 17) M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, *Optics Express*, Vol.15, No.9 (2007) pp.5674-5686
- 18) M. Sakakura, M. Terazima, K. Miura, and K. Hirao, *The Review of Laser Engineering*, 35, No.2. (2007)109.
- 19) M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, *Optics Express*, Vol.15, No.25 (2007) pp.16800-16807
- 20) S. Kanehira, K. Miura, and K. Hirao, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 023112-1 (2008)

## 2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

### (1) はじめに

フェムト秒レーザー照射によるガラス内部の改質に関しては多くの研究例が報告されている。ガラスは広いバンドギャップに由来する高いレーザー加工閾値を有するので、フォトニクス材料やバイオフォトニクス材料への応用に対して魅力的であり、そのため、材料としてガラスが利用される。シリカガラスは導波路やマイクロ流路作製に最も広く用いられている。[1-4]一方で、多成分系光学ガラスは所望の光学機能を持たせるためにガラスネットワーク構造を容易に変化させることができ、アクティブな集積素子を作製するためには有望な材料である。非常に様々なガラス系に対して異なるレーザー照射条件下で実験されている。しかしながら、加工メカニズムについては未だに明らかになっていないことが多い。[5-10]その理由としては、加工条件、屈折率差の測定方法、ガラス種、異質相の状態などが多種多様であり、また、フェムト秒レーザーという非常にパルス幅が短いレーザーによる改質のメカニズムが非常に複雑であることに起因すると考えられる。

本研究では、光学ローパスフィルタ (Optical Low Pass Filter ; OLPF) をターゲットデバイスとした光学デバイス加工用ガラス材料の開発を目的としている。従来のOLPFよりも薄型にするためには、フェムト秒レーザー照射により異質相の屈折率差 (以下  $\Delta n$  と表す) が大きく取れるガラス材料が必要となる。また、撮像光学系での使用に耐える可視光領域での高い透明性を併せ持つ材料の開発が必要である。そのため、ガラス内部に形成される異質相の母材との屈折率差が0.015である光学ガラス材料を開発することを最終目標としている。

本研究は、高  $\Delta n$  を実現するガラスを開発するにあたって、レーザーパワーの変化に対する  $\Delta n$  の変化に関する基礎的な情報を取得するべく、金属酸化物種と含有量が異なるシリケート系、ボロシリケート系を中心に光学ガラスを選定し、フェムト秒レーザー照射により形成された異質相の  $\Delta n$  の比較を行う。また、 $\Delta n$  データの解析から高  $\Delta n$  が予想されるガラスの検討を行い、候補となるガラスを選定する。選定されたガラスに対して、レーザー照射並びに  $\Delta n$  の評価を行うとともに、 $\Delta n$  の起源を解明するために異質相部の調査を行う。最終的には、異質相部の調査結果に基づき、より低いエネルギーで大きな  $\Delta n$  を実現するガラスを検討する。

### (2) 実験方法

#### 1) $\Delta n$ 測定

##### 1) - 1 レーザー照射条件と $\Delta n$ 測定方法

可視光領域 (400-760nm) で透明な市販の光学ガラスから、珪酸塩 (シリケート系) あるいはホウ珪酸塩 (ボロシリケート) 系ガラスをベースとし、異なる金属酸化物 ( $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、

Ba0) を修飾酸化物として含有するガラスを選定し、これらにフェムト秒レーザーを逐次照射で加工した。レーザー加工したガラスの組成系並びに主要物性は表 GT1 に示される。図 GF1 に加工光学系の模式図を示す。集光には異なる 2 種類の対物レンズ(10 倍、N. A. =0.3 と 40 倍、N. A. =0.85) を用いた。本分中に記載される平均出力は対物レンズ手前の測定値を記載する。一方、ピークパワー密度は対物レンズを透過した光の焦点位置のパワーとして記載した。レンズは倍率、開口数が異なり、対物レンズ手前のパワーが同じでも焦点位置でのパワー密度が異なる。ピークパワー密度を算出するあたり、使用した対物レンズの焦点位置のスポット面積は、下記(式 GE1)により求められ(表 GT2)、パワー密度は表 GT3 に示される。

$$w_F = \frac{\lambda f M^2}{\pi w_L} \quad (\text{式 GE1})$$

ここで、 $w_F$  は焦点位置のスポット半径、 $w_L$  は平行光の集光レンズ位置での半径、 $M^2$  はビーム品質のファクターであり、理論的なガウシアンビームでは  $M^2=1.0$  となる。本研究では、簡略的に  $M^2=1.0$  を用いた。[G11]

サンプルは X-Y 方向に移動するエアベアリングステージに設置され、フェムト秒パルスレーザーを対物レンズを介してガラス内部に集光照射し、一定の速度でスキャンすることで図 GF2 のように 1 パルスで形成される点状の異質相が連結した擬似的なライン状異質相を形成する。 $\Delta n$  測定用サンプルの詳細なレーザー加工条件は表 GT4 に示す。加工深さは対物レンズに設置されたピエゾ素子でサンプルの傾きに対して深さが一定となるように一定の速度で移動させた。また、 $\Delta n$  測定用サンプルは図 GF2 の配置のように前記の異質相ラインと垂直方向に適度な厚みで切り出され、断面に異質相ラインが露出するように所望の厚みまで鏡面研磨される。 $\Delta n$  測定は後述する定量位相顕微鏡でライン断面方向からの  $\Delta n$  を評価した。

本加工技術により得られる加工品の光学デバイスへの応用を考えると、前記  $\Delta n$  とその分布に関して、サブミクロンの分解能で異質相の  $\Delta n$  を測定し、設計と加工にフィードバックを行う必要がある。これまでに、高精度に(スペックとして、可視光領域で面分解能：サブミクロン以下、測定精度：0.001±0.0005 以下) 評価可能である手法として有望であると考えられた定量位相顕微鏡を利用することとして測定してきた。加えて、この手法であれば、 $\Delta n$  の符号も含めて測定可能である。ここで、定量位相顕微鏡は、定量位相イメージング技術が倒立型顕微鏡に組み込まれたものであり、空間的干渉光学像から定量的な位相像が測定される。光源には He-Ne レーザー(633nm) が用いられ、1×2 のシングルモードファイバー光学カプラーに結合され、二本の平行光が出力される。そのうち一本の光束が倒立顕微鏡の照射光(物体光)として用いられ、ビームスプリッターキューブを通過したサンプル像は、チューブレンズにより CCD 面に結像される。一方、カプラーからもう一本の出力光は参照光であり、コリメータレンズで平行光にされた後、もう一つの顕微鏡

対物レンズとチューブレンズから成るテレスコープ系によりビーム径が拡げられる。この参照光はサンプル像と干渉する平面波として近似される。参照光は X 軸と Y 軸に関して 45° で均一な干渉縞を形成するようにサンプル像に対して傾けられている [G12-14]。(図 GF3) 表 GT5 に定量位相顕微鏡の測定条件ならびにスペックを示す。

この測定法では、サンプルが厚すぎる場合や、局所的な屈折率変化が大きい場合などは位相飛びが生じてしまい、うまく測定できない場合がある。従って、予めサンプルの  $\Delta n$  を下記 (式 GE2) から予測し、サンプル厚みを適宜調整する必要がある。ここで、 $\phi$  : 位相 (ラジアン)、 $\Delta n$  : 屈折率変化量、 $d$  : 幾何学長 (サンプルの厚み)、 $\lambda$  : 測定波長である。従って、(式1) より  $\Delta n$  と  $d$  の積が  $2\pi$  以内になるようにサンプルを作製する。仮に  $\Delta n = 0.01$  (0.7%) が想定されるとき、 $d = 63.3\mu\text{m}$  以下が好ましい。典型的な厚みは  $20\sim 30\mu\text{m}$  とした。

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{d \times \Delta n}{\lambda} \quad (\text{式 GE2})$$

図 GF3 において、サンプルは 2 枚のカバーガラスに挟み込まれる。サンプルーカバーガラス、或いはサンプルー対物レンズの間にスペースがあると多重反射が生じ測定ノイズが大きくなる。そのため、測定の際には各界面に屈折率マッチングオイルを挿入した。表 GT6 に示されるように、60 倍で  $0.001 \pm 0.002$  で測定できることを確認している。

## 2) 異質相の形態評価

### 2)-1 SEM 観察

$\Delta n$  測定サンプルにおいて、ガラス内部に形成されたライン状異質相は研磨面に露出した状態である。異質相には空洞や穴がない連続した屈折率変化であることを想定しており、確認のために空洞や穴の有無を SEM により観察した。SEM 観察用サンプルはラインと垂直方向に破断された断面を観察した。破断面にはエッチング処理などは行わず、導電処理としてカーボン蒸着を施した。表 GT7 に測定条件を示す。

### 2)-2 TEM 観察

ガラス内部の異質相部と母材部について、結晶状態を評価するために、異質相断面の薄片試料の TEM 観察を行った。薄片はイオンミリング法で作製された。表 GT8 に測定条件を示す。

## 3) 異質相の組成分析 (EPMA)

EPMA の異質相周辺の特異 X 線強度を計測し、ZAF 補正法により定量した。サンプルは樹

脂包埋後、研磨処理を行い、研磨面の測定を行った。導電処理としてカーボン蒸着を実施した。表 GT9 に EPMA による定量分析と線分析の測定条件を示す。

得られた濃度変化から ZAF 補正法により wt%濃度を算出した。標準試料の各成分の濃度および対応する特性 X 線の強度から 1 点検量線を作成し、その検量線と各元素の特性 X 線強度  $I_{\text{sample}}$  から含有成分の wt%濃度  $C_{\text{sample}}$  に換算した。より具体的には、以下の手順 (1) から (4) のとおりである。

- (1) 標準試料を EPMA で測定し、ZAF 補正法により含有成分の wt%濃度  $C_{\text{sample}}$  を算出。
- (2) 標準試料を線分析と同条件（加速電圧、照射電流、スキャン方法・範囲、ビーム径、間隔）で測定し、ピークおよび 2 点のバックグラウンドの計 3 点それぞれの強度を  $40\ \mu\text{m}$ 、1001 点にわたって計測して各平均値  $I_{\text{peak}}$ 、 $I_{\text{bg1}}$ 、 $I_{\text{bg2}}$  を求めた。
- (3)  $I_{\text{bg1}}$  と  $I_{\text{bg2}}$  との平均  $I_{\text{bg}}$ 、 $I_{\text{peak}}$  から  $I_{\text{bg}}$  を減じた値をピークのネット強度  $I_{\text{net}}$  とし、 $I_{\text{net}}$  を標準試料中の各成分の wt%濃度  $C_{\text{std}}$  で除した値 ( $I_{\text{net}}/C_{\text{std}}$ ) を検量線の傾き  $S$  とした。
- (4) 各成分の wt%濃度  $C_{\text{sample}}$  を以下の GE4 によって求めた。

$$C_{\text{sample}} [\text{wt}\%] = (I_{\text{sample}} [\text{count}] - I_{\text{bg}} [\text{count}]) / S [\text{count}/\text{wt}\%] \quad \dots \text{式 GE4}$$

### (3) 実験結果および考察

#### 1) $\Delta n$ 測定

定量位相顕微鏡による典型的な  $\Delta n$  測定画像として、対物レンズ 10 倍を用いて加工した場合を図 GF5 から 8 に示す。また、対物レンズ 40 倍を用いて加工した場合を図 GF9 から 12 に示す。レーザーの入射方向は赤矢印で示され、画像上部から下部方向である。対物レンズ 10 倍を用いた加工では、異質相の形状は光軸方向に細長く、 $\Delta n$  の分布は比較的均質であった。大部分の光学ガラスにおいて、異質相の中心部の屈折率は減少した。パワーの増加に伴い異質相上部の幅が増大した。シリカガラス、今回の投入パワーの範囲では、 $\Delta n$  の値は  $\sim 0.002$  以下と比較的小さく、屈折率は増加した。また、 $\text{La}_2\text{O}_3$  含有系でも、中心部の  $\Delta n$  は増加する傾向が見られた。 $\text{BaO}$  含有系、 $\text{TiO}_2$  含有系のガラスでは  $\Delta n$  は減少する傾向が見られ、パワーの増加に伴う  $\Delta n$  は比較的大きかった。

一方、対物レンズ 40 倍を用いた加工では、異質相の形状やサイズは、シリカガラスの場合と他の光学ガラスの場合では大きく異なることが確認された。シリカガラスの場合は、パワーが増加しても幅の増大は見られず、他の光学ガラスについては、幅が増大した。異質相の中心部は、光学ガラスの場合は屈折率の変化がほとんどないか減少し、その周囲に  $\Delta n$  が増加した個所がリング状に分布し、更にその外周では  $\Delta n$  が減少していた不均一な分布となった。異質相のサイズは、パワーの増加に伴い大きくなった。 $\Delta n$  の値は、シリカガラスにおいては、120mW 以上からパワーの増加に伴い急激に大きくなった。40x レンズを用いて 360mW 投入時には、異質相の上部の  $\Delta n$  がプラスの場合とマイナスの場合があった。

BaO 含有系や TiO<sub>2</sub> 含有系では、 $\Delta n$  は減少する傾向が見られた。La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系は、パワーの増加に伴い、 $\Delta n$  はプラス側に大きくなる傾向が見られた。

各ガラスの  $\Delta n$  の最大値（プラス側）／最小値（マイナス側）の結果を表 GT10 に示す。また、図 GF13 に、 $\Delta n$  の最大/最小値のピークパワー密度に対するプロットを示す。

図 GF13 において、同一ピークパワー密度におけるプラス／マイナス側の値は一对の値である。これより、プラス／マイナス側への変化のし易さは、ガラスによって傾向が異なることが確認できる。40 倍のレンズを利用することで大部分のガラスにおいて  $\Delta n$  は 0.01 を越えた。これより、集光度の高いレンズを利用し、ピークパワー密度が高い照射条件であれば、 $\Delta n$  を大きく取り易くなることが示唆された。光学デバイスへの応用やその実用化を考えると、 $\Delta n$  が大きく取れる光学ガラスに加工することにより、光学デバイスの薄型化が期待でき、更に、加工時間の短縮、加工エネルギー低減による低コスト化も可能となると考えられる。一方で、大きな  $\Delta n$  に加えて、低加工エネルギー、異質相のサイズや  $\Delta n$  の分布の制御は課題である。

## 2) 異質相の形態評価 (SEM)

$\Delta n$  の分布に関して、40x 対物レンズを用いた加工では、比較的ピークパワー密度が高く、微小空洞 (ボイド) 形成などの現象が懸念される。ガラスによっては異質相部に空洞形成が起り可能性があると考えられる [G16, 17]。仮に空洞が形成されていた場合、 $\Delta n$  の測定箇所の空洞部が外部に開いているかどうかで屈折率の測定結果が変化する可能性がある。即ち、空洞が形成されていると、空洞部が閉じた状態であれば空洞部はガラスより屈折率が低いので屈折率が低下 (マイナス方向に変化) するはずである。一方で、空洞部が開いている場合、本研究ではサンプルをマッチングオイルで浸しており、オイルが空洞部に入ると、ガラスとオイルの屈折率差となり、ガラスの屈折率がオイルより高ければ空洞部 (オイルで満たされれば) 屈折率は低下する。

そこで、異質相部の空洞形成の有無について調査すべく、レーザー加工後のライン状異質相の破断面の SEM 観察を行った。多成分系光学ガラスと VIOSIL (シリカガラス) を対象とし、40 x 対物レンズを用いて形成された異質相の破断面をエッチング処理なしの状態を観察した。結果として、光学ガラスにおいては、空洞の痕跡は確認されなかった。一方で、VIOSIL (シリカガラス) では微小空洞が 100 ナノのオーダーで配列したナノクラック構造が確認された (図 GF14)。形状や加工時の配置は文献 [G8] に報告されているものと類似していた。ナノクラックの幅は一定ではなく、場所によっては閉じている個所があった。

シリカガラスの  $\Delta n$  測定結果について、上述の図 GF9 の  $\Delta n$  測定結果において、40x レンズを用いて 360mW 投入時には、異質相の上部の  $\Delta n$  がプラスの場合とマイナスの場合があることを述べた。これは、恐らくクラックの幅にバラつきがあることやマッチングオイルが空洞部に入るかどうか起因すると考えられた。仮に、オイルがクラックに侵入してい

る場合には、ガラスとマッチングオイルの屈折率の差となり、屈折率はオイルの方が大きい( $n_{\text{Viosil}}=1.45$  に対して  $n_{\text{Oil}}=1.51$ ) ので、 $\Delta n$  はあたかも増加した値として観測される可能性がある。以上より、微小空洞やナノクラック構造が存在する場合には本手法では測定が困難であり、別途検討する必要がある。一方で、その他の多成分光学ガラスに関して、10x レンズを用いた加工においては、今回パワーレンジであれば 40x の場合よりもピークパワー密度としては小さいので、空洞形成は起こり難くなると考えられ、空洞形成が起こる可能性は極めて低いと考えられる。従って、先の異質相の均質性に加えて、空洞形成しにくいという観点からも 10x レンズを用いた加工で得られた  $\Delta n$  のデータを比較することが好ましいと考えられた。

### 3) 大きな $\Delta n$ を示すガラスの検討

前記のとおり、低パワー密度レンジの照射条件下では比較的均質な異質相が得られ易いことが確認された。照射条件では、 $\text{TiO}_2$  を含有するシリケート系ガラスにおいて比較的大きな  $\Delta n$  の減少が確認された。 $\Delta n$  が低下するメカニズムは明らかではないが、 $\text{TiO}_2$  を含有する光学ガラスは比較的高屈折率なガラスであり、そのため異質相部と母材とのが大きく取れていることが考えられた。一方で、本研究では可視光領域で透明なガラスの開発を目標としており、400nm の光が透過する必要がある。そこで、400nm の波長の光が透過するガラスのうち、 $\text{TiO}_2$  を比較的多く含有することができるガラスについて調査したところ、 $\text{TiO}_2$  を多く含有するリン酸塩系ガラスが候補に挙げられた。そこで、 $\text{TiO}_2$  を含有するリン酸塩系ガラスにレーザー照射し、 $\Delta n$  の評価を検討することにした。

### 4) 選定ガラスへのレーザー照射と $\Delta n$ 評価

選定したガラスは組成系としては  $\text{TiO}_2$  と  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を含有するリン酸塩系ガラスであり、ガラス自身の高屈折率化に寄与する  $\text{TiO}_2$  や  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を多く含有する。前記と同様のレーザー照射条件で対物レンズ 10x (0.3) を用いて逐次レーザー加工を行い、異質相の  $\Delta n$  を評価した。ガラス A は、120–360mW では薄く着色したような変化が観察された。一方、480mW では比較的高コントラストの高い異質相が形成された。図 GF19 に異質相ライン断面の  $\Delta n$  測定結果を示す。赤矢印はレーザーパルスの入射方向である。480mW (ピークパワー密度で  $8.5 \times 10^{13}$ ) のとき、最大値と最小値はそれぞれ 0.002 と -0.017 であり、 $\Delta n$  分布は比較的均質であった。また、加工エネルギーに関しては、ピークパワー密度で比較すると、 $8.5 \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$  であり、シリカガラスの場合の  $6.8 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$  よりも 1/8 程度のエネルギーで  $\Delta n=0.015$  を越えた(図 GF20)。異質相ラインの断面形状は、異質相下部(パルス伝播方向の後半側)の屈折率が変化していない(欠けた)形状であった。図 GF8 の Ti-3 においても同様な傾向が強かった。このような形状になる原因は明確ではなく、より詳細な検討が必要である。しかし、適切なレーザーパワー密度でレーザーを照射できれば、形状制御は可能であると考

える。図 GF21 にガラス A の透過率曲線を示す。波長 400nm において若干の吸収はあるが、可視光領域(400–760nm)で透明なガラスである。

## 5) 異質相の形態評価(TEM)

前記のとおり、本研究における 10x レンズを用いた加工条件の範囲であれば、多成分系の光学ガラスにおける空洞形成の可能性は極めて低いと考えられた。比較的大きな  $\Delta n$  が形成されたガラス A でも空洞形成の痕跡は確認されていなかった。そこで、ガラス A の異質相に関して TEM 観察を行った。図 GF22 に示されるように光学顕微鏡で異質相位置を確認しながらイオンミリングで薄片を作製した。サンプルが薄くなるほど光学顕微鏡像における異質相部のコントラストが低くなったが、図中の黄色矢印の先端部を結んだ辺りに異質相と母材の界面がある。次に、図 GF23 に、TEM 観察像の位置関係を示す。A は異質相部、B は未加工部(母材部)である。図 GF24 のとおり異質相部は周辺の未加工部と比べてほとんど差が無く、アモルファス状であった。

## 6) 異質相の組成分析(EPMA)

近年、繰り返し周波数が 100kHz を越える高繰返しフェムト秒レーザー照射により形成された異質相に濃度変化が起きていること報告されている[G18]。上記ガラス A についても EPMA により異質相とその周辺部の成分濃度の変化の有無を調査した。異質相部は SEM 反射電子像(組成像)で異質相部がかろうじて認識できることから、異質相部には濃度変化が起きていると考えられた。図 GF25 に測定場所 A、B、C の光学顕微鏡を示す。図 GF26 に各ポイントの異質相部における濃度分析後の SEM 組成像を示す。また、図 GF27 に、異質相 A、B、C における各元素成分の濃度プロファイルを示す。各成分の信号強度は弱く、測定個所の違いにより種によっては濃度増減の結果にバラつきがあった。表 GT11 に異質相部 3 箇所の濃度増減をまとめた。各異質相ポイントで成分の信号強度変化のプロファイル結果が僅かに異なった。傾向としては、P、O は異質相部で信号強度が増加し、Na は減少する傾向が確認された。Ti や Nb などの高屈折率に寄与するイオンの濃度変化はほとんどないようであった。以上より、このガラスにおける屈折率差の原因は、成分の濃度変化に起因することが考えられた。異質相部で屈折率が低下した原因としては、アルカリ成分の濃度が低下し、ガラス形成酸化物量が増加し、架橋酸素が増加することで酸素のイオン屈折が低下し、屈折率が低下したことが考えられる。[G19]

## 7) 高 $\Delta n$ 低エネルギー化の検討

前記のとおり、大きな屈折率差を示したガラス A において屈折率差の原因は含有成分の濃度変化に起因することが考えられた。濃度変化と成分の特徴は次の 2 種類に分類できる。即ち、①移動しない高屈折率成分(Ti、Nb)、②移動する低屈折率成



分 (Na、P、O)。それぞれの動きについて明らかにはできていないが、①、②量の比率を変えたときの屈折率変化について調査した。図 GF28 と 29 にそれぞれガラス B とガラス C の  $\Delta n$  測定結果を示す。

表 GT12 に、ガラス B、C の各パワーにおける  $\Delta n$  測定値をガラス A の結果と合わせて示す。また、図 GF30 に  $\Delta n$  の最大値／最小値をピークパワー密度に対してプロットする。これらより、ガラス C では  $\Delta n = -0.018$  が確認され、ガラス A の  $\Delta n = -0.017$  よりも  $\Delta n$  が僅かに大きくなった。また、B では、360mW で  $\Delta n = -0.017$  が確認された。これは、ガラス A の 75%程度のパワーで  $\Delta n = 0.015$  を達成したことに相当する。また、図 GF31 に、ガラス B、C の可視光領域の透過率の結果をガラス A の結果と合わせて示す。これより、ガラス B では吸収端の位置が短波長側にシフトし、可視光領域の透過率も改善されていることが確認できた。

#### (4) まとめ

フェムト秒レーザーをガラス内部に集光し、逐次照射加工で形成されたライン状異質相の断面方向からの  $\Delta n$  分布を定量位相顕微鏡（波長 633nm）で評価した。 $\Delta n$  は母材ガラスに対して増加（プラス側）と減少（マイナス側）の両方向に分布を示し、プラス／マイナス側への変化のし易さの傾向はガラスによって異なることが確認された。40x (0.85) 高パワー密度レンジの加工では、パワーの増加に伴い  $\Delta n$  は大きくなる傾向が確認された。一方で、異質相部の  $\Delta n$  は不均質な分布を示す。10x (0.3) レンズを使用した加工では比較的均質な  $\Delta n$  分布が得られ易いことが確認された。また、 $TiO_2$  を含有するシリケート系ガラスで比較的高い  $\Delta n$  が確認された。更に、 $TiO_2$  を含有するリン酸塩系ガラスにおいてより大きな  $\Delta n$  が 0.015 を越えることが確認された。このガラスの異質相部では EPMA の組成分析の結果、濃度変化が確認され、主成分の配合比率を調整することで、さらに 75%のエネルギーで  $\Delta n$  が 0.015 を越えるガラスが開発された。

・ 図表

表 GT1 ガラスサンプルのガラス系と各物性値

ガラス	ガラス系	$n_d$ :屈折率 (d線=587.56nm)	$v_d$ :アッベ数	Tg:ガラス転移点 (°C)	$\alpha$ :線膨張係数 (-30→+70) ( $\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ )	E:ヤング率 ( $\times 10^9 \text{ N/m}^2$ )	$\lambda_5$ :吸収端近傍波長 (nm)
Ba-3	BaO含有-珪酸塩系	1.589	61.2	527	66	1008	300
Ba-4		1.639	44.9	608	76	904	350
Ba-5		1.723	38.0	643	66	911	360
La-1	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含有-ホウ珪酸塩系	1.651	56.2	651	71	877	330
La-3		1.755	52.3	700	58	1222	280
La-4		1.806	40.4	566	58	1127	340
La-5		1.883	40.8	738	66	1268	320
Ti-1		1.567	42.8	552	79	739	350
Ti-3	TiO <sub>2</sub> 含有-珪酸塩系	1.689	31.1	611	82	855	360
Ti-4		1.805	25.4	604	89	931	370
F-1	F含有-ホウ珪酸塩系	1.487	70.2	500	90	623	270
VIOSIL	シリカ	1.45					

表 GT2 加工対物レンズとスポットサイズの理論値

倍率	N. A.	焦点距離 f (mm)	スポット半径 $w_F$ ( $\mu\text{m}$ )	スポット面積 ( $\text{cm}^2$ )
10x	0.3	18	1.53	$7.33 \times 10^8$
40x	0.85	4.5	0.38	$6.73 \times 10^9$

表 GT3 投入パワーとパワー密度の関係

平均出力 (mW)	60	120	240	360	480
パルスエネルギー ( $\mu\text{J}/\text{pulse}$ )	0.24	0.48	0.96	1.44	1.92
平均出力 at Focus (mW)	39	78	156	234	312
パルスエネルギー at Focus ( $\mu\text{J}/\text{pulse}$ )	0.16	0.31	0.62	0.94	1.25
<b>10x (0.3)</b> ピークパワー密度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )		2.13E+13	4.25E+13	6.38E+13	8.51E+13
<b>40x (0.85)</b> ピークパワー密度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	1.13E+14	2.27E+14	4.54E+14	6.81E+14	

※ピークパワー密度は実パルス幅 ( $\tau=200\text{fs}$ ) で算出された。

表 GT4  $\Delta n$  測定用サンプルレーザー加工条件

中心波長	nm	:	800
パルス幅	fs	:	200                      300fs (AC)
繰返し周波数	kHz	:	250
平均出力	mW	:	120-480
対物レンズ		:	10x (0.3)
スキャンスピード	mm/s	:	1
加工ピッチ	$\mu\text{m}$	:	1
加工深さ	$\mu\text{m}$	:	200

表GT5 定量位相顕微鏡の測定条件並びにスペック

測定波長：	632.8nm
測定領域：(各倍率)	(100倍) 80x60 $\mu\text{m}$ (60倍) 100x133 $\mu\text{m}$ (20倍) 300x400 $\mu\text{m}$
記録画素数：	2040×1536 [310万]
記録階調：	12 bit
空間方向分解能：	測定波長程度 (対物レンズによる異なる)
垂直方向分解能：	理論値 $\lambda/8000$ 、実効値 $\lambda/100 - \lambda/1000$ 程度
屈折率変化分解能：	0.0001程度 (条件により異なる)
(標準偏差によるノイズ特性評価)	
垂直方向分解能：	5nm程度
屈折率変化分解能：	0.0002程度
垂直方向の繰返し分解能：	0.05nm程度 (実績値)

表GT6  $\Delta n$ 測定結果の精度

観察倍率	測定回数	$\Delta n(-)$	標準偏差 $\sigma$	$\Delta n(+)$	標準偏差 $\sigma$
60倍	1	0.0017	-0.0095	0.0085	
	2	0.0017	-0.0105	0.0082	
	3	0.0016	-0.0096	0.0106	
	平均	-0.0099	0.0004	0.0091	0.0011

表 GT7 SEM 測定条件

装置	:	FE 走査型電子顕微鏡 (JSM-7500F, 日本電子製社製)
測定方法	:	二次電子像観察
加速電圧 kV	:	1.5

表 GT8 TEM 測定条件

装置	:	透過型電子顕微鏡 (日立製 H-9000 UHR III)
測定方法	:	明視野像、制限視野電子回折パターン
加速電圧 kV	:	300
イオンミリング	:	PIPS 691 GATAN 社製

表 GT9 EPMA による定量分析と線分析の測定条件

装置	:	フィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザ (FE-EPMA) JXA-8500F (日本電子製)
検出元素	:	5・B~92・U (原子番号・元素記号)
分光結晶	:	TAP (65mm-250mm), PETH (88mm-235mm), LIFH (88mm-235mm), LDE1H (88mm-235mm), LDE2H (88mm-235mm)
<b>■ 定量分析 ■</b>		
加速電圧 kV	:	15
照射電流 A	:	$1.0 \times 10^{-7}$
ビームスキャン	:	ON、スポット
ビーム径 $\mu\text{m}$	:	50
<b>■ ライン分析 ■</b>		
加速電圧 kV	:	15
照射電流 A	:	$2.0 \times 10^{-7}$
照射時間/スポット ms	:	500
スキャンモード	:	ステージスキャン
ビームスキャン	:	ON ( $\times 10000$ )
ビーム径	:	最小 ( $< 1 \mu\text{m}$ )
間隔 nm	:	40
測定距離 $\mu\text{m}$	:	40 (1001 点)

表 GT11 異質相部で強度変化が見られた元素

	異質相で強度増加	異質相で強度減少
スポット①	0	Na
スポット②	P, 0	

※() 僅かに増減があると判断された成分。

表 GT12 Δn の最大/最小値の結果(新規照射分)

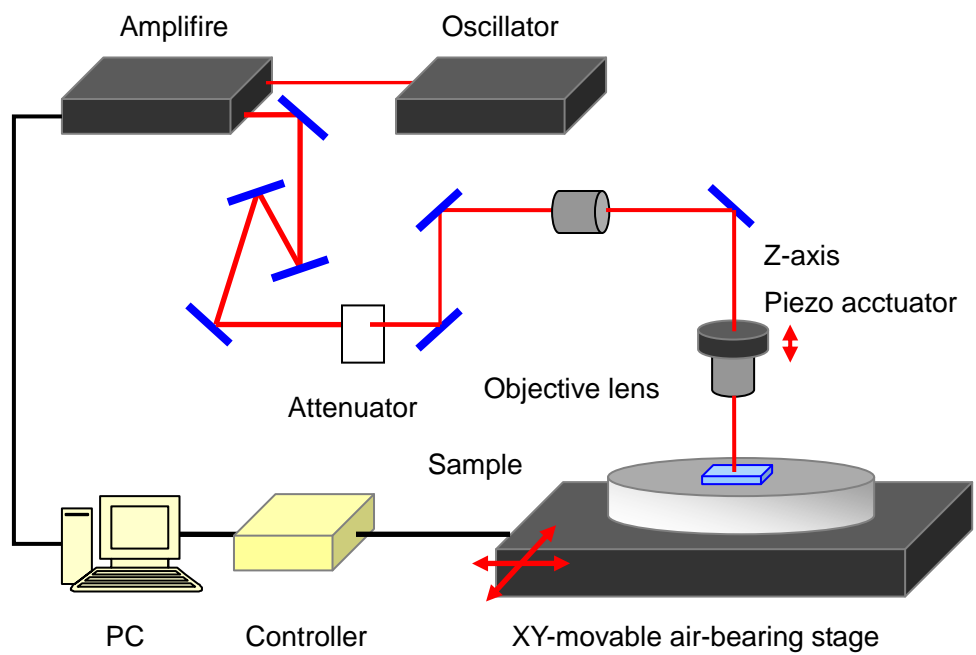
加工対物レンズ	10x(0.3)				
加工時の パワー パルスエネルギー パワー密度 ※(@F; @焦点位置)	平均出力 (mW)	120	240	360	480
	パルスエネルギー (μ J/pulse)	0.48	0.96	1.44	1.92
	平均出力@F (mW)	78	156	234	312
	パルスエネルギー@F (μ J/puls)	0.31	0.62	0.94	1.25
	ピークパワー密度 (W/cm2)	2.13E+13	4.25E+13	6.38E+13	8.51E+13
ガラス	Δ nラベル	Δ n			
A	A+(10)				0.002
	A-(10)				-0.017
	A (10)Max Δ n				0.017
B	B+(10)		0.002	0.003	0.003
	B-(10)		-0.007	-0.017	-0.017
	B (10)Max Δ n		0.007	0.017	0.017
C	C+(10)				0.002
	C-(10)				-0.018
	C (10)Max Δ n				0.018

※ピークパワー密度は焦点位置のパワーおよび実パルス幅から算出。

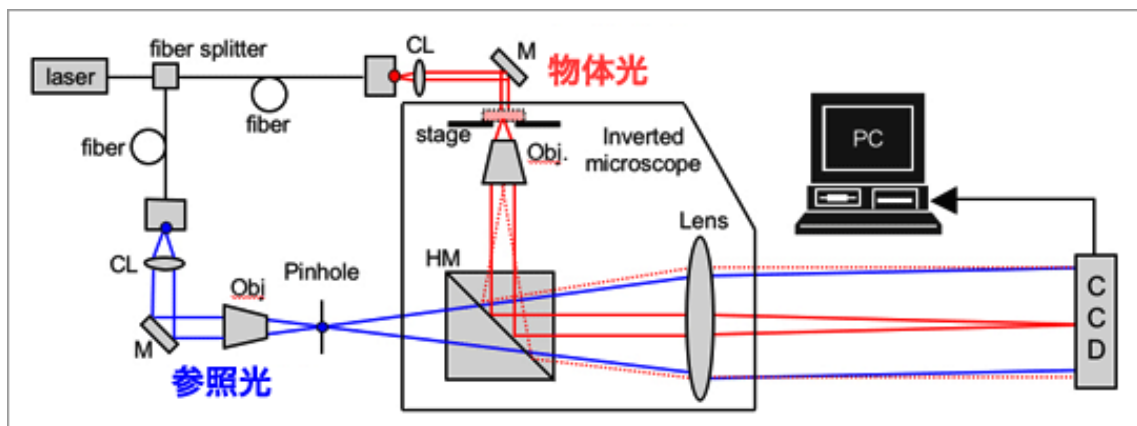
表 GT10 Δn の最大/最小値の結果

加工対象物	10x(0.3)	40x(0.85)								
加工時の平均出力 (mW)	120	240	360	480	60	120	240	360		
パルスエネルギー (μ J/pulse)	0.48	0.96	1.44	1.92	0.24	0.48	0.96	1.44		
パルスエネルギー@F (mW)	78	156	234	312	39	78	156	234		
パルスエネルギー@F (μ J/pulse)	0.31	0.62	0.94	1.25	0.16	0.31	0.62	0.94		
ピークパワー密度 (W/cm <sup>2</sup> )	2.13E+13	4.25E+13	6.38E+13	8.51E+13	1.70E+14	3.40E+14	6.81E+14	1.02E+15		
ガラス	Δnラベル				Δnラベル					
Ba-3	Ba-3+(10)	0.002	0.001	0.001	0.002	Ba-3+(40)	0.004	0.005	0.008	0.008
	Ba-3-(10)	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	Ba-3-(40)	-0.006	-0.004	-0.015	-0.013
	Ba-3 δ Δn	0.000	0.000	-0.001	0.000		-0.003	0.001	-0.006	-0.006
	Ba-3(10)Max Δn	0.002	0.002	0.002	0.002	Ba-3(40)Max Δn	0.006	0.005	0.015	0.013
Ba-4	Ba-4+(10)	0.001	0.002	0.002	0.002	Ba-4+(40)	0.002	0.002	0.004	0.004
	Ba-4-(10)	-0.004	-0.006	-0.006	-0.005	Ba-4-(40)	-0.007	-0.006	-0.010	-0.011
	Ba-4 δ Δn	-0.003	-0.004	-0.004	-0.003		-0.005	-0.004	-0.006	-0.007
	Ba-4(10)Max Δn	0.004	0.006	0.006	0.005	Ba-4(40)Max Δn	0.007	0.006	0.010	0.011
Ba-5	Ba-5+(10)	0.001	0.001	0.002	0.001	Ba-5+(40)	0.002	0.002	0.003	0.002
	Ba-5-(10)	-0.001	-0.004	-0.005	-0.004	Ba-5-(40)	-0.008	-0.007	-0.012	-0.009
	Ba-5 δ Δn	0.000	-0.002	-0.003	-0.003		-0.006	-0.006	-0.009	-0.006
	Ba-5(10)Max Δn	0.001	0.004	0.005	0.004	Ba-5(40)Max Δn	0.008	0.007	0.012	0.009
La-1	La-1+(10)	0.002	0.002	0.002		La-1+(40)	0.002	0.001	0.002	0.003
	La-1-(10)	-0.004	-0.004	-0.004		La-1-(40)	-0.007	-0.007	-0.009	-0.005
	La-1 δ Δn	-0.003	-0.002	-0.002			-0.005	-0.006	-0.007	-0.002
	La-1(10)Max Δn	0.004	0.004	0.004		La-1(40)Max Δn	0.007	0.007	0.009	0.005
La-3	La-3+(10)	0.002	0.004	0.004	0.004	La-3+(40)	0.004	0.008	0.007	0.007
	La-3-(10)	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	La-3-(40)	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001
	La-3 δ Δn	0.001	0.003	0.003	0.003		0.002	0.006	0.006	0.006
	La-3(10)Max Δn	0.002	0.004	0.004	0.004	La-3(40)Max Δn	0.004	0.008	0.007	0.007
La-4	La-4+(10)	0.003	0.003	0.002	0.002	La-4+(40)	0.009	0.008	0.009	0.009
	La-4-(10)	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	La-4-(40)	-0.006	-0.011	-0.009	-0.009
	La-4 δ Δn	0.001	0.002	0.001	0.000		0.002	-0.003	0.000	0.000
	La-4(10)Max Δn	0.003	0.003	0.002	0.002	La-4(40)Max Δn	0.009	0.011	0.009	0.009
La-5	La-5+(10)	0.001	0.003	0.003	0.003	La-5+(40)	0.002	0.006	0.004	0.004
	La-5-(10)	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	La-5-(40)	-0.003	-0.004	-0.004	-0.004
	La-5 δ Δn	-0.001	0.001	0.001	0.001		0.000	0.002	0.000	0.000
	La-5(10)Max Δn	0.002	0.003	0.003	0.003	La-5(40)Max Δn	0.003	0.006	0.004	0.004
Ti-1	Ti-1+(10)	0.001	0.001	0.001	0.001	Ti-1+(40)	0.002	0.001	0.001	0.001
	Ti-1-(10)	-0.003	-0.006	-0.006	-0.006	Ti-1-(40)	-0.009	-0.008	-0.011	-0.012
	Ti-1 δ Δn	-0.002	-0.005	-0.004	-0.004		-0.008	-0.006	-0.010	-0.011
	Ti-1(10)Max Δn	0.003	0.006	0.006	0.006	Ti-1(40)Max Δn	0.009	0.008	0.011	0.012
Ti-3	Ti-3+(10)	0.001	0.001	0.001	0.002	Ti-3+(40)	0.002	0.002	0.004	0.005
	Ti-3-(10)	-0.002	-0.007	-0.006	-0.006	Ti-3-(40)	-0.008	-0.008	-0.015	-0.016
	Ti-3 δ Δn	-0.001	-0.005	-0.005	-0.004		-0.006	-0.007	-0.011	-0.011
	Ti-3(10)Max Δn	0.002	0.007	0.006	0.006	Ti-3(40)Max Δn	0.008	0.008	0.015	0.016
Ti-4	Ti-4+(10)	0.002	0.002	0.002		Ti-4+(40)	0.002	0.001	0.002	0.003
	Ti-4-(10)	-0.004	-0.005	-0.005		Ti-4-(40)	-0.012	-0.009	-0.013	-0.013
	Ti-4 δ Δn	-0.002	-0.003	-0.003			-0.009	-0.007	-0.011	-0.010
	Ti-4(10)Max Δn	0.004	0.005	0.005		Ti-4(40)Max Δn	0.012	0.009	0.013	0.013
F-1	F-1+(10)	0.001	0.001	0.001	0.001	F-1+(40)	0.002	0.001	0.001	0.001
	F-1-(10)	-0.004	-0.004	-0.003	-0.003	F-1-(40)	-0.008	-0.003	-0.007	-0.007
	F-1 δ Δn	-0.002	-0.003	-0.002	-0.002		-0.005	-0.003	-0.006	-0.007
	F-1(10)Max Δn	0.004	0.004	0.003	0.003	F-1(40)Max Δn	0.008	0.003	0.007	0.007
VIOSIL	VIOSIL+(10)	0.001	0.002	0.002	0.002	VIOSIL+(40)		0.002	0.009	0.016
	VIOSIL-(10)	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	VIOSIL-(40)		-0.004	-0.012	-0.007
	VIOSIL(10) δ Δn	0.000	0.001	0.001	0.001	VIOSIL(40) δ Δn		-0.002	-0.003	0.009
	VIOSIL(10)Max Δn	0.001	0.002	0.002	0.002	VIOSIL(40)Max Δn		0.004	0.012	0.016

※ピークパワー密度は焦点位置のパワーおよび実パルス幅から算出。



図GF1  $\Delta n$  測定用サンプル加工光学系の模式図。



図GF3 定量位相顕微鏡の光学系の模式図。

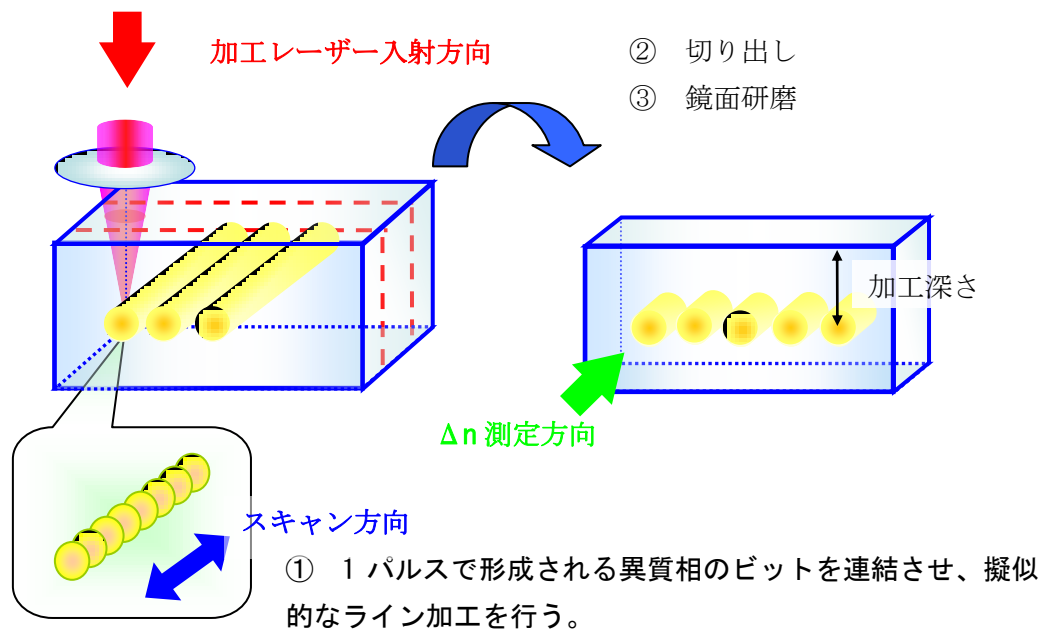
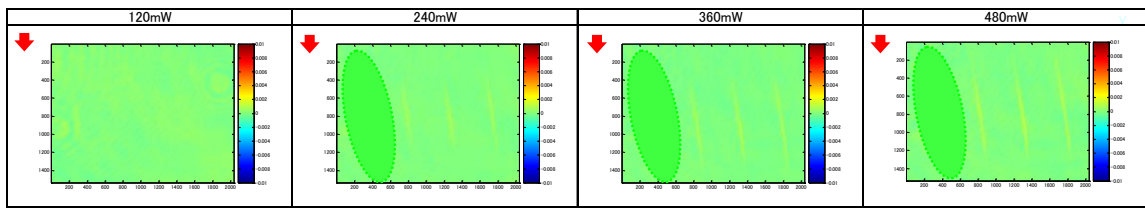
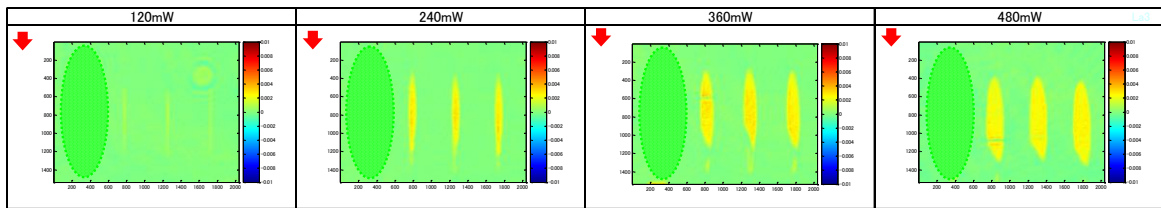


図 GF2  $\Delta n$  測定用サンプルの異質相ライン、切出し方向、 $\Delta n$  測定方向の配置関係の模式図

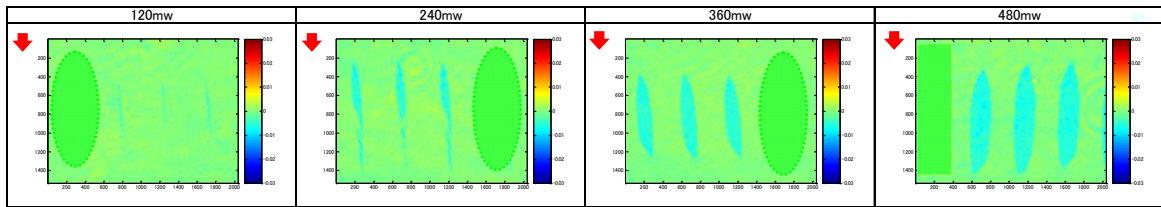




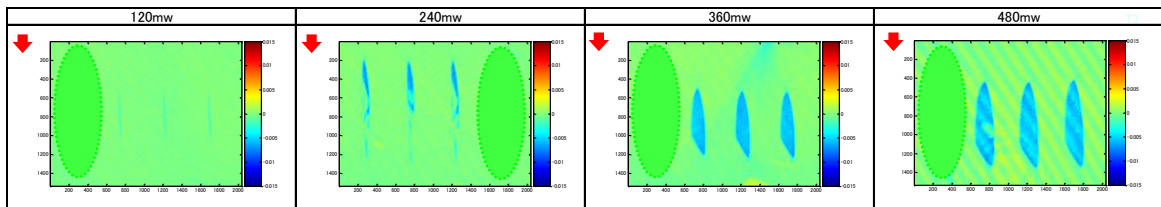
☒ GF5 Δn 測定結果(サンプル : シリカガラス、レンズ : 10x(0.3))



☒ GF6 Δn 測定結果(サンプル : La-3、レンズ : 10x(0.3))



☒ GF7 Δn 測定結果(サンプル : Ba-5、レンズ : 10x(0.3))



☒ GF8 Δn 測定結果(サンプル : Ti-3、レンズ : 10x(0.3))

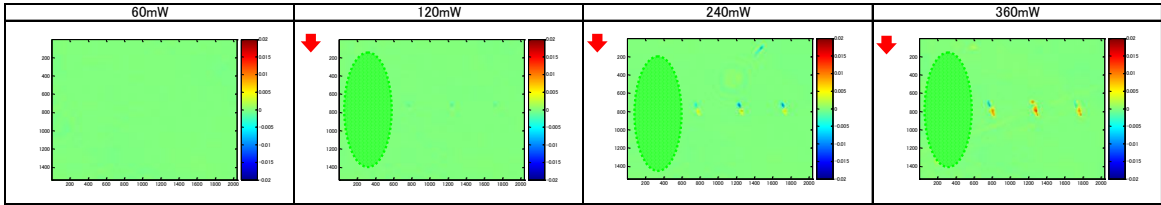


図 GF9  $\Delta n$  測定結果(サンプル : シリカガラス、レンズ : 40x (0.85))

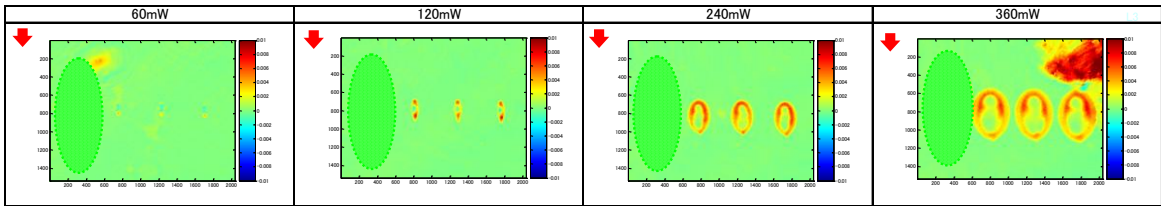


図 GF10  $\Delta n$  測定結果(サンプル : La-3、レンズ : 40x (0.85))

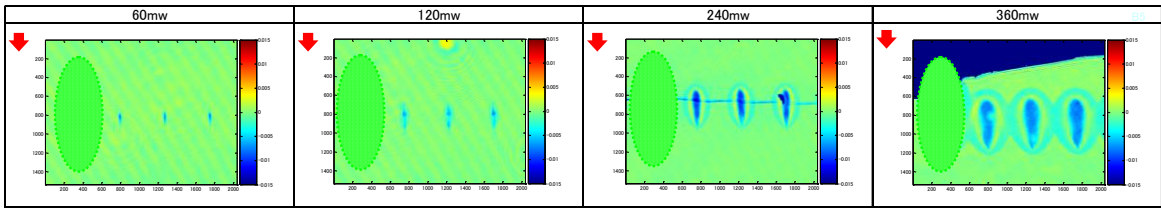


図 GF11  $\Delta n$  測定結果(サンプル : Ba-5、レンズ : 40x (0.85))

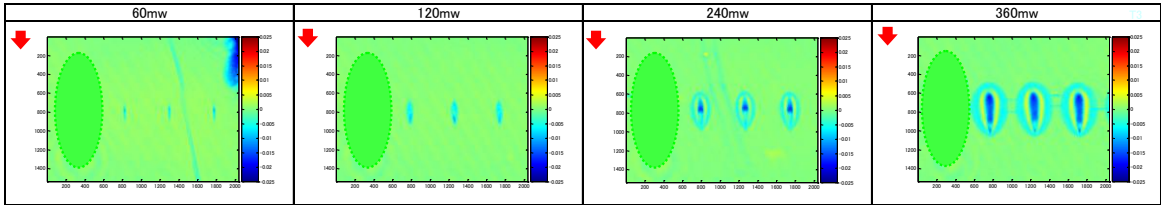


図 GF12  $\Delta n$  測定結果(サンプル : Ti-3、レンズ : 40x (0.85))

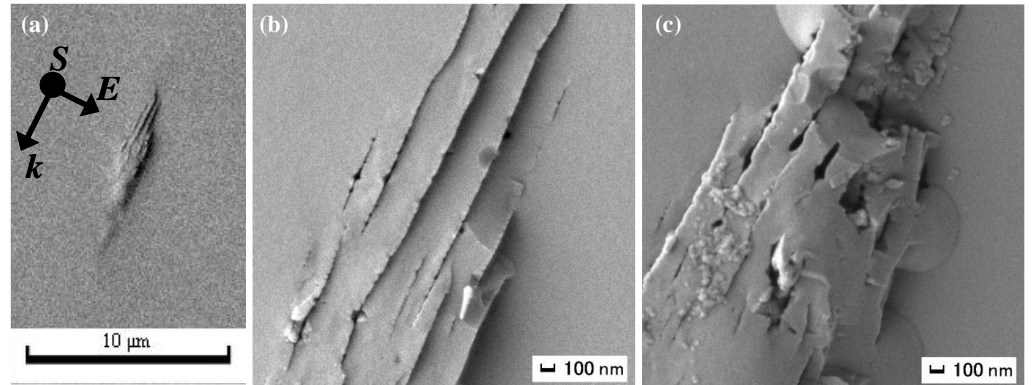


図 GF14 シリカガラス内部形成された異質相の破断面（エッチングなし）の SEM 観察像。(a)はピークパワー密度  $6.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  で形成された異質相。(b)は(a)の拡大像。(c)はピークパワー密度  $1.0 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  で形成された異質相。(a)に示される加工配置は次のとおりである。 $k$ : レーザービームの伝播方向、 $S$ : スキャン方向、 $E$ : 直線偏光のレーザー光の電界ベクトル方向。

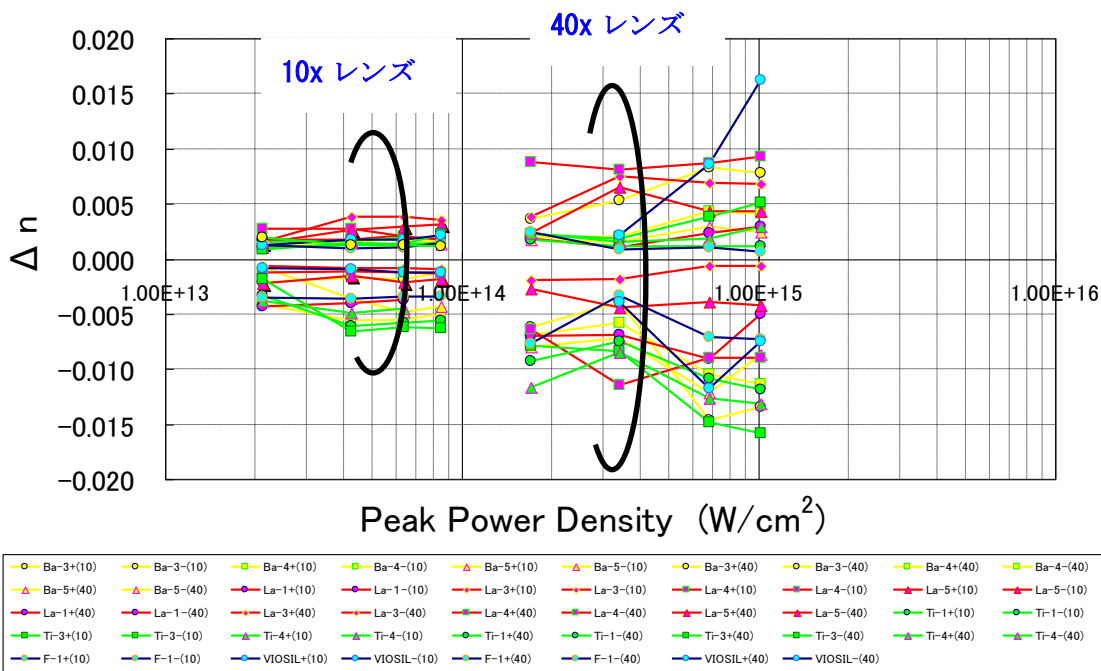


図 GF13 フェムト秒レーザー照射により形成されたライン状異質相断面における  $\Delta n$  の最大値（プラス側）／最小値（マイナス側）のレーザーピークパワー密度に対するプロット。

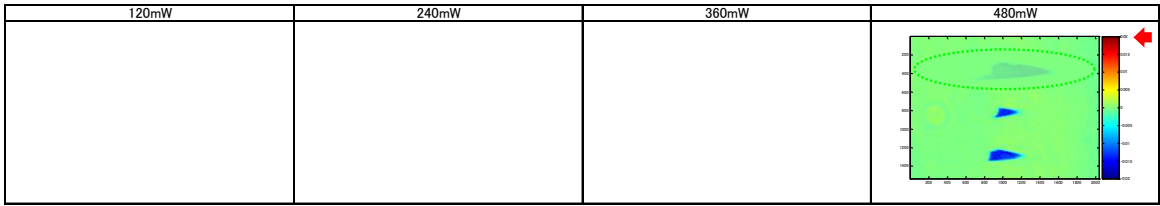


図 GF19  $\Delta n$  測定結果(サンプル : A、レンズ : 10x(0.3))

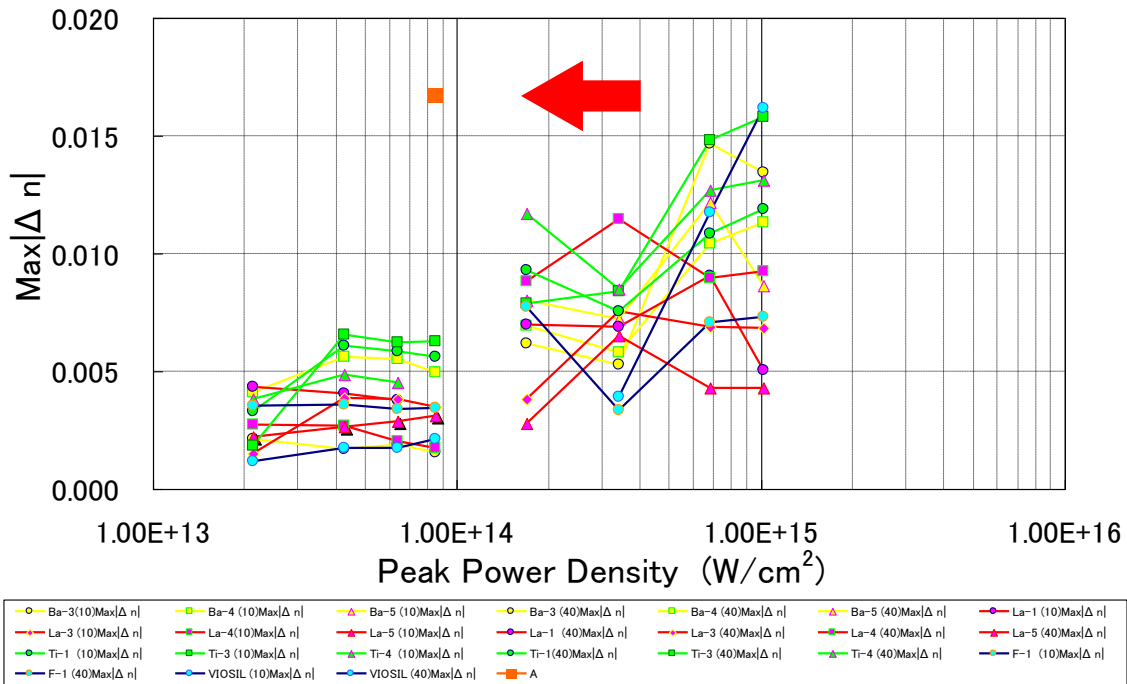


図 GF20 フェムト秒レーザー照射により形成されたライン状異質相  $\text{Max}|\Delta n|$  のピークパワー密度に対するプロット。 $\text{Max}|\Delta n|$  は  $\Delta n$  の最大値 (プラス側) / 最小値 (マイナス側) の絶対値。

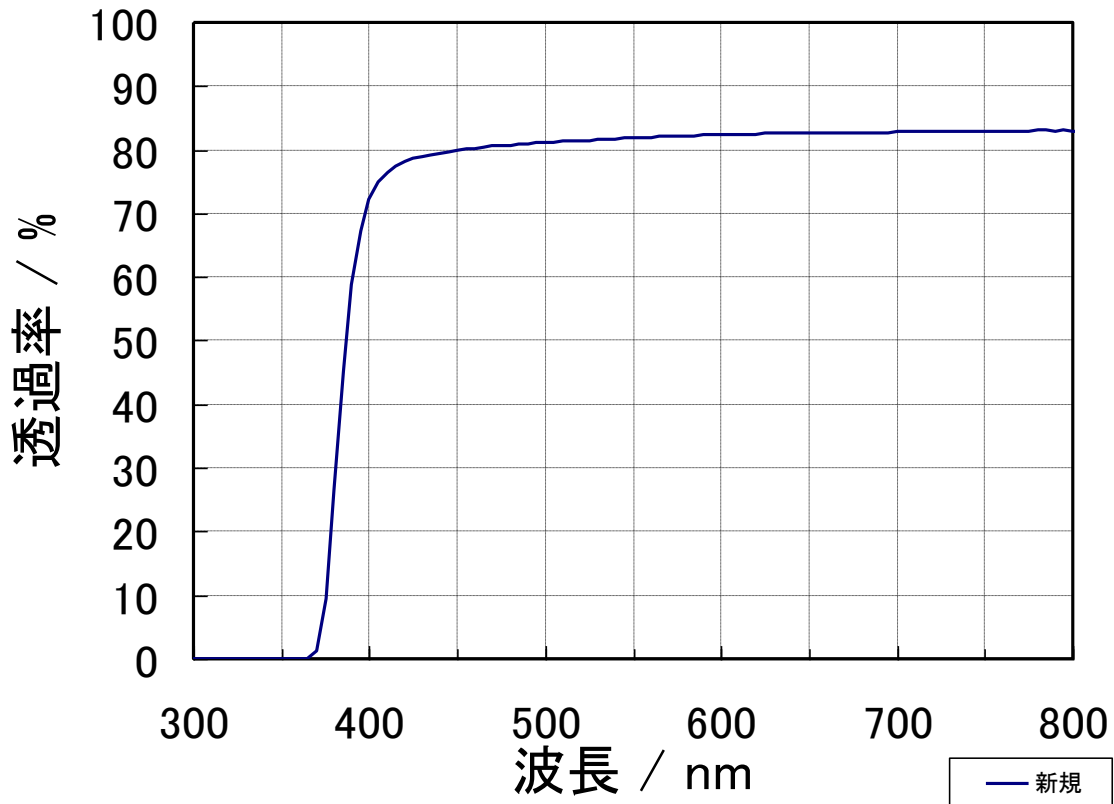


図 GF21 ガラス A の透過率曲線。(反射を含む。測定厚みは 1mm)

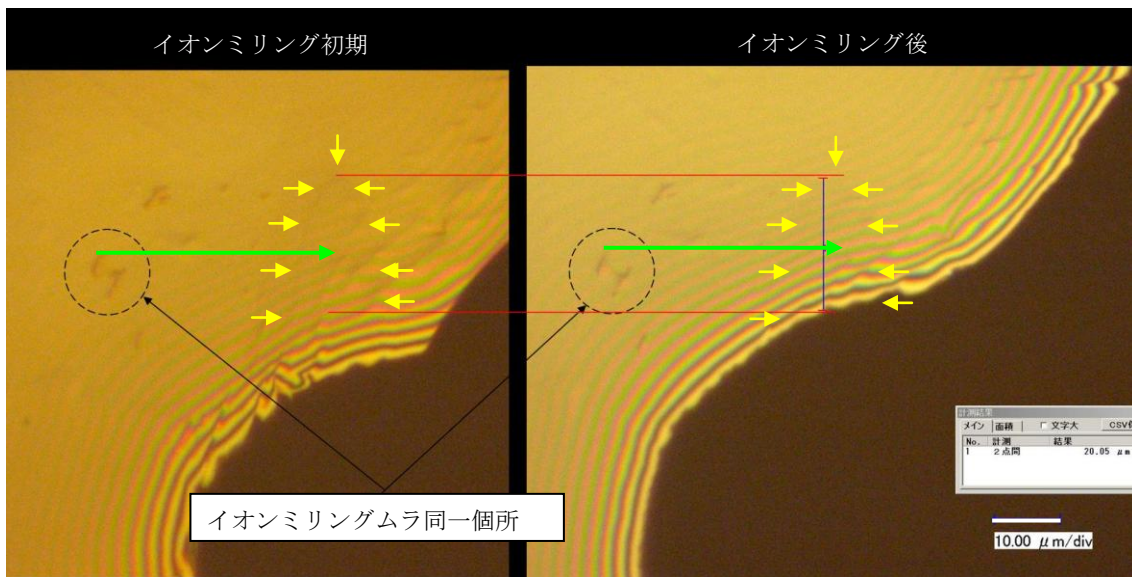
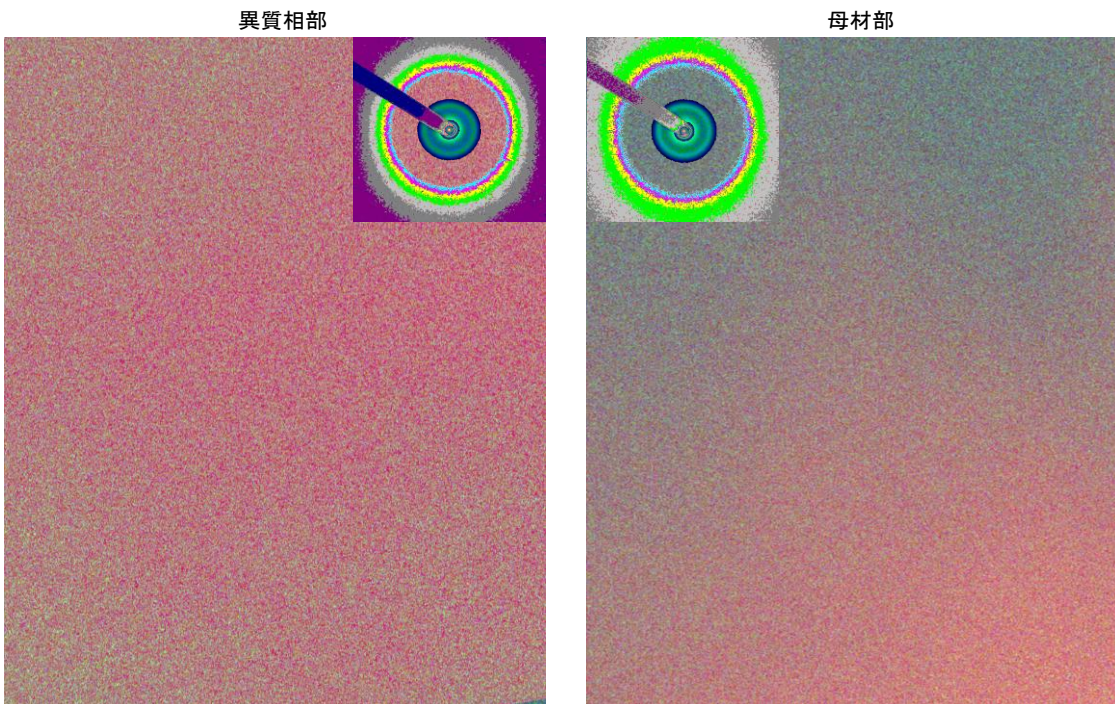


図 GF22 異質相位置の光学顕微鏡像。(イオンミリング初期(左)・後(右))



図 GF23 TEM 観察位置の光学顕微鏡像。異質相部：赤丸、母材部：青丸



40nm × 500,000

図 GF24 異質相部と母材部(未加工部)の TEM 像と制限視野電子回折パターン(枠内)

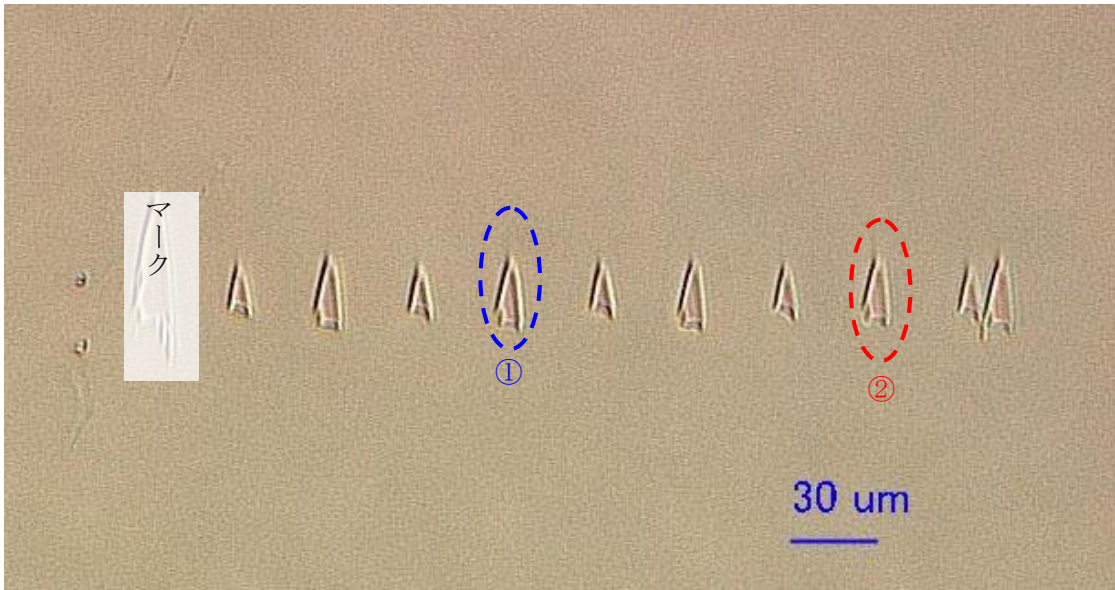


図 GF25 測定場所①と②の光学顕微鏡。

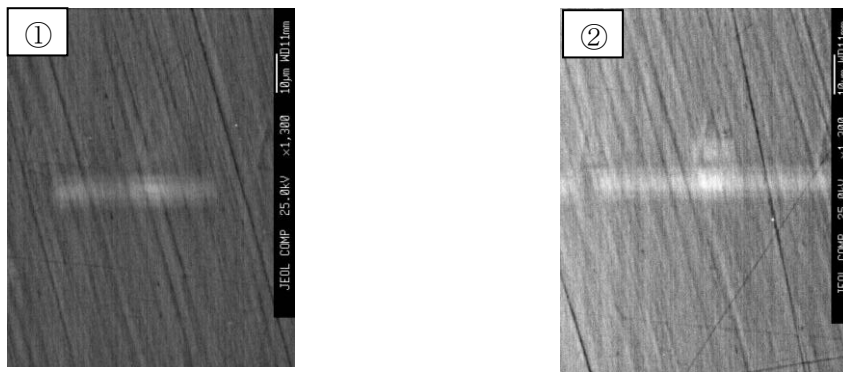


図 GF26 各ポイント①、②の異質相部とその周辺の濃度分析後のSEM反射電子像(組成像)。

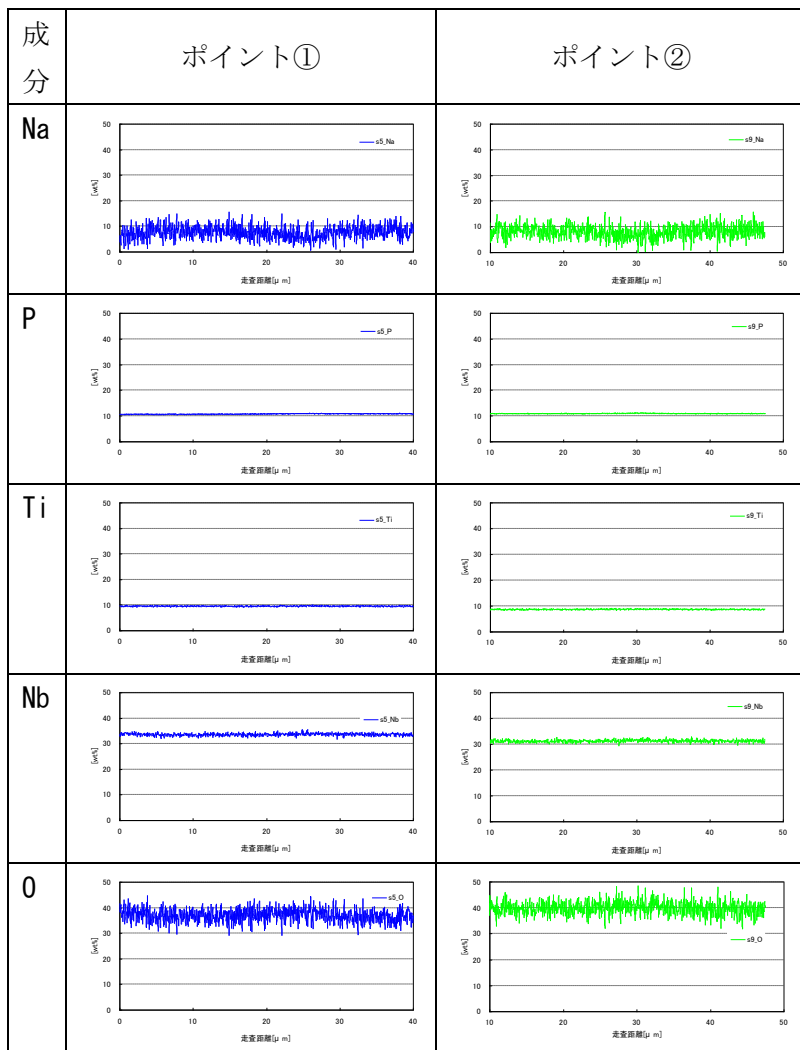


図 GF27 異質相①と②における各元素成分の濃度プロファイル。(縦軸は wt% 表示)

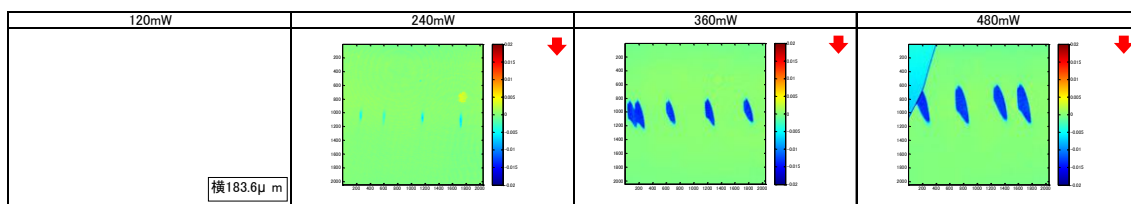


図 GF28

$\Delta n$  測定結果(ガラス B, カメラ視野サイズ変更あり。横 183.6 μ m)

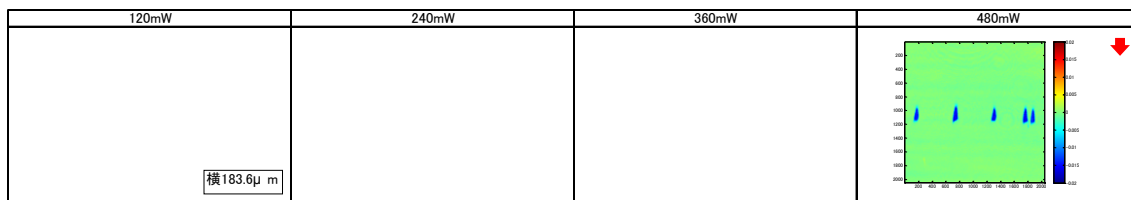


図 GF29  $\Delta n$  測定結果(ガラス C, カメラ視野サイズ変更あり。横 183.6 μ m)



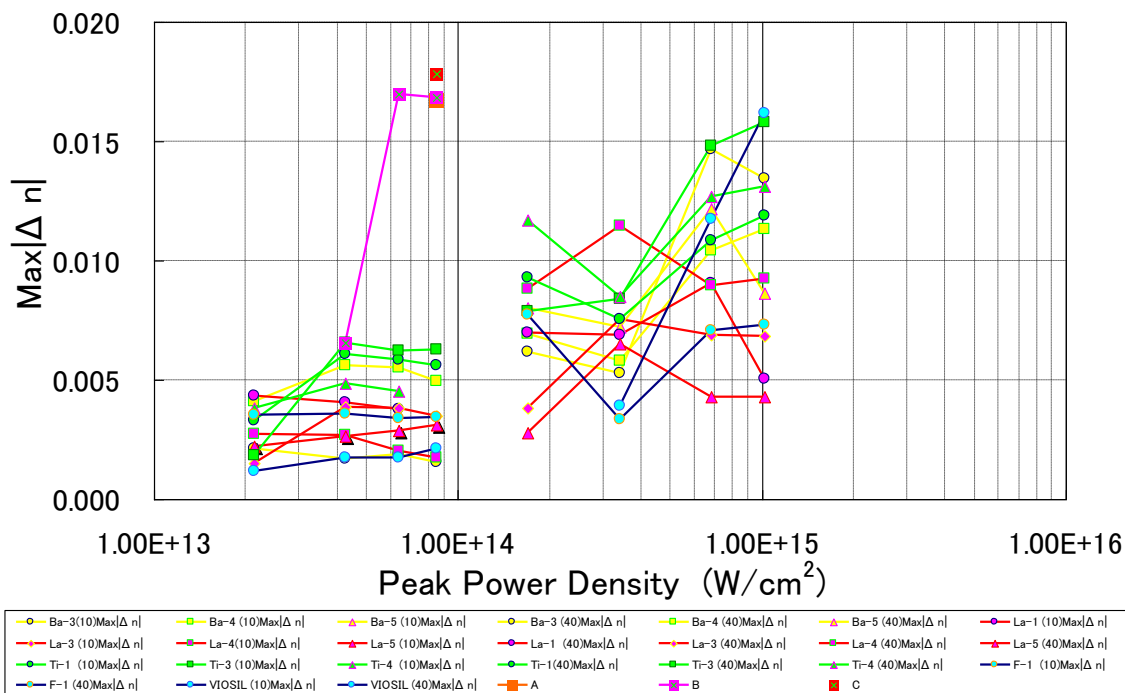


図 GF30 フェムト秒レーザー照射により形成されたライン状異質相  $\text{Max}|\Delta n|$  のピークパワー密度に対するプロット。 $\text{Max}|\Delta n|$  は  $\Delta n$  の最大値 (プラス側) / 最小値 (マイナス側) の絶対値。

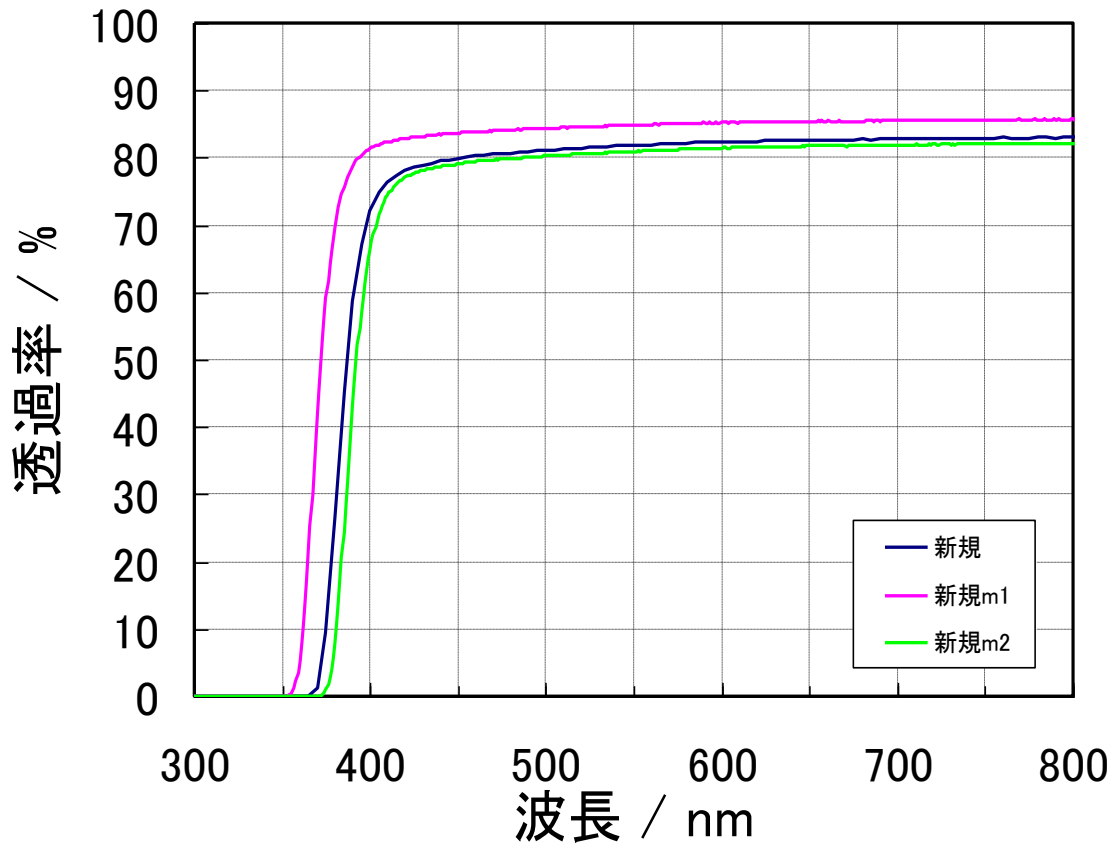


図 GF31 透過率曲線(ガラス A、B、C、反射を含む)

## 参考文献

- G1) Yasuhiko Shimotsuma, Kazuyuki Hirao, Jianrong Qiu and Kiyotaka Miura, "Nanofabrication in transparent materials with a femtosecond pulse laser," *Optics Letters*, Vol. 21, Issue 21, (1996)pp.1729-1731.
- G2) K. Miura, Jianrong Qiu, H. Inouye, and T. Mitsuyu, K. Hirao, "Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser," *Appl. Phys. Lett.* 71, 3329 (1997); DOI:10.1063/1.120327.
- G3) Kazuhiro Yamada, Wataru Watanabe, Yudong Li, Kazuyoshi Itoh, and Junji Nishii, "Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses," *Optics Letters*, Vol. 29, Issue 16, (2004)pp. 1846-1848.
- G4) H. B. Sun, Y. Xu, S. Matsuo, H. Misawa, "Microfabrication and Characteristics of Two-Dimensional Photonic Crystal Structures in Vitreous Silica", *OPTICAL REVIEW*, Vol. 6, No. 5 (1999) pp.396-398.
- G5) James W. Chan, Thomas R. Huser, Subhash H. Risbud, Joseph S. Hayden, Denise M. Krol, "Waveguide fabrication in phosphate glasses using femtosecond laser pulses," *Applied Physics Letters*, Volume 82, Issue 15, (2003)pp.2371-2373.
- G6) J. Siegel, J. M. Fernández-Navarro, A. García-Navarro, V. Diez-Blanco, O. Sanz, and J. Solis, F. Vega and J Armengol, "Waveguide structures in heavy metal oxide glass written with femtosecond laser pulses above the critical self-focusing threshold," *Appl. Phys. Lett.* 86, (2005) 121109.
- G7) N. D. Psaila, R. R. Thomson, H. T. Bookey, A. K. Kar, N. Chiodo, R. Osellame, G. Cerullo, G. Brown, A. Jha, and S. Shen, "Femtosecond laser inscription of optical waveguides in Bismuth ion doped glass," *Optics Express*, Vol. 14, Issue 22, (2006) pp.10452-10459.
- G8) V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. B. Corkum, D. M. Rayner, C. Hanatvsky, R. S. Taylor, "Femtosecond laser-induced refractive index modification in multicomponent glasses," *J. Appl. Phys.* **97**, 083102 (2005); DOI:10.106
- G9) R. Osellame, N. Chiodo, V. Maselli, A. Yin, M. Zavelani-Rossi, G. Cerullo, P. Laporta, L. Aiello, S. De Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, and G. Pierattini, "Optical property of waveguides written by a 26 MHz stretched cavity Ti:sapphire femtosecond oscillator," *Opt. Express*, 13, Issue 2, (2005)pp. 612-620.
- G10) Masaaki Sakakura and Masahide Terazima, "Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass," *Phys. Rev.*, B 71, (2005)24113-
- G11) S. A. Self, *Focusing of Spherical Gaussian Beams*, *Appl. Opt.* 22, no. 5(1983)658.
- G12) 鈴木賢哉, 那須悠介, Vikas Sharma, 池田貴裕, James G. Fujimoto, Erich P. Ippen, Michael S. Feld, 「フェムト秒レーザによる導波路描画技術を用いた[3x3]光方向性結合器の作製と評価」, *The 16th Meeting on Glasses for Photonics 2006*.
- G13) 浜松ホトニクス株式会社HP ;  
([http://jp.hamamatsu.com/rd/publication/nature/na\\_0611.htm](http://jp.hamamatsu.com/rd/publication/nature/na_0611.htm))

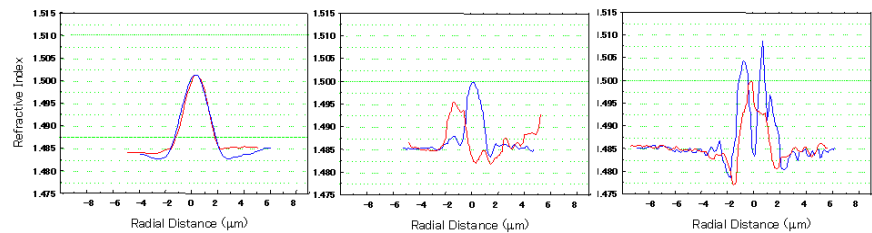
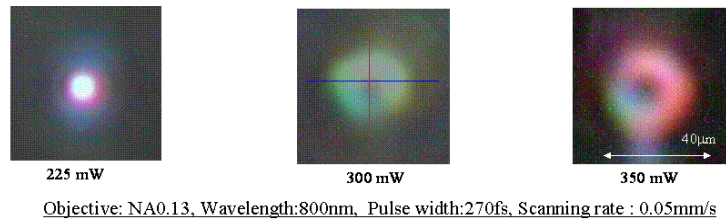
- G14) 池田貴裕, 「フィードバック系及びコモンパス光学系により安定化された定量位相顕微鏡,  
Proceedings of 39th Meeting on Lightwave Sensing Technology, June. 2007.
- G16) T. Hashimoto, S. Juodkazis, H. Misawa, Void recording in silica, Appl. Phys. A83, 2  
(2006)337-340.
- G17) T. Hashimoto, S. Juodkazis, H. Misawa, Void formation in glasses, New J. Phys. 9  
(2007)253.
- G18) S. Kanehira, K. Miura, K. Hirao, Ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation,  
Appl. Phys. Lett., Vol.93, Issue 2, 023112 (2008).
- G19) ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店発行, p130

### 3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

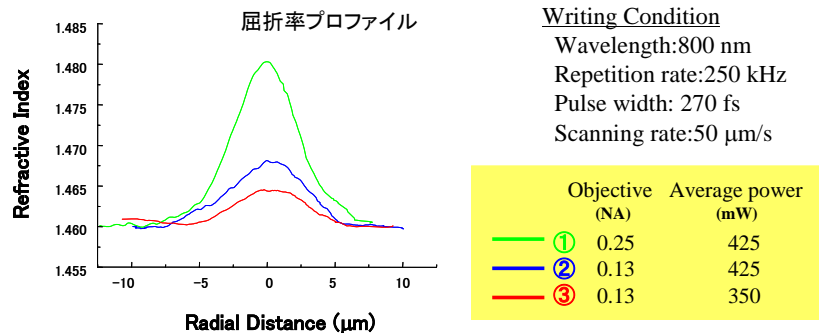
#### a) 光導波路形成用ガラス材料の探索

逐次描画法（従来法）で各種ガラスに直線導波路を形成し、中間目標である伝送損失：0.1 dB/cmの光導波路描画が可能なガラス材料を選定した。光導波路構造を形成するためにはレーザー照射領域の屈折率を高くする必要があるため、構造破壊（空洞化、クラック発生、粗密化）を起こすことなく高屈折率化が可能な材料を調べた。その結果、これまでに検討した範囲では合成石英ガラスとホウケイ酸塩ガラスにおいて比較的良好な導波路構造が形成可能であることを確認した。図Ⅲ①(3)-1は、レーザー照射パワーを変化させてホウケイ酸塩ガラス内部に描画した光導波路の屈折率分布と出射光パターンを示しており、

225 mW 照射において構造破壊を誘起することなく高屈折率化（中心部において+0.02程度）が実現できている。コア径や比屈折率差は、描画対物レンズ、平均出力、パルス幅、繰り返し周波数や描画速度等の各種描画条件を変化させることで調整することができる。図Ⅲ①(3)-2 に対物レンズと平均出力を変化させて得られた合成石英ガラスに描画した導波路の屈折率分布、及び伝搬モード（計算値）を示す。描画する対物レンズの開口数や平均出力により、得られる導波路の比屈折率差やコア径が変化し、それに伴い伝搬モードも変化していることがわかる。図中③に示すように、合成石英ガラスでは通信帯域においてシングルモードの光導波路を描画することも可能である。図Ⅲ



図Ⅲ①(3)-1 レーザー照射パワーを変化させてホウケイ酸塩ガラス内部に描画した光導波路の屈折率分布と出射光パターン



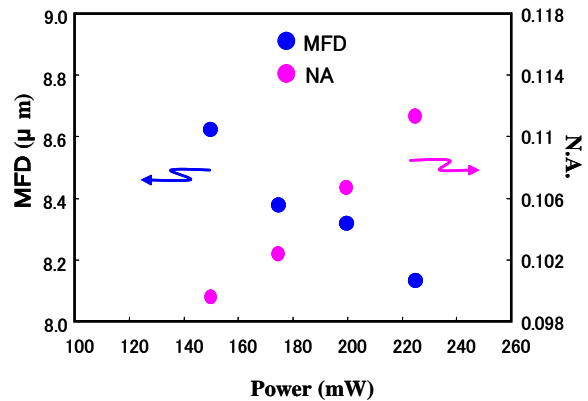
	Refractive index reference[%]	Change distance[μm]	Calculated guide mode[1.3μm]	Calculated guide mode[1.55μm]
①	1.32	20	LP01, LP02, LP11	LP01, LP11
②	0.53	18	LP01, LP11	LP01, LP11
③	0.27	11	LP01	LP01

図Ⅲ①(3)-2 対物レンズと平均出力を変化させて得られた合成石英ガラス導波路の屈折率分布、及び伝搬モード（計算値）

①(3)-3 は、描画導波路におけるモードフィールド径（MFD）および開口数（NA）のレーザー出力依存性を調べた結果である。レーザー出力が大きくなるに従い、屈折率変化領域も大きくなるが、その変化量よりも高屈折率化の効果が大きいことから、結果として、描画エネルギーの増大は、NA を大きくし MFD を小さくする。以上の結果は、レーザー照射条件によりある程度描画導波路の特性を調節することができることを意味するが、得られる導波路の伝搬損失もレーザー照射条件に大きく依存し、実際には損失との兼ね合いで描画条件の最適化を行う必要がある。

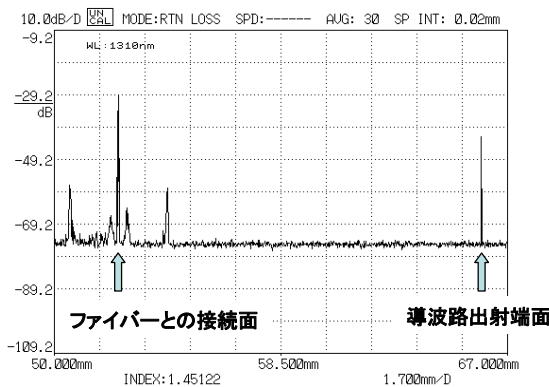
描画導波路における大きな損失要因には構造不整による散乱とレーザー照射により誘起される欠陥吸収とが考えられる。図Ⅲ①(3)-4 は合成石英ガラスに描画した光導波路の散乱をリフレクトメーターにより観測した結果の一例で、散乱因子となるような輝点が存在していない導波路が形成されていることが確認できる。欠陥による吸収も光通信帯域（1.3、1.55 ミクロン）への影響はないことも確認した。結果として、合成石英ガラスおよび一部のホウケイ酸塩ガラスにおいて伝送損失：

0.1 dB/cm のシングルモード光導波路が形成可能であることが確認でき（図Ⅲ①(3)-5 参照）、中間目標を達成することができた。また、パルス照射遅延システムを構築し、逐次描画法と一括描画法とにおける損失への影響の違いを調べた結果、両者では熱拡散および熱蓄積に明確な差異が認められ、

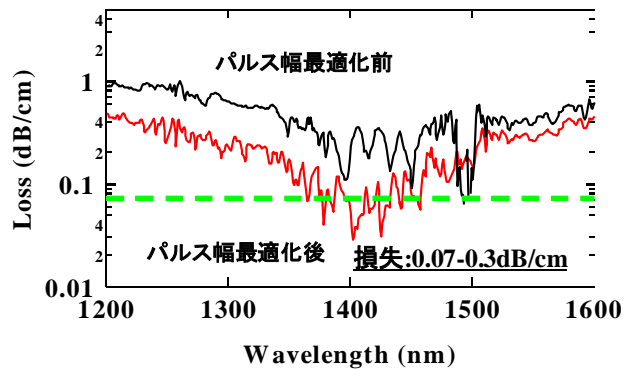


図Ⅲ①(3)-3 モードフィールド径（MFD）および開口数（NA）のレーザー出力依存性

0.1 dB/cm のシングルモード光導波路が形成可能であることが確認でき（図Ⅲ①(3)-5 参照）、中間目標を達成することができた。また、パルス照射遅延システムを構築し、逐次描画法と一括描画法とにおける損失への影響の違いを調べた結果、両者では熱拡散および熱蓄積に明確な差異が認められ、



図Ⅲ①(3)-4 リフレクトメーターによる合成石英ガラスに描画した光導波路の散乱を測定



図Ⅲ①(3)-5 パルス幅の最適化により得られた合成石英ガラス描画光導波路の損失スペクトル

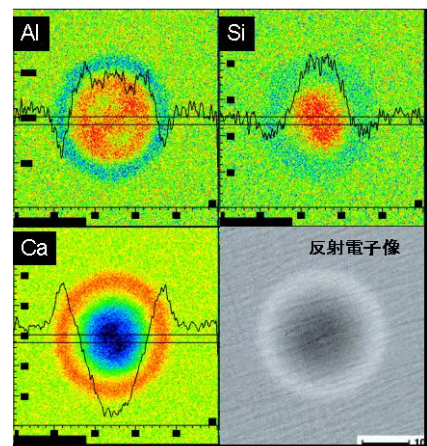
その結果生じる屈折率変化領域の形状やサイズの乱れを制御することが、一括描画における直線導波路の損失低減に重要であることを明らかにした。

## b) 新しい高屈折率化現象とガラス材料開発

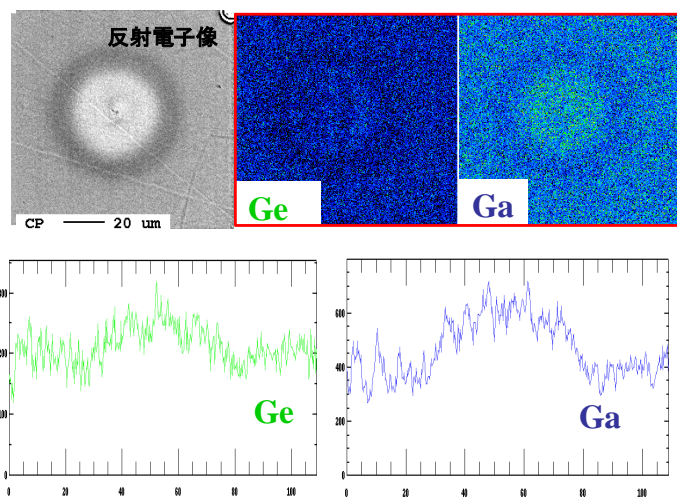
フェムト秒レーザーによる従来の異質相形成による屈折率変化は、①(1)で詳述したようにガラスの密度変化に起因している。従って、ガラス構造を破壊することなく高屈折率化させようとした場合、その変化量は 0.02~0.03 程度が既存ガラスでは限界と言える。そこで、密度変化以外の現象を利用した高屈折率化を試みた。その結果、圧力波によるイオン交換（移動）現象により高屈折率化が実現できるガラス材料を見出した。加えて、このイオン移動現象を利用することで、Si ナノ微粒子が析出可能なガラス材料の開発にも成功した。Si の屈折率は 3.4 程度であり一般的なガラスが 1.5 程度であるのに対して2倍以上の高屈折率を有する。また、Si は光通信帯域に吸収が無く、ナノ微粒子の状態であれば散乱による損失への影響を無視することができることから、ガラス内部に局所的に Si ナノ微粒子を析出させることで、析出領域の巨視的な屈折率を周囲に比べ高くすることが可能である。

### b-1 イオン移動による元素分布形成を利用した高屈折率化

多成分からなるガラス材料の内部にフェムト秒レーザーを集光照射し、圧力波の伝搬に起因する材料構成元素の拡散（移動）速度の差を利用することで、均質な材料内部において元素分布が形成される<sup>1)</sup>。図Ⅲ①(3)-6 は、Si-Ca-Al-O ガラス内部にフェムト秒レーザー（パルスエネルギー：2  $\mu$ J，繰り返し周波数：250 kHz）を1秒間照射した後、レーザー集光点近傍が表面となるように研磨したサンプルの反射電子像とその領域におけるガラス構成元素の面マッピングの結果を示す。この結果から、レーザー集光点近傍はその中心領域に Si と Al が集まり、Ca が同心円状に周囲に拡散していることが確認できる。圧力波が中心から周囲に向かって伝搬する過程において、Ca の拡散係数が Si や Al に比べより大きい結果として、このような元素分布が形成されたものと考えられる。しかしながら、このガラスにおいては Si 元素濃度が中心において高くなるためレーザー照射による照射領域の高屈折率化は望めない。そこで、網目形成酸化物が異なる様々な組成のガラスについて元素移動を系統的に調査することで、レーザー照射領域近傍にガラスを高屈折率化させる元素を集めることができるリン酸塩系ガラスガラスを見出した。図Ⅲ①(3)-7 は、図Ⅲ①(3)-5 と同様な条件で、レーザー照射および観測した元素分布である。分布の様子（元素の配置や分布幅等）は、材料を構成している元素の組み合わせにより変化し、このケースでは、圧力波が中心から周囲に向かって伝搬する過程に



図Ⅲ①(3)-6 Si-Ca-Al-O ガラスへのレーザー集光照射による元素分布（EPMA）



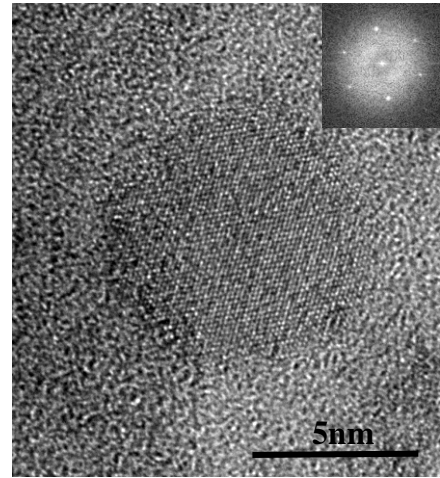
図Ⅲ①(3)-7 P-Ca-Ga-O ガラスへのレーザー集光照射による元素分布（EPMA）

において、Ca の拡散係数が Ga より大きい結果として、Ga 元素が中心に集まり Ca がその周囲に移動したと考えられる。反射電子像の比較からも明らかのように、リン酸塩系では中心近傍により原子量が大きい元素 (Ge や Ga) が集まっており中心領域が高屈折率化していることが予想される (元素の移動量より計算した屈折率変化量 : +0.1)。屈折率差はガラス構成元素やレーザー照射条件を最適化することでさらに大きくすることが可能である。

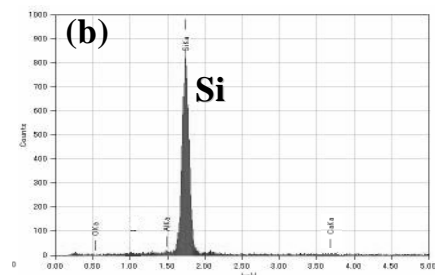
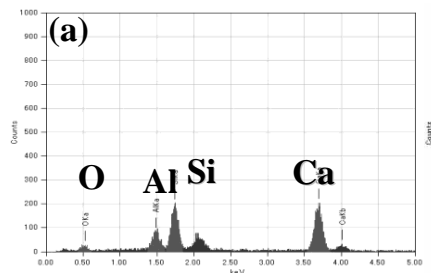
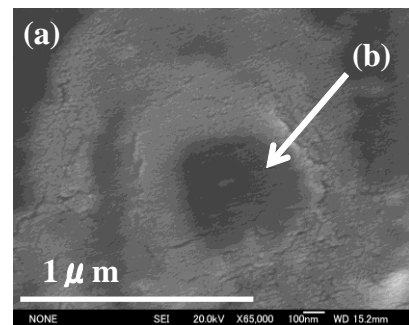
### b-2 金属 Al 添加ガラスからの Si ナノ微粒子析出

SiO<sub>2</sub>ガラスを Si に変化させる方法としては、電子ビーム、イオンビームやX線あるいはγ線といった高エネルギー源の利用が考えられるが、これらの高エネルギー源はいずれもガラスを透過せず、従って Si 析出は材料表面に限られてしまう。また、フェムト秒レーザー加工ではガラス内部を加工することが可能であるが、SiO<sub>4</sub>四面体を有している一般的な石英系ガラスにフェムト秒レーザーを集光照射しても、ガラス内部に Si を析出させることは困難である。仮に Si-O 結合をレーザーにより切断できたとしても空間的に閉ざされたガラス内部では、切断された大量の酸素イオンを補足する構造が無い。そこで、SiO<sub>2</sub>系ガラスに出発原料として金属アルミニウムを添加したガラス材料 (無色透明) を開発し、このガラスにフェムト秒レーザーを集光照射することで、Si ナノ微粒子をガラス内部に局所選択的に析出させることができた<sup>1-3)</sup>。図Ⅲ①(3)-8 は金属 Al 添加シリケートガラス材料内部に析出させた Si ナノ粒子のTEM像である。この Si ナノ粒子はレーザーによる Si の移動 (図Ⅲ①(3)-5 参照) とともにレーザーにより Si-O 結合が切断され、O が Al に補足されることで Si 同士のクラスター化が促進された結果と考えられるが、イオン移動と同様にそのメカニズムの詳細は明らかではなく今後の課題である。また、半導体ナノ粒子は量子サイズ効果により粒径を制御することで可視域において発光することが知られており、ガラス材料の優れた成形性と組み合わせることで新しい形態の発光素子が開発できる可能性も期待できる。

更に、Si をガラス内部においてミクロンオーダーのサイズにまで成長させることもできた。図Ⅲ①(3)-9 は、原料に金属アルミニウムを混合して作製したガラスにフェムト秒レーザーを集光照射し、イオン拡散により Si と Al を集光点中心近傍に集めると同時に、フェムト秒レーザーをトリガーとしたテルミット反応をガラス中で起こさせることで Si を析出させた例である。図Ⅲ①(3)-10 も同様な Si



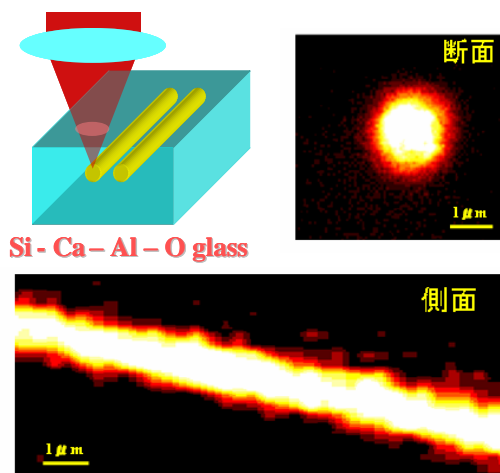
図Ⅲ①(3)-8 Si-Al-Ca-O 材料内部



図Ⅲ①(3)-9 Si析出領域の反射電子像とEPMAによるレーザー未照射領域 (a) および照射領域 (b) の元素分析結果



析出例であるが、こちらはレーザー集光点をラインスキャンしたサンプルを共焦点顕微ラマン分光法により観測した結果で、Si がライン状に析出していることがわかる。Si は酸素に次いで地球上に多い元素であり、最もポピュラーな半導体材料であるとともに、前述したように、Si は石英ガラスのような酸化ガラスに比べ高い屈折率を有していると同時に光通信帯域の波長を透過する。この特性を利用すれば、透明ガラス内部へ Si フォトニック結晶や Si 細線導波路への応用が期待できる。

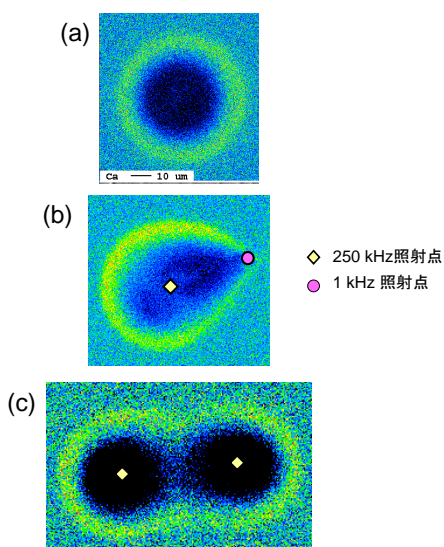


図Ⅲ①(3)-10 共焦点顕微ラマン分光により面観察した Si 析出ライン

### c) 元素分布の形状制御

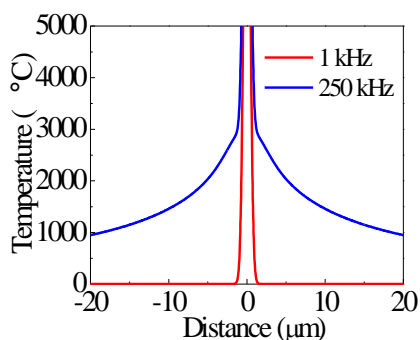
b) b-1 で述べたように、250 kHz レーザーを 1 点で集光照射した場合、同心円状の元素分布が形成される<sup>16)</sup>。一方、低繰り返し 1 kHz レーザーをガラス内部に照射しても、構造変化領域が非常に小さく、またクラックも入りやすいため、高繰り返しの場合のような元素分布の形成は観察されていない。しかしながら、250 kHz レーザーと 1 kHz レーザーを同時照射することによって、元素分布の形状が大きく変化することを確認した(図Ⅲ

①(3)-10 参照)。図Ⅲ①(3)-10 (b) から、250 kHz レーザー照射点で形成された同心円状の分布が 1 kHz レーザー照射点に向かって鋭く収束していることがわかる。同じ 2 点照射でも、250 kHz のみの場合とは大きく異なっている(図Ⅲ①(3)-10 (c))。このような変化には、レーザー照射時の温度分布が大きく影響し



図Ⅲ①(3)-10 様々な照射条件での Ca の元素分布

- (a) 250 kHz レーザー照射、
- (b) 250 kHz と 1 kHz レーザーの 2 点同時

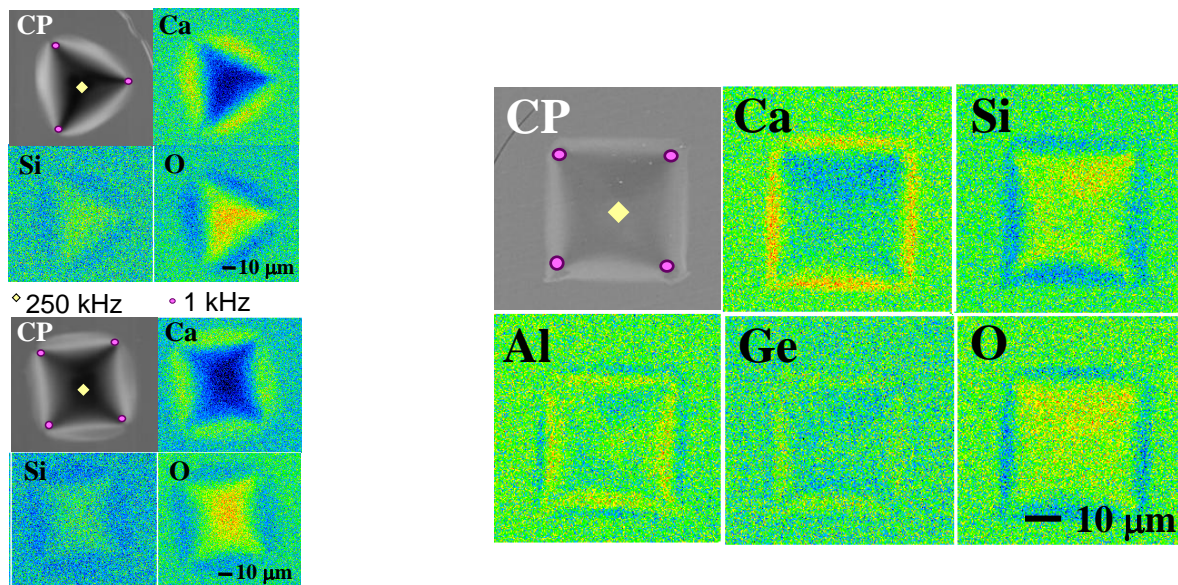


図Ⅲ①(3)-11 1 kHz と 250 kHz とのレーザー照射によって形成させる温度勾配の比較

ていると考えられる。図Ⅲ①(3)-11 に、1 kHz と 250 kHz とのレーザー照射によって形成させる温度勾配の比較を示す。この図から 1 kHz の繰り返し照射の方が急峻な温度勾配が形成されることを確認することができ、250 kHz レーザー照射点付

近に 1 kHz レーザーを照射することによって温度分布が変化し、元素が拡散できる領域が広がった結果、1 kHz 照射点周辺で鋭いエッジを持つ元素分布が形成されたと考えられる。以上の結果は、250 kHz と 1 kHz レーザーの同時多点照射によって、元素分布形状が制御可能であることを示唆する。そこで、LCOS-SLM を用いた多点同時照射による元素分布形状の制御を試みた。

図Ⅲ①(3)-12, 13 は、LCOS-SLM を用いて、250 kHz レーザー照射点の周囲に 3 点、4 点に分割した 1 kHz レーザーを照射した場合に得られた元素分布の結果を示す。シャープな三角形、四角形の形状を持つ元素分布が形成可能であることが確認できる。



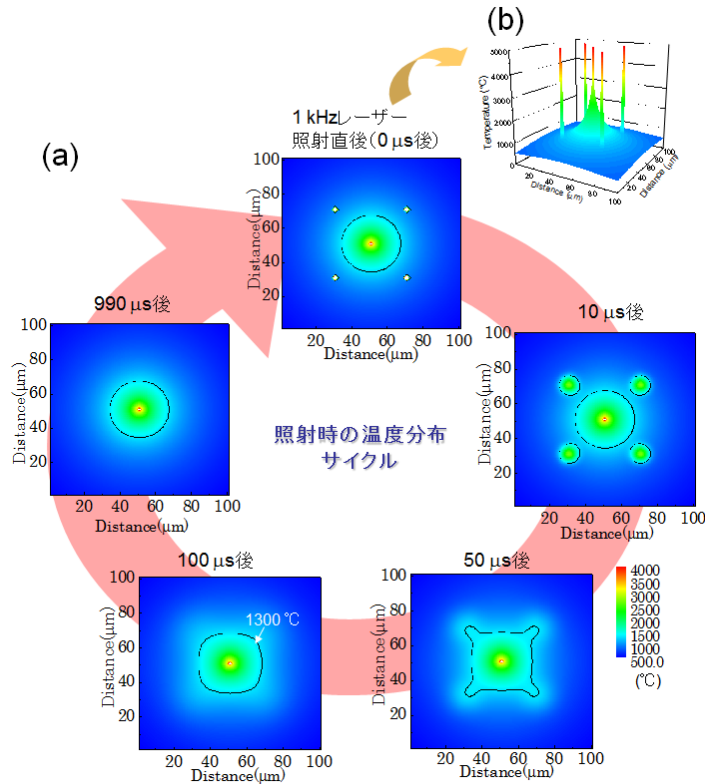
図Ⅲ①(3)-12 1 kHz と 250 kHz レーザーの多点同時照射による元素分布形状制御(アルカリシリケートガラス)

図Ⅲ①(3)-13 1 kHz と 250 kHz レーザーの多点同時照射による元素分布形状制御 (37.5SiO<sub>2</sub>-18.75GeO<sub>2</sub>-33.75CaCO<sub>3</sub>-10Al ガラス)

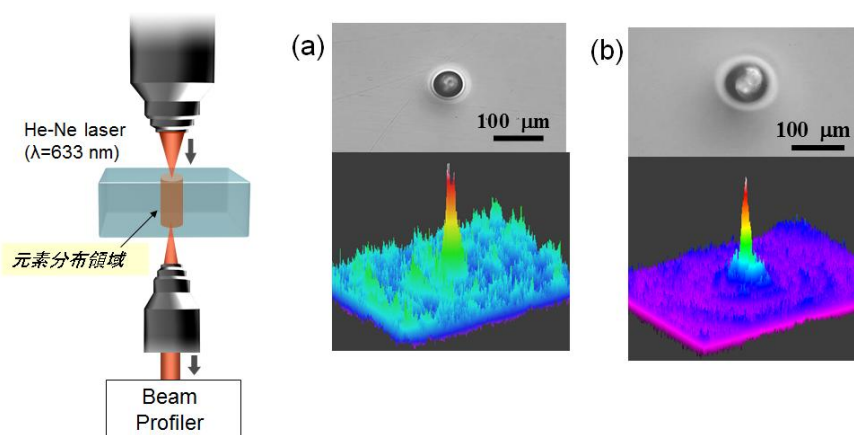
図Ⅲ①(3)-14 は、図Ⅲ①(3)-13 の元素分布を形成した照射条件での温度分布サイクルの計算結果を示す。250 kHz に比べて 1 kHz の照射点で非常に鋭い温度分布が形成されていることが分かる。また、1 kHz レーザー照射によって生じる高温領域が、照射後約 100 us 間で広がっていき、四角い温度分布を経て変形していくことも確認できる。四角形の元素分布形状はこの温度分布を反映したものであり、1 kHz レーザーが 1 パルス打ち込まれる毎にこのような温度分布が繰り返されることで、元素分布形状が特徴的な形状へと変化する。以上、LCOS-SLM を用いた多点同時照射により、元素分布形状の制御に成功した。

光学特性に大きく影響を与える元素を中心に集めることで局所的に光学特性が異なる領域を形成することができ、例えば基板内部へのマイクロレンズアレイや光導波路アレイが形成できる可能性がある。実際に、元素分布形成を利用して光導波路構造を形成し、光伝搬が可能であることも確認している(図Ⅲ①(3)-15)。

さらに、ガラス材料は構成元素を選択することで紫外から10ミクロン以上の赤外領域にいたる幅広い波長領域で優れた透過特性を有する材料が種々存在し、センサーや通信分野において多様な波長域で利用可能な光学素子の開発が期待できる。



図III①(3)-14 250 kHz レーザー1点と1 kHz レーザー4点の同時照射時の温度分布サイクル



図III①(3)-15 コア領域の光学顕微鏡像と光導波路からの出射光強度分布

(a)  $\text{P}_2\text{O}_5\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-K}_2\text{O}$  ガラス

(b)  $\text{B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-K}_2\text{O}$  ガラス

## 参考文献

- 1) K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Hamabe and K. Hirao, Proc. SPIE–The International Society for Optical Engineering 6413, 64130K–1–13 (2006).
- 2) M. Hamabe, K. Miura, Y. Shimotsuma, M. sakakura, S. Kanehira, M. Nishi, K. Hira, Journal of Wuhan University of Technology–Mater. Sci. Ed., Vol. 22 (2007), pp. 5–8
- 3) K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Hamabe and K. Hirao, Applied Physics A, Vol. 93 (2008) 183–188
- 4) S. Kanehira, K. Miura, and K. Hirao, Appl. Phys. Lett., **93**, 023112–1 (2008)
- 5) Y. Liu, M. Shimizu, X. Wang, B. Zhu, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, J. Qiu, K. Miura, and K. Hirao, Chemical Physics Letters, Vol. 477 (2009) 122–125.

## 【研究項目②三次元化加工システム技術】

### 1) 波面制御三次元加工システム技術

#### (a) ホログラム設計用ソフトウェアシステム技術とホログラム設計技術

本研究の目的は、三次元一括加工を実現するためのホログラム設計技術を提案・構築することである。具体的には、①大規模計算のためのソフトウェアシステムを構築すること、②三次元物体を表現するホログラム設計方法を開発すること、③ホログラム設計の高速化を実現すること、である。

ホログラムの設計に必要な環境として、高性能 CPU を搭載した計算機器による HPC (High Performance Computing) 基盤システムを構築した。これを基にガラス内部で 1 辺  $60\mu\text{m}$  の立方体内に直径  $10\mu\text{m}$  以下の球状異質相を 4 個以上、三次元で形成するホログラムを最初に設計した。また、ガラス内部に直径  $9\pm 0.9\mu\text{m}$  の直線導波路や曲線導波路を形成するためのホログラムも設計した。これらの設計の際、波面計算の計算領域を適切に絞り込むことで設計時間の短縮化を実現した。

本サブテーマで構築した設計技術を用いて、実際にホログラムを作製し、ガラス内部への三次元一括加工を実現できたことから、有効な研究成果である。また計算領域を適切に絞り込む計算手法により、中間目標であるホログラム設計の従来比 3 倍以上の高速化、最終目標の従来比 10 倍以上の高速化を共に達成した。

#### a) 大規模計算のためのソフトウェアシステムの構築

ホログラム設計に必要な環境として、高性能 CPU を搭載した計算機器による HPC 基盤システムを構築した。従来のシステムでは、ホログラム設計に並列処理を用いても、64 万画素あたり約 100 時間費やすため、マルチコア環境に対応したハードウェアとソフトウェア技術を導入することは重要である。本システムは、従来のワークステーションや汎用 PC に比べ計算時間を大幅に短縮できるため有効なシステムである。

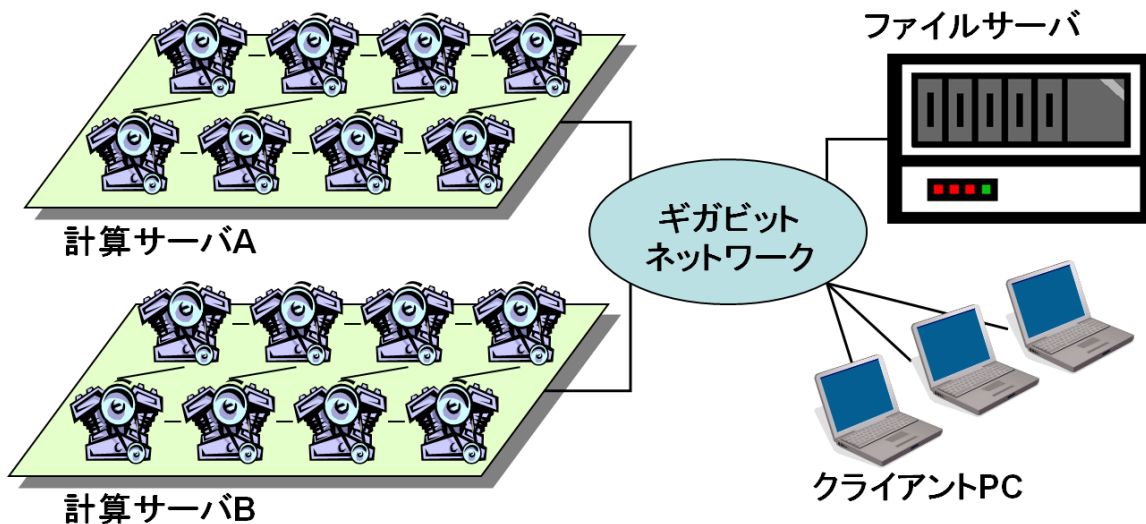


図 3-2-1-a-1. 計算システムの構成

図 3-2-1-a-1 に示す通り、本システムの構成は、デュアルコアプロセッサを 8 機と大容量メモリ (64GB) を搭載した 2 台の計算サーバと、RAID (Redundant Arrays of Inexpensive Disks) 機能を搭載した計算データ収録装置 (ファイルサーバ) をネットワーク接続したものである。これにより並列処理が可能となる。また加えて、最新の GPU コンピューティングシステムを導入し、よりスケラブルなシステムへと拡張した。

本システムを基にアプリケーション (例えば、光学シミュレータなど) を構築する場合、マルチスレッドプログラミング [5] や OpenMP [6]、MPI (Message Passing Interface) [7] などの並列計算技術を用いることで、効率的な大規模計算処理が実現できる。

#### b) 三次元物体を表現するホログラム設計手法の開発

ホログラム生成には、式 1 に示すフレネル-キルヒホッフの回折積分 [1, 2] を基に、光学的要件 (結像距離や開口サイズなど) を考慮に入れた近似式を用いる場合が多い。例えば、ホログラムと結像位置が有限距離で配置するフレネルホログラム [3] や、無限遠で配置するフーリエ変換ホログラム [3] は、その主な代表例である。

$$U(P) = -\frac{iA}{2\lambda} \iint \frac{\exp\{ik(r_0 + r)\}}{r_0 r} [\cos(n, r_0) - \cos(n, r)] dS \quad (\text{式 1})$$

図 3-2-1-a-2 は式 1 に対応する回折モデルである。

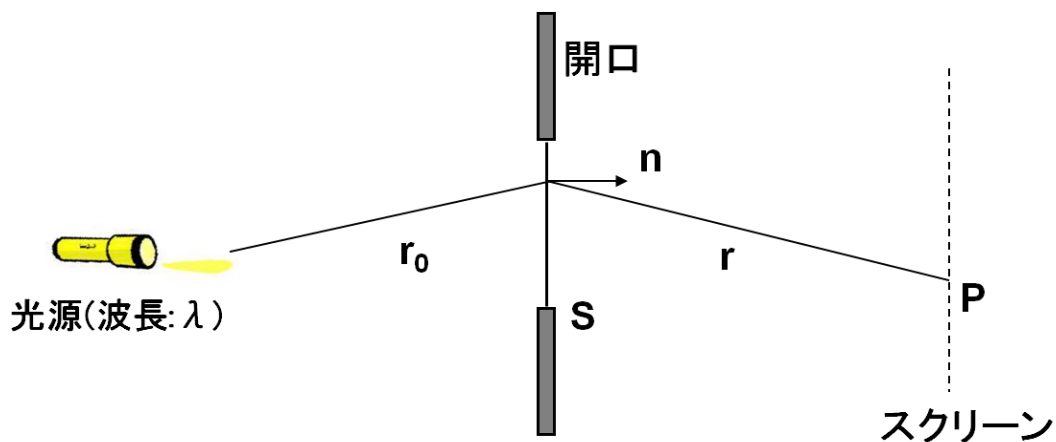


図 3-2-1-a-2. フレネルーキルヒホッフの回折モデル

図 3-2-1-a-2 中の  $r_0$  は光源からの開口上の点への距離を、 $r$  は開口上の点からスクリーン上の観測点への距離を示す。 $n$  は開口面との法線、 $A$  は定数、 $\lambda$  は波長を示す。

本研究においても、フェムト秒レーザー加工システムを考慮して、フレネルーキルヒホッフの回折積分（式 1）を展開することは重要である。本研究では主に次の 2 点に注目する。

- 光源が開口面（物体あるいはホログラム）から十分離れた位置（無限遠）にあり、光源からの入射波を平面波とみなす。
- 開口面から観測点までの距離に関する近似はしない。

これらを踏まえ、式 1 の展開を以下に示す。

まず、入射波  $\exp\{ikr_0\}/r_0$  は平面波とみなせるので一定となる。これと積分の外側の  $A$  を掛け  $A'$  とする。

$$U(P) = -\frac{iA'}{2\lambda} \iint \frac{\exp\{ikr\}}{r} [\cos(n, r_0) - \cos(n, r)] dS \quad (\text{式 2})$$

また、光源から開口への入射波を示す単位ベクトル  $\vec{r}_0$  と開口面との法線を示す単位ベクトル  $\vec{n}$  のなす角は  $0^\circ$  で、 $\cos(n, r_0) = 1$  となる。

$$U(P) = -\frac{iA'}{2\lambda} \iint \frac{\exp\{ikr\}}{r} [1 - \cos(n, r)] dS \quad (\text{式 3})$$

$\vec{n}$ と開口からの回折光を示す単位ベクトル $\vec{r}$ （向きは回折波の進行方向とは逆方向）のなす角 $(n, r)$ から、 $\mathcal{X} = \pi - (n, r)$ とすると、 $\cos(n, r) = -\cos\mathcal{X}$ となる。

$$U(P) = -\frac{iA'}{2\lambda} \iint \frac{\exp\{ikr\}}{r} [1 + \cos\mathcal{X}] dS \quad (\text{式 4})$$

最後に、開口関数  $f(x, y)$  を導入する。これは任意の物体の複素振幅分布を示す。

$$U(x', y') = -\frac{iA'}{2\lambda} \iint f(x, y) \frac{\exp\{ikr\}}{r} [1 + \cos\mathcal{X}] dx dy \quad (\text{式 5})$$

以上がフレネル-キルヒホッフの回折積分についての近似である。

次に、式 5 を基に三次元モデルに対応するように回折計算を拡張する。

$$F(x', y'; z) = \bigcup_{z=z_0}^{z_n} f_z(x, y) \quad (\text{式 6})$$

式 6 は、三次元モデル  $F(x, y; z)$  を二次元に断層化することを示す。断層化における結像距離の範囲を、 $z_0 \sim z_n$  となる。ここで式 6 と式 5 に適用する。

$$U(x', y'; z) = \bigcup_{z=z_0}^{z_n} \left( -\frac{iA'}{2\lambda} \iint f_z(x, y) \frac{\exp\{ikr\}}{r} [1 + \cos\mathcal{X}] dx dy \right) \quad (\text{式 7})$$

式7は、各々の層 $f_z$ ごとに 式5の回折計算を施し、これらを合成することを示す。

以上を踏まえると、三次元物体のためのホログラム設計の流れは次の通りである。

- ① 目的の三次元物体を二次元モデルに分割する。
- ② 各々の二次元モデルごとにホログラムを生成する。
- ③ 生成したホログラム群を1つホログラムに合成する。

図 3-2-1-a-3 は、1 辺  $60 \mu\text{m}$  の立方体内に直径  $10 \mu\text{m}$  以下の球状異質相を 4 個形成するためのホログラム設計を示す（図中の番号は上の箇条書き番号に対応する）。



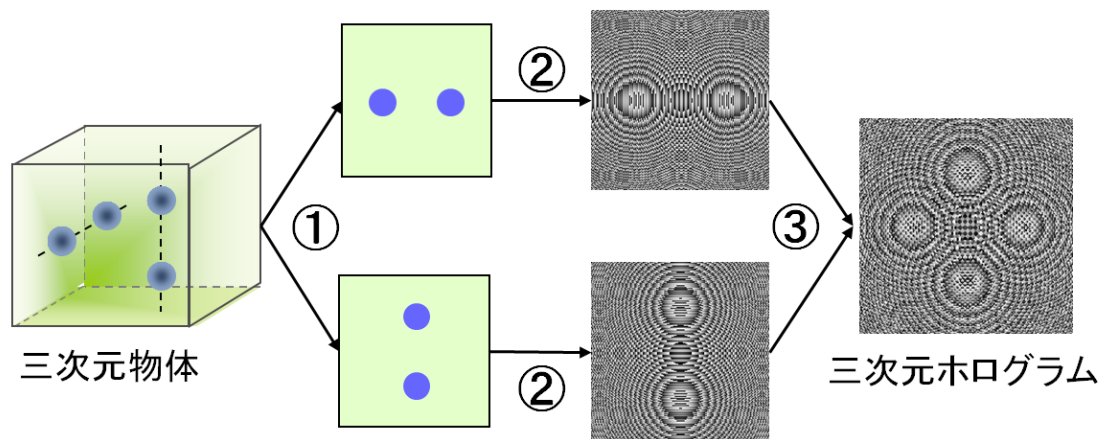


図 3-2-1-a-3. 三次元物体を形成するホログラム設計の概要

設計検証は計算機による波面再生にて行う。つまり、生成したホログラムデータを回折積分に代入し、結像距離ごとの二次元再生像を求め、これら再生像群を立体的に捉え、目的の三次元物体の形成を確認する。実際に図 3-2-1-a-3 で生成したホログラムの再生像を図 3-2-1-a-4 に示す。

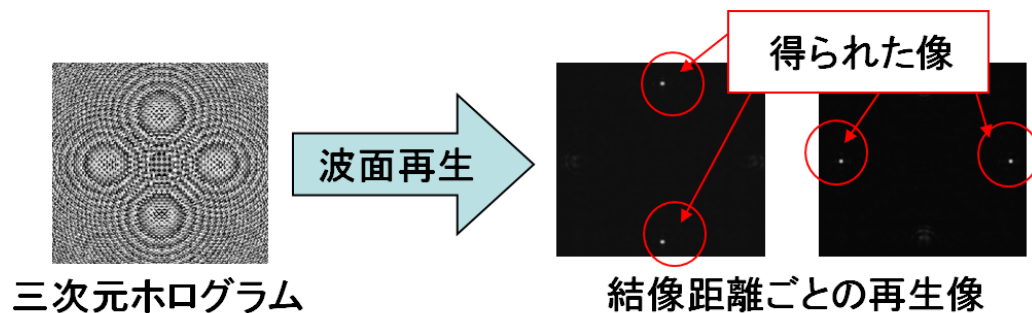


図 3-2-1-a-4. 計算機による波面再生の結果

### c) ホログラム設計の高速化の実現

ホログラム設計の際、式 5 で示した回折積分の計算領域を適切に絞り込む計算手法を用いることで設計時間の短縮化を実現した。図 3-2-1-a-5 にホログラム生成の過程をより詳細に示す。

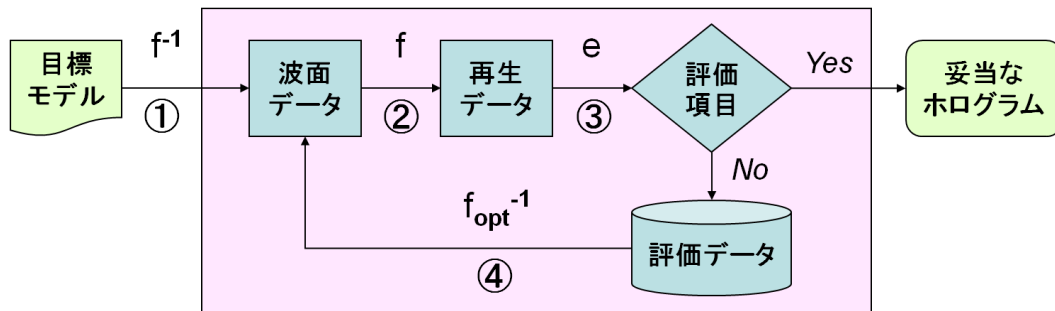


図 3-2-1-a-5. ホログラム生成の詳細モデル

図 3-2-1-a-5 中、 $f$  は式 5 を、 $f^{-1}$  は式 5 の逆変換を示す。 $f_{opt}^{-1}$  は  $f^{-1}$  を拡張した変換を示す。また  $e$  は再生データと目標モデルを比べ、予め設定した評価項目をテストする関数である。ホログラム設計は、図 3-2-1-a-5 に示したような生成プロセスに基づくことが多い[4]。具体的には次の通りである（箇条書き番号は図 3-2-1-a-5 中の番号に対応する）。

- ① 加工用の目標モデルを定め、 $f^{-1}$ により、これを表現する波面を求める。
- ② 求めた波面から、 $f$ より、再生データを求める。
- ③ 評価関数  $e$ により、評価項目をチェックする。

※十分な結果の波面データを妥当なホログラムとし、生成プロセスは終了する。

- ④ 評価データを基に、 $f_{opt}^{-1}$ により、再び波面を求める。(⇒②へ)

②→③→④→②… の工程を最適化プロセスとする。これはホログラム生成の核となり、ホログラムの精度や設計の高速は、この最適化プロセスに依存する。

ここで、図 3-2-1-a-5 に示した生成モデルを基に、設計時間の短縮化について述べる。まず、ホログラム設計に掛かる合計時間 ( $CGH_{Time}$ ) を以下の通りに示す。

$$CGH_{Time} = |f^{-1}| + (|f| + |e| + |f_{opt}^{-1}|)N \quad (式 8)$$

$|f^{-1}|$ 、 $|f|$ 、 $|e|$ 、 $|f_{opt}^{-1}|$ は、各々に掛かる計算時間を示す。 $N$  は最適化プロセスの回数を示す。このとき、 $|f^{-1}|$ は 1 回しか行われないので、 $CGH_{Time}$  から除く。同様に、 $|e|$ は他の計算に比べて軽量なので、 $CGH_{Time}$  から除く。

$$CGH_{Time} \Rightarrow (|f| + |f_{opt}^{-1}|)N \quad (式 9)$$

$f_{opt}^{-1}$  は  $f^{-1}$  と同様に波面を求める計算である。 $f^{-1}$  は目標モデルと光学条件（波長や結像距離など）を入力値とする。一方、 $f_{opt}^{-1}$  は目標モデルと光学条件に加えて、波面再生の評価データを入力値とする。入力項目に違いはあるが、波面計算部は同じなので、計算時間はほぼ等しくなる。よって、|

$f_{\text{opt}}^{-1}$  を  $|f^{-1}|$  に置き換えることができる。

$$CGH_{\text{Time}} \Rightarrow (|f| + |f^{-1}|)N \quad (\text{式 10})$$

ここで、 $|f|$  と  $|f^{-1}|$  について述べる。上で述べた通り、 $f$  は式 5 の回折積分を示し、 $f^{-1}$  はその逆変換である。つまり、 $f$  は光源からの光波の進行方向と同じ方向への回折波面を求め、 $f^{-1}$  は光源からの光波の進行方向とは逆向きの回折波面を求める。 $f$  は  $f^{-1}$  (もしくは  $f_{\text{opt}}^{-1}$ ) により求めた波面データと光学条件を入力値とする。よって、 $|f|$  と  $|f^{-1}|$  の差は、波面データと目標モデルの違いに依存する。一般に  $f^{-1}$  の入力値である目標モデル  $g(x, y)$  は、開口関数として以下の通りに定義する。

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & (\text{開口部}) \\ 0 & (\text{遮蔽部}) \end{cases} \quad (\text{式 11})$$

このとき、遮蔽部の値は 0 なので、この部分から算出される値も 0 となることは明らかである。よって、遮蔽部に関連する計算は、 $CGH_{\text{Time}}$  から除くことができる。ここで、式 11 の開口部の占有率  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) と、 $|f|$  の計算時間  $T$  を導入する。

$$\begin{aligned} CGH_{\text{Time}} &\Rightarrow (T + \rho T)N \\ &= (1 + \rho)TN \end{aligned} \quad (\text{式 12})$$

よって、式 12 がホログラム設計に掛かる合計時間になる。

本研究では、式 12 が示す設計時間を基にした短縮化手法を提案する。まずレーザー加工での用途を考慮すると、式 12 の  $\rho$  は往々にして小さな値であることが多い。例えば、64 万画素で 100 個の球を加工する場合 (1 球を 1 画素で表現する場合)、 $\rho = 100/640000 = 0.00015625$  となる。これは十分に小さい値であり、 $|f^{-1}|$  は  $|f|$  に比べ、 $CGH_{\text{Time}}$  への影響が小さいと考える。このため、 $|f|$  の計算時間を削減することが重要になる。

そこで、 $f$  により求める再生データに対して計算領域を設定することで、 $|f|$  を削減することを提案する。つまり、目標モデルの開口部とその周辺部分のみの再生データを求め、評価関数  $e$  への入力とするのである。ここで、領域係数  $\alpha$  ( $\geq 1$ ) を導入し、短縮化した設計時間を  $CGH'_{\text{Time}}$  とする。

$$\begin{aligned}
 CGH'_{Time} &\Rightarrow (\alpha\rho T + \rho T)N \\
 &= (\alpha + 1)\rho TN
 \end{aligned}
 \tag{式 13}$$

|f|はTから  $\alpha\rho T$  へと変化する。 $\alpha\rho$  は目標モデルの開口部とその周辺部分を含めた占有率であり、その範囲は、 $0 < \alpha\rho < 1$  である。ここで、設計時間の短縮率  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ) を導入する。

$$\beta = \frac{CGH'_{Time}}{CGH_{Time}} = \frac{(\alpha + 1)\rho}{1 + \rho}
 \tag{式 14}$$

式 14 を展開して、開口部の占有率  $\rho$  と設計時間の短縮率  $\beta$  に応じた領域係数  $\alpha$  が求まる。

$$\alpha = \frac{(1 + \rho)\beta}{\rho} - 1
 \tag{式 15}$$

例として、上で述べた 64 万画素で 100 個の球を表現するホログラムを設計する場合を考える。式 15 に  $\rho = 0.00015625$ 、 $\beta = 1/3$  (3 倍の短縮化) を代入すると、 $\alpha = 2132.666$  ( $0 < \alpha\rho = 0.3332290625 < 1$ ) となる。これは 1 球あたり 2133 画素の計算領域を確保すれば、論理的に 3 倍の短縮化になることを示す。2133 画素は  $46 \times 46$  画素の矩形領域に相当し、再生データの評価範囲としては十分である。同様に、 $\rho = 0.00015625$ 、 $\beta = 1/10$  (10 倍の短縮化) を代入すると、 $\alpha = 639.1$  ( $0 < \alpha\rho = 0.099859375 < 1$ ) となり、1 球あたり 639 画素の計算領域を確保すれば、論理的に 10 倍の短縮化になることを示す。639 画素は  $25 \times 25$  画素の計算領域に相当し、これでも再生データの評価は可能であると考えられる。

以上より、式 15 を用いて f の計算領域を適切に絞り込み、図 3-2-1-a-5 のホログラム生成プロセスを実行する計算手法により、設計時間の短縮化が可能となることを示した。実際に、三次元一括加工が可能な 64 万画素のホログラム設計の際、計算領域を 1 画素あたり  $25 \times 25$  画素に絞り込むことで、約 12 倍の設計高速化を確認した。図 3-2-1-a-6 は、回折積分 1 回あたりの計算時間を測定した結果である。縦軸は計算時間を、横軸は適用した CPU コア数を示す。青色の折れ線は従来手法、赤色の折れ線は本手法の測定結果である。

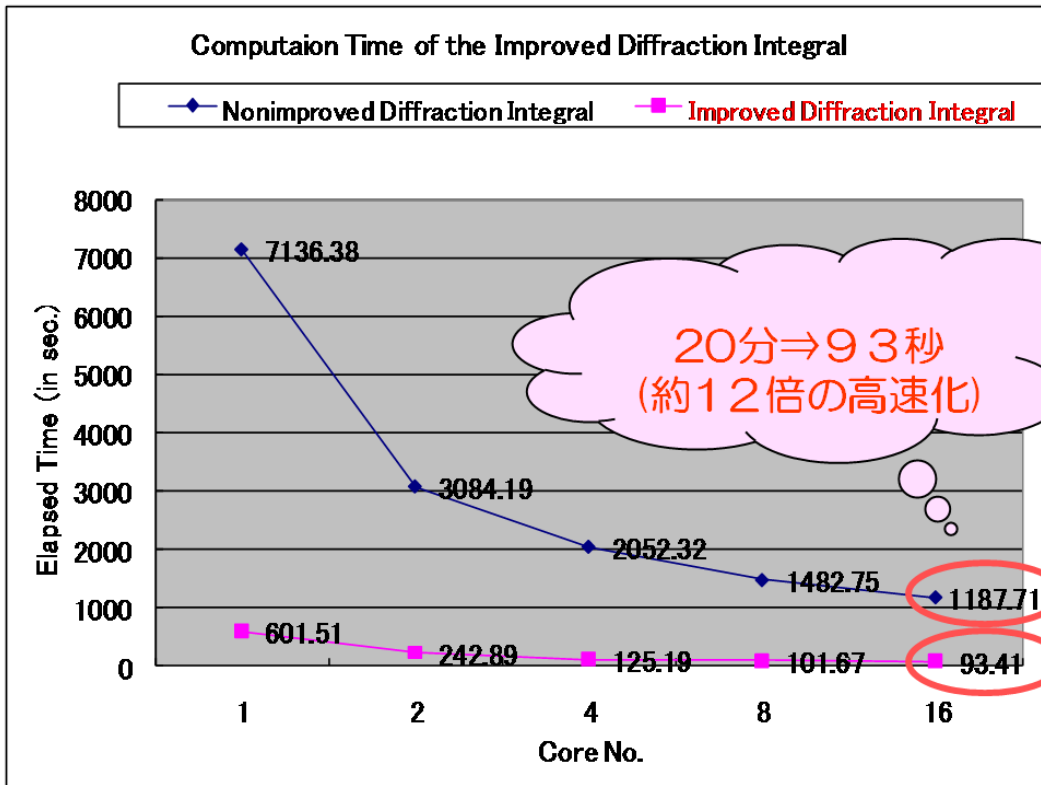


図 3-2-1-a-6. 回折積分 1 回あたりの計算時間測定の結果

#### d) 三次元ホログラム設計事例

ここでは、上の a) ~c) 節で述べたホログラム設計手法を用いた 5 つの設計事例を挙げる。内容は、①直線モデル、②三次元螺旋モデル、③三次元ドット面心立方格子モデル、④光軸平行直線モデル、⑤マルチレベル強度分布モデル、である。この 5 例により設計の柔軟性を示す。

##### i) 直線モデル

まず基本形状である直線形状の設計を試みる。直線形状は、例えば、回折格子を始めとする光学素子の製作を考慮する上でも、最も重要な形状の 1 つである。図 3-2-1-a-7 に直線モデルの設計概要を示す。

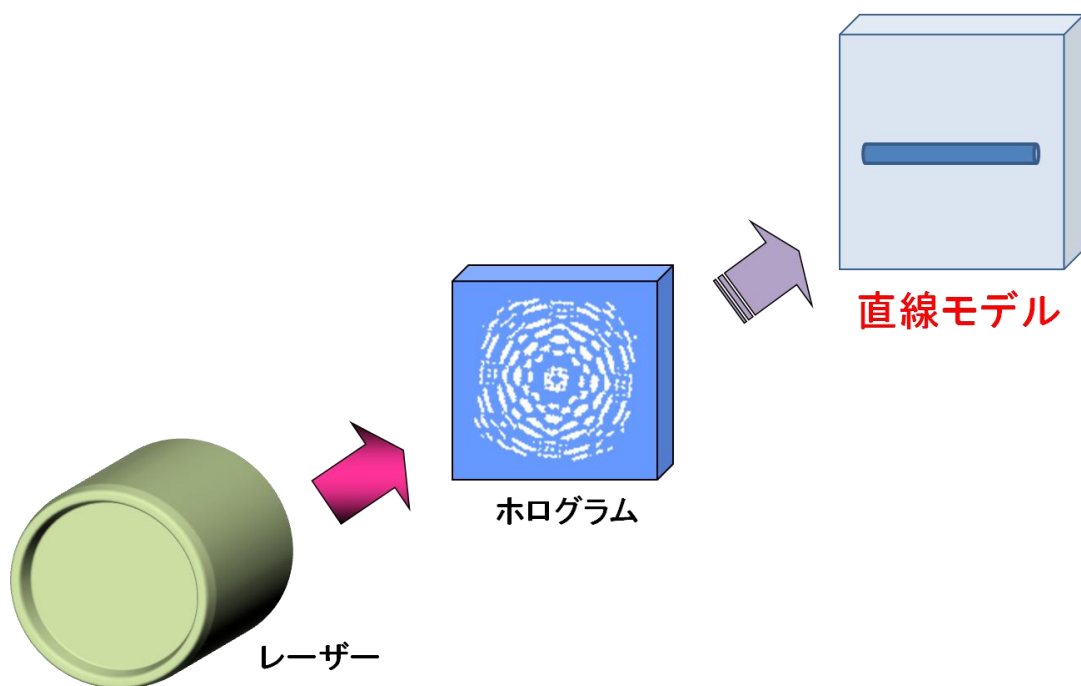


図 3-2-1-a-7. 直線モデルの設計概要

図 3-2-1-a-7 中の「レーザー」から発振したレーザー光は「ホログラム」を通すことで直線形状を形成する。ホログラムは設計によって、任意の位置、任意の長さの直線形状を形成できる。本設計事例においては、「ホログラム」から 100mm の位置に、長さ 2mm の直線形状を設計する。

図 3-2-1-a-8 に直線モデルの設計結果を示す。図 3-2-1-a-8 の「設計モデル」欄の通り、長さ 2mm の直線は、100 ピクセルで表現した。「CGH」欄には設計したホログラムパターンを示した。このパターンの外形は直径 8mm の円形である。これはレーザー加工で用いるビーム形状を考慮したものである。また、ホログラムパターンの階調数については、波面制御素子（例えば、ガラス・ホログラムや空間光変調器など）の仕様に応じて柔軟に対応できる。本設計事例では、2 階調でホログラムを設計した。

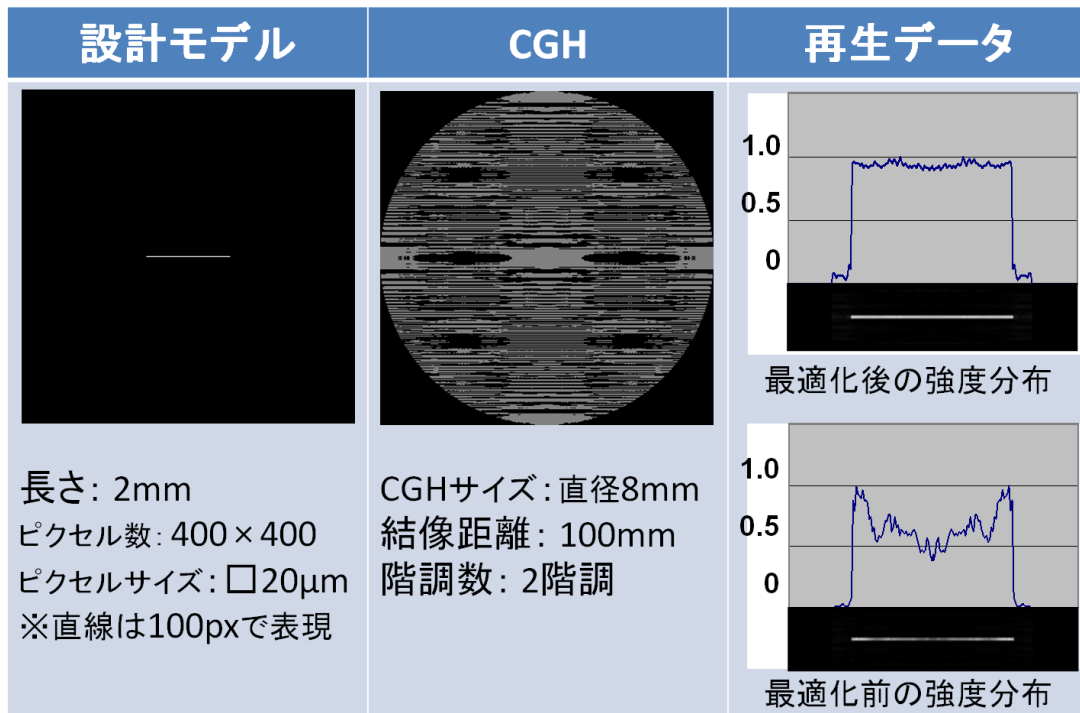


図 3-2-1-a-8. 直線モデルの設計結果

ホログラム設計には最適化処理が必要である。我々は単一方向性アルゴリズム [4] を基にした独自の反復計算手法により、最適化処理を実現した。直線モデルのホログラム設計において、最適化の効果を確認する。図 3-2-1-a-8 の右欄は、最適化前後の直線形状の計算機再生の結果である。右欄下側は最適化前の直線像とその強度分布である。中央部分の強度が低く均一性が十分でない。一方、右欄上側は最適化後の直線像とその強度分布である。右欄下側に比べ、均一性を大幅に改善できた。この事例からも最適化は重要な設計工程の 1 つである。本最適化手法は、直線モデル以外の任意の設計モデルで適用できる。

結像距離	再生データ				
500mm	-20mm	-10mm	±0mm	+20mm	+30mm
300mm	-6mm	-3mm	±0mm	+3mm	+9mm
100mm	-2mm	-1mm	±0mm	+1mm	+2mm

図 3-2-1-a-9. 直線ホログラムの結像距離とその前後での計算機再生の結果

図 3-2-1-a-9 は、3 つの結像距離（100mm, 300mm, 500mm）で設計した直線ホログラムの各々の結像距離とその前後での計算機再生の結果を示す。3 つの直線ホログラムは各々の結像距離（±0mm）では、所望の直線形状を形成している。ここで、各々の結像距離の前後の強度分布に注目する。結像距離 500mm の場合、-10mm～+20mm の間で光強度に違いはあるものの直線形状が確認できる。これは光軸方向への冗長性の高い強度分布である。同様に結像距離 300mm の場合、-3mm～+3mm の間で直線形状を形成している。結像距離 500mm に比べれば、光軸方向への冗長性は抑えられているが十分ではない。最後に結像距離 100mm の場合、-1mm と +1mm の位置では直線形状の光強度がかなり弱くなっていることが確認できる。つまり、±0mm 付近でしか直線形状を形成していないので、光軸方向への冗長性をよく抑えている。図 3-2-1-a-9 で示した結果から、同じ直線モデルでも、設計によって異なる性質（ここでは、光軸方向への冗長性）の直線形状を形成することを確認した。ターゲットとなるアプリケーションによって、この性質を上手く活用することは、ホログラムを用いたレーザー加工技術の重要な要素の 1 つである。

## ii) 三次元螺旋モデル

1 つのホログラムから三次元形状を形成できる。三次元螺旋形状は、三次元形状の特徴的な形状であり、三次元特有の複雑さである「光軸方向へ重なり」を含む事例である。この「光軸方向への重なり」は、例えば、三次元光ストレージにおいて、ビット列を三次元的に一度で配置する場合に非常に有用な要素となる。



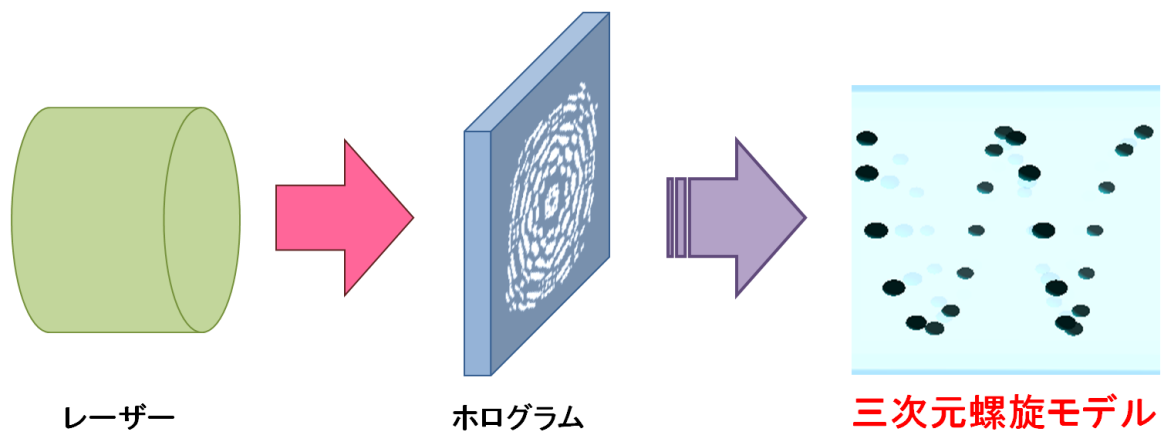


図 3-2-1-a-10. 三次元螺旋モデルの設計概要

図 3-2-1-a-10 は、三次元螺旋モデルの設計概要を示す。螺旋は 24 個のドットを 24 層に配置することで表現する。「光軸方向への重なり」は、(1 層, 13 層) (2 層, 14 層) (3 層, 15 層) (4 層, 16 層) (5 層, 17 層) (6 層, 18 層) (7 層, 19 層) (8 層, 20 層) (9 層, 21 層) (10 層, 22 層) (11 層, 23 層) (12 層, 24 層) の 12 組ある。

図 3-2-1-a-11 は、三次元螺旋モデルの設計結果である。「CGH」欄に設計したホログラムパターンを示す。上の i) 節で示した直線ホログラムと同様、このパターンの外形は直径 8mm の円形で、2 階調で設計した。「再生データ」欄は、三次元螺旋ホログラムの 24 層分の計算機再生の結果である。

「光軸方向への重なり」となる 12 組は、各々光軸方向上に分離したドットとして強度分布が生成されており、設計が良い結果となったことを示す。

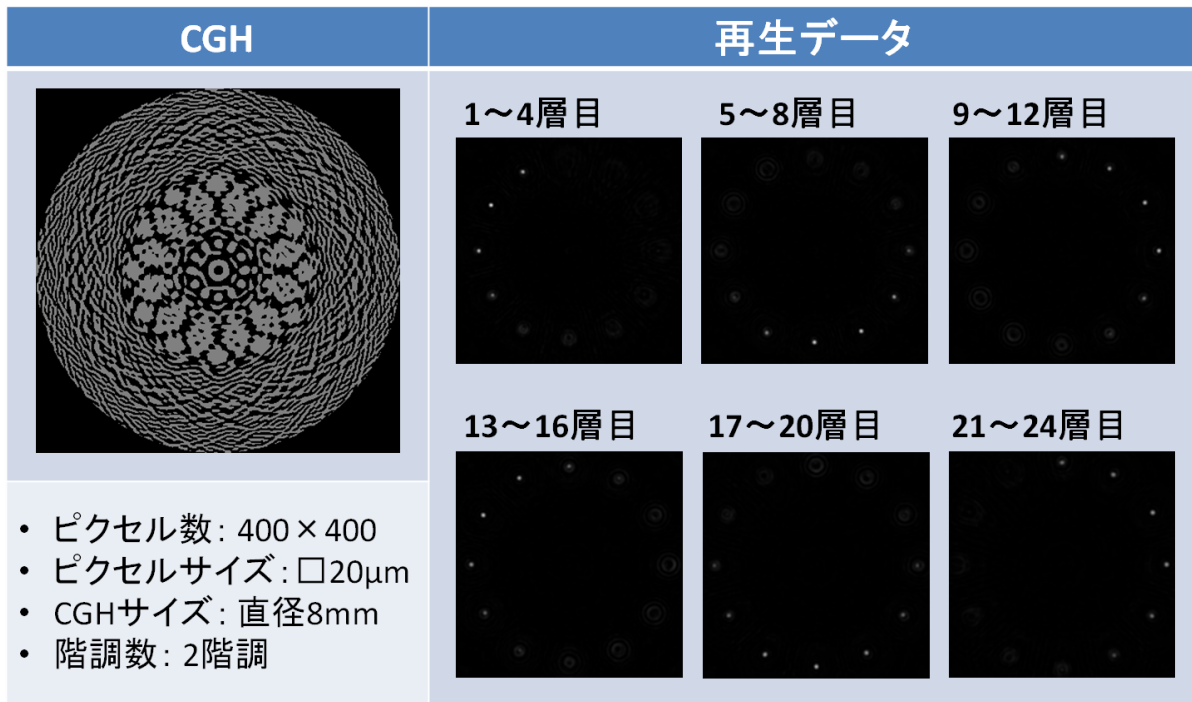


図 3-2-1-a-11. 三次元螺旋モデルの設計結果

iii) 三次元ドット面心立方格子モデル (異質相 100 個)

さらに複雑な三次元形状の設計を試みる。ここでは、最終目標でもある 100 個の異質相を一括で表現するためのホログラムを考慮する。

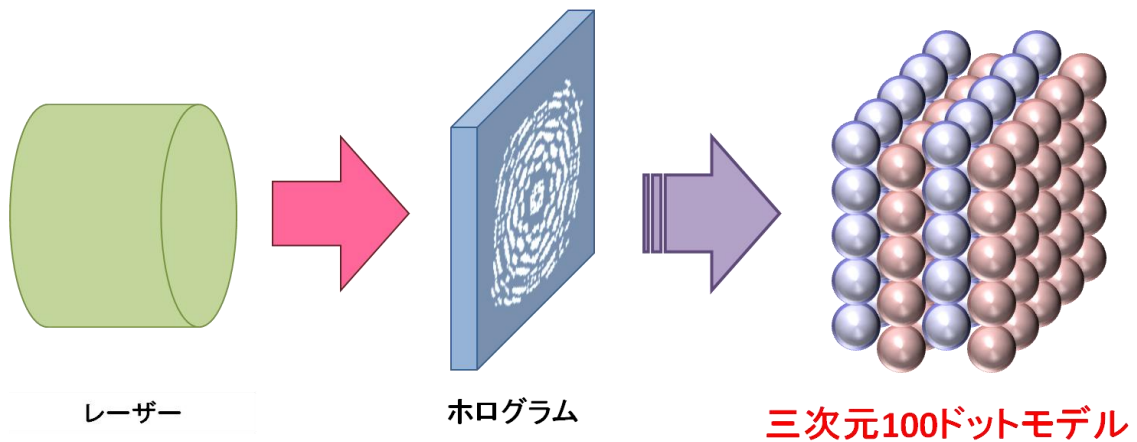


図 3-2-1-a-11. 三次元ドット面心立方格子モデルの設計概要

図 3-2-1-a-11 は、三次元ドット面心立方格子モデルの設計概要である。100 個の異質相は、5×5 の平面格子を 4 層分配置することで表現する。1 層目と 3 層目、2 層目と 4 層目を「光軸方向への重なり」として構成することで、三次元面心立方格子とする。

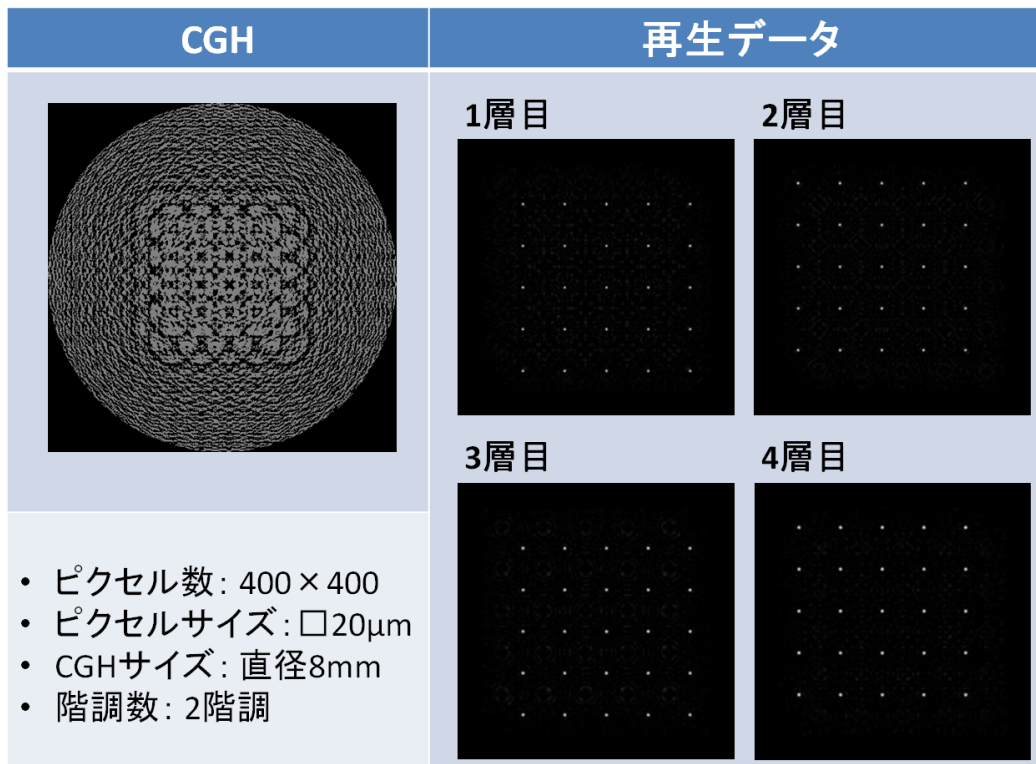


図 3-2-1-a-12. 三次元ドット面心立方格子モデルの設計結果

図 3-2-1-a-12 は、三次元ドット面心立方格子モデルの設計結果である。「CGH」欄には、設計したホログラムパターンが、直径 8mm の円形として 2 階調で表現されている。「再生データ」欄には、4 層分の計算機再生の結果がある。1 層目と 3 層目の再生データを見ると、XY 平面（光軸との垂直平面）上、同じ位置に各々 25 個のドット形状の強度分布がある。これらは、2 層目と 4 層目にはないので、25 組の「光軸方向への重なり」を実現したと確認できる。同様に、2 層目と 4 層目の各々の 25 個のドット形状強度分布についても、「光軸方向への重なり」を実現したと確認できる。これにより、100 個の異質相を一度に表現するホログラムの設計を達成した。

#### iv) 光軸平行直線モデル（長焦点深度ホログラム）

三次元形状を表現するホログラムの応用として、光軸と平行な直線形状の設計を試みる。これは、i) 節で示した直線形状とは垂直の位置関係になる。この光軸平行直線形状も、基本的な形状の 1 つであり、例えば、三次元回路や三次元流路などを考慮する場合、非常に重要な要素となる。

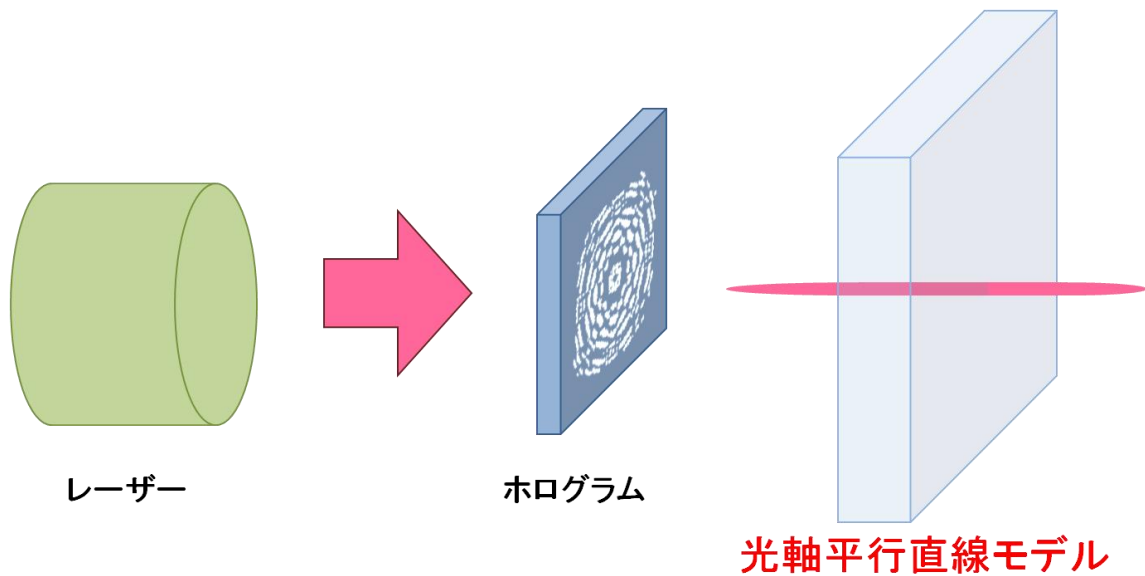


図 3-2-1-a-13. 光軸平行直線モデルの設計概要

図 3-2-1-a-13 は、光軸平行直線モデルの設計概要である。図中に示す通り、加工サンプルを貫通するように光強度分布を形成する。ii) 節と iii) 節で示した三次元形状とは異なり、「光軸方向への重なり」については、不連続な部分がないように設計する必要がある。

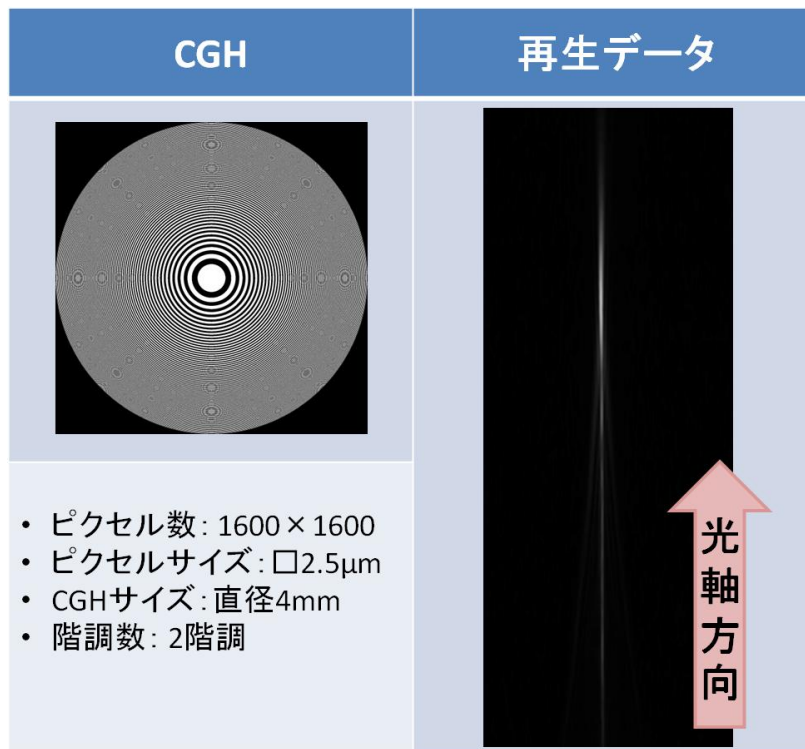


図 3-2-1-a-14. 光軸平行直線モデルの設計結果

図 3-2-1-a-14 は、光軸平行直線モデルの設計結果である。「CGH」欄には、設計したホログラムパターンが直径 4mm の円形として 2 階調で表現されている。「再生データ」欄には、設計したホログラムの計算機再生の結果が XY-Z 平面上に示されている。光線は下から上へ進む。強度分布の形状を見ると、光軸と平行な細長い棒状になっていることが確認できる。これは、所望の光軸平行直線形状であり良い設計結果である。

ここで、この光軸平行直線形状を形成するホログラムを「長焦点深度ホログラム」と呼ぶことにする。

#### v) マルチレベル強度分布モデル

ここでは、マルチレベルの光強度値で所望の形状を一度に形成するホログラム設計を試みる。i) 節～iv) 節までに設計したモデルでは、光強度の値は 1 つであった。つまり、光強度分布があるか否か（白黒）で形状を表現していた。本事例では、この光強度の値を複数にしてモデルを表現し、一度にこれら複数の光強度値を持つ形状を形成するホログラムを設計する。

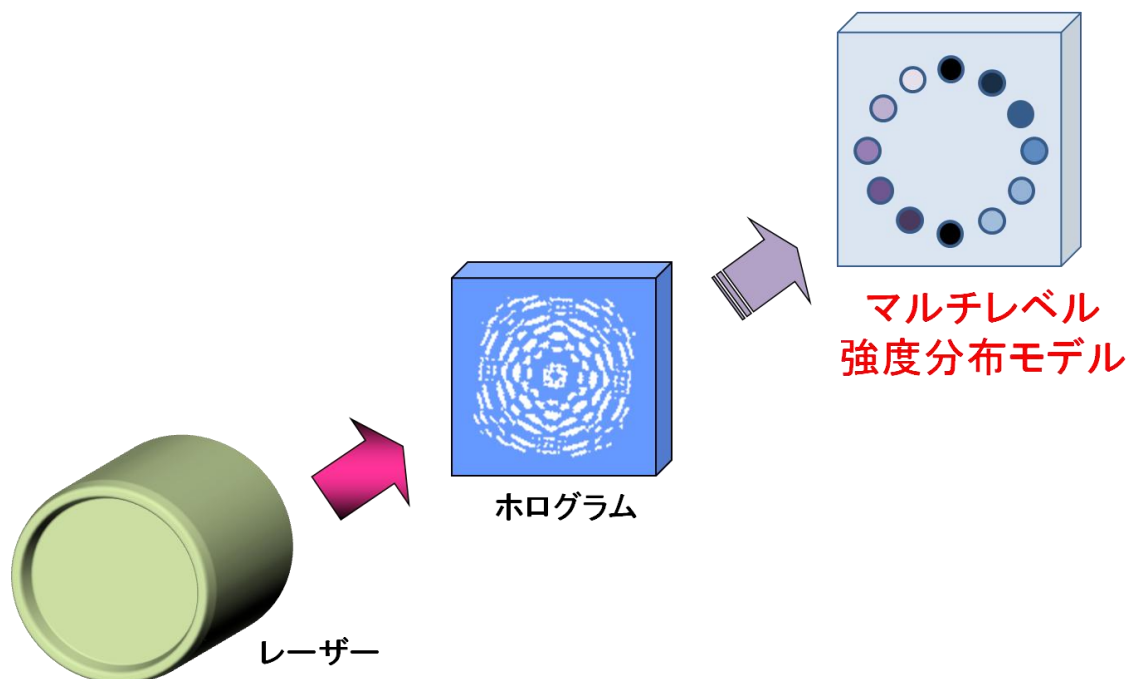


図 3-2-1-a-15. マルチレベル強度分布モデルの設計概要

図 3-2-1-a-15 は、マルチレベル強度分布モデルの設計概要である。図で示す通り、12 個のドット

を同一円周上に等間隔で配置することで、11種類の光強度値を表現する。同一円周上にドットを配置する理由は、ビームプロファイル（ガウシアン分布）の影響でなく、ホログラムパターンからの回折によって、光強度値が制御できることを確認するためである。


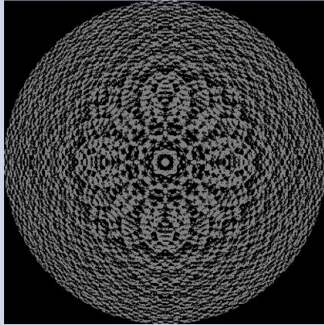
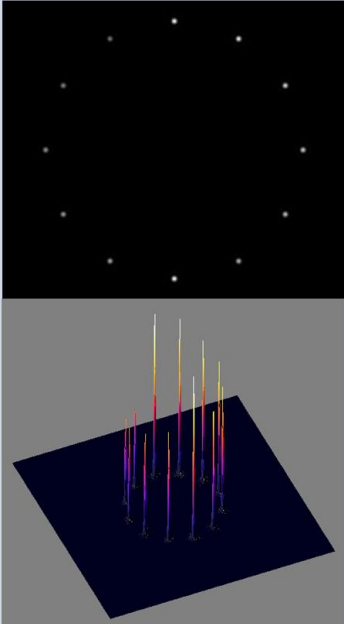
設計モデル	CGH	再生データ
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>強度階調数：11階調</li> <li>強度最小値：最大値/2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ピクセル数：400 × 400</li> <li>ピクセルサイズ：□20μm</li> <li>CGHサイズ：直径8mm</li> <li>階調数：2階調</li> </ul>	

図 3-2-1-a-16. マルチレベル強度分布モデルの設計結果

図 3-2-1-a-16 は、マルチレベル強度分布モデルの設計結果である。「設計モデル」欄には、光強度値の詳細な設定が示されている。光強度値の最大値を 100%として、その最小値を 50%に設定し、5%ずつ段階的に光強度値に変化を与えた。「CGH」欄には、設計したホログラムパターンが直径 8mm の円形として 2 階調で表現されている。「再生データ」欄は、設計したホログラムの計算機再生の結果である。上側は XY 平面（光軸と垂直平面）の再生データで 12 個のドットが確認できる。下側は光強度の値を高さとして表現した三次元プロファイルデータである。光強度値の最大値から段階的に減衰しており、最小値は、概して最大値の半分程度である。これにより、2 階調のホログラムでマルチレベルの光強度値を持つ形状を形成できることが確認できた。

### e) 光デバイスとしてのホログラム素子の応用

本プロジェクトでは、ホログラムはフェムト秒レーザー加工の高効率化を図るために導入する波面制御素子である。このための設計手法や基本設計事例は、a) 節～d) 節で述べた。しかし、我々が設計する三次元ホログラムはレーザー加工用ツール以外にも活用できると考える。そこで、本節ではホログラムが生成する光強度分布を信号処理ツールとして用いることを考慮する。ここでは、このホログラムによる情報伝達をホログラム信号処理と呼ぶこととする。このホログラム信号処理の事例として、「蛍光ガラスによるホログラム信号処理」と「イメージコンジットによるホログラム信号処理」、「段差面によるホログラム信号処理」を挙げる。

#### i) 蛍光ガラスによるホログラム信号処理

図 3-2-1-a-17 は、蛍光ガラスと UV レーザーを用いたホログラム信号処理の概要を示す。これは、200nm～400nm の紫外光を高効率で可視光に変換する蛍光ガラス[8]をターゲットにして、UV レーザーによってホログラムを波面再生することで、所望の形状を蛍光ガラス上に可視光で受信するものである。

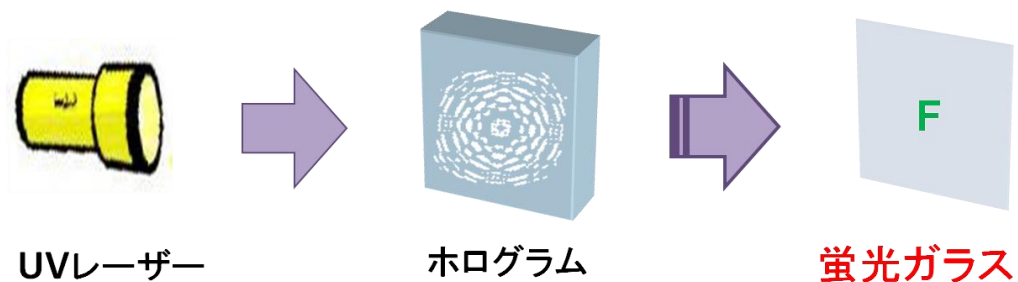


図 3-2-1-a-17. 蛍光ガラスを用いたホログラム信号処理モデル

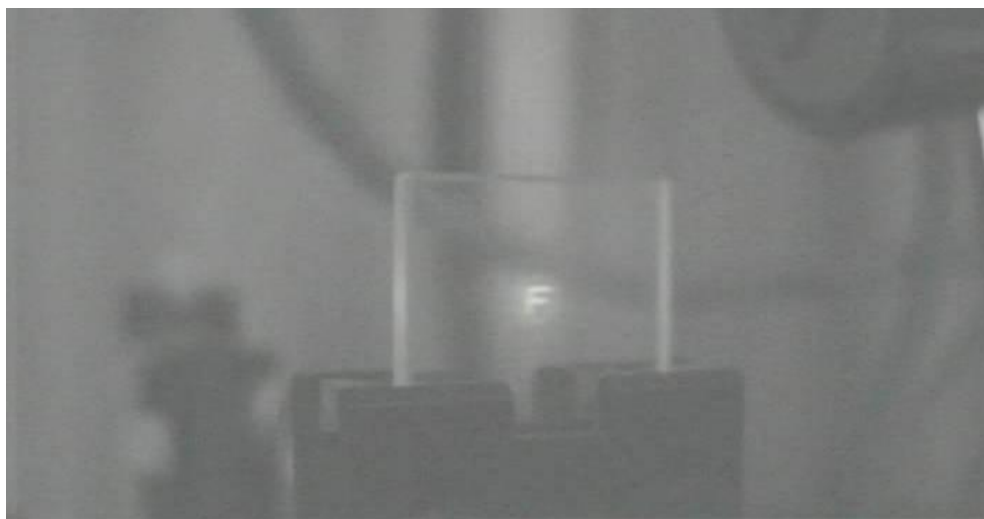


図 3-2-1-a-18. 蛍光ガラスへの「F」信号の伝達結果

図 3-2-1-a-18 は、実際に蛍光ガラスへ「F」信号を伝達した結果である。蛍光ガラスの中心部に「F」が表示されていることから、所望の信号処理の実現が確認できた。UV レーザーのスイッチを切れば、信号表示も消え、透明なガラスとして機能する。また別の応用事例として、簡易的な透明ガラススクリーンへの適用も考慮できる。

## ii) イメージコンジット (像導伝管) によるホログラム信号処理

図 3-2-1-a-19 は、イメージコンジットを用いたホログラム信号処理の概要を示す。イメージコンジットとは、細い光ファイバを数万～数百万本整列させて、熔融させたガラスブロックのことである。このイメージコンジットの端面をターゲットにして、ホログラムを波面再生することで、所望の形状を反対側の端面で受信するものである。

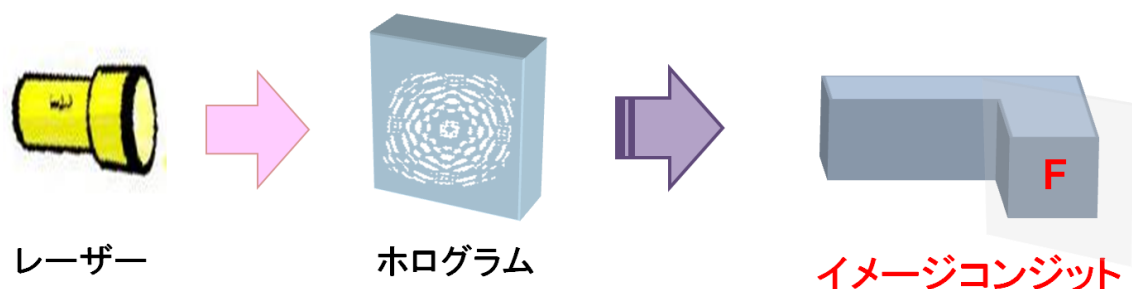


図 3-2-1-a-19. イメージコンジットを用いたホログラム信号処理モデル

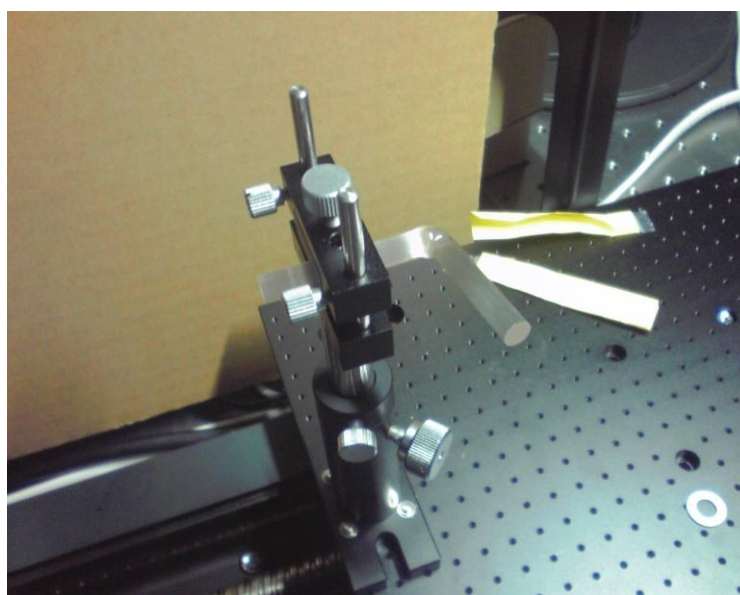


図 3-2-1-a-20. L字型イメージコンジットの実物像



図 3-2-1-a-20 は、実際に用いた L 字型のイメージコンジットの写真である。図 3-2-1-a-21 は、この L 字型イメージコンジットの端面を拡大したもので、この時、反対側の端面から「F」信号を伝達した結果である。イメージコンジットの端面中心部分に「F」が表示されていることから、所望の信号処理の実現が確認できた。イメージコンジットは光ファイバの集まりであることから、ホログラムによって、通信のための光線の分岐やスイッチ機能の実現への可能性を示した。

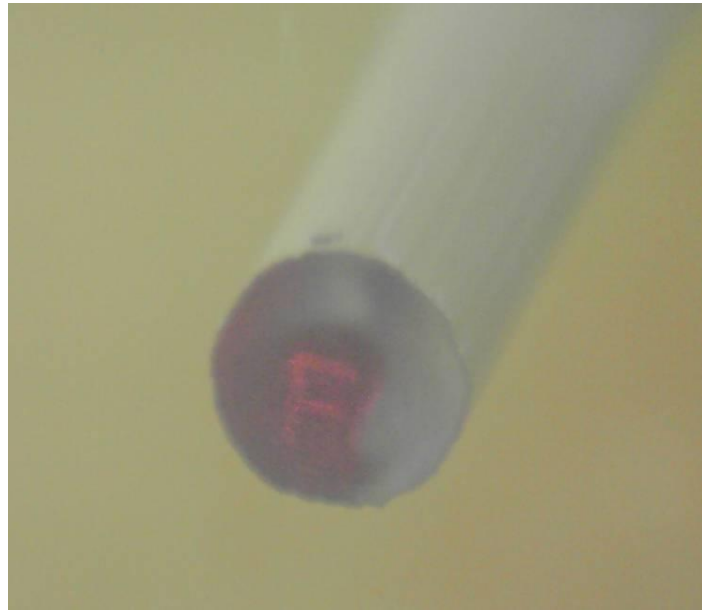


図 3-2-1-a-21. イメージコンジットへの「F」信号の伝達結果

### iii) 段差面によるホログラム信号処理

ここでは、段差のある面に対するホログラム信号処理を試みる。図 3-2-1-a-22 は、段差面を考慮した三次元ホログラムの設計概要である。ここでは、段差 10mm の 3 段平面をターゲットにする。

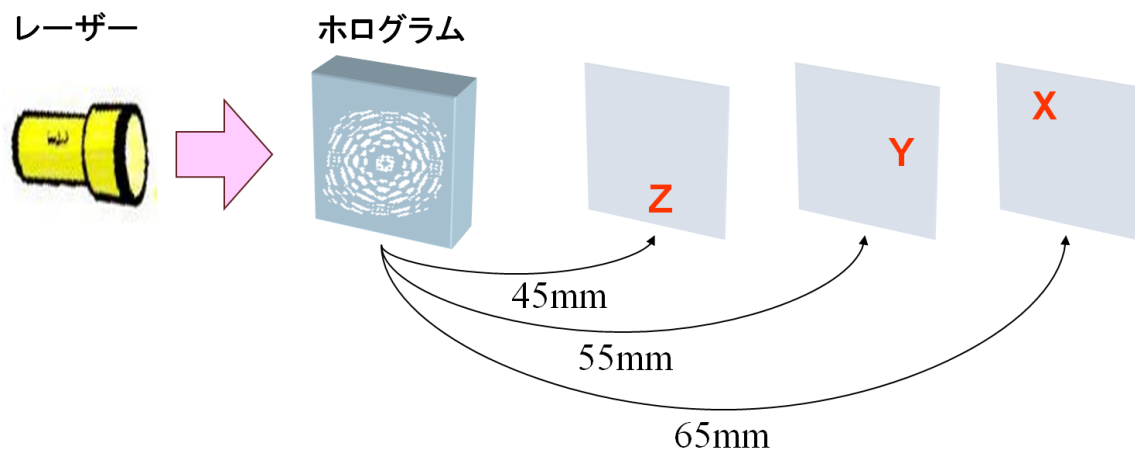


図 3-2-1-a-22. 段差面ホログラム信号処理のための三次元ホログラムの設計モデル

図 3-2-1-a-23 は、段差のある面に各々「X」「Y」「Z」信号を伝達した結果である。図 3-2-1-a-22 の設計モデルを基にしたホログラムからの波面再生により、所望の信号処理が実現したことが確認できた。

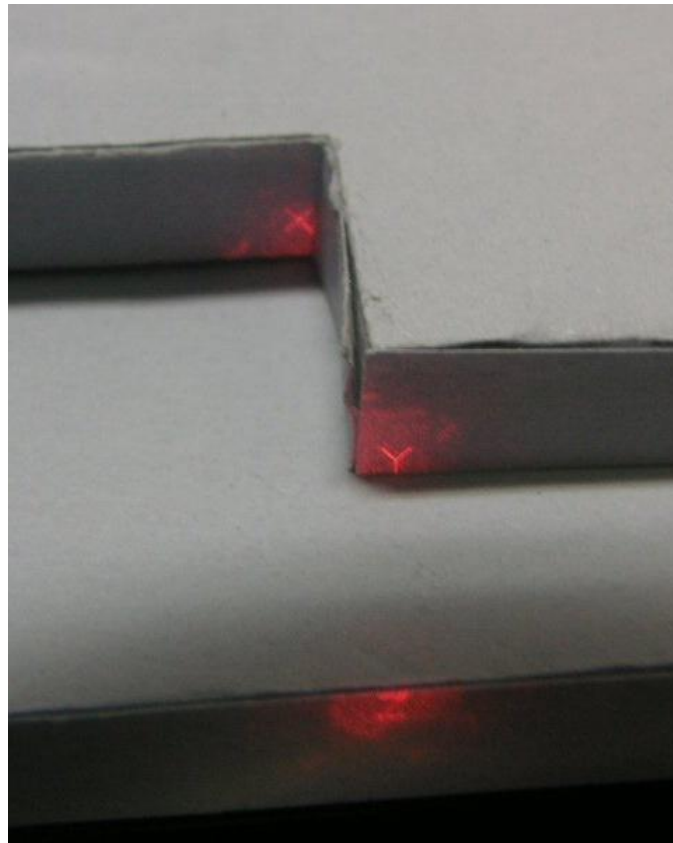


図 3-2-1-a-23. 段差面を用いた「X」「Y」「Z」信号の伝達結果

## 参考文献

- [1] M. Born and E. Wolf 著, 草川徹, 横田英嗣 訳: “光学の原理Ⅱ”, 東海大学出版会, 1975.
- [2] E. Hecht 著, 尾崎義治, 朝倉利光 訳: “ヘクト光学Ⅱ —波動光学—”, 丸善株式会社, 2003.
- [3] 物理学辞典編集委員会編: “物理学辞典改訂版[縮刷版]”, 培風館, 1992.
- [4] B. Kress and P. Meyrueis 著, 小館香椎子 監訳, 藤野誠, 駒井友紀 訳: “デジタル回折光学”, 丸善株式会社, 2005.
- [5] Bil Lewis, Daniel J. Berg 著, 岩本 信一 訳: “Pスレッドプログラミング”, ピアソン・エデュケーション, 1999.
- [6] OpenMP Architecture Review Board: “OpenMP.org”, <http://openmp.org/wp/>, 2008.
- [7] “Message Passing Interface (MPI) Forum Home Page”, <http://www.mpi-forum.org/>,
- [8] 株式会社住田ガラス ルミラス -機能性蛍光ガラス- ホームページ, <http://www.sumita-opt.co.jp/ja/products/optical/lumilass.html>

## (b) 光デバイスと光情報処理用ホログラムの設計技術

### a) はじめに

近年のインターネットや携帯電話の普及による通信需要の増大により、情報ネットワークの高速化・大容量化が求められており、光通信システムの高機能化が重要である[1-4]。また、スーパーコンピュータ等では、CPU間、CPUの内部においても高速かつ大容量のデータ通信を行う必要があり、電気配線から光配線(光インターコネクション)[5]へのシフトが始まっている。これらを構成する光デバイスの安価な大量生産方法の開発が重要となっている。

フェムト秒レーザーパルスガラス等の透明体内部に集光すると非線形光学効果による多光子吸収が起こり、集光部周辺のみで屈折率変化等の異質相が形成される。この現象を利用したガラス内部への様々なデバイスの試作が報告されており[6]、1つのプロセスで光デバイスを作製できる点がフェムト秒レーザー加工の利点である。

これらの試作では、対物レンズでフェムト秒レーザーパルスをガラス内部に集光し、ガラスを固定したステージを走査することでデバイスを作製する。このため、デバイス作製時間が長く、ステージの走行時の振動等の外乱により加工精度が制限される。また、通常はフェムト秒レーザー光源から供給されるパルスエネルギーより下げて加工を行うため、エネルギー効率が悪い。

このような問題を解決するための1つの方法がホログラムを使ったフェムト秒レーザー一括加工である。回折格子[7]や多光束干渉[8、9]等を使った加工方法もあるが、これらは加工形状に制限があり、加工の自由度はホログラムを使った場合の方が高い。文献[10]ではガラス・ホログラムを使って、非周期的に配置された多数のスポットが一括加工できることを示した。文献[11]では3次元のスポットが1つのホログラムで一括加工可能であることが示された。また、文献[12]では、LCOS-SLMを使って動的にホログラムを変えて、多数のスポットを加工する試みも行われている。

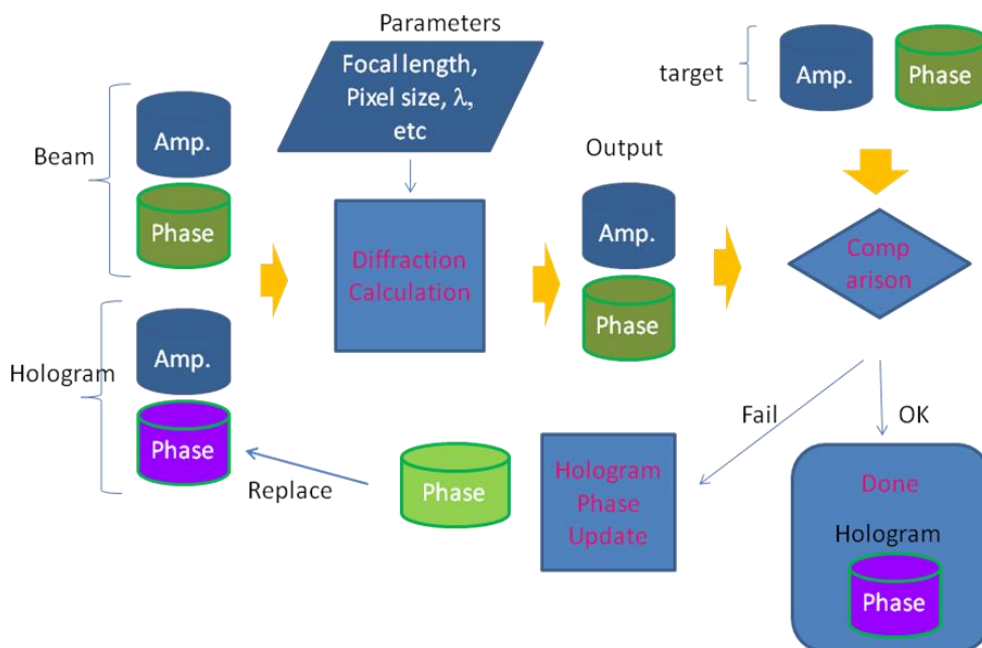
文献[10-12]では、複数のスポットを配置した構造の一括加工で、直線や曲線の一括加工の報告はされていなかった。本章では、全長約1cm程度の直線、曲線、円を、縮小光学系を用いず等倍(1:1)でガラス内部に一括加工するための位相ホログラム設計方法の検討を行った。設計したホログラムでは、直線、曲線、円を高い像質で再生することができた。また、すでに設計されたホログラムを2つ組み合わせて、複雑な強度分布を再生する方法、ホログラム合成方法について検討した。

### b) ホログラム設計方法とその具体例

ホログラムには振幅を変調する振幅型、位相を変調する位相型、両方を変調することも原理的には可能である。振幅型ホログラムは、入射波の振幅を減衰することにより、振幅を変調するためエネルギー利用効率が低くなる。フェムト秒レーザー一括加工用ホログラムとしては、入射レーザーのエネルギーをできるだけ利用することのできる位相型が適している。また、ガラス内部に集光されたフェムト秒レーザーは非線形光学効果による多光子吸収により異質相を形成する。この多光子吸収の閾値効果により、強度の高い部分のみで吸収が起こるといった特徴がある。このため、ホログラムの生成す

る再生像には高い一様性が要求される。つまり、直線導波路や曲線導波路を一括加工で作製するためには線上の強度一様性が重要である。一方、ノイズは閾値以下ならば吸収されないため、閾値以下のノイズは許容される。

計算機ホログラフィ[13-16]を基にしたさまざまな位相ホログラムの設計手法が考案されている。例えば、GS法[17]、Optimal Rotation Angle法[18]、Simulated Annealing法[19]等である。ここでは、図(2)(b)-1に示すようなアルゴリズムで位相ホログラムを計算する。とくに、線上の強度の一様性が高くなるように注意している。

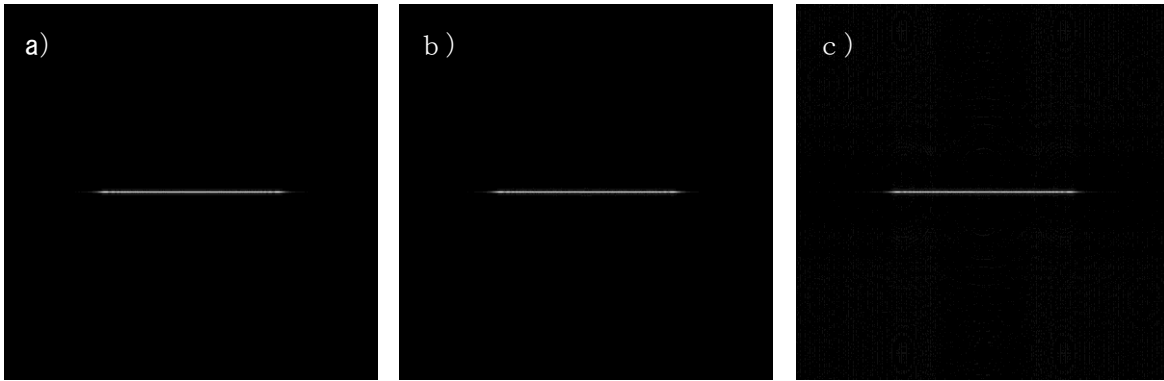


図(2)(b)-1 位相ホログラム計算概略図

以下では、直線、曲線、円を再生するホログラムの設計について述べる。なお、一括加工で使用するフェムト秒レーザーの波長が800nmであるため、ホログラムの設計、再生像の計算には断りがない限り、波長は800nmを用いる。

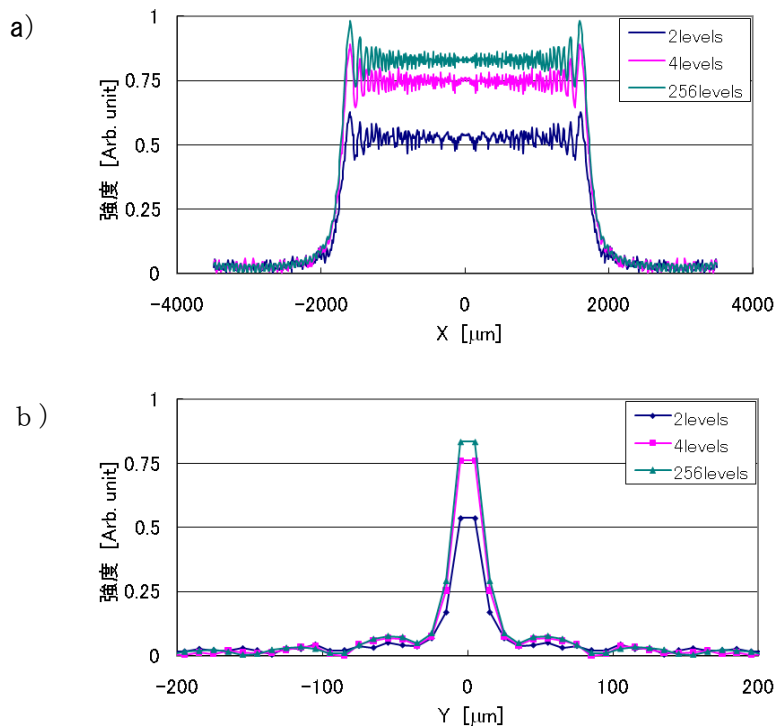
#### ・直線を生成する位相ホログラムの設計 ([20-22])

入射レーザーの強度分布はガウス分布 ( $\sigma = 3.5\text{mm}$ ) とし、直線の全長  $L = 3.5\text{mm}$ 、結像距離:  $8.5\text{cm}$ 、ピクセルサイズ:  $10\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ:  $7\text{mm} \times 7\text{mm}$  ( $700 \times 700$ ピクセル) で、位相段数 256 段、4 段、2 段の位相ホログラムを計算した。位相 256 段では十分に小さな位相ステップでの計算しているため、理想的な場合と考えることができる。フレネル近似による回折計算[13-16]を行い、これらのホログラムの再生像強度を得た(図(2)(b)-2)。図(2)(b)-3は直線上の強度プロファイルで、階調化により、強度は低くなっているが、再生された直線の強度の一様性の劣化は小さく、直線外部のノイズも小さい。また、直線の全長  $L = 11\text{mm}$ 、結像距離:  $8\text{cm}$ 、ピクセルサイズ:  $5\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ:  $12.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$  ( $2500 \times 2500$ ピクセル) のホログラム位相分布も計算できており、(2)(g)章で示されているように、フェムト秒レーザー一括加工で導波路が作製されている[26]。



図(2)(b)-2 直線を再生する位相ホログラムの計算による再生像 a) 位相 2 5 6 段 b) 位相 4 段

c) 位相 2 段



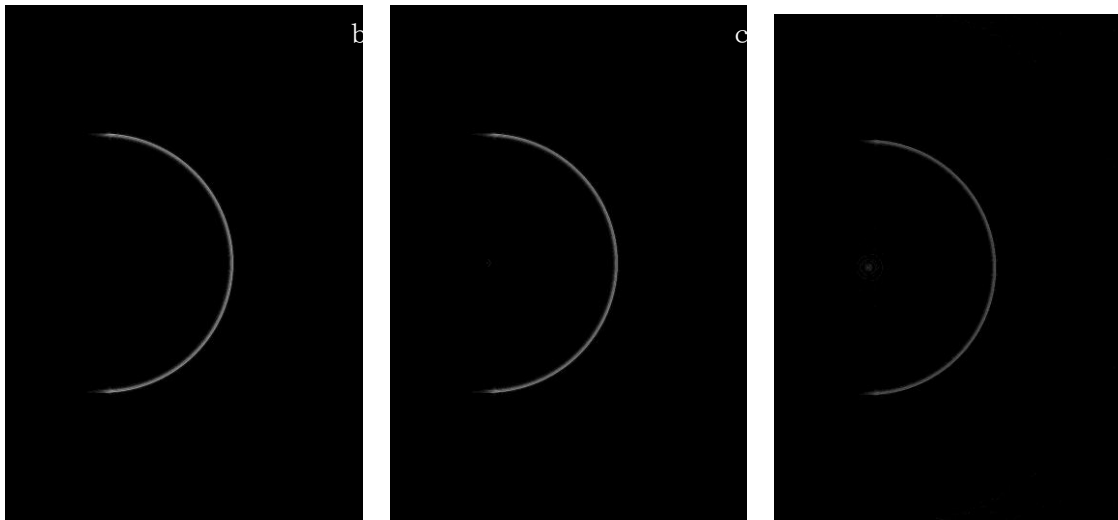
図(2)(b)-3 図(2)(b)-3の再生像強度のプロファイル a) 直線上のプロファイル b) 直線に垂直な方向のプロファイル

#### ・曲線を生成する位相ホログラムの設計 ([21])

ここでは曲線の一例として半円を生成する位相ホログラムの設計について述べる。曲線導波路では、直線導波路で問題となる伝搬損失だけでなく、曲げ損失も考慮する必要がある。曲げ損失はレーザー照射部分と母材の屈折率差 ( $\Delta n$ ) に強く依存し、ガラス種類やレーザー加工条件により異なる。これまでフェムト秒レーザーを用いた合成石英への加工で得られている結果は  $\Delta n \approx 0.01$  程度[23]であり、曲線導波路の曲げ損失を抑えるためには半径は数mm程度必要となる[4、24]。したがって、半径が数mmの半円を一括加工することがホログラムには要求される。

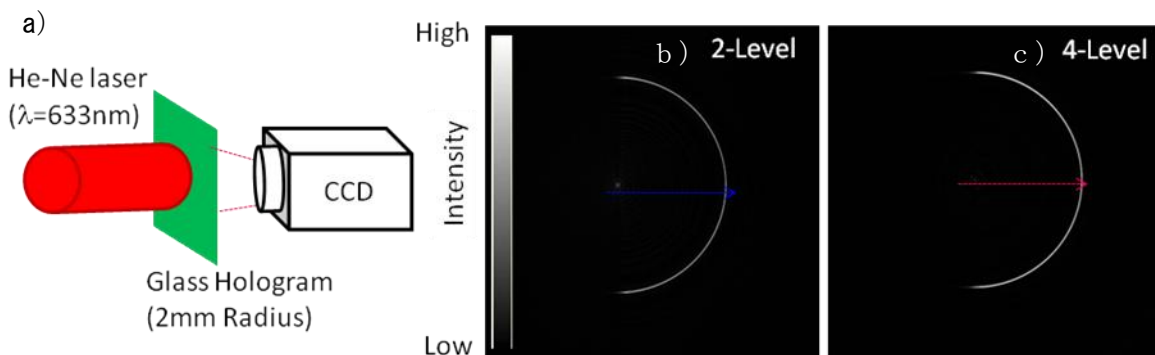
半径 2 mm (弧長 6.28mm)、ピクセルサイズ: 5  $\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ: 8mm  $\times$  8mm (1600 ピク

セル×1600 ピクセル)、結像距離：5 cm として、位相段数 256 段、4 段、2 段の場合の位相ホログラムを計算した。これらの設計結像距離での再生像をフレネル近似での伝搬計算により計算し、図(2)(b)-4に示した。図(2)(b)-4 a)の位相 256 段での再生像では設計通り半円強度が生成されている。しかし、位相 4 段と位相 2 段での再生像の場合は、半円の中心付近にスポット状に強度の高いノイズが存在する。これは、再生像の半径にも依存して、半径が大きいほどノイズが高くなる傾向がある。



図(2)(b)-4 半円を再生する位相ホログラムの計算による再生像 a) 位相 256 段 b) 位相 4 段 c) 位相 2 段

位相 4 段と位相 2 段のホログラムを作製し、He-Ne レーザー (波長：633nm) を照射し、再生像を観察した (図(2)(b)-5 a))。図(2)(b)-5 b) と図(2)(b)-5 c) は He-Ne レーザーでの再生像である。図(2)(b)-6 に強度プロファイルを示した。計算上の再生像と同様に、半円の中心にスポットノイズがあるが、位相 2 段に比べて位相 4 段の場合の方が低い。このように半円強度を再生するホログラムでは、中心付近にノイズが現れるため、このノイズが問題となる場合は位相 4 段以上でホログラムを設計する必要がある。



図(2)(b)-5 He-Ne レーザーでの半円再生像の観察 a) 観察系概略図 b) 位相 2 段の場合の再生像強度 c) 位相 4 段の場合の再生像強度

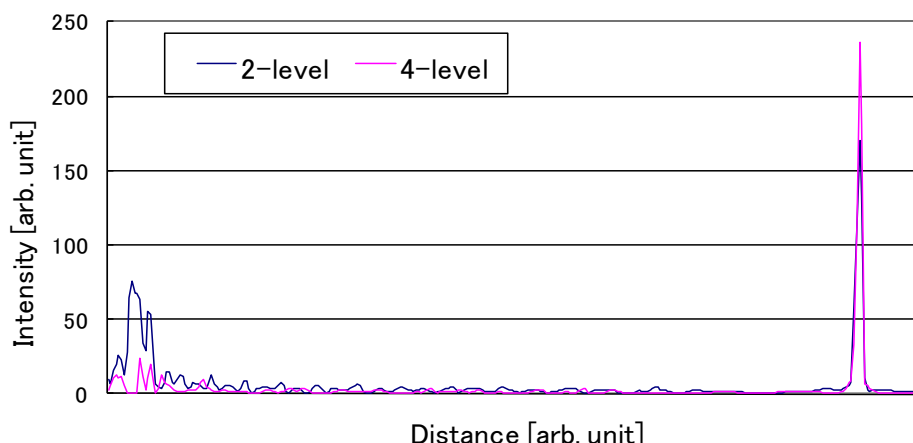


図 (2) (b) - 6 図 (2) (b) - 5 b) と c) の強度分布の He-Ne レーザーでの再生像強度のプロファイル

### ・円を生成する位相ホログラムの設計

閉曲線は光デバイス中では共振器等に利用される。閉曲線として円を生成するホログラムを設計する。導波路として機能させるためには、曲げ損失を考慮すると  $\Delta n \approx 0.01$  では半径数mmの円を一括加工する必要がある。ここでは、半径 1 mm (周長 6.28 mm)、ピクセルサイズ: 10  $\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ: 8 mm  $\times$  8 mm (800 ピクセル  $\times$  800 ピクセル)、結像距離: 10 cm として、位相段数 256 段、4 段、2 段の位相ホログラムを計算した。これらのホログラムによる設計結像距離での再生像をフレネル近似により計算した。結果を図 (2) (b) - 7 に示した。半円の場合と同様に円の中心部分にノイズが現れており、位相 2 段の方が位相 4 段に比べてより強く現れている。また、円の半径が大きくなるほど、ノイズが強くなる傾向がある。半円の場合と同様に、このノイズが問題となる場合は、位相 4 段以上で設計する必要がある。

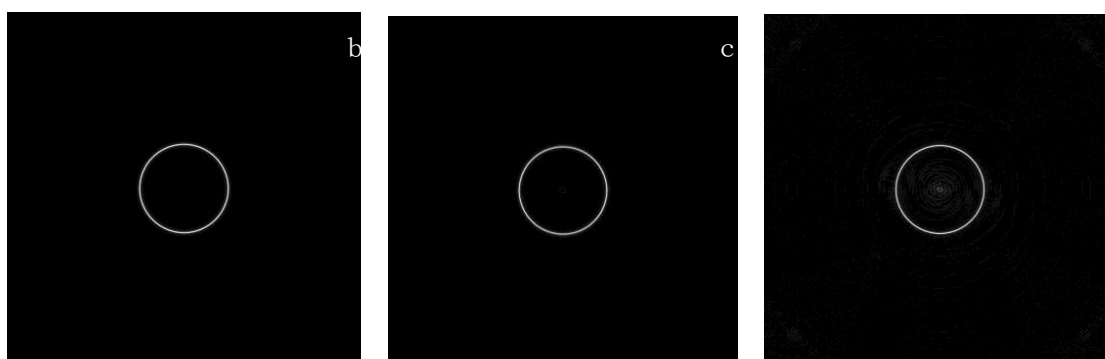


図 (2) (b) - 7 円を再生する位相ホログラムの計算による再生像 a) 位相 256 段 b) 位相 4 段 c) 位相 2 段

### c) ホログラム合成方法とその具体例

b) 節で示したように、直線、半円、円等を高い像質で再生する位相ホログラムの設計できることが分かった。これらのホログラムを合成することにより、複雑なデバイス形状を 1 つの位相ホログラムで生成することができるかを検証する。一般に個々に設計されたホログラムを合成しても、単純に個々の再生像の合成像にはならない。ホログラムの合成による再生像質の劣化が予想されるが、再度



ホログラムの設計を行う場合と比較して、大幅に計算時間を短縮できる。

#### ・ホログラムの合成

合成後の位相ホログラム  $\varphi(x, y)$  とすると、

$$\omega(x, y) = \sum_i A_i(x, y) \exp[i\phi_i(x, y) + i\Delta_i(x, y)] \quad (\text{式 (2) (b) - 1})$$

$$\varphi(x, y) = \arg[\omega(x, y)] \quad (\text{式 (2) (b) - 2})$$

のように計算できる。ここで、 $\phi_i(x, y)$  はすでに求められているホログラムの位相、 $A_i(x, y)$  は任意の実数係数、 $\Delta_i(x, y)$  は位相に対するオフセットとする。単純な合成では  $A_i(x, y) = 1$ 、 $\Delta_i(x, y) = 0$  であるが、合成ホログラム  $\varphi(x, y)$  の生成する再生像質が向上するように  $A_i(x, y)$  と  $\Delta_i(x, y)$  を選ぶことも可能である。 $A_i$  と  $\Delta_i$  を位置の関数として最適値を探すには多くの計算を必要として現実的でないため、 $A_i$  と  $\Delta_i$  は場所に依存しないものとして扱う。以下では、 $A_i$  を依存しない係数、 $\Delta_i = 0$  としてホログラムの合成を行う。

#### ・直線ホログラムと半円ホログラムの合成

直線と半円をそれぞれ再生する位相ホログラムの合成を行う。この合成ホログラムの再生像をガラス内部へ一括加工することにより方向性結合器としての利用が考えられる。ピクセルサイズ：10  $\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ：8 mm  $\times$  8 mm (800ピクセル  $\times$  800ピクセル)、結像距離：12 cmで設計した直線の全長は6 mmの位相ホログラムと半径2 mm (弧長6.28 mm) の位相ホログラムを合成した。直線と半円の強度が等しくなるように、(式 (2) (b) - 1) の  $A_{\text{直線}}$  と  $A_{\text{半円}}$  を決めた。直線と半円との最近接距離を20  $\mu\text{m}$  とした。合成ホログラムの再生像をフレネル近似で計算した。図 (2) (b) - 8に示すように、直線と半円はどちらも途切れることなく、ほぼ等しい強度比で再生されている。ノイズも全体には低いが、直線と半円の近接した付近や直線と半円の上に連続したノイズが存在する。これらのノイズがどのように一括加工したデバイスの性能に影響するか注意する必要がある。この合成ホログラムをガラス・ホログラムとして作製した。作製したホログラムに He-Ne レーザーを照射し CCD で観察した。この再生像を図 (2) (b) - 9に示した。直線、半円ともに良好に再生できており、ノイズレベルも十分に低い。

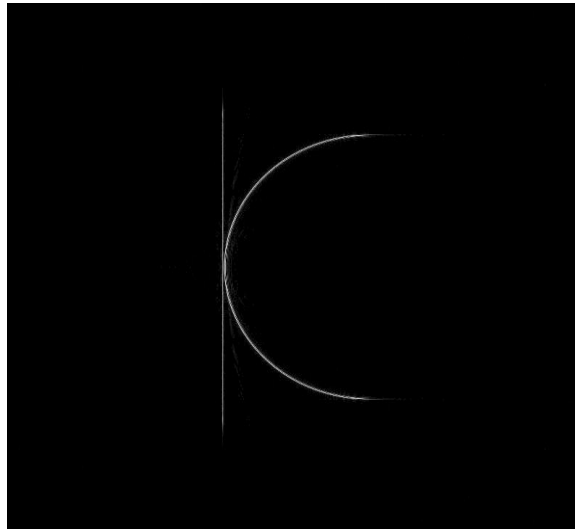


図 (2) (b) - 8 直線と曲線を同時に再生する位相 4 段ホログラムの計算による再生像



図 (2) (b) - 9 作製した位相 4 段ホログラムの He-Ne レーザーによる再生像

#### ・半円ホログラムと半円ホログラムの合成

次に半径 3 mm の半円と半径 2 mm の半円を生成するホログラムの合成を行う。ホログラムのピクセルサイズ：10  $\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ：8 mm  $\times$  8 mm (800 ピクセル  $\times$  800 ピクセル)、結像距離：11 cm として位相 4 段ホログラムを設計した。個々のホログラムでの再生像強度を計算し、合成後のホログラムの強度比が等しくなるように係数  $A_{\text{半径}3\text{mm}}$  と  $A_{\text{半径}2\text{mm}}$  を決めた。この合成ホログラムの計算による再生像を図 (2) (b) - 10 に示した。半径 2 mm の半円と半径 3 mm の半円が同時に再生されている。強度は弱い、2 つの半円の間にはノイズによるパターンも存在しており、これらの一括加工への影響には注意する必要がある。

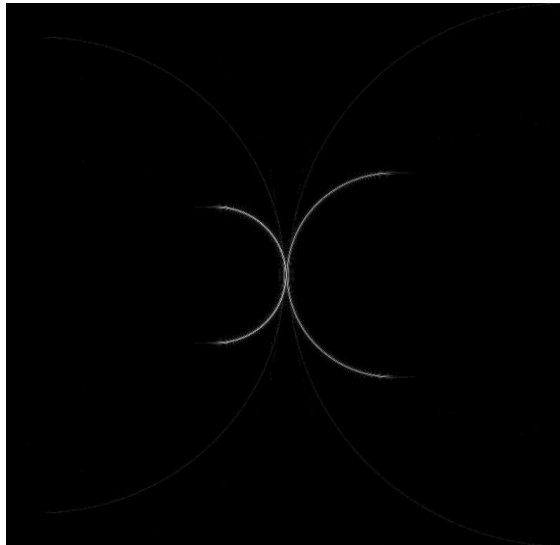


図 (2) (b) - 10 異なる半円を同時に再生する位相 4 段ホログラムの計算による再生像

・直線ホログラムと円ホログラムの合成

直線（全長 6.6 mm）と円（半径 1 mm、全長 6.28 mm）を再生する合成ホログラムを計算した。ホログラムピクセルサイズ：10  $\mu$ m、ホログラムサイズ 8 mm  $\times$  8 mm（800 ピクセル  $\times$  800 ピクセル）、位相 4 段、結像距離：11 cmとした。それぞれのホログラムから強度比が等しくなるように係数  $A_{\text{直線}}$  と  $A_{\text{円}}$  を決めた。図 (2) (b) - 11 は計算で得られた合成ホログラムの再生像である。円と直線の最近接部付近ではノイズが存在するが、円と直線は概ね良好に再生されている。同様に直行する直線 2 本と円を同時に再生する位相 4 段ホログラムを設計し、再生像の計算を行った（図 (2) (b) - 12）。設計通り、直行する 2 本の直線と円が再生できている。

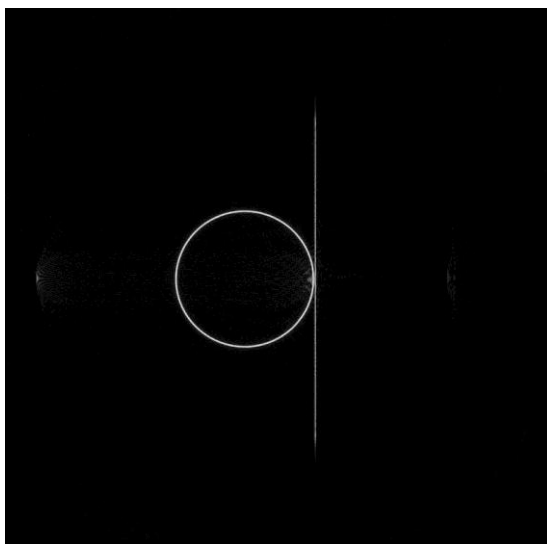


図 (2) (b) - 11 直線と円を同時に再生する位相 4 段ホログラムの計算による再生像

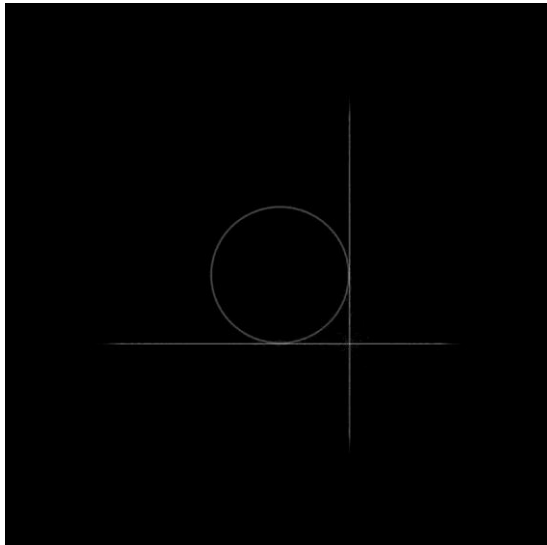


図 (2) (b) - 1 2 直線 2 本と円を同時に再生する位相 4 段ホログラムの計算による再生像

#### d) まとめ

ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工により直線導波路、半円（曲線）導波路、円導波路を作製するための位相ホログラムの設計方法の検討し、計算機ホログラフィを基にしてこれらの位相ホログラムを計算した。位相ホログラムの計算による再生では、直線、半円、円を低ノイズで、高い強度一様性で再生できることを確認した。半円や円では、階調化により中心付近にスポット状ノイズが生じるため、これが問題ある場合には位相 4 段以上でホログラムを設計する必要がある。

個々には高い再生像質の位相ホログラムが設計可能となったので、これらを合成してより複雑な再生像を生成するための合成ホログラムの検討を行った。これは 2 本の導波路からなる光デバイス（結合器、共振器、分波器、合波器等）を一括加工で作製するためのホログラムを設計することに相当している。また、このようにホログラムを合成することで、再度設計する場合に比べて、計算時間を大幅に短縮できる。本章では、直線ホログラムと半円ホログラムの合成、異なる半径の半円ホログラムの合成、直線ホログラムと円ホログラムの合成について検討を行った。直線ホログラムと半円ホログラムを合成する場合、この合成ホログラムの再生像では、直線と半円が良好に再生されている。強度は低いがノイズも現れており、このノイズによる一括加工への影響には注意する必要がある。また、実際のデバイスの性能は導波路間の結合長に依存し、これは導波路間の最近接距離で制御可能である。合成ホログラムの場合は、導波路間の距離を考慮して、ピクセルサイズ等のパラメータを設定する必要がある。ホログラムの合成方法については、さらに検討が必要な部分もある。

本章で設計したホログラムは、(2) (c) 章のガラス・ホログラム作製プロセスにより実際にガラス・ホログラムとして作製し、ガラス内部へのフェムト秒レーザー一括加工を行った。結果は (2) (f) 章に示されている。

## 参考文献

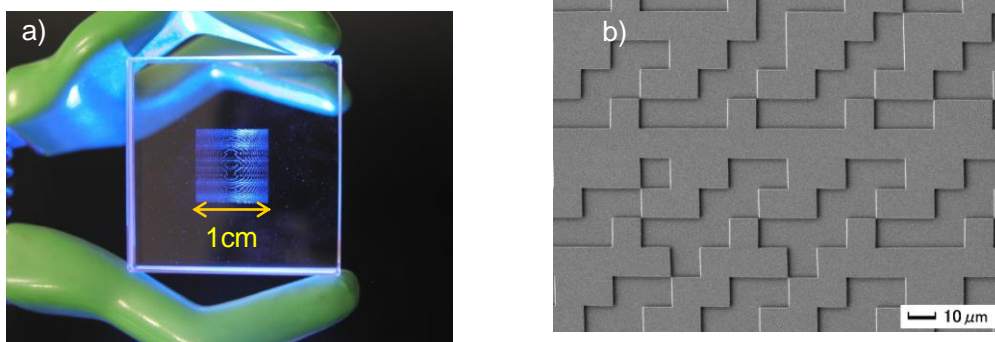
- 1) 三木哲也、須藤昭一、“光通信技術ハンドブック”、オプトロニクス社、2001年
- 2) オプトロニクス社編、“光通信技術の最新資料集 V”、オプトロニクス社、2002年
- 3) 電子ジャーナル社編、“2004 オプトデバイス技術大全”、電子ジャーナル社、2004年
- 4) 末松安晴、小林功郎、“フォトンクス 光エレクトロニクスとその進展”、オーム社、2007年
- 5) 三上修、(社)エレクトロニクス実装学会 光回路技術実装技術委員会(監修)、“光配線実装技術ハンドブック”、オプトロニクス社、2008年
- 6) R. R. Gattass, E. Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materials”, Nature Photonics 2, 219 (2008)
- 7) J. Amako, K. Nagasaka, and K. Nishida “Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of a pair of diffractive optical elements”, Opt. Lett. 27, 969 (2002)
- 8) T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, and, H. Misawa, “Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals”, Opt. Lett. 79, 725 (2001)
- 9) K. Kawamura, et. al., “Femtosecond-laser-encoded distributed-feedback color center laser in lithium fluoride single crystals”, App. Phys. Lett. 84, 311 (2004)
- 10) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, S. Tanaka, K. Hirao, “Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical element”, Opt. Express 12, 1908 (2004)
- 11) S. Hasegawa, Y. Hayasaki, and N. Nishida, “Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses”, Opt. Lett. Vol.31, 1705 (2006)
- 12) Y. Hayasaki, T. Sugimoto, and N. Nishida, “Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator”, Appl. Phys. Lett. 87, 031101 (2005)
- 13) 辻内順平、「ホログラフィー」、裳華房、1997年
- 14) (社)応用物理学会、日本光学会 光設計研究グループ 監修、「回折光学素子入門」、オプトロニクス社、2006年
- 15) B. Kress and P. Meyrueis, “Digital Diffractive Optics “, JOHN WILEY & SONS, New York, 2000
- 17) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures”, Optik 35, 237 (1972)
- 18) J. Bengtsson, “Kinoform design with an optimal-rotation-angle method”, Appl. Opt. 33, 6879 (1994)
- 19) M. S. Kim, M. R. Feldman, and C.C. Guest, “Optimum encoding of binary phase-only filters with a simulated annealing algorithm”, Opt. Lett. 14, 545 (1989)

- 2 0 ) J. Suzuki, M. Yamaji and S. Tanaka, “Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram” , Proc. SPIE 7201, 72011C (2009)
- 2 1 ) J. Suzuki, Y. Arima, M. Yamaji, H. Kawashima and S. Tanaka, “Curved-waveguide fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram” , Proc. SPIE 7589, 75890T (2010)
- 2 2 ) J. Suzuki, Y. Arima, and S. Tanaka, “Optical device fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram” , Proc. SPIE 7925, 79251D (2011)
- 2 3 ) T. Hashimoto and S. Tanaka, “Large negative refractive index modification induced by irradiation of femtosecond laser inside optical glasses” , App. Surf. Sci. 257, 5429 (2011)
- 2 4 ) 岡本勝就、「光導波路の基礎」、コロナ社、1992年

### (c) ガラス・ホログラム作製技術（基盤技術）

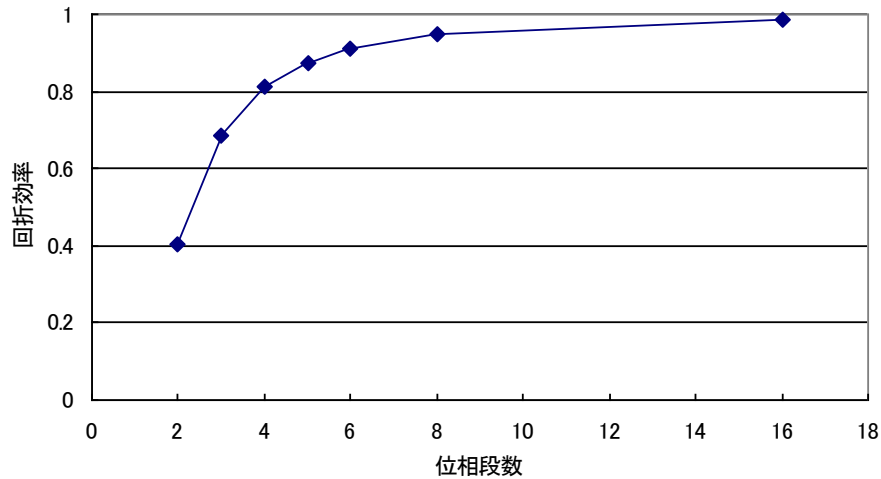
#### a) はじめに

ガラス・ホログラムは計算機ホログラフィ（Computer-Generated Holography：CGH）によって得られた位相分布をガラス表面に階段構造として作製した光学素子である[1-3]。この階段構造によりフェムト秒レーザーの波面が変調され、設計強度分布へと変換される。通常、CGH で得られた位相分布は「ピクセル」と呼ばれる小領域ごとに計算され、0から $2\pi$ の値を持っている。ガラス・ホログラムの基板として合成石英を使用する。合成石英はフェムト秒レーザーの波長 800nm に対しての透過率が高いため、フェムト秒レーザー耐性に優れている。したがって、高いエネルギーのフェムト秒レーザーパルスを照射できるため、大面積（体積）の加工が可能となる。このように、ガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工はデバイス生産に適している。

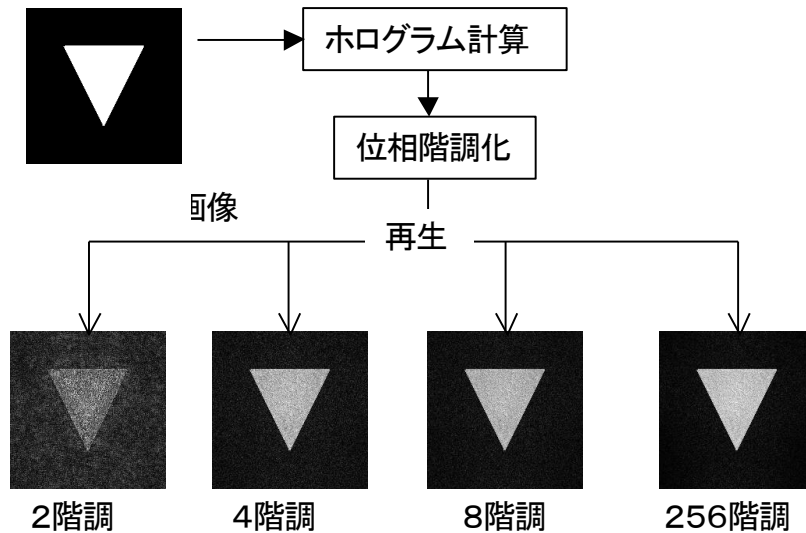


図（2）（c）-1 a)ガラス・ホログラム全体図（中心付近の1cm口に段差構造が形成されている） b)ホログラムパターンの拡大図（SEMで観察）

ガラス・ホログラム作製において重要なパラメータは、ホログラム位相段数、ピクセルサイズ、ピクセル数等で、これらは、ガラス・ホログラムの性能にも影響を与える。ホログラム位相段数が増えるに従って回折効率が向上し[1-5]、加工効率が向上する（図（2）（c）-2）。同時に、ホログラムの再生する像質も向上する（図（2）（c）-3）。ピクセルサイズを微細化することで、回折限界による上限はあるものの解像度が向上する[1-3]。ピクセル数を増加することで、ホログラムの有効面積が増加し、入射フェムト秒レーザーのエネルギーを有効に利用することが可能となる。しかし、これらはガラス・ホログラム作製時間の長期化や作製難度が高くなるというデメリットを引き起こす。したがって、これらのパラメータは目的によって適切に選ぶ必要がある。位相4段では、図（2）（c）-2から回折効率約80%、図（2）（c）-3から再生像質の劣化も小さい。位相ホログラムを設計するCGHでは、スカラー波回折理論[1-3、5]を基にしていることから、フェムト秒レーザー波長以下の回折計算には適していない。したがって、ホログラムのピクセルサイズとしては、レーザー波長程度が目安となる。



図(2)(c) - 2 位相段数と回折効率 (文献[2-5])



図(2)(c) - 3 位相段数と各段数のホログラムによる再生像の関係 (一例)

プロジェクト開始時においては、ホログラム設計方法の確立とフェムト秒レーザー一括加工の基礎データ取得が最優先課題であり、様々な位相分布のガラス・ホログラムを短期間で作製することが必須であった。また、「一括加工によるデバイス生産では、設計したホログラムを作製し、それを使ってデバイスの試作を行い、問題点をホログラムの設計にフィードバックし、再度ホログラム設計・作製、デバイス試作・・・」というプロセスを短期間に行う必要がある。そこで、短期間でのガラス・ホログラム作製に重点を置いて、ガラス・ホログラム作製プロセスの構築を行った。ここでは、位相段数4段、ピクセルサイズ10 $\mu$ m、ホログラムサイズ5mm $\times$ 5mmのパラメータでガラス・ホログラム作製することにした。次に構築した作製プロセスの問題点を調査し、作製プロセスの改良を行った。このガラス・ホログラム作製プロセス改良により、本プロジェクトでの目標である「ガラス・ホログラム作製精度として $\pm 40$ nm以下」を達成した。さらに、様々なホログラムを作製することで明らかになった、帯電や長時間描画時の位置精度の劣化等の問題を対策することで、位相段数8段、ピクセルサイズ1 $\mu$ m(～レーザー波長)、ホログラムサイズは10mm $\times$ 10mm以上のようなパラメータでのガラス・ホログラムを試作が可能となった。



## b) ガラス・ホログラム作製プロセスの構築

ガラス・ホログラムの段差構造では、段の幅は数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ 、段の深さは数百 nm のオーダーである。この構造を精度よく形成するため、ガラス・ホログラム作製には電子線（EB）リソグラフィとリアクティブイオンエッチング（RIE）を用いることとした。これらは、長年にわたり半導体製造に利用され、高精度で nm オーダーの微細構造を作製可能にしている[6、7]。本プロジェクトで使用したEB描画装置[8]と RIE 装置[9]は主に実験室での開発用途に使用される装置である。EB 描画装置[8]は加速電圧 30 kV の点描画方式で、1 スポットは約 30nm である。このため、100nm 以下の微細パターンの描画も可能であるが、多数のスポットを重ねてパターンを形成するため、大面積パターンでは描画時間が長くなるという欠点がある。また、RIE 装置[9]はドライプロセスで、高アスペクト比での加工が可能で、加工の自由度が高いという特徴がある。しかし、低圧で高密度プラズマを発生させることができず、エッチング条件には制限がある。

図（2）（c）－4にガラス・ホログラム作製プロセスの概略図を示す。ガラス・ホログラム作製はガラス（合成石英）基板の上に金属膜を成膜し、さらにEB描画用レジストを塗布した三層基板を用いる。ホログラム位相パターンをこの基板の上にEB描画する。ここで用いたEB描画レジスト（日本Z EON、ZEP520A）はポジ型で、EB照射部分が現像後に除去される。未照射部分のレジストをマスクとして金属膜をエッチングすることにより金属膜を除去する。レジストを剥離して、金属膜をマスクとしてガラスをエッチングし、ガラス基板表面に段差構造が形成される。多段ホログラムの場合は、再度基板にレジストを塗布して、EB描画、各エッチングを行う。最後に金属膜を剥離し、ガラス・ホログラムが完成する。各工程終了後に、光学顕微鏡で目視にてチェックを行い、早期に問題点を見つけ出すようにしている。最後に作製したガラス・ホログラムは走査型電子顕微鏡（SEM）[10]で作製した段差構造の観察や測定を行い、ガラス・ホログラム作製精度の確認を行っている。

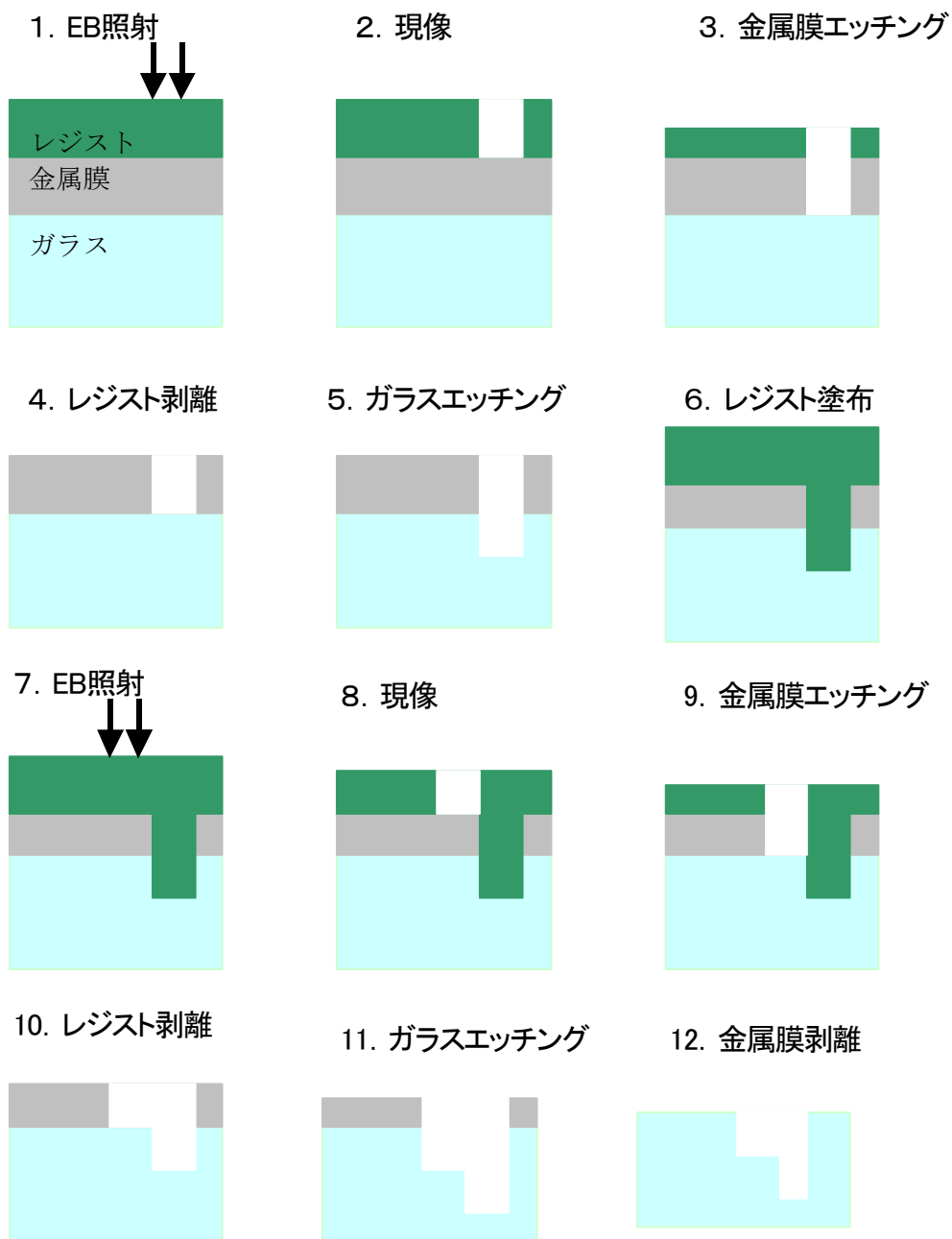
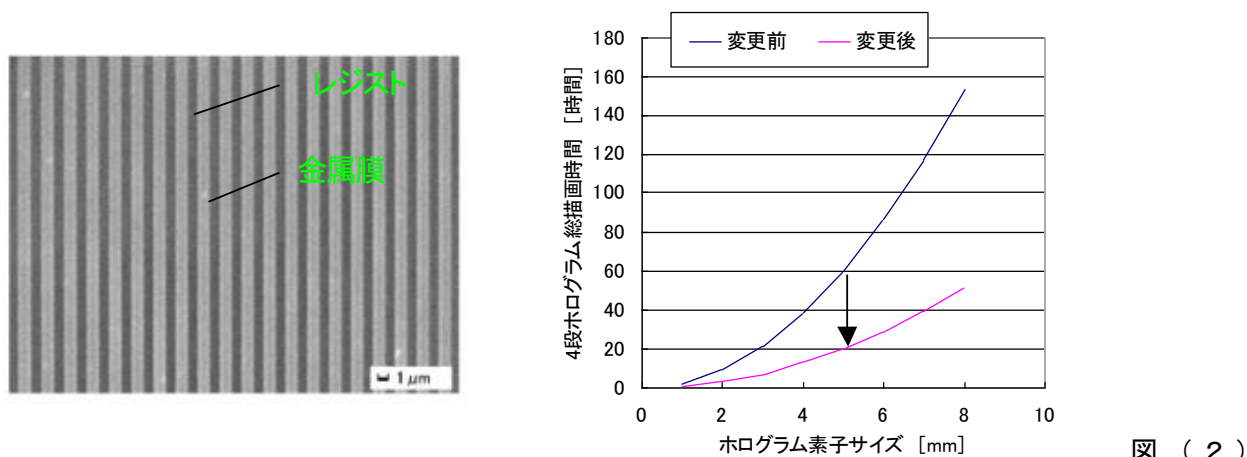


図 ( 2 )

(c) - 4 多段ガラス・ホログラム作製プロセス (さらに多段のホログラムを作製する場合は、工程 11. の後、再度工程 6 ~ 11 を繰り返す)

図 ( 2 ) (c) - 4 に示したガラス・ホログラム作製プロセスにおいて、EB 描画時間はホログラム位相分布 (ホログラム面積やピクセルサイズ) に依存して数時間から数日かかる。その他の工程は十分程度である。したがって、ガラス・ホログラムの作製期間を短縮するためには、EB 描画時間の短縮することが最も効果的である。点描画方式の EB 描画装置では、描画時間は 1 点の照射時間と描画面積で決まる [6 - 8]。通常 EB 描画ではサブ  $\mu\text{m}$  のパターンを解像するための描画・現像条件が用いられる。この条件では 1 点の照射時間が長いため、描画時間は長くなる傾向がある。ホログラム位相分布の設計ではスカラー波回折理論 [1 - 3, 5] を基にしていることから、フェムト秒レーザー波長以下の回折計算には適していない。そこで、ガラス・ホログラムのピクセルサイズとしてはフェムト秒レーザー波長程度 ( $1\mu\text{m}$  程度) のパターンが解像すればよい。したがって、 $1\mu\text{m}$  線幅のパター

ンが解像するように、描画・現像条件を調整した。図(2)(c)-5 a)に示したように、1 $\mu$ m幅のパターンが解像している。このEB描画・現像条件を用いることで、EB描画時間はピクセルサイズ10 $\mu$ m、ホログラムサイズ5mm $\times$ 5mm(500ピクセル $\times$ 500ピクセル)のホログラムパターンの描画で約35%に短縮できた(図(2)(c)-5 b)参照)。



(c)-5 (a) 設計線幅 1 $\mu$ mの現像後のレジストパターン (b) ホログラム素子サイズに対するEB描画時間

一般に多段ホログラムは、2<sup>N</sup>段のホログラムをN回描画・プロセスによる作製方法が用いられる[2, 3]。例えば、4段ホログラムでは、1回目の描画で、1段目と2段目、2回目の描画で3段目と1段目の描画を行う。ここでは最深段の1段目は2回描画され、総描画時間はこの分だけ長くなる。そこで、最深段から1段ずつを描画する方法(N段をN-1回描画で作製する方法)を採用した。例えば、4段ホログラムでは3回描画を行うが、約25%の描画時間が短縮可能となる。さらに多段の場合は、さらに短縮されることになる。

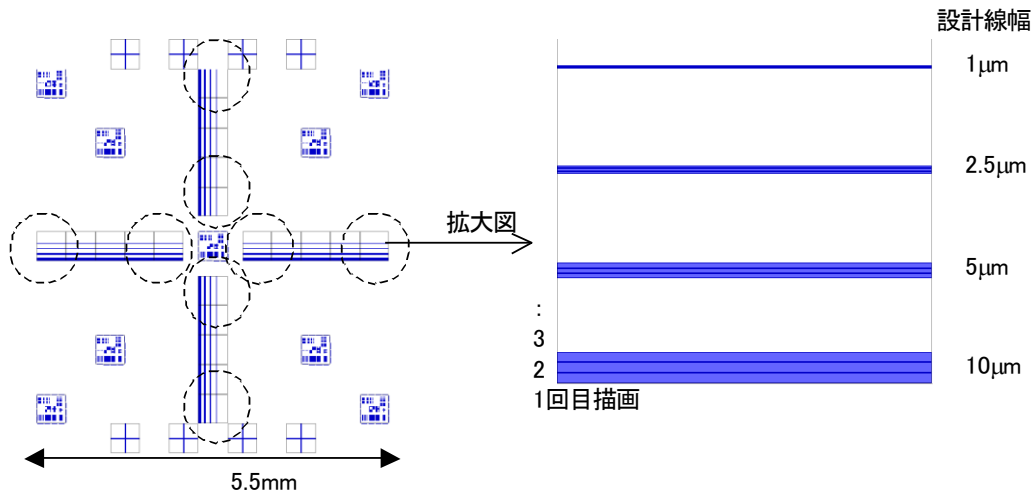
金属膜エッチングとガラスエッチングはRIE装置で行った。金属膜エッチングとガラスエッチングでは、選択比、エッチング壁面の形状、垂直性、ラフネスを考慮して、それぞれエッチング条件を決めた。表(2)(c)-1に金属膜エッチング、レジスト剥離、ガラスエッチング、金属膜剥離の各条件を示した。

表(2)(c)-1 金属膜エッチング、レジスト剥離、ガラスエッチング、金属膜剥離の各条件

	ガス	RF パワー [W]	試料室内圧力 [pa]	エッチング時間 [s]
金属膜エッチング	SF6 (9sccm) CHF3 (3sccm)	10	2	600
レジスト剥離	O2 (120sccm)	40	10	600
ガラスエッチング	CHF3 (6sccm)	250	10	段数依存 2段では 600 4段では 225
金属膜剥離	SF6 (9sccm) CHF3 (3sccm)	40	2	360

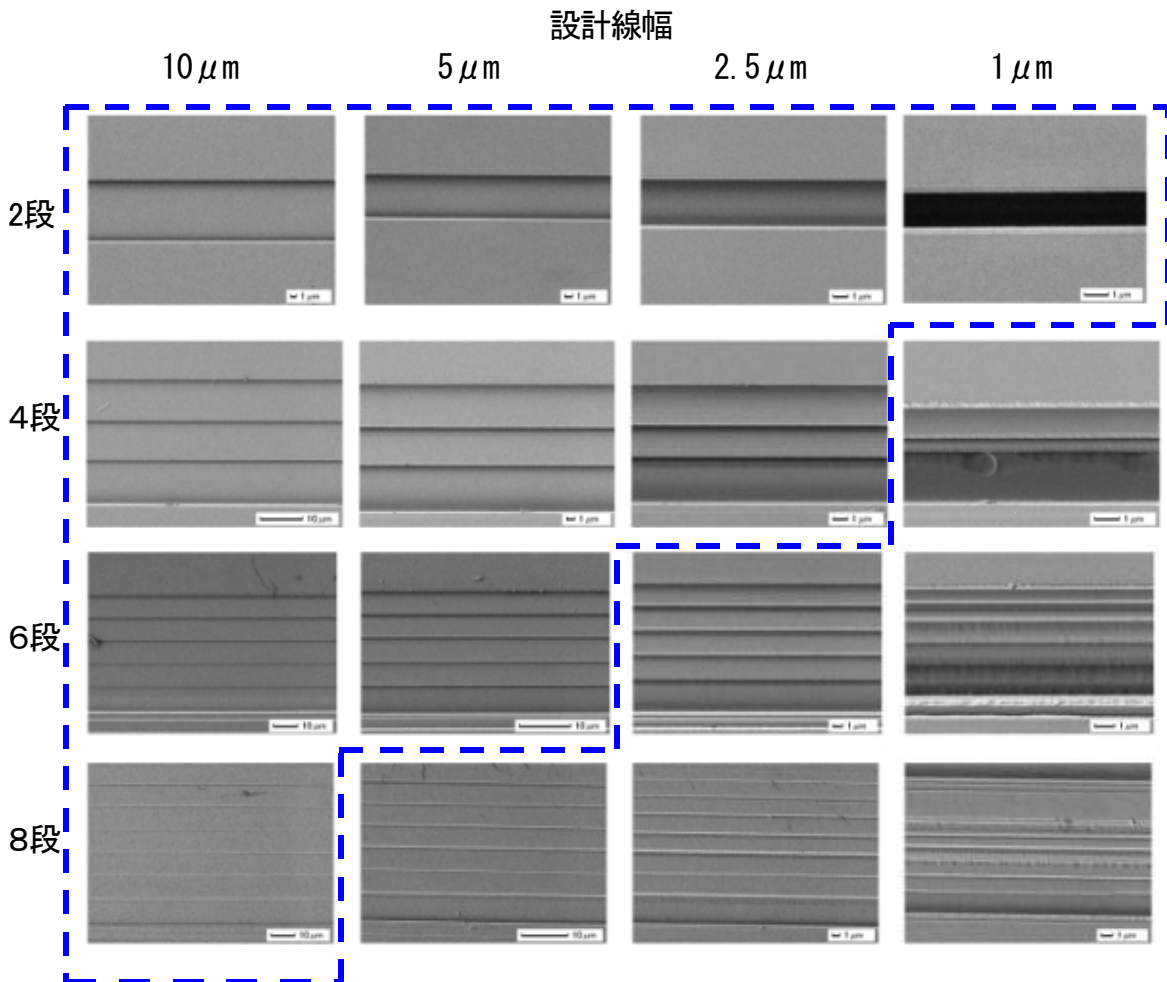
このように構築したガラス・ホログラム作製プロセスで、どのようなガラス・ホログラムが作製可能かテストパターンを用いて調査した。図(2)(c)-6に示すように、テストパターンの外形は5.5mm $\times$ 5.5mmで、段幅10、5、2.5、1 $\mu$ mの階段パターンを十字型に配置している。このテストパ

ターンを 2、4、6、8 段で作製し、走査型電子顕微鏡（SEM）でそれぞれのパターンを観察した（図（2）（c）－7）。図（2）（c）－7から、段幅が狭くなるに従って、または段数の増加するに従って、パターン形状の劣化が見られる。例えば、段幅  $10\mu\text{m}$  では 8 段まで良好に作製されているが、段幅  $1\mu\text{m}$  では 2 段以上の階段パターンのラフネスや段幅のばらつきが目立つ。このプロセスでは、段幅により作製可能な段数が異なり、段幅  $10\mu\text{m}$  では 8 段、段幅  $5\mu\text{m}$  では 6 段、段幅  $2.5\mu\text{m}$  では 4 段、段幅  $1\mu\text{m}$  では 2 段という結果であった。



図（2）

（c）－6 プロセステスト用階段パターンの概略図



図

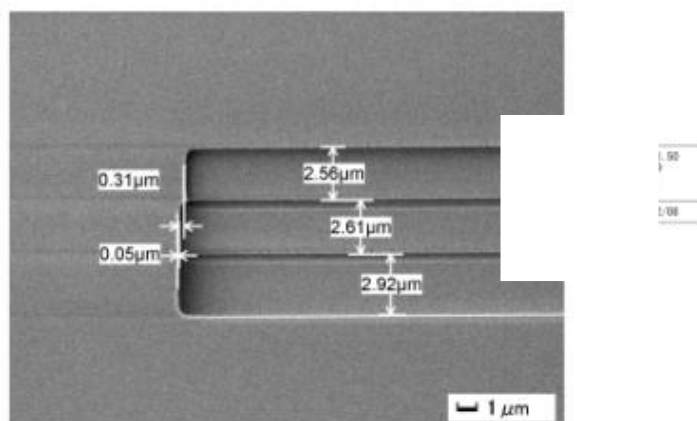
(2)(c) - 7 試作した階段パターンのSEM像 (画像毎に観察倍率が異なる)

### c) ガラス・ホログラム作製プロセスの改良

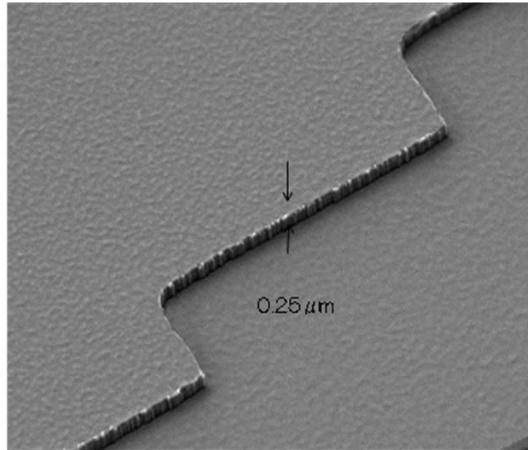
b) 節で構築したガラス・ホログラム作製プロセスでは、幾つかの問題点があり、これら問題点の改善を行った。また、様々な位相分布のガラス・ホログラムを作製することで現れた問題点のうち、帯電による位置ずれ、長時間 EB 描画での位置精度の劣化への対策について報告する。

#### ・ガラス・ホログラム作製プロセスの改良

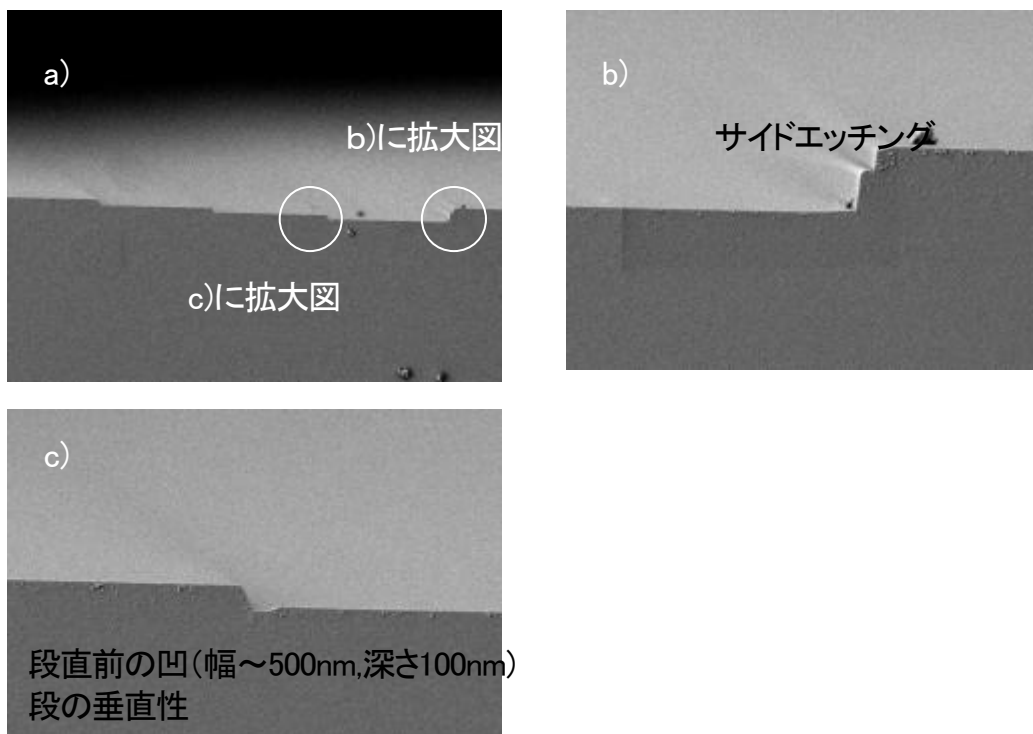
前節ではガラス・ホログラム作製プロセスを構築したが、段幅により作製可能な段数に制限があり、段幅が狭い場合はラフネスや段幅のばらつき等の問題点があった。そこで、SEMを使ってパターンの形状を詳細に観察した。図(2)(c) - 8は段幅  $2.5\mu\text{m}$  のパターンを表面から見たSEM像である。1段目の段幅が2段目と3段目に比べて約  $500\text{nm}$  程度太く、これは設計段幅によらず同様な傾向である。図(2)(c) - 9は傾斜をかけて段の側壁を観察したSEM像である。側壁のラフネス、表面のラフネスがみられる。次に階段パターンを割断し、断面方向からの観察し、作製プロセスの問題点を検討した。図(2)(c) - 10は段幅  $10\mu\text{m}$  の4段パターンの断面図である。図(2)(c) - 10から、段が深い程段の角が丸くなっている。段は垂直ではなくテーパを持っており、1段目と4段目の境界では図(2)(c) - 10b)のようにサイドエッチングがみられる。また、図(2)(c) - 10c)から段直前で幅  $500\text{nm}$ 、深さ  $100\text{nm}$  の凹ができています。図(2)(c) - 10には示していないが、約  $70\text{nm}$  程度段の深さのばらつきがある。これらを1つずつに対して対策を行うのでは効率が悪いため、これらの問題点の傾向から、ガラス・ホログラム作製プロセス中の問題点の検討を行った。



図(2)(c) - 8 設計段幅  $2.5\mu\text{m}$  の4段パターンのSEM像 (表面観察)



図(2)(c)-9 設計段幅 2.5 μm の 4 段パターンの SEM 像 (傾斜観察)



図(2)(c)-10 設計段幅 10 μm、位相 4 段テストパターンの SEM による断面観察 a) 4 段パターン全体図、b) と c) は拡大図

高倍率の SEM 像観察からは、作製されたガラス・ホログラムからオーバーエッチングによるダメージやラフネスが見られる。そこで、レジスト膜厚や金属膜厚を薄膜化して、エッチング時間をできるだけ短くして、ダメージを軽減する方法をとることにした。金属膜エッチング、ガラスエッチングのエッチングレート、選択比を高精度で測定した。得られた選択比から 4 段、6 段、8 段を作製するのに必要な金属膜厚を求めて、金属膜厚を薄膜化し、ホログラムの段数により金属膜厚調整した。再度、選択比が高くダメージの少ないエッチング条件を探した。次にレジスト塗布条件を決定し、金属膜エッチング時間、ガラスエッチング時間を段ごとに最適化した。

改良したガラス・ホログラム作製プロセスで段幅 1、2.5、5、10 μm のテストパターン (図(2)(c)-6) を段の深さ 400nm で作製した。結果は図(2)(c)-11~図(2)(c)-14 に示した。図(2)(c)-11a)~図(2)(c)-14a) に示したように、段幅 2.5~10 μm パターンでは段幅は設計値 ±40nm で作製されている。段幅 1 μm パターンでは 1 段目の段幅が広く改善の余地

はあるが、段幅  $2.5\mu\text{m}$  以上のパターンでは最終目標値の  $\pm 40\text{nm}$  以下を達成している。段の深さについては、図 (2) (c) - 1 1 b) ~ 図 (2) (c) - 1 4 b) に示したように、すべての段幅のパターンで設計値  $\pm 40\text{nm}$  で作製されている。また、段の直前の凹は  $20\text{nm}$  以下となり、サイドエッチング、表面ラフネス、段側面ラフネス等の問題は低減されている。

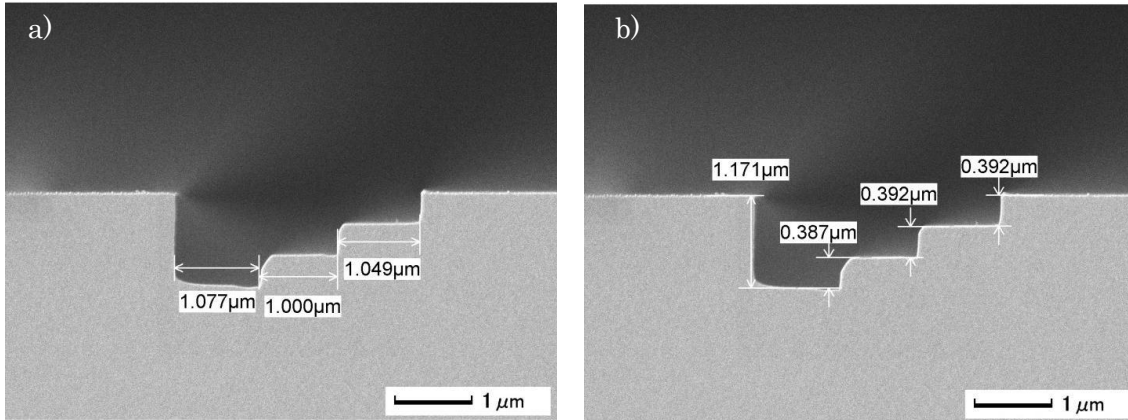


図 (2) (c) - 1 1 プロセス改良後の設計段幅  $1\mu\text{m}$  の 4 段パターンの SEM 像 (断面観察) a) 段幅測定 b) 段の深さ測定

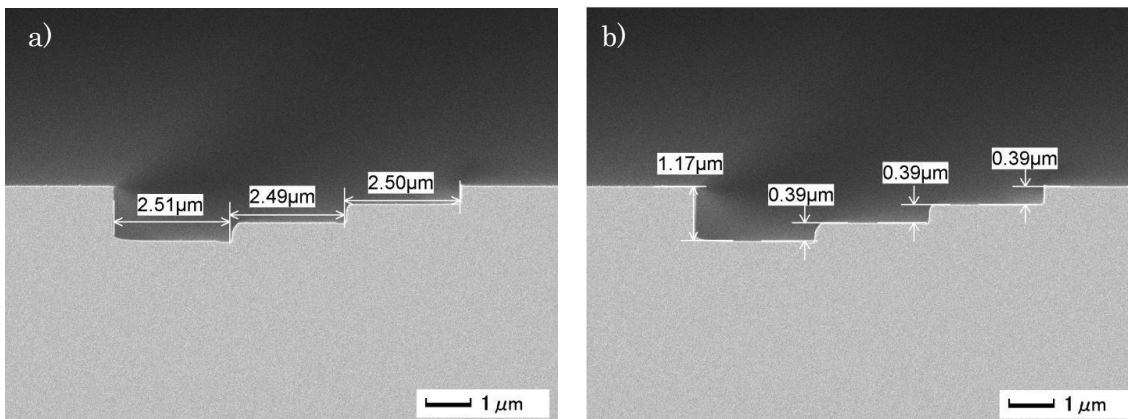


図 (2) (c) - 1 2 プロセス改良後の設計段幅  $2.5\mu\text{m}$  の 4 段パターンの SEM 像 (断面観察) a) 段幅測定 b) 段の深さ測定

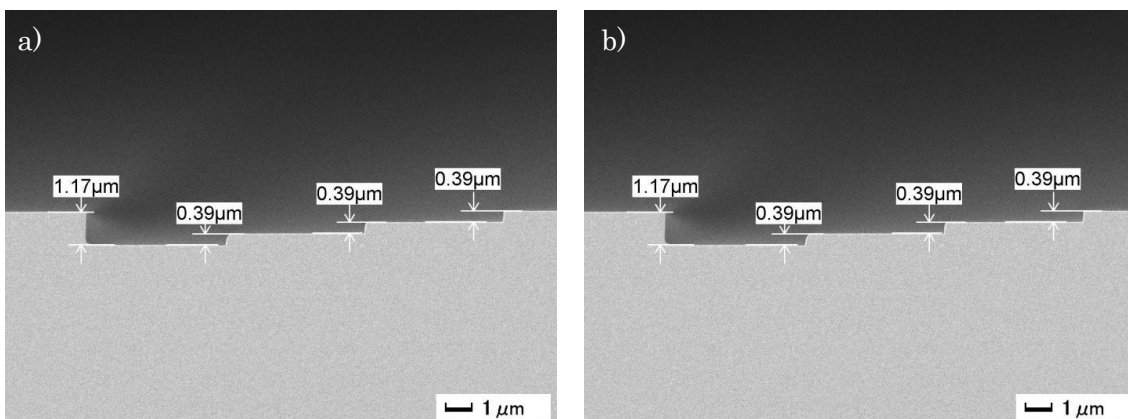
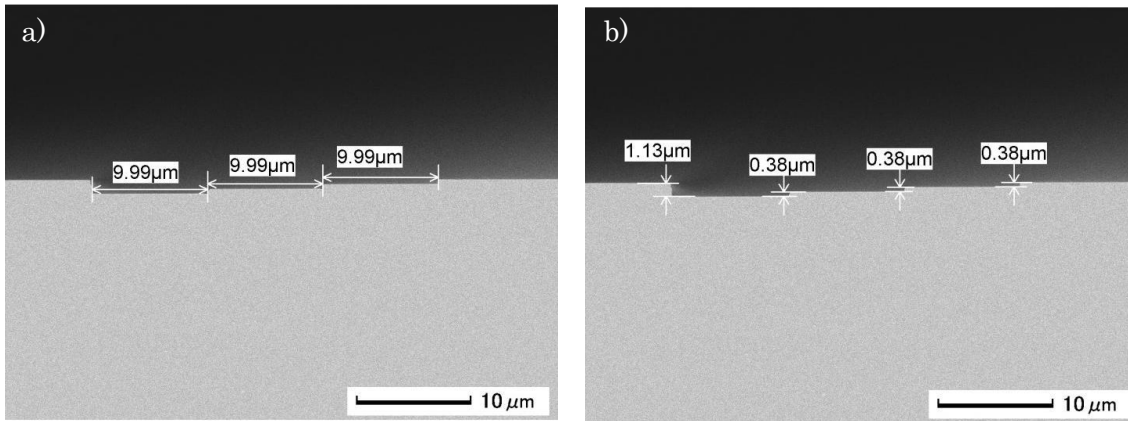


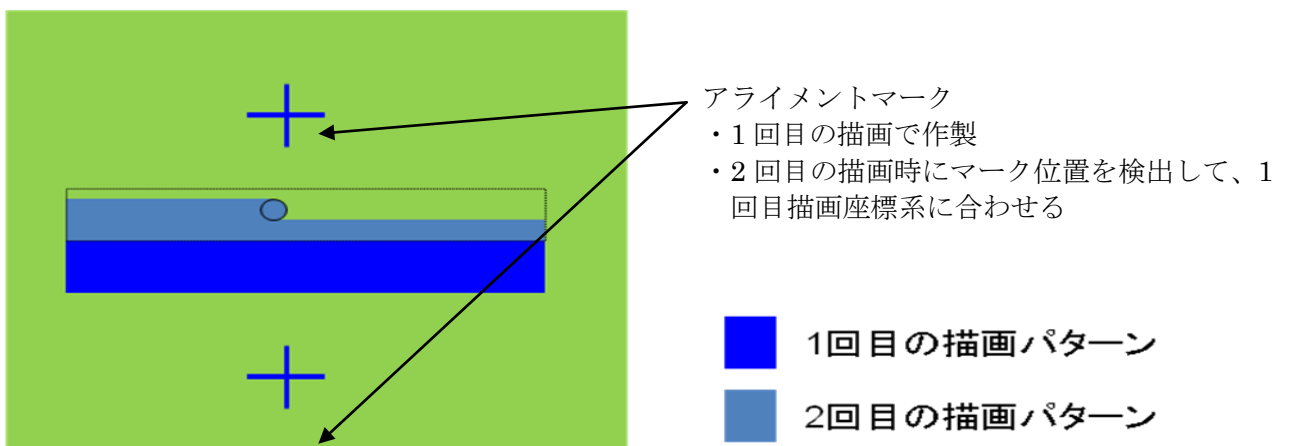
図 (2) (c) - 1 3 プロセス改良後の設計段幅  $5\mu\text{m}$  の 4 段パターンの SEM 像 (断面観察) a) 段幅測定 b) 段の深さ測定



図(2)(c)-14 プロセス改良後の設計段幅 $10\mu\text{m}$ の4段パターンのSEM像(断面観察) a) 段幅測定 b) 段の深さ測定

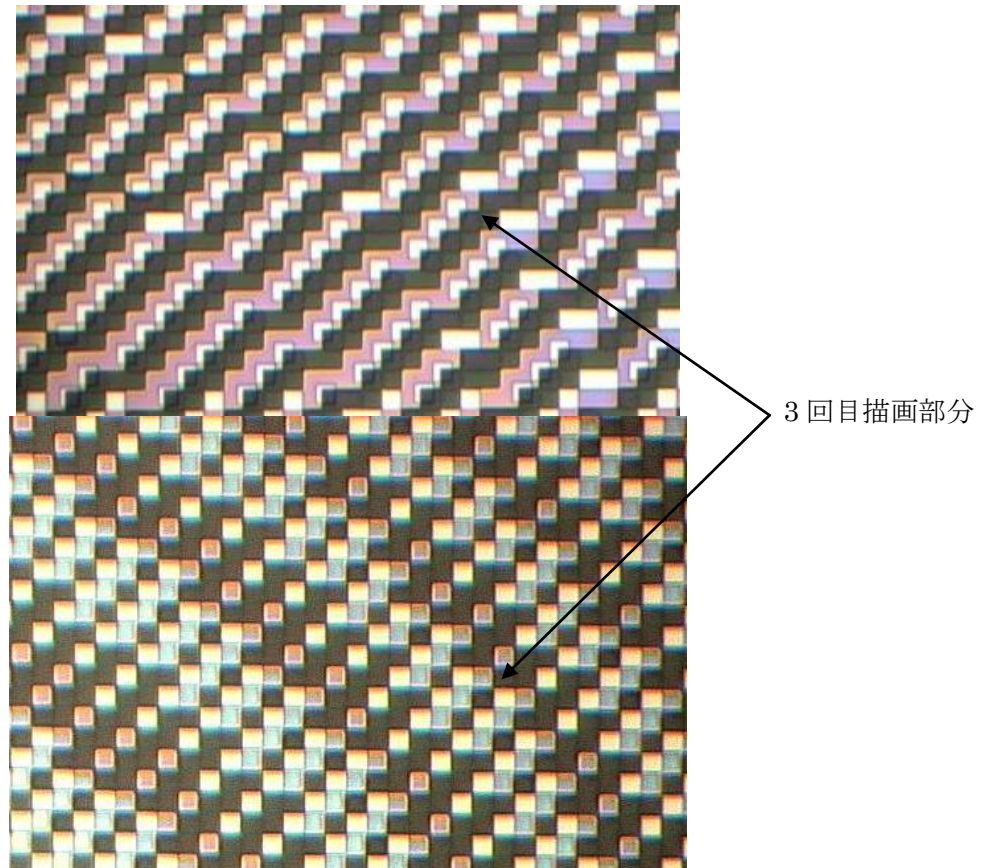
・帯電による位置ずれへの対策

多段ホログラムを作製するためには、1枚の基板に複数回のEB描画を行う必要がある。2回目以降の描画では、1回目のEB描画座標系に合わせて描画を行う(レジストレーション描画[8])。まず、1回目のEB描画座で基板上に作製した2か所のアライメントマークを電子線ビームでスキャンし、反射電子を検出してアライメントマークの位置を高精度に決定する。次に2点のマーク座標から1回目の描画座標系を算出し、この座標系で2回目のEB描画を行う(図(2)(c)-15)。このレジストレーション描画時に、2つの問題が発生した。1つはマークスキャン時の帯電によりマークスキャンが失敗することである。もう1つの問題は、2回目以降のEB描画でのパターンでの帯電による位置ずれである。図(2)(c)-4のガラス・ホログラム作製プロセスには示していないが、レジスト塗布(工程6.)後に、帯電防止剤を塗布している。しかし、2回目以降のEB描画では、すでにプロセスを終えたパターンのガラス部分の面積が大きくなるため、帯電の影響が大きくなり、位置ずれが発生する可能性がある。図(2)(c)-16a)はピクセルサイズ $5\mu\text{m}$ 、4段ホログラムの3回目の現像後の光学顕微鏡像で、位置ずれを起こしている。ただし、この位置ずれについては、描画パターン依存性が強く、すべての場合に発生するという訳ではない。



図(2)(c)-15 レジストレーション描画概念図





図(2)(c)-16 ピクセルサイズ  $5\mu\text{m}$ 、位相4段ホログラムの3回目描画後のレジストパターンの光学顕微鏡像 a)帯電防止膜なし(位置ずれあり) b)帯電防止膜あり(位置ずれなし)

この位置ずれ対策として、レジストの下地に帯電防止材を成膜し、帯電の影響を小さくする工程を追加することにした(図(2)(c)-17)。帯電防止材の選定では、薄膜でも導電性が高く、膜の剥離が容易であることに注意した。帯電防止材の除去されずに残ると、フェムト秒レーザーを吸収し、透過率を下げるため一括加工性能を下げることになる。また、レーザーの吸収によるガラス・ホログラムの損傷も発生する可能性がある。様々なテストを行い、帯電防止材を選定した。レジスト塗布前に帯電防止材を基板全体に成膜してEB描画を行うと図(2)(c)-16b)のように位置ずれがほぼなくなった。成膜した帯電防止材は非常に薄く、金属膜エッチングやレジスト剥離で剥離されるため、特にこの帯電防止材を除去する工程は設けていない。また、先ほどのマークスキャンの失敗も、帯電防止材の成膜によりほとんどなくなった。

マークスキャンによるマーク位置検出に関しては、位置精度検出向上のためにマークの大きさ、スキャンピッチ、マーク検出アルゴリズムの改良も行った。

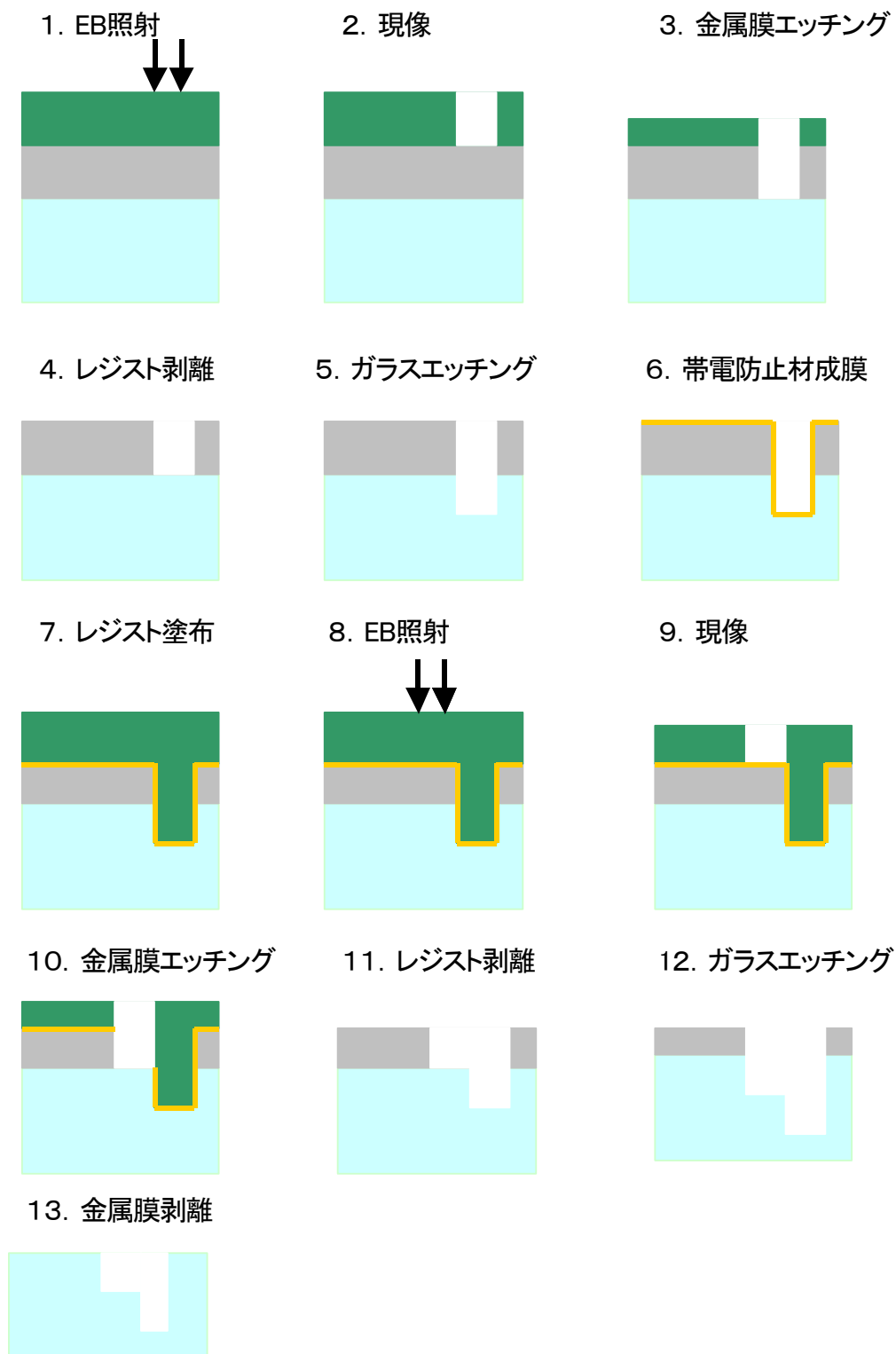


図 ( 2 )

(c) - 17 帯電対策後 (工程 6.) の多段ガラス・ホログラム作製プロセス (さらに多段のホログラムを作製する場合は、工程 12. の後、再度工程 6 ~ 12 を繰り返す)

・長時間 EB 描画での位置精度劣化への対策

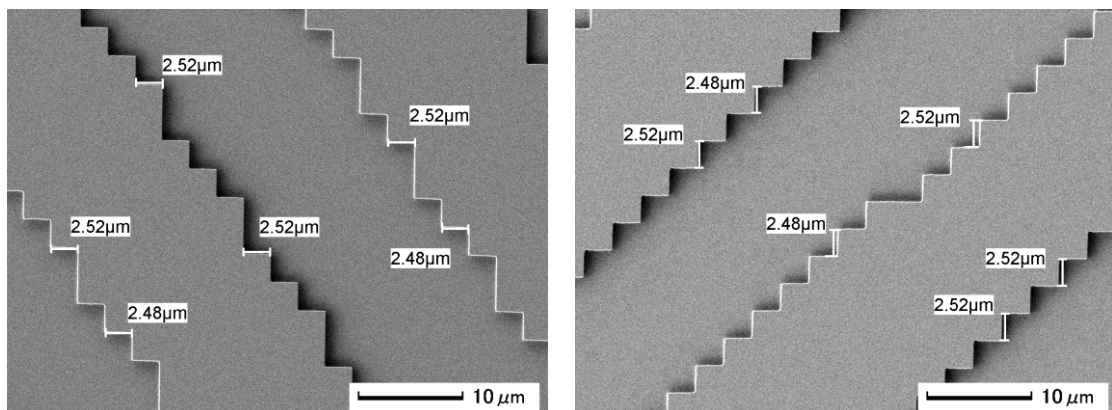
フェムト秒レーザー一括加工では入射エネルギーをできるだけ有効に使用し、大面積 (体積) に加工をすることが望ましい。ホログラムの多段化による回折効率の向上とともに、ホログラム位相分布の有効面積を拡大する必要がある。有効面積を拡げることは、ホログラムの EB 描画時間が増加につな

がる。長時間のEB描画では、温度や気圧等の環境変化や鏡筒内の帯電により電子線の軌道がドリフトし、位置精度の劣化が予想される。レジストレーション描画では2か所のマークの位置を決定している。そこで、EB描画中1時間に1回マークをスキャンしマーク位置を決めることで、電子線軌道のドリフトを補正することにした。これにより、位置精度の劣化を低減することができ、描画時間3日以上 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 以上の有効面積の多段ガラス・ホログラムの描画も可能となった。

#### d) ガラス・ホログラム作製例

これまで構築・改良したプロセスで作製した一括加工用ガラス・ホログラムの作製例を示す。作製した一括加工用ガラス・ホログラムは、ほぼ全数についてSEMによるパターン形状の観察と計測を行った。一般にガラスは絶縁体であるため、帯電によりSEMでの観察は困難である。ガラス・ホログラムの場合も、SEMでの直接観察は困難であり、帯電防止コートを使用する必要がある。通常のSEM観察で用いられる帯電防止コート（金、白金、白金パラジウム等）は、剥離が容易でないためガラス・ホログラムに一旦コートしてしまうとガラス・ホログラムの透過率を低下させ、一括加工に影響を与えると予想される。そこで、導電性に優れ、容易に剥離が可能な帯電防止コートを探した結果、オスmium (Os) コート[11]が最適であった。Os膜はアモルファス状で他の帯電防止コートに比べて導電性が高い。回り込みがよく、短時間でコートができるためサンプルへのダメージも小さいという特徴がある。SEM観察前にOsコートし、観察後にOsを除去するが、高エネルギーパルス ( $14\text{mJ/pulse}$ ) のフェムト秒レーザー一括加工に使用しても問題は発生していない。

作製した一括加工用ガラス・ホログラムには様々なピクセルサイズ、位相段数、ホログラムサイズであり、すべてを示すことはできないが、典型的なガラス・ホログラムについてSEM観察結果を示す。図(2)(c)-18はピクセルサイズ  $2.5\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ  $4\text{mm} \times 4\text{mm}$  ( $1600$ ピクセル  $\times$   $1600$ ピクセル)、位相2段で作製したホログラムのSEM観察結果である。パターン形状は良好である。寸法を測定した結果は、いずれも設計値ピクセルサイズ  $2.5\mu\text{m} \pm 40\text{nm}$  以下で作製されている。

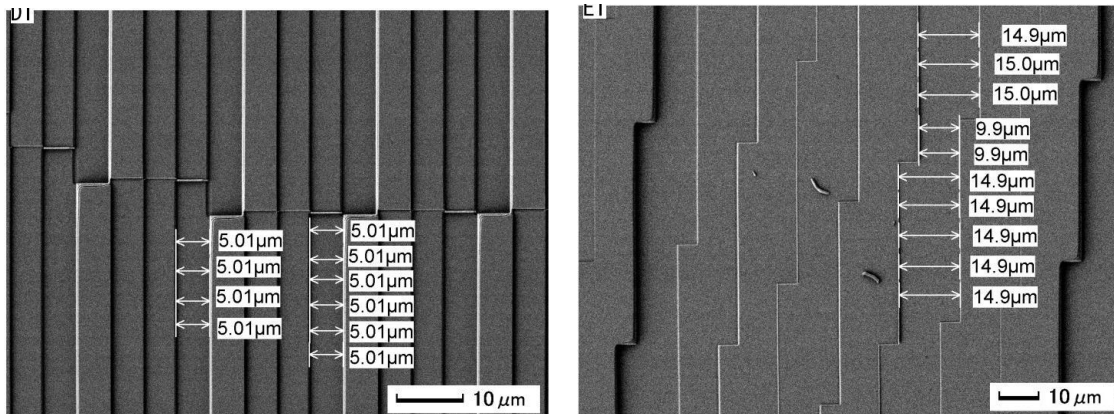


図(2)(c)-18 ピクセルサイズ  $2.5\mu\text{m}$ 、位相2段ガラス・ホログラムのSEM観察例 (左右は異なる場所の観察例)

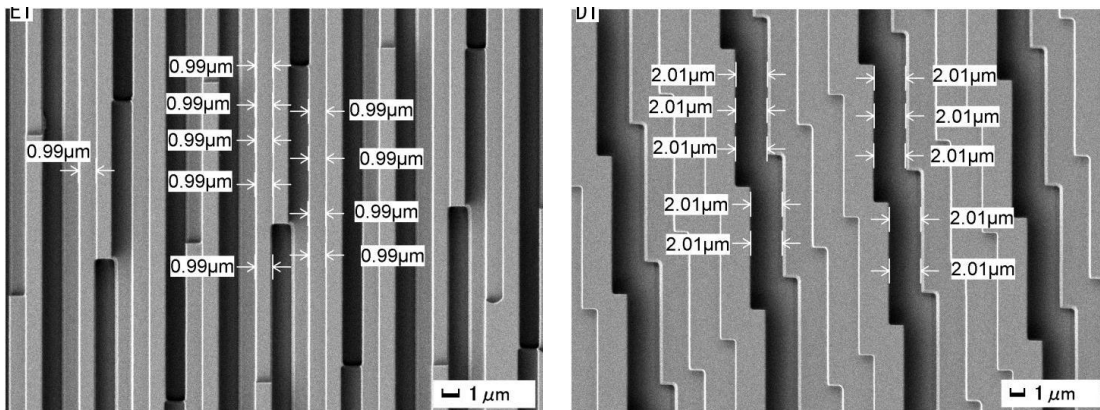
図(2)(c)-19はピクセルサイズ  $5\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ  $12.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$  ( $2500$ ピクセル  $\times$   $2500$ ピクセル)の位相4段ガラス・ホログラムの作製結果である。4段は非常に良好に形成されている。図(2)(c)-19に示されているように、測定したパターン幅は設計段階  $5\mu\text{m} \pm 40\text{nm}$  以下である。また、抜き取りでピクセルサイズ  $5\mu\text{m}$ 、位相4段のガラス・ホログラムを切断し、ホログラム断面をSEM観察した。図(2)(c)-20に結果を示す。段の深さも設計値  $400\text{nm}$  に対して、 $\pm 40\text{nm}$  以内で作製されている。



図(2)(c) - 21 ピクセルサイズ  $5\ \mu\text{m}$ 、位相 6 段ガラス・ホログラムの SEM による観察例  
(左と右は異なる場所の観察例)



図(2)(c) - 22 ピクセルサイズ  $5\ \mu\text{m}$ 、位相 8 段ガラス・ホログラムの SEM による観察例  
(左と右は異なる場所の観察例)



図(2)(c) - 23 ピクセルサイズ  $1\ \mu\text{m}$ 、位相 4 段ガラス・ホログラムの SEM による観察例  
(左と右は異なる場所の観察例)

### e) 作製したガラス・ホログラムの性能

多段ガラス・ホログラムの性能を調査するために、改良後の作製プロセスで位相 2 段、位相 4 段ガラス・ホログラムの試作し、これらの再生像を CCD で観察し比較を行った。

まず、図 (2) (c) - 2 4 に示した直径  $100\mu\text{m}$  の円盤 20 個を再生する位相ホログラムを位相 256 段で設計した (図 (2) (c) - 2 5 a))。ホログラムのピクセルサイズは  $10\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ  $5\text{mm}\times 5\text{mm}$  ( $500$  ピクセル $\times 500$  ピクセル) である。これらを 4 段 (2 段) に階調化して、位相 4 段 (位相 2 段) の位相ホログラムを得た (図 (2) (c) - 2 5 b) と図 (2) (c) - 2 5 c))。位相段数 256 段、4 段、2 段ホログラムの再生像の計算を行った。図 (2) (c) - 2 6 a)、b)、c) にそれぞれの再生像を示した。また、図 (2) (c) - 2 7 には、再生像中心パターンの強度プロファイルを示した。予想通り、段数が増えるほど強度が増し、一様性が高い。

次に図 (2) (c) - 2 5 b) と図 (2) (c) - 2 5 c) の位相 4 段と位相 2 段のホログラムを試作した。図 (2) (c) - 2 8 a) と b) は光学顕微鏡で観察した全体図である。ガラス・ホログラムのほぼ同じ場所を SEM で観察を行った結果を図 (2) (c) - 2 8 c) と図 (2) (c) - 2 8 d) に示した。位相 4 段、位相 2 段の場合も位相パターンは良好に形成されている。また、位相 4 段の方がより複雑な位相分布を持っていることが分る。

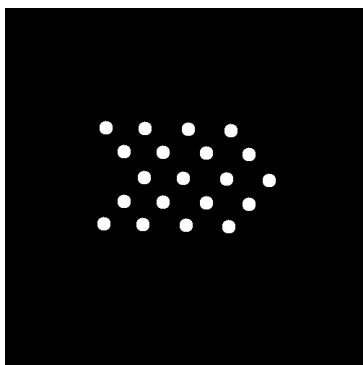


図 (2) (c) - 2 4 ホログラム性能評価用強度分布 ( $100\mu\text{m}\phi$  20 個の円盤)

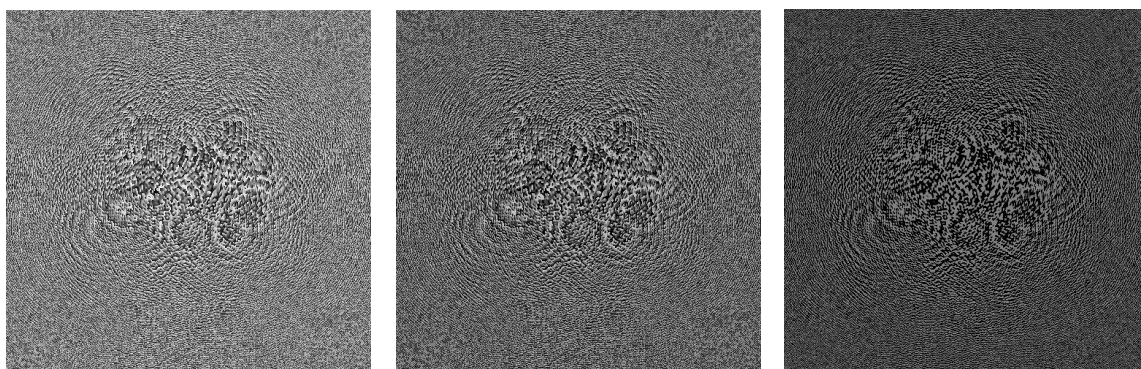
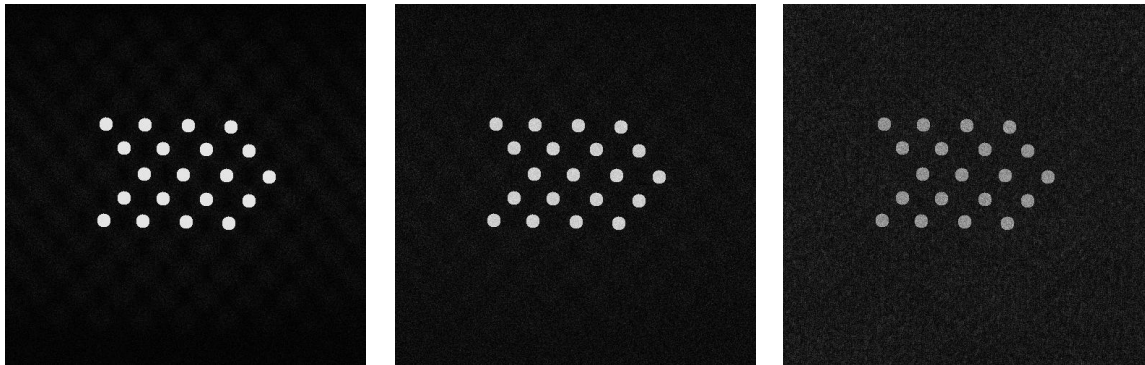
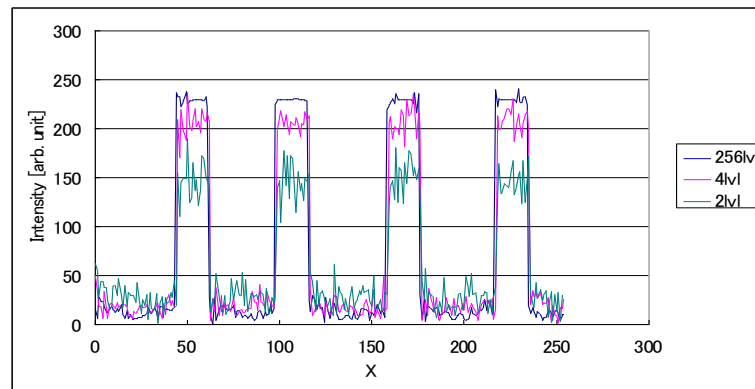


図 (2) (c) - 2 5 図 (2) (c) - 2 4 を再生する位相ホログラム a) 位相 256 段 b) 位相 4 段 c) 位相 2 段



図(2)(c)-26 図(2)(c)-25のホログラムの計算による再生像 a)位相 256 段での再生像 b) 位相 4 段での再生像 c) 位相 2 段での再生像



図(2)(c)-27 図(2)(c)-24の計算による再生像の強度プロファイル (中心付近のラインプロファイル)

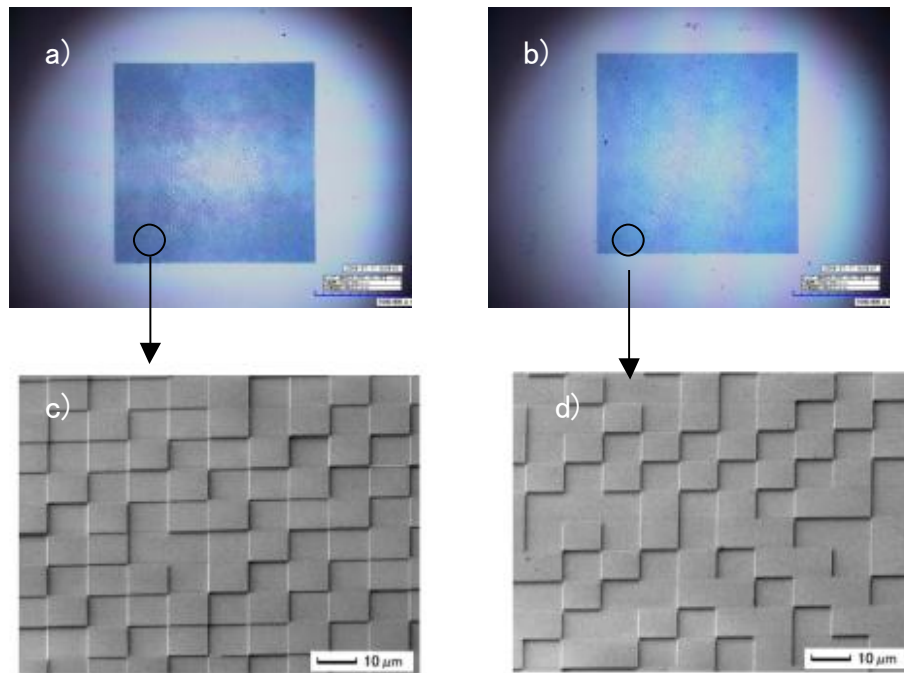


図 (2)

(c) - 28 作製したガラス・ホログラム a) 位相 4 段ホログラムの全体図 b) 位相 2 段ホログラムの全体図 c) 位相 4 段ホログラムの SEM による拡大図 d) 位相 2 段ホログラムの SEM による拡大図

これらのホログラムを図 (2) (c) - 29 に示すような光学系で観察し、再生像の比較を行った。光源は波長 633nm の He-Ne レーザーで、ビーム径を拡大するためのビームエキスパンダーを使用した。ガラス・ホログラムの間には光量調整用の ND フィルタを置いた。今回の測定では、位相 2 段と位相 4 段での再生像の直接比較を行うため、同じ ND フィルタを用いて位相 2 段と位相 4 段のガラス・ホログラムへの入射光量が等しくなるようにした。ガラス・ホログラムの後方には 2 次元ステージ上に CCD カメラを設置し、様々な結像距離での再生像の観察が可能である。

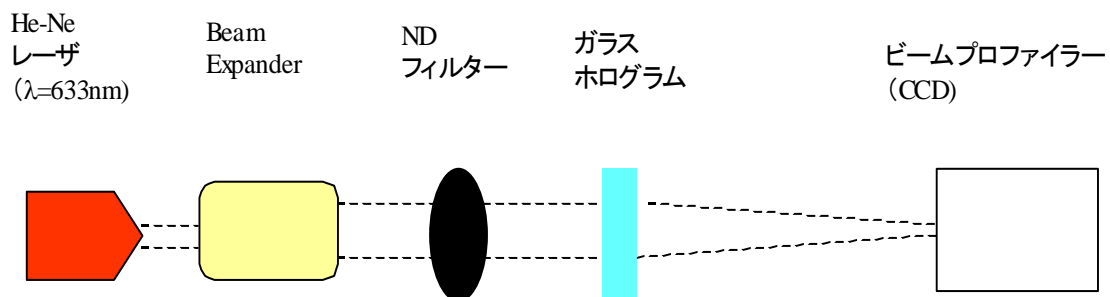
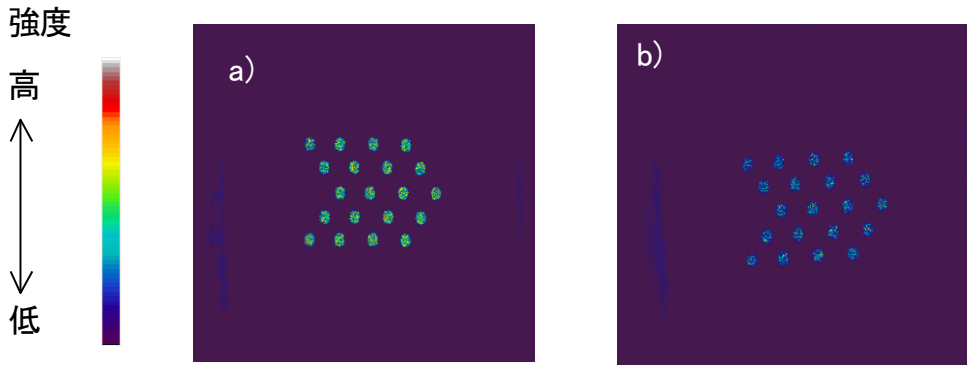


図 (2)

(c) - 29 ガラス・ホログラム再生像観察概略図

位相 4 段と位相 2 段のガラス・ホログラムの再生像を最適な結像距離で観察した結果を図 (2) (c) - 30 に示した。計算結果と同様に位相 4 段ホログラムの方が位相 2 段ホログラムよりも再生強度が高い。これは、構築・改良を行ったガラス・ホログラム作製プロセスの有効性を示している。また、様々なガラス・ホログラムを使ったガラス内部への一括加工結果においても、多段化による効率の改善が見られた。





図(2)(c) - 30 He-Ne レーザーによる作製したガラス・ホログラムの再生像 a) 位相 4 段の場合 b) 位相 2 段の場合

#### f) まとめ

ガラス・ホログラム作製プロセスの構築を行った。EB描画条件の最適化により5mm×5mmのホログラムの描画時間は約35%になり、ガラス・ホログラム作製期間を大幅に短縮できた。この作製プロセスの問題点を検討し、プロセスの改良を行った。4段のテストパターンでは、段幅2.5μm以上で段幅、段の深さは設計値±40nmで作製できた。なお、深さについては段幅1μm以上のパターンで設計値±40nmで作製できた。実際一括加工に使用するピクセルサイズ2.5μmの位相2段ホログラム、ピクセルサイズ5μmの位相4段ガラス・ホログラムでも、ホログラムパターンの幅と段の深さが設計値±40nmで作製できていることを確認した。これらの結果により、プロジェクトの最終目標値である「波面制御素子の作製精度±40nm以下」を達成した。また、e)節で示したように、ピクセルサイズ1μm、ホログラムサイズ13mm×13mm(13000ピクセル×13000ピクセル)、位相4段ホログラムも良好に作製できており、フェムト秒レーザー波長程度のピクセルサイズの多段ホログラムも作製可能である。現状では、ガラス・ホログラム全面をSEMで観察・測定することは不可能である。しかし、(2)(g)章で述べるように、ピクセルサイズ5μm、素子サイズ12.5mm×12.5mm(2500ピクセル×2500ピクセル)の位相4段ホログラムを用いて、1cm導波路を一括加工で作製し、導波光が観察できていることから、ホログラム全面においても高精度で作製されていると考えられる。また、ガラス・ホログラムの多段化により効率が向上していることから、作製誤差は十分小さいと考えられる。

今回開発したガラス・ホログラム作製プロセスにおいても、改善すべき点はまだある。フェムト秒レーザー一括加工によるデバイス製造では、「ホログラム設計→ガラス・ホログラム作製→一括加工→問題点の設計へのフィードバック、ホログラム再設計→ホログラム作製→一括加工→・・・」、というようなサイクルを繰り返す必要があり、ガラス・ホログラム作製期間を短期間化することは必須である。プロセスの大半はEB描画に費やされており、EB描画時間を短くする必要がある。本プロジェクトで使用した点描画方式EB装置は実験室で使用する開発用途の装置であり、最先端の半導体製造プロセスで使用されているものより性能面で劣っている。最先端の半導体リソグラフィー用マスクでは、可変整形ビーム型EB描画装置[6、7、12]が使用され、描画精度と速度ともに優れている。描画時間については、本研究室で100時間かかるものが、10分程度で描画可能である。描画精度についても、寸法誤差については数nm程度である[12]。また、プロセス改良後でも、設計段幅1μmの段の角が丸くなることが観察されている。(図(2)(c)-11)。これは深い段でとくに顕著にあらわれる。ガラスエッチング時に角の先端に電界が集中し、段の角でダメージをうけている。本プロジェクトで使用したRIE装置では、低圧で高密度プラズマを発生させることができないため、総

エッチング時間の長くなる最深段でのダメージを取り除くことはできなかった。しかし、低圧で高密度プラズマを発生させることのできる装置では電界集中を低減し、角が丸くなりにくい条件があることを確認している。このように、先端の装置を利用することで、さらに高性能のガラス・ホログラムを作製可能である。

本プロジェクトではテスト用基板を含めて、655枚の基板をEB描画し、プロセスした。作製したガラス・ホログラムを使ったフェムト秒レーザー一括加工においては、プロジェクトの中間目標や最終目標である「 $60\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}$ 内部に100個以上の異質相を一括加工で形成する」を達成するとともに、3次元らせん構造[13]、導波路[14-16]、回折格子[17、18]等の様々な加工を行うことができた。

## 参考文献

- 1) 辻内順平、「ホログラフィー」、裳華房、1997年
- 2) (社)応用物理学会、日本光学会 光設計研究グループ 監修、「回折光学素子入門」、オプトロニクス社、2006年
- 3) B. Kress and P. Meyrueis, “Digital Diffractive Optics”, JOHN WILEY & SONS, New York, 2000
- 4) H. Damman, “Spectral characteristics of stepped-phase gratings”, Optik 53, 409-417, 1979.
- 5) J. W. Goodman, “An Introduction to Fourier Optics”, McGrawHill, New York, Second Edition.
- 6) 田邊功、法元盛久、竹花洋一、「フォトマスク技術」、工業調査会、2006年
- 7) S. M. Sze, “VLSI Technology”, McGrawHill, New York, Second Edition, 1998
- 8) 株式会社クレステック、「高分解能電子線描画装置 CABL-2100LBNG 取り扱い説明書」
- 9) 株式会社サムコインターナショナル研究所、「REACTIVE ION ETCHING SYSTEM MODEL:RIE-10NRG OPERATION MANUAL」
- 10) 日本電子株式会社、「JSM-7500F 電界放出形 走査電子顕微鏡 INSTRUCTIONS」
- 11) メイワフォーシス株式会社、「Neco-ST ネオオスミウムコーター 操作ガイドライン」
- 12) T. Kamikubo, et. al., “Electron beam mask writer EBM-7000 for hp 32nm generation”, Proc. SPIE 7488, 74881E (2009)
- 13) M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki and S. Tanaka, “Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram”, App. Phys. Lett. 93, 041116 (2008)
- 14) J. Suzuki, M. Yamaji and S. Tanaka, “Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram”, Proc. SPIE 7201, 72011C (2009)
- 15) J. Suzuki, Y. Arima, M. Yamaji, H. Kawashima and S. Tanaka, “Curved-waveguide fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram”, Proc. SPIE 7589,

75890T (2010)

1 6 ) J. Suzuki, Y. Arima, and S. Tanaka, “Optical device fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram” , Proc. SPIE 7925, 79251D (2011)

1 7 ) H. Kawashima, M. Yamaji, J. Suzuki and S. Tanaka, “Microfabrication of gratings inside a transparent material using femtosecond laser processing with computer generated holograms” , Proc. ICALEO, 1495–1499 (2009)

1 8 ) H. Kawashima, M. Yamaji, J. Suzuki and S. Tanaka, “Microdrilling of sheet materials with femtosecond laser pulses shaped by computer generated holograms” , Proc. ICALEO, 762–766 (2010)

## (d) ホログラムによる加工のための基盤技術

### 1) 研究の背景

フェムト秒パルスレーザーを用いた透明媒体の内部加工は、光導波路<sup>[1, 2]</sup>や三次元光メモリなどの光デバイスをはじめとする様々なデバイス加工への応用性と将来性によって幅広い分野から注目されているだけでなく、超短パルス光と物質との相互作用という基礎物理学的の面でも、電子励起・振動励起・アブレーションの各過程を独立して扱うことができるため多くの関心がよせられている。レーザーと物質との相互作用、とくに絶縁破壊についての研究はレーザーの歴史自体と同じくらい古く、1963年には既に Maker ら<sup>[3]</sup>によって理論的に偏光の影響などが詳細に調べられている。1974年には Bloembergen<sup>[4]</sup>によって実際にアブレーションの実験が行われている。そこから既に半世紀が経過しようとしているが、いまだその相互作用の詳細については解明されていない部分が多い。さらに、これらの研究は連続波に限定されたものである。つまり電磁波であるレーザー光は時間的・空間的に変化する“場”として捉えられてはいるが、パルスレーザーの場合はその“場”自体がテンポラリーな扱いとなり、より扱いが難しくなる。よってパルスレーザーによるアブレーション実験とその理論的な解析が行われたのはこれよりずっと後であり、90年代後半に Hannover 大学の研究グループによって発表された<sup>[5, 6]</sup>。ここでは電子温度と格子温度それぞれについて時間的・空間的な変化を議論しており、光子が相互作用領域を通過するタイムスケールと電子温度・格子温度が上昇するタイムスケールとの違いにより生じる相互作用が異なってくるところまで解説したおそらく最初の論文である。そこで用いられた被加工物質は光が透過しない物質（金属）であり、対象とした加工は当然表面アブレーションである。我々が本プロジェクトにおいて研究している対象は光に対して透明な物質の内部へのフェムト秒パルスレーザー加工であり、系はさらに複雑さを増す。実際、これまでもフェムト秒パルスレーザーを用いた透明媒体内部への加工に関する研究は数多くなされているが、どのような仕組みでどのような物理的・化学的変化が起きて、どのような性質の被加工領域がどの程度の大きさに生じるのかについては、全くといっていいほど理論が追いついていない状態である。本プロジェクトで達成しなければならない三次元微細加工はそれぞれの異質相の形状および相対位置について高い精度が要求されるため、これら未解明の基礎過程について解き明かすことは非常に重要である。超短パルスを用いることで、物質の電子系に光が吸収（電子励起）された後に引き続いて起こる電子系から格子系へのエネルギー移行（振動励起）のタイムスケールが始まるまでに光パルスは相互作用領域を通過してしまっているため、これまでの連続光やナノ秒パルスではこれら電子励起と振動励起の過程に加えてその後のアブレーションまでが混在して起きていた状況とは全く異なり、理論的にはこれら全ての素過程が時間的に独立して捉えられる。その意味でフェムト秒パルスレーザーのもたらす知見は非常に大きいと期待できる。本報告書ではその解明への足がかりとして、特にパルス幅を変化させたときの加工形状の変化から、光吸収プロセスがどのように変わっていくかについても議論している。

フェムト秒パルスレーザーを用いることの利点としては、このような素過程の解明という面に限らず、熱的影響による加工領域の物理的・化学的変化が無視できることが挙げられる。これは光子のエネルギーがフェムト秒のオーダーで電子系に吸収される一方で、熱的変化が生じるナノ秒のオーダーの時点では既にパルスレーザーは対象領域を通過してしまっていることに依る。また別の利点としては、相互作用により生じるプラズマの扱いが容易になり、これにより加工精度を向上させられることが挙げられる。パルス幅が長くナノ秒のオーダーになる場合、物理的・化学的に既に変化した物質とプラズマとが共存した系を想定しなければならないが、特にアブレーション加工に至っては蒸発した物質とプラズマとの相互作用まで考慮しなければならないが、フェムト秒パルスであればそれらの効果は無視できるため、プラズマプルームの性質は物質やレーザーの特性に依存しないため比較的容易にシミュ

レーションすることが可能である。

本章では、このフェムト秒パルスレーザーとガラス・ホログラムを用いた三次元加工に関する報告を行う。レーザーによるガラス内部の改質でデバイスを作製する場合、多くの点やある程度の長さを持った線を作製することがほとんどである。そのためには、これまではガラスサンプルを高精度の3軸ステージ上に設置し、1点加工した後にサンプルを動かして次の点を加工する、あるいはレーザーのシャッターを開放したままサンプルを動かしながらライン加工を行う逐次描画法が主に用いられてきた。この加工法は任意の3次元形状の加工が可能であるため自由度は高いが、例えばデバイス作製に1万点の加工が必要な場合、2個/秒の速度で加工を行ったとしても1時間以上を要するため大量生産にはおおよそ適していない。またライン加工を行う際には、設定速度までの加減速の影響で端の部分が中央部分と異なる加工になる欠点もある。最近ではこの逐次描画法をさらに発展させ、レーザー加工後にアニーリングとフッ酸によるエッチングを行ってマイクロ流路を作る方法も確立された<sup>[7]</sup>。しかしこの手法でも、加工時間で最もネックになるのはレーザー加工過程である。この加工時間の問題を解決するために提案されたのが三次元一括加工法であり、様々な分野において実用化が期待されている。

一方でレーザーによるガラスの内部加工については、すでに広く応用されているにもかかわらず、実際に光と物質とがどのような過程をふんでどのように変質されているかについてはいまだ未解明の部分が大きく、基礎研究がまったく追いついていないのが現状である。近年アブレーションに関しては研究が進んできたが、それでも未知の部分が多い。内部加工については、言うまでもなくさらに未開拓である。そこで本報告書では、プロジェクトの最終目標の1つであるガラス内部の60 $\mu\text{m}$ 立方体積内への100点異質相一括加工に関する報告とあわせて、超短パルス光とガラスとの相互作用についても得られた知見について議論する。

## 2) 理論

### 2-1) レーザーと物質との相互作用

ひとことにレーザーと物質との相互作用といっても、そのプロセスは複雑である。物質の光パルスに対する応答は、パルスの強度やパルス幅、照射パルス数、繰返し周波数、レーザー波長などのレーザーのパラメータとともに物質の屈折率や透過率、熱伝導率や原子の配置にも依存してくる<sup>[8]</sup>。特にこのプロセスを時間軸にそって光の強度への依存性ととともに示したのが図3-1-2-(2)-(c)-1である。まずレーザーパルスとして相互作用領域に到達した光子は電子によって吸収される。金属の場合、到達する光子の密度に対して物質が十分な自由電子密度を持つため、光子および自由電子の密度に比例した確率のもとでこの吸収が行われ、エネルギーが電子に移行し、より高いエネルギーの自由電子となる。半導体の場合、光子の吸収は価電子帯の電子によって行われる。価電子帯にある電子が伝導帯に励起するためには禁制帯の幅(バンドギャップ)に相当するエネルギーを光子から得る必要があるが、多くの場合光子のエネルギーはバンドギャップに匹敵するため、金属の場合と同様に線形に吸収が行われる。これに対し絶縁体の場合も半導体と同様自由電子密度が非常に低く( $\sim 10^{-9}/\text{cm}^3$ )、光子の吸収は価電子帯の電子によって行われるが、バンドギャップが半導体に比べて非常に大きいため、これを超えるためには多光子吸収過程が必要になる。いずれの場合においても電子へのエネルギー移行の時間スケールはパルス幅によって決定される。別の言い方をすれば、パルスが通過した後は光子による電子励起は起きない(厳密には、高いエネルギーを持った電子による他の電子の励起、つまり impact ionization は起こり得る)。

吸収されたエネルギーは続いて電子からフォノンへと移行される。すなわち振動による格子の温度上昇である。金属においては、高いエネルギーの電子から低いエネルギーの格子へのエネルギー移行は two-temperature model によって説明される<sup>[9]</sup>。これは電子系と格子系の温度をそれぞれ定義し、1次元の2温度拡散モデルとして全体の系を捉えたものである。

このモデルは幾つかの仮定を付け加えることで絶縁体にも適用可能であるが<sup>[10]</sup>、電子-フォノンのカップリング以外にも electron trapping や再結合などの過程も考慮に入れなければならない、系は複雑になる<sup>[11]</sup>。特にパルス幅が電子の励起にかかる時間のオーダーに近くなってくると、電子の温度というパラメータを定義すること自体の意味が崩れてくるため、超短パルスの場合にはこのモデルの扱いには注意が必要である。また、レーザーの光強度に関してもこのモデルは制約がある。パルスの光強度が十分に高く、“強い”励起により融解やアブレーションが引き起こされる場合にはこのモデルで正確に表現することができるが、パルス幅が十分に短く電子励起過程が熱過程よりも前に終了する場合で、かつ励起される電子の量もあまり多くない“弱い”励起の場合には、電子からフォノンへのエネルギー移行は遅れを伴う可能性があり、超短パルスによるエネルギー移行を正確に表現するためにはモデルのさらなる進化が必要と思われる<sup>[12]</sup>。

まず前提としてパルス幅が有限の値であり、その中でさらに光軸方向に対しても強度分布を持っていることを考慮すると、光子密度が最も高くなる対物レンズの焦点をパルスの最初の部分が通過する際、光子密度は多光子吸収を起こすには十分高くなく、よって焦点近傍のガラスでさえパルスにとっては透明であり（これが表面アブレーションの場合であればもちろん約4%のフレネル反射は存在するが）そのまま通過する。その直後光子密度は自己収束の臨界密度を一気に超え、自己収束が始まる。このとき多光子吸収の臨界点も超えるため、焦点近傍におけるパルスとガラスとの最初の相互作用である光子から電子へのエネルギー移行が多光子吸収により行われると同時に、自己収束が始まる<sup>[13, 14]</sup>。一方で多光子吸収により束縛電子は自由電子となりプラズマ状態を形成するが、これは逆にパルスをデフォーカスさせる効果をもたらす。つまりこれらのバランスにより光子が吸収され得る領域の大きさが決まってくる<sup>[15]</sup>。光子の吸収は多光子吸収がトリガーとなって始まり、これによって価電子帯から伝導帯へ励起された電子が種となり逆制動輻射による衝突イオン化やトンネルイオン化が次々と起こり電子雪崩となって自由電子が増大していく。加工の際にクラックの発生がみられる場合は、この電子増大が進み過ぎていることが要因と考えられる<sup>[15]</sup>。

パルスが加工領域を通り過ぎたのち、励起された電子は価電子帯に緩和される。この電子-正孔再結合により、バンドギャップ  $E_g$ （シリカガラスの場合 $\sim 8.9$  eV）に相当するエネルギーが格子系の局所的な体積内に移行される。このエネルギーが物質の温度を上昇させ、融解させる。多くの場合は融点どころか沸点も超えるため、この場合には気化することになる。温度が上昇した領域は安定状態から vapor bubble や vapor layer といった新たな相を含む準安定状態へと移行する<sup>[15]</sup>。

フォトンの電子系による吸収過程には多光子吸収とカスケード衝突による逆制動放射の2種類がある。多光子吸収とは、仮想準位を介してバンドギャップに相当するエネルギーになるように複数のフォトンを一度に吸収する現象である。仮想準位とは、電子と1つのフォトンとが相互作用する際にそのフォトンのエネルギーがバンドギャップよりも低い場合、これを吸収することはできないが一時的にとどめておくことのできる現象を表した概念である。フォトンは量子であり、エネルギーと時間のパラメータ間に不確定性を持つ。つまり非常に短い時間であれば本来のエネルギーと大きくずれた量子として振る舞うことができる。このエネルギーの不確かさを利用して、電子は吸収することのできないエネルギーをもったフォトンを受取り励起状態になることができる。ところが励起状態にとどまることはエネルギー保存則から許されない。そのため、この「非常に短い時間」の後には必ずフォト

ンを放出して基底状態に戻る。この時放出される光子は、エネルギー保存則から吸収された光子のエネルギーと同じエネルギーを持つ。つまり不確定性原理により決まる時間以上の時間スケールで観測してもこの吸収過程を見ることはできない。このような遷移を仮想遷移と呼び、このときに使われる準位を仮想準位と呼ぶ。この寿命は振動数の逆数程度であり、800nm の光であれば 2.66fs になる。この仮想準位の寿命の間に次の光子も吸収され、寿命  $1/2\nu$  を持つより高いエネルギー  $2h\nu$  の仮想準位へ励起が起こる。エネルギー準位が上に行くほど準位の間隔が狭くなり、擬似的な連続体となるため光子の吸収が進んでいく。そして結果的にイオン化を起こすために十分な光子数が吸収される。またカスケード衝突とは、光子により励起された自由電子が、集光されたレーザー光による逆制動放射、つまり光子と衝突するたびに吸収していき、原子と衝突するまでに他の電子を自由電子に励起させるのに十分な量の光子を吸収していればこの電子を励起させることを繰り返して自由電子を増大させる現象である。この過程では多光子吸収と異なり比較的長い時間光子のエネルギーを自由電子が蓄えておくことができ、一般的にその寿命は振動励起の周期程度 ( $\sim 100\text{fs}$ ) とされている。つまり多光子吸収よりもその寿命差分は少なくともカスケード衝突による自由電子の生成過程の方が起こりやすいといえることができる。またカスケード衝突には自由電子の移動による電子-原子衝突過程が必要であり、そのため多光子吸収より時間的に遅く起きる。その意味では、これら 2 つの吸収過程が混在する場合には、多光子吸収がトリガー的役割を果たしカスケード衝突によって増倍するという構図になっていると思われる。このように光子の吸収は全く異なる 2 つの過程によって行われ

光子-電子相互作用 (=電子励起) は、そのほとんどが相互作用領域をパルスが通過する間に起きる。これに対して、引き続いて起こる電子-フォノン相互作用 (=格子振動、原子移動を伴わない融解) はパルス到達後から数 ps~数十 ps のオーダーで始まる<sup>[16]</sup>。また原子・分子の動きを伴う物質の改質・アブレーションなどは数 ns~のオーダーで起こる<sup>[16]</sup>。つまりパルス幅が長い、あるいは連続波の場合、最初に届いた光子のエネルギーが既に原子・分子にまで移行が進んでいる中に後続の光子が次々と到達するため、上記の 3 つのプロセスが混在する中で物質の改質が進むが、パルス幅が数十 fs~数百 fs 程度の場合、これら 3 つの素過程が時間的に独立した状態で起こる。つまり光と物質との相互作用を考える上で、超短パルス光を用いることは現象を簡素化することにもつながる。

本報告書では主に 1 パルスのみ照射実験の結果について議論しているが、作製するデバイスによっては複数のパルスを連続して同じ領域に照射する方が都合がよい場合もあり、またそれが必須となる場合もある。このような場合、これら照射されるパルス同士は十分にそのパルス幅が短く、かつパルス間が十分に離れているため、加工領域において互いに影響を及ぼしあうことはできない。つまり多くのパルスを照射したからといって、前のパルスによって励起された電子が後続のパルスの到達まで励起されていることは当然あり得ず、これよりもタイムスケールの長い格子振動や熱拡散でさえ次のパルスの到達までには収束している。つまり、到達するパルスは常に安定状態の物質と相互作用する。しかしこれは、最初のパルスと最後のパルスとが同じ相互作用を起こすという意味にはならない。加工閾値を超えるパルスが 1 つでも通過した後であれば必ず欠陥などが形成され、これによって禁制帯中に新たな電子状態が作られ、多光子吸収に必要な光子数の平均値が減少し、吸収率が增加する。よって連続パルス照射の場合、加工領域の状態のうち吸収に影響を受けるものは、照射パルス数の増加とともに指数関数的な変化を見せる<sup>[17, 18]</sup>。実際、繰返し周波数 1kHz で数秒間の照射を行うと異質相が徐々に濃くなり、屈折率の変化量が大きくなっていることが確認できた。このようなパルスの蓄積効果についてはこれまでも幾つかの報告がなされており、特に繰返し周波数が MHz のオーダーになると熱の蓄積効果も無視できなくなってくるため、加工形状の制御が難しくなるという報告もある<sup>[17, 18]</sup>。さらに、このように熱の蓄積が起こり得る場合、シリカガラスはその低い熱伝導率 (=1.38Wm<sup>-1</sup>

$K^{-1}$ ) と熱膨張率 (ネットワーク構造に依存するがおよそ  $0.55 \times 10^{-6} K^{-1}$  程度) によりその蓄積効果は他の物質の場合に比べて著しいといえる。この蓄積された熱エネルギーは溶融部分に高圧・高温領域を形成し、衝撃波を生む。パルスパワーが極めて高い場合あるいは連続パルス照射の場合、溶融する堆積は大きくなり、中心部分が冷却されるまでにかかる時間が結晶化に必要な時間よりも長くなれば部分的に結晶化するケースもある<sup>[15]</sup>。

レーザーパルスが被加工領域に到達すると、光子のエネルギーはいくつかの非線形吸収過程を介して核内電子に吸収される。このとき電子はその熱容量の小ささにより、一時的に数千度にまで加熱される。加熱された電子は 1-100ps 程度の時間をかけて格子温度を上昇させるが、その時間は electron-phonon coupling の強さに依存して物質ごとに異なってくる。

レーザーパルスをレンズにより集光した場合など、光子を高密度に凝縮させることでその領域中の原子・分子はイオン化されプラズマが発生することが知られている。多数の微小な異質相を狭い領域に加工するためには、各異質相の大きさを正確に制御しなければならず、そのためには発生するプラズマの性質について理解することが非常に重要である。本加工法において特に考えなければならないのは、主にプラズマ内の自由電子密度が極度に増大することでパルス後半の光子が反射されてしまうケースである。

レーザー照射により生成されるプラズマは、レーザーの強度がそれほど強くない場合には電子-電子相互作用は無視できるため、プラズマ中の自由電子の特性はプラズマの吸収と反射によって決定される。Saha の式<sup>[19]</sup>を用いると、自由電子密度  $N_e$  は次式で表すことができる。

$$N_e \sim 5.8 \times 10^{-4} \frac{N_g T_g^{5/4} [K]}{p_g^{1/2} [\text{bar}]} \exp\left(-\frac{E_{ion}}{2k_B T_g}\right) \quad (\text{式. 1})$$

ここで  $T_g$  はプラズマ温度、 $N_g$  は粒子密度、 $E_{ion}$  はイオン化エネルギー、 $p_g$  は圧力であり、理想気体を仮定している。平衡状態では衝突周波数  $\gamma$  は電子と原子 (あるいは分子) との衝突現象に限定して考えることができるため、電子-原子衝突断面積  $\sigma_{ea}$ 、プラズマ粒子密度  $N_p$ 、電子の速度  $v_e$  とすると

$$\gamma \sim \sigma_{ea} N_p v_e \quad (\text{式. 2})$$

と表すことができる。ここで、生じるプラズマの密度がそれほど小さくなく  $\gamma \ll \omega_p$  ( $\omega_p = N_e e^2 / m_e \epsilon_0$  はプラズマ周波数) の近似が適用できる場合、プラズマの吸収係数は

$$\alpha \sim \frac{\gamma \omega_p^2}{\omega^2 c} \sim \frac{N_e N_p}{\omega^2} \sim \lambda^2 \quad (\text{式. 3})$$

となる。このときイオン化の割合はそれほど高くないため、自由電子はレーザーからの光子の供給により直接多光子吸収を起こす。あるいはレーザーによる場で加速された電子の衝突が引き起こす衝突イオン化 (impact ionization) がメインのチャンネルとなり増大していく。被加工領域にポイドでなく異質相を形成する場合は、照射されるレーザーの強度は比較的低くしなければならず、プラズマの吸収係数は上記の条件を満たしていると考えられる。このときプラズマによりパルス後半の光子が反射される影響は無視することができ、現象はより簡単にモデリングすることができる。

これに対しレーザーの強度が非常に高い場合、プラズマの生じた領域にあるほぼ全ての原子・分子はイオン化した状態にあり、電子温度と原子温度が著しく異なる非平衡状態となる。このとき主要なイオン化チャンネルは逆制動輻射 (inverse Bremsstrahlung) であり、プラズマ吸収係数は

$$\alpha \sim B \lambda^3 \frac{Z^2 N_i N_e}{T_p^{1/2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\hbar \omega}{k_B T_p}\right) \right] \sim \lambda^3 \quad (\text{式. 4})$$



となる。

## 2-2) シリカガラス

ここまでパルスを構成する光子を中心として相互作用について議論してきたが、ここからは物質側であるシリカガラスを主体としてこの相互作用について考えてみる。フェムト秒パルスレーザーによる加工はガラスに限らず、レーザーの波長よりも吸収端が短波長側にある物質であれば原理的にはなんでも加工可能である。実際本加工法はガラスに限らずアクリルなどの樹脂類にも適用できることが確認されているが、ここではシリカガラスを対象を限定する。

シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) は地球上の岩石の 95%以上を形成しており、自然界に存在する最も豊富な物質のひとつである。また産業界においても  $\text{SiO}_2$  は金属酸化物半導体になくはならない物質である。このような背景から、これまで合成石英ガラスに関する様々な理論的<sup>[20, 22]</sup>・実験的<sup>[22-24]</sup>研究がおこなわれてきた。特に分子構造、相転移、高圧化での振る舞い、optical breakdown、アブレーションなどに関する研究がさかんである。特に結晶やアモルファスなど数多くの状態を持つシリカガラスは、圧力および温度に対して複雑な振る舞いをする。フェムト秒パルスレーザーがシリカガラスに照射される際には、圧力や温度は局所的に急激に変化するため、現象はさらに複雑になる。

## 3) 実験装置及び加工方法

本加工法に用いたフェムト秒パルスレーザーの外観を図 3-1-2-(2)-(c)-3、3-1-2-(2)-(c)-4 に、光学系概略図を図 3-1-2-(2)-(c)-5 および図 3-1-2-(2)-(c)-6 に示した。概略図中央は増幅部であり、真空チャンバー内に設置されたチタンサファイア結晶を中心に 2 つのミラーが設置され、1~9 パスまでの光路が結晶を通過するマルチパス方式をとっている。1~4 パスはオシレータ光の 80MHz のままであり、目視による確認が可能である。その後レーザー光はポッケルスセルと呼ばれる光スイッチング E/O 変調器および偏光板を通じて Q スイッチがかけられる。4 パスまでは横偏光であり、ポッケルスセルに  $\pi/2$  だけ位相差が生じるように電圧をかけておくと、反射光もまた  $\pi/2$  位相がずれるため、最終的に半周期分の位相がずれ、ポッケルスセル直前に置かれた偏光子を再び通過することはできない。ここに反転分布が最大となるタイミングに合わせてパルスジェネレータにより電圧を取り除くトリガーをかけることで発振が始まり強力なパルスを得ることができる。本装置で用いているパルスジェネレータは 1Hz、10Hz、100Hz、1kHz の 4 種類に設定可能であり、したがってレーザーの繰返し周波数もこの 4 種類に設定可能である。

光軸調整は以下のような手順で行った。

- (1) オシレータ (図 3-1-2-(2)-(c)-5 中の Femtosource) 内のミラーを調整し、連続発振・モードロックいずれのモードでも適切な出力 (連続発振時 800mW、モードロック時 550mW 以上) が得られるようにした。
- (2) オシレータ光を M04 および M0 ミラーにより二軸調整し、増幅部に導入した。
- (3) M1、M2 ミラー上に見える 1 パス~4 パスのオシレータ光のスポット位置を確認しながら、それらが適切な位置にくるように、かつ A1、A2 スリットおよびチタンサファイア結晶中央部を通過するように M04、M0、M4、M6 ミラーを調整した。チタンサファイア結晶チャンバー内は常時真空引きされているが、図 3-1-2-(2)-(c)-7 のように水滴が付着することもあるため、付着が生じた場合にはこれを拭き取る。
- (4) 5 パス~8 パスの光軸を M9 ミラーにより調整した。
- (5) 9 パスの光軸を M11、M12、M13、M14 ミラーにより調整し、圧縮部にオシレータ光が導入されるのを確認した。
- (6) ポライザ Pol2 により 5 パス以降の横偏光を全てカットした。
- (7) ポンプ光 Nd:YLF がチタンサファイア結晶および M1 ミラーの適切な位置に入射するように M19 および M20 ミラーで二軸調整を行った。

- (8) ポンプ光の出力を 7W にし、2 パスのオシレータ光をフォトダイオード PD3 に入射させて 30 倍に増幅されるように M04、M0、M4、M6 ミラーを調整した。同様に 4 パスのオシレータ光が 1000 倍に増幅されるように上記ミラーを再調整した。
- (9) ポンプ光の出力を 23.3A まで上げ、圧縮部入口において 500mW 程度の出力が得られるようにオシレータ光およびポンプ光の光軸を再調整した。ただしポンプ光の劣化によりこの電流値で十分な出力が得られなくなってきた場合には最大 32A まで上げて調整を行った。この際、M21 と M1 の間に衝立をはさみ、M21 で反射されたポンプ光の成分はカットした。
- (10) M21 と M1 の間の衝立を取り除き、出力が 1W 得られることを確認した。

出力がモードロック時で 550mW 以上、中心波長は 809nm（半値幅は 106nm）になるように以上のような光軸調整を定期的に行った。

用いたホログラムは、ホログラム 01～05 は正方形で縦横 8mm、ホログラム 06～11 は円形で直径 8mm である。後半のホログラムの形状を変えた理由は、レーザーパルスの光軸に垂直な方向の断面形状が直径 8mm の円形であり、ホログラムもこれに合わせることでより効率的に光を利用するためである。本報告書で使われるホログラム一覧は表 1 にまとめた。

## 4) 結果と考察

### 4-1) レンズのみによる加工

#### 4-1-1) 逐次描画加工実験

三次元一括加工法ではフェムト秒パルスレーザーと被加工物質の他にホログラムと対物レンズが必要である。ホログラムはパルスの位相分布の制御のために用いられ、対物レンズは結像領域における光強度(=光子密度)を十分に上げるために光を縮小するデバイスとして用いられる。これら2つの素子を含んだ系の3次元位相分布は非常に複雑になる。そこでまず対物レンズだけを用いて加工試験を行い、レーザーパルスと物質との相互作用について確認した。

まず目視で確認できる程度の比較的大きなサイズの加工試験を行った。レーザーのパルス幅は66fs、パルスパワーは820 $\mu$ J/pulse、繰り返し周波数は1kHzで、用いたサンプルは合成石英ガラス(東ソー:ESグレード2面研磨、25 $\times$ 25 $\times$ 3mm)である。図3-1-2-(2)-(c)-8は加工ステージを動かしながらレーザーを連続照射する逐次描画法で一辺が2mmの立方体枠型に加工した例である。このように対物レンズのみで集光させた場合、意図する深さに3次元的な異質相を形成できることを確認した。ただしここで行った条件での逐次加工の場合、ステージを動かす速さをおよそ1mm/secより速くすると加工領域は目視で確認することができなかった。これは、同一または非常に近い位置に複数のパルスを照射することで加工領域の性質、特に屈折率が変化していることを示している。図3-1-2-(2)-(c)-2に示したようにそれぞれの相互作用のタイムスケールと照らし合わせて考えてみても、パルス光と物質との相互作用が全て完了してからおよそ1ms後に次のパルスが到達するため、前後するパルス同士が影響を及ぼし合うことは考えられない。よって、最初のパルスによって加工された領域の屈折率変化は目視するには十分ではなく、後続のパルスがこの加工領域にある程度重なることで、より大きな屈折率変化をもたらしていると推測される。ここでの加工条件では、1パルスで加工される領域の大きさは光軸方向に垂直な面でおおよそ30 $\mu$ mであるため、前述のステージ速度で考えると同一箇所に30発のパルスが照射されて初めて目視で確認できるほどの屈折率変化をもたらしていることになる。しかし本プロジェクトで作製しなければならない異質相は屈折率変化 $\Delta n$ が0.015もあれば十分であり、この場合は1ヶ所に1パルスの1/1000程度の光が照射されれば十分なレベルである。このことから3次元一括加工法によって理論上は1000個の異質相を1パルスで加工可能なことが分かる。

#### 4-1-2) 表面アブレーション実験

表面に対物レンズの焦点を合わせアブレーションを起こさせた場合の、加工形状と照射パルス数との関係について調べた。図x022は左から1kHz、100Hz、10Hz、1Hzでそれぞれ1秒間照射した(つまりそれぞれ1000、100、10、1パルス照射した)場合の光学顕微鏡で見たアブレーション形状である。通常、連続波のレーザーを用いると熱的影響の及ぶ範囲に熔融による境界の不明瞭な加工痕ができてしまうが、フェムト秒パルスレーザーの場合熱拡散が起きる前にフォトンの供給がなくなるため、熱による変形を最小限に抑えられていることが確認できる。また照射パルス数に比例してアブレーション半径が大きくなっているのが確認できる。これは後続のパルスが加工領域に到達する際にはすでに前のパルスによってアブレーション加工がされており、アブレーション加工された領域はそのラフネスおよび化学的变化によって屈折率の変化した状態になっているため、新たな加工を生じさせていると考えられる。この効果により後続のパルスはアブレーション

ションをさらに拡げていくが、その影響が及ぶ範囲は限定的であるため、ここでは示されていないがさらに数万パルス照射するとアブレーション半径は飽和する。また、1パルスのみ照射した場合はこの図からは加工が確認できないが、レーザーのパルスパワーは加工閾値を超えているため、1パルスだけでも加工はできるはずである。よって倍率を上げなければ見えないほど小さい加工か、あるいは加工の際のシャッタを切るタイミングとパルスの周期との同期がとれておらずにパルスが到達していなかった可能性が考えられる。

この加工サンプルは側面を光学研磨することで側面からの観察も可能にした。これにより、アブレーション半径だけでなく深さも照射パルス数に比例して深くなっていることが分かる。1000パルスの場合はアスペクト比およそ4であるが100パルスでは1程度である。深さのパルス数依存性についても数万パルスでの飽和を確認した。このような傾向はホログラムを介した加工でも同様に見られると思われるため、照射するパルス数は加工形状を最適化するために重要なパラメータのひとつであることが分かる。

また、このアブレーションテストを行った時点でのビームの質はあまりいいとは言えず、これによりアブレーション形状はきれいな正円を描いていない。そこでビームエキスパンダーを光路上に設置しビーム半径を上げた上で、その中心近傍の比較的強度プロファイルが整った部分を用い、外側をしぼりによって取り除いてビーム整形を行った。これによりビームの強度プロファイル（横モード）は図3-1-2-(2)-(c)-9のようになった。なおM5の対物レンズ（焦点距離10mm）を使用し、ガラスサンプルの表面からの反射光をCCDカメラにて観察した。しぼりとの干渉により同心円状の干渉模様が生じており、これによりシングルモードのビームよりも空間的コヒーレンスが悪くなっている影響は考えられるが、一方でホログラムを計算する際には入力光としてフラットな強度分布を想定しているため、その意味ではこのハイハット型に近い強度分布はより忠実な再生像を結像する可能性はある。以降の加工試験は主にこの強度分布にて行っている。

ここで行ったアブレーション試験をさらにすすめて、ソーダライムガラスおよびシリカガラスにパルスパワーを変えながら同様のアブレーション試験を行い、パルスパワーとアブレーション形状との相関を調べた。このうちソーダライムガラスに照射した結果を図3-1-2-(2)-(c)-10に示した。照射パルスパワーが減少するにしたがってアブレーション半径およびアブレーション深度が減少しているのが確認できる。アブレーション半径  $d_{abl}$  とパルスパワー  $E$  との関係は次式で表すことができる。

$$d_{abl}^2 = \frac{1}{2} d_w^2 (\ln E - \ln E_{thr}) \quad (\text{eq. x8})$$

ここで  $d_w$  はビームウエスト、 $E_{thr}$  はアブレーション閾値であり、アブレーション半径が0のときのパルスパワーに等しい。よってアブレーション半径の2乗とパルスパワーの自然対数とは比例関係にあることが予想されるため、これをグラフ化してみたのが図3-1-2-(2)-(c)-11である。予想通りの比例関係を確認することができる。このグラフからアブレーション半径が0のときのパルスパワーの値を外挿してみると、ソーダライムガラスでは  $E_{thr} = 1.7 \mu\text{J/pulse}$ 、合成石英ガラスでは  $E_{thr} = 2.1 \mu\text{J/pulse}$  となる。合成石英ガラスについては過去に同様の実験が行われており<sup>[24]</sup>、グラフ中に示したように今回の我々の結果とよく一致している。ただしこれよりも高出力の状態で照射すると、もはやパワーとアブレーション半径との関係は単なる比例ではなく、下に凸の曲線を描く。

また、アブレーション深度はパルスパワー  $I$  が光子吸収により減衰していく次式によって表わされる。

$$dI = -\alpha_1 I dz - \alpha_2 I^2 dz - \alpha_3 I^3 dz - \dots$$

(式. 9)

ここで  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、はそれぞれ 1 光子吸収係数、2 光子吸収係数、3 光子吸収係数である。1 光子吸収のみが起きているとすると式 x9 より

$$L = \frac{1}{\alpha_1} (\ln I - \ln I_{thr})$$

(式. 10)

ただし  $I_{thr}$  はアブレーション閾値である。同様に 2 光子吸収のみを考慮する場合は

$$L = \frac{1}{\alpha_2} \left( \frac{1}{I_{thr}} - \frac{1}{I} \right)$$

(式. 11)

3 光子吸収のみを考慮する場合は

$$L = \frac{1}{\alpha_3} \left( \frac{1}{I_{thr}^2} - \frac{1}{I^2} \right)$$

(式. 12)

となる。実際にアブレーション加工試験を行い深度をプロットしたものが図 3-1-2-(2)-(c)-12 である。パルスパワーが増加するにしたがってアブレーション深度が大きくなっていることは確認できるが、何光子吸収が主なチャンネルになっているかは判別がつきにくい。式 10-12 の曲線は  $I-L$  でグラフ化すると全て上に凸の曲線となってしまう、カーブフィッティングをしなければ各チャンネルの重みが分からないためである。そこで次のようにして 1 光子、2 光子、3 光子、あるいはそれ以上の多光子吸収のいずれがメインのチャンネルになっているかを判断する。まず 1 光子吸収のみが起きている場合は、 $I$  を対数でとることにより  $L$  と直線関係になり、その傾きの逆数から 1 光子吸収係数を求めることができる。しかし図 3-1-2-(2)-(c)-12 の横軸を対数にとると、直線ではなく下に凸の曲線となってしまう。よって支配的なチャンネルは 1 光子吸収ではなく 2 光子以上の多光子吸収であると推測できる。次に式 11、12 の定数項を除いて両辺の対数をとると、それぞれ

$$\ln L = \ln I + \ln \alpha_2$$

(式. 13)

$$\ln L = 2 \ln I + \ln \alpha_3$$

(式. 14)

となる。つまり両対数でプロットすると、その傾きが 1 に近ければ 2 光子吸収、2 に近ければ 3 光子吸収がメインのチャンネルとなることがわかる。そこで図 3-1-2-(2)-(c)-12 のグラフを両対数でプロットしてみたところ図 3-1-2-(2)-(c)-13 のようになり、ホログラムの有無にかかわらずその傾きは 1 に近いことが判明した。このことから今回の実験条件では主に 2 光子吸収によりアブレーションが形成されていたことが明らかとなった。ここで用いたソーダライムガラスは波長 800nm の光による 2 光子吸収のエネルギーに等しい 400nm 付近でシリカガラスよりも若干吸収が大きいことも、この結果を裏付けるものといえる。ただし、このフィッティングは自由電子の生成が多光子吸収のみで起きていると仮定した場合の話である。実際には多光子吸収だけでなく電子雪崩による二次的な増大も起こり得るため、特に後者による自由電子生成の割合が高くなる比較的広いハルス幅の場合にはこの仮定が成り立たなくなることに注意したい。

この結果をホログラムの有無で比較するため、ホログラムを用いない前述の実験との比較を容易にするため、1 点のみに集光するホログラム 04 を用いて同様の実験を行った。これらの結果を比較してみると、ホログラムを用いた場合の方がアブレーション深度は小さい。これには 2 つの

要因が挙げられる。1 つはホログラムの回折効率に起因するものである。今回用いたホログラムは 1 ドットに集光するだけのものであり、回折効率はホログラムの中では高い方であると推測されるが、それでもホログラムを通した後のレーザー強度は約 30%にまで落ちている。回折効率が落ちるということは、それだけアブレーションに使われるフォトン数が減っていることになる。

もう 1 つの要因は NA 値の違いによるものである。フレネルレンズ型ホログラムを通した場合、ホログラムなしの場合よりも NA 値が高くなる。つまりビーム径の  $z$  依存性が大きいため、フルエンスつまり光子密度も速く減衰する。これらの効果を確認するため、ホログラムの回折効率を 30% とし、これによるフルエンスの減少を考慮したグラフに書き直したものを図 3-1-2-(2)-(c)-14 に示した。この図を見ると明らかなように、アブレーション深度はフルエンスの関数であることが分かる。つまりホログラムの有無に関わらず、加工領域に到達したビームの光子密度により加工深さが決定されることが判明した。

このように光子密度でアブレーション現象を捉える場合、式 9 について再考してみる必要がある。この式では光の減衰が物質への吸収のみで起きているとしているが、対物レンズを用いて集光しているため、レンズの NA による光の減衰についても考慮しなければならない。レンズにより集光することによる  $z$  方向の強度変化は

$$I(z) = \frac{w^2}{r^2} I = \frac{w^2 NA^2}{z^2(1 - NA^2)} \quad (\text{式. 16})$$

と表わされる。ここで  $w$  はビームウエストである。この項を式 x9 に挿入すると

$$\frac{dI}{dz} = -\frac{2w^2 NA^2}{z^3(1 - NA^2)} - \alpha I - \beta I^2 - \dots \quad (\text{式. 17})$$

$I_2$  以上の項は非常に小さいと仮定してこの式を  $I$  について解くと

$$I = \frac{e^{\alpha L} I_{th}}{1 - \frac{2w^2 NA^2}{1 - NA^2} \int_0^L \frac{e^{\alpha z}}{z^3} dz} \quad (\text{式. 18})$$

となる。この式により得られる計算結果を実測値と比較したものが図 3-1-2-(2)-(c)-15 である。式 18 の解を求める際に 2 光子以上の吸収過程を非常に小さいとして無視しているため実測値との乖離が見られると予想していたが、実際には非常に良くフィッティングすることができた。これは 2 光子以上の吸収過程の効果をフィッティングパラメータだけで吸収できてしまった可能性もあるが、実際に  $I$  の 1 乗に比例する項がアブレーション深度を決定付けていると捉えることもできる。もちろん、アブレーション加工が起きるためには、そのトリガーとして必ず 5~6 光子による多光子吸収が起きなくてはならない。しかし自由電子の生成チャンネルには、既に生成された自由電子がレーザー場（あるいは新たな光子の衝突）からエネルギーを得て他の電子を励起させる逆制動放射（あるいは衝突イオン化）も存在する。これらはパルス強度の 1 乗に比例するため、自由電子の多くがこれらのチャンネルによって生成されていると考えれば、図 3-1-2-(2)-(c)-15 のフィッティングも説明できる。つまりこの結果から、多光子吸収過程は加工の種となる自由電子を生成し、これが逆制動放射あるいは衝突イオン化によって電子雪崩を引き起こし、自由電子が増大している可能性が示唆された。

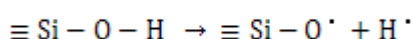
ここまでのアブレーション試験の結果を見てみると、シリカガラスとソーダライムガラスとでアブレーション深度にほとんど差がないことが分かる。特に閾値はほぼ同じ値となっている。これはソー

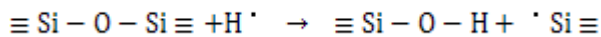
ドライムガラスの方がシリカガラスに比べて加工されやすいという一般的な認識とは異なる結果である。これはアブレーションの閾値が、発生するプラズマの臨界密度によって特徴づけられており、この臨界密度は照射する物質の性質に依らず光の波長のみで決まってくることに起因する。

加工の閾値については、議論しておくべき点が他にも幾つかある。まずは「加工の閾値」とは何か、という定義の問題である。正確には、物質内に何かしらの物理的・化学的变化が起きれば加工はされているわけであり、その意味ではたった 1 つの電子が多光子吸収により自由電子になれば加工されたということもできる。しかし一般的には、光が照射された領域を光学顕微鏡を用いて観察し、非照射領域との違いが確認できたところを閾値として扱っているケースが多い。つまりある程度の屈折率の変化が必要であり、そのためにはある程度の構成原子の移動が必要である。次に「加工の閾値」の持つ意味であるが、この閾値が高いことは当然その物質が加工されにくいことを意味する。光で物質を加工する場合、比較的長いパルス幅の照射では加工のされやすさは電子から原子へのエネルギーの移行しやすさが大きく影響してくる。これは長いパルス幅の場合、パルスが相互作用領域を通過している最中に、電子から原子へのエネルギー移行も同時に行われており、これによって電子雪崩のために必要な余分なエネルギーを持った自由電子が減少してしまうためである。またパルス強度の時間依存性がガウシアンに近い形状をしているために、閾値を超える一定量の光子を確保するためにはパルス幅が長い場合にはそれだけピークパワーが高くならなければならない。これら 2 つの効果により、シリカガラスの場合加工閾値はパルス幅  $\tau$  に対して  $\tau^{0.502}$  の依存性を持つことが明らかとなっている<sup>[29]</sup>。他の一般的なガラスでも  $\tau^{0.3} \sim \tau^{0.6}$  の範囲での依存が確認されている<sup>[23]</sup>。

#### 4-1-3) 内部加工試験

次に前述の M5 レンズ（焦点距離 35mm）および M20 レンズ（焦点距離 10mm）の 2 種類のレンズを用いて内部加工試験を行った。レーザーの条件はパルス幅 66fs、繰り返し周波数 1kHz、照射時間 1s である。被加工サンプルはソーダライムガラスであり、加工深さは 1400  $\mu\text{m}$  である。加工したサンプルを光軸に対して垂直な向きから光学顕微鏡により観察したものを図 3-1-2-(2)-(c)-16 に示す（図上方がレーザー光源方向）。図 3-1-2-(2)-(c)-17 左は 205  $\mu\text{J/pulse}$  のパワーで照射した場合の加工形状である。ガラス内部においてクラックを伴ったボイドが形成されているのが分かる。またその上方に茶色く変色した異質相も確認された。パワーを 100  $\mu\text{J/pulse}$  にまで落とすことでこの異質相は見られなくなる。さらにパワーを 55  $\mu\text{J/pulse}$  にまで落とすと、被加工領域の様子は一変する。それまでのような光路外の部分にまでおよぶ破壊とは異なり、 $\phi 5 \mu\text{m}$  内に密度の偏りによると思われる縞模様が形成される。これらの異質相は閾値の異なる別の加工と定義することができる。加工のメカニズムも全く異なっており、ボイドは非常に高い電子密度により加工部分がプラズマ状態となり、熔融状態を経た後にボイドとなる。シリカガラスの場合にはボイド周辺に Si 密度の高いシェルが作られているため、おそらくボイドには酸素が充満しているものと思われる。茶色に変色した異質相は特にソーダライムガラスのように吸収端が比較的長波長側に伸びているガラスにおいて発生しやすい。加工される位置は、加工点のボイド上端より上側が主である。吸収端が長波長側に伸びたガラスでは Si-O-Si ネットワーク密度は低く、OH 基やハロゲン元素、あるいは様々な欠陥などによる終端が高い密度で存在する。特に OH 基がイオン化される場合、次式で示すような過程を経てカラーセンターを作ることが知られている。





(式. 15)

ソーダ石灰ガラスの場合には OH 基濃度が高いため、これによって着色がみられたと考えられる。また縞模様のように観察された異質相は本来作製しようとしている異質相に最も近く、ボイドの発生や着色を伴わずに原子の偏りにより屈折率を変化させていると思われる。加工により形成される異質相はこのように照射するパルスのパラメータに大きく依存してくるため、作製したい異質相の種類を考えながらパルスのパラメータを決める必要がある。

このように異質相といっても様々な種類があり、さらにそれぞれの異質相でどのような変化が起きているかについては未だ明らかにされていない部分が多い。そこでまず、もっとも変化が大きいと思われるボイドについて顕微ラマン測定法を用いて性質を調べた。サンプルはシリカガラス表面から  $20\mu\text{m}$  の深さに  $1\text{mm}$  角の広さで千鳥格子に異質相を並べて作製した。用いた対物レンズは 90 倍で、光源である波長  $514.5\text{nm}$  Ar<sup>+</sup>レーザーのビーム径は  $1\mu\text{m}$ 、レーザーパワーは  $100\text{mW}$ 、クロススリットは  $200\mu\text{m}$  とした。得られたスペクトルを図 3-1-2-(2)-(c)-52 に、フィッティング結果を図 3-1-2-(2)-(c)-18 および表 3 に示す。これによると、加工部・非加工部ともに石英ガラス中のランダムネットワークに由来するラマンバンド ( $460$ 、 $800$ 、 $1060$ 、 $1200\text{cm}^{-1}$  付近) と 3 員環および 4 員環構造に由来する比較的シャープなラマン線 ( $600$  および  $495\text{cm}^{-1}$  付近) が確認できる。ピーク強度比をグラフで比較したものを図 3-1-2-(2)-(c)-19 に、ピーク波数を比較したものを図 3-1-2-(2)-(c)-20 に示した。加工部では非加工部よりも 3 員環および 4 員環構造に由来するラマン線が相対的に大きく観測されていることから、構造中に含まれる 3 員環および 4 員環構造の割合が大きくなっていることがわかる。またガラスの結晶化の際に見られるシャープなラマン線は観測されていないことから、異質相における結晶化は起こっていないものと思われる。ピーク波数についてみると、加工することでピーク波数が高波数側にシフトしているのが確認できる。一般的に、物質に応力が生じると観測されるその応力に応じてラマン線のピーク波数がシフトすることが知られている。圧縮応力が生じている場合には高波数側、引っ張り応力が生じている場合は低波数側にシフトする。このことを考慮すると、加工部では非加工部と比較して大きな圧縮応力が生じたものと思われる。加工部周辺の Si 濃度が高くなることとこの結果をあわせて考えると、ボイドが形成されるほどの高フルエンスのレーザー照射の場合、フォトンの吸収によって自由電子が爆発的に形成されそのエネルギーが原子に吸収されると、その過程がどういう形であれ最終的に加工領域の外殻部にネットワーク密度の高い領域が形成されていると推測される。また同時にラマンスペクトルのベースラインが高波数側で上昇して観測されていることから、異質相による蛍光が増加していると考えられる。これは加工により新たに生じた欠陥構造による可能性が高い。ただし顕微ラマンによる測定では顕微鏡で焦点をあわせた位置から数~数十  $\mu\text{m}$  の深さ領域の平均情報を取得しているものと考えられるため、純粋に異質相だけのスペクトルとなるとこれよりもさらに顕著に変化が見えるものと思われる。

ここで行った加工試験は非常に高いパルスパワーを用いることでクラックが発生したものや広い範囲での着色なども見られたが、原子の偏りのみで異質相を作製する場合は、対物レンズの Rayleigh 長とビームウエストとで作られる空間のうち加工閾値を超える領域のみが加工される。つまり加工される領域のアスペクト比は、対物レンズによって決まってくるこれら 2 つのパラメータに大きく依存することになる。次章で触れるホログラムを用いた加工ではこのようなアスペクト比の制約は一切なく、各異質相を自由な形状で設計・加工可能である。さらに加工可能領域も、対物レンズの場合には焦点を中心とした上記空間内においてのみ可能であるが、ホログラムを用いた場合、加工点の中心は加工閾値を超えることが可能な範囲内であればどこにでも設計可能である。これらは 3 次元一括加工法の大きな利点であり、ユニークな特徴であるといえる。



また、ここで行った加工は繰返し周波数 1Hz で 1 秒間の照射、つまり 1 つのパルスのみを加工点に照射している。ここで繰返し周波数を 1kHz に変えて数秒間の照射を行った連続パルス照射の場合について考えてみる。これらのパルス同士は十分にそのパルス幅が短いため、加工領域において互いに影響を及ぼしあうことはできない。つまり多くのパルスを照射したからといって、前のパルスによって励起された電子が後続のパルスの到達まで励起されていることは当然あり得ず、これよりもタイムスケールの長い格子振動や熱拡散でさえ次のパルスの到達までには収束している。つまり、到達するパルスは常に安定状態の物質と相互作用する。しかしこれは、最初のパルスと最後のパルスとが同じ相互作用を起こすという意味にはならない。加工閾値を超えるパルスが 1 つでも通過した後であれば必ず欠陥などが形成され、これによって禁制帯中に新たな電子状態が作られ、多光子吸収に必要な光子数の平均値が減少し、吸収率が増加する。よって連続パルス照射の場合、加工領域の状態のうち吸収に影響を受けるものは、照射パルス数の増加とともに指数関数的な変化を見せる。実際、繰返し周波数 1kHz で数秒間の照射を行うと異質相が徐々に濃くなり、屈折率の変化量が大きくなっていることが確認できた。このようなパルスの蓄積効果についてはこれまでも幾つかの報告がなされており、特に繰返し周波数が MHz のオーダーになると熱の蓄積効果も無視できなくなってくるため、加工形状の制御が難しくなるという報告もある<sup>[17,18]</sup>。さらに、このように熱の蓄積が起こり得る場合、シリカガラスはその低い熱伝導率 (=1.38Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) と熱膨張率 (ネットワーク構造に依存するがおよそ 0.55×10<sup>-6</sup>K<sup>-1</sup>程度) によりその蓄積効果は他の物質の場合に比べて著しいといえる。

#### 4-2) ホログラムを用いた 2 次加工

##### 4-2-1) ホログラム再生シミュレータ

ホログラムを用いたフェムト秒パルスレーザーによる 3 次元加工システムにおいて、加工の結果得られた加工精度などの情報をホログラム作製サイドにフィードバックすることは、異質相形状の計算値と測定値との差を遡減させる上で非常に重要である。そのためには、再生イメージからホログラムの干渉模様を計算するシミュレータを用いることで、より精度の高い再生イメージを得るためにホログラムに対しどのような変更を加えるべきかを把握することが必須となる。ここでは、このシミュレータの前段階として作成した振幅ホログラム再生シミュレータの詳細および再生結果について記述する。

今回作成した振幅ホログラム再生シミュレータは、ホログラム上の各点からスクリーンに伝搬した光の強度分布を求め、それをホログラム全体について積分することでスクリーン上の干渉模様を計算するという、Huygens-Fresnel の原理<sup>[25]</sup>に基づいたアルゴリズムを用いている。これを式で表すと、スクリーン上の任意の点 (X, Y) における光の強度は以下になる。

$$I = A \int \frac{\delta(x, y) \exp[ik\sqrt{R^2 + (X-x)^2 + (Y-y)^2}]}{\sqrt{R^2 + (X-x)^2 + (Y-y)^2}} dx dy$$

(式. 5)

ただし x, y はホログラム上の座標であり、 $\delta(x, y)$  は光がホログラムのその点を通り得る場合に 1、通り得ない場合には 0 となるデルタ関数、A は入射光の強度を決定する任意係数である。

ユーザーインターフェースの外観を図 3-1-2-(2)-(c)-21 に示した。入力値はスクリーンの大きさ、ホログラム-スクリーン間距離 R[mm]の最小値 R<sub>min</sub>、最大値 R<sub>max</sub>、刻み幅 ΔR、2 次元のホログラムパターンである。ホログラムパターン上の白いセルは光を通す部分に相当する。出力は ΔR ごとのスクリーン上のパターンとして右側のピクチャボックスに表示されていく。また [amp] の値を

変更することで入射光の強度を変え、その計算結果を即時に確認することが可能となっている。

図 3-1-2-(2)-(c)-22 および 3-1-2-(2)-(c)-23 に示したのは単純な方形スリットを入力ホログラムとしたときの再生イメージである。中央の 0 次光の周辺に  $1/2\pi$ 、 $3/2\pi$ 、 $5/2\pi$ ……の位置を中心に干渉模様を確認することができる。

#### 4-2-2) ビームプロファイラによる再生テスト

フェムト秒パルスレーザーとホログラムを用いた 3 次元一括加工を行うためには、まずホログラムが意図する再生像を再生しているかどうか、簡単な光学系を用いて手軽に確認できる必要がある。そのためこれを実現することのできる光学系を構築した (図 3-1-2-(2)-(c)-24)。光源には波長 633nm の He-Ne レーザーを用いた。ホログラムが 8mm×8mm の大きさであるのに対し、光源から得られるビーム径が 3mm 程度しかなかったため、ビームエキスパンダーを挿入することで約 5mm までビーム径を拡げた。その後ろにアパーチャーおよび ND フィルタを挿入しビームの調整を行った上でホログラムを通した再生像を得た。

再生試験に用いたホログラムは合計 8 個で、このうち 2 つがフーリエ変換ホログラム (ホログラム 01、02)、残り 6 つがフレネル変換ホログラム (ホログラム 03~08) である。このうちフーリエ変換ホログラムの再生像を図 3-1-2-(2)-(c)-25 および 3-1-2-(2)-(c)-26 に示した。中央に見えている明るいスポットは 0 次光である。この 0 次光をはさんで物体像と共役像が確認できた。このアルゴリズムにより作製したホログラムは無遠で結像するように作られているため、ホログラムとスクリーンとの間の距離を任意に変えても像の大きさが変わるだけで同じ形の再生像を見ることができた。

フレネル変換ホログラムの設計図と実際にビームプロファイラにより得られた再生像との比較を図 3-1-2-(2)-(c)-27 にまとめた。異なる大きさのドットを表現したホログラム 05 とライン形状のホログラム 07 を除けばほぼ設計通りの再生像が得られていることが分かる。ただし入射したビームの強度プロファイル (横モード) が理想的ではないため、背景に同心円状の光が見えてしまっている。この背景光はおそらくビームエキスパンダーを通したときに生じているものと考えられるため、できればもともと径の大きなレーザーで再生させる方がよい。この同心円の分布が偶然にもハイハット型に近い強度プロファイルを実現させており、これはある意味設計時の入射光がフラットな強度を持っていることを考えると、通常の高ス分布の場合よりはよい再生像を結像している可能性も考えられる。いずれにせよこの同心円状の背景光がライン形状の集光を邪魔している可能性は考えられるが、ホログラム 05 の結果と併せて考えると、単に出来る限り小さいドットに集光する場合に比べて、縦横にある程度の長さを持つ形状に集光することに困難があるように思われる。

また、ここで行った再生試験では光軸方向への像の伸びについては検証することができなかった。特にホログラム 03 は 3 つの面にそれぞれ異なる再生像を結像することのできるホログラムであるため、光軸方向の分解能の高い方法で再生検証を行うべきである。

#### 4-2-3) フレネル変換ホログラムを用いた 2 次元一括加工試験

フェムト秒レーザーとホログラムを用いた 3 次元一括加工では、特に光軸方向に関する設計や強度プロファイル調整が非常に難しい。そこでまず光軸方向に関しては無視できる 2 次元ホログラムを用いて加工試験および加工条件の最適化を行った。

最初に用いたホログラムは 5×5 の 25 点を同一平面内に結像させるホログラム 08 である。パルス幅 66fs、パルスパワー 820 μJ/pulse、繰り返し周波数 1kHz、照射時間 1s で照射した結果、表面から 350 μm の深さに最も顕著に加工された。図 3-1-2-(2)-(c)-28 はこの深さに焦点を合わせて光学顕微鏡により観察したものである。なお、サンプルの位置合わせに用いている波長 633nm 半導体レーザーの焦点はサンプル表面に合わせてある。この波長は加工に用いるレーザーの波長に比べて短いため、対物レンズを通すと手前に結像する。これは色収差と呼ばれる現象で、物質の屈折率が波長に依存して変化することに由来する。つまり波長 633nm のレーザー焦点より深い位置に波長 800nm のレーザーが結像することはこれに矛盾しないが、これによる差はレンズの作動距離にも依存するが数 μm 程度であり、350 μm という深さの差の説明はつかない。対物レンズを用いた加工ではこの現象は説明がつかないため、ホログラムによってもたらされたものと推測される。この推測の妥当性については 4-3 節で議論する。25 個の各ドットには濃淡の差がみられるが、この加工を行った時点ではまだレーザーの強度プロファイルむらが顕著に見られたため、それが原因であると思われる。

異質相の大きさはそれぞれ直径約 5 μm、また両端 2 点間距離が 50 μm、となっている。設計上これらの値はそれぞれ 128 μm、2688 μm である。両端 2 点間距離で縮小率を見積もると、約 1/54 に縮小されているのが分かる。ここで用いている対物レンズは M5（光学的鏡筒長 210mm）のレンズである。よって焦点距離  $f$  は

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{f}$$

$$r_1 = 5r_2 = 210$$

(式. 6)

とな  $\therefore f = 35[\text{mm}]$  る。この値を用いることで、実際の倍率  $\beta$  は次式によって算出される。

$$b = a - f \frac{\beta + 1}{\beta}$$

(eq. x7)

ここで  $b$  はホログラムの結像距離であり、ホログラム 08 の場合 1600mm である。 $a$  はホログラムーレンズ間距離で、ここでは 350mm に設定されている。ここから求められる倍率は  $\beta \sim 1/35$  である。実際の縮小率はこれより高くなっているが、この式から求められる倍率は対物レンズ焦点における倍率であり、ホログラムと対物レンズを同時に用いた加工の場合はレンズ焦点において結像するとは限らないため、この倍率と異なってくることも考えられる。そのためフィードバックのプロセスなしに加工形状の大きさまで正確に決めようとする場合には、ホログラムとレンズの位置関係やレーザーパルスの強度プロファイル、対物レンズによる光路の変化などを考慮した厳密な計算が必要になる。また、それぞれの異質相の大きさもホログラムによって設計可能であるが、これは各異質相の相対位置の場合のように光学設計だけで決定されるものではなく、レーザーのパルス幅やパルスパワーによっても複雑に変化するため、各異質相の大きさまで含めた設計をするためにはレーザー光と物質との相互作用について詳細に知る必要がある。

次にこの 25 点加工結果を光学顕微鏡により光軸方向に垂直な方向から観察してみた結果を図 3-1-2-(2)-(c)-29 に示す。同図上側は図 3-1-2-(2)-(c)-28 と同じ光源方向から見た観察像で、下側がそれと垂直な方向から見た観察像である。横から見ると、表面アブレーションを伴わずガラス内部だけに 5 本のラインが加工できていることが分かる。2 方向から見たこれらの結果から、ガラス内部に 25 個の異質相が設計通りの相対位置を持って加工できていることが確認できた。しかし一方で、異質相の光軸方向への伸びが顕著であることも明らかになった。この加工例の場合、伸

びは  $500\mu\text{m}$  に達している。もっとも、このような光軸方向への異質相の伸びは一概に悪いとはいえない。フィルタなどのデバイスでは 1 回の加工でなるべく大きな屈折率変化をさせなければならないケースもあり、そのような場合にはこの伸びが有利に働く。ただし本プロジェクトの最終目標の 1 つでもある、 $60\mu\text{m}$  立方体内への異質相 100 個同時加工を達成するためには、言うまでもなく最低でも光軸方向への伸びを  $60\mu\text{m}$  以下に抑えなければならず、同一光軸上に複数の異質相を作るのであればやはり最低でも  $30\mu\text{m}$  未満にならなければならない。そこで我々はレーザーおよびホログラムのパラメータの最適化によりこの伸びを極限まで抑えることに取り組んだ。これについては後の章に記す。また、この伸びは光路上にしぼりを入れずにパルスそのままホログラムに入射するとさらに  $1000\mu\text{m}$  ほど伸びてしまう。つまりしぼりを入れることでパルスの直径がホログラムの一辺の長さよりも短くなるように調整することが最低限の条件となる。ただししぼりを入れることでパルスの位相のコヒーレンス性の悪化も起こり得るため、その影響についても検討する必要がある。

また光軸方向への異質相の形状依存性については、伸びていること以外にも像が 2 か所に加工されていることが判明した。図 3-1-2-(2)-(c)-30 はホログラム 08 を用いてガラス内部に異質相を加工する際に、加工する深さを  $100\mu\text{m}$  ずつ深くしていった加工を並べ、表面から  $750\mu\text{m}$  の深さに光学顕微鏡の焦点を合わせて観察した像である。一番左上が表面に最も近い位置 ( $350\mu\text{m}$ ) に加工したものであり、一番右下が最も深い位置 ( $2050\mu\text{m}$ ) で加工したものである。つまり異質相を下から上に向かって光軸方向に  $100\mu\text{m}$  ごとに断面観察し並べた図と捉えることができる。この図から、結像綿から上 (光源方向) には  $300\mu\text{m}$  以上伸びているのに対し、下には  $200\mu\text{m}$  程度しか伸びていないことが分かる。この上下の伸びの違いの要因について、当初は結像面に向かって集光しながら異質相を形成するため、結像面より下では加工のエネルギーが十分に残っていないためと考えた。しかしこの推測が正しくないことは、加工深さを  $2000\mu\text{m}$  以上にまで深くしていくと再び  $5\times 5$  の異質相が加工されていることから明らかになった。よって一度結像面を通過しても、レーザーは再生像を加工するために十分なエネルギーを残している。おそらく像の上下の伸びやすさの違いは、ホログラムによってどのように位相を制御しているかに依存する部分もあるし、また対物レンズの焦点に対してどの位置に結像させるかにも依存してくるものと思われる。いずれにせよ伸びは上にも下にも抑える必要がある。

また、この図をみると意図した像が異なる深さの 2 か所において結像していることが分かる。この 2 ヶ所に結像する様子を分かりやすく図示したものが図 3-1-2-(2)-(c)-32 である。この 2 つの像はほぼ同じ形状をしているように見えるが、点对称かどうかについてはここでは判断することができない。いずれにせよ対物レンズだけを用いた加工の際にはこのような現象は見られず、またホログラムだけを用いたビームプロファイラによる再生試験においても見られないため、対物レンズとホログラムを組み合わせたことで生じる現象であると考えられる。これについては 3 次元ホログラムにより改めて検証を行っているため、説明は後の章に譲る。

また、図 3-1-2-(2)-(c)-30 の加工を行った際に表面に形成されたアブレーションの様子を図 3-1-2-(2)-(c)-33 に示した。この結果から、アブレーション量は加工深さに依存することが判明した。特に結像面が表面から  $750\sim 1150\mu\text{m}$ 、 $1750\sim 2050\mu\text{m}$  離れているときにアブレーションが非常に少ないことが分かる。この現象については図 3-1-2-(2)-(c)-30 で得られた知見から容易に想像されるように、異質相が形成される領域、つまり結像面から上に  $300\mu\text{m}$ 、下に  $200\mu\text{m}$  の範囲に表面が位置するとアブレーション量が大きくなると解釈できる。

#### 4-2-4) ホログラムの位置による加工への影響

光路に対するホログラムの位置の影響について調べるため、ホログラム 08 を用いて試験を行った。フェムト秒パルスレーザーのパルス幅を 66fs、パルスパワーを  $820\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、繰り返し周波数 1kHz、照射時間 1s で照射した。ホログラム位置はホログラムの中心がビーム径の中心に来る位置を基準とし、そこから x、y 方向 (xy 平面は光軸に対して垂直とし、+x 方向は光源から見て右、+y 方向は光源から見て上とする) に  $\pm 5\text{mm}$  まで 1mm ピッチでホログラムを動かして検証した。加工された異質相の焦点付近における様子を図 3-1-2-(2)-(c)-31 に示す。これをみると、中心より-x 方向にずれた位置にホログラムを置いたときに最も鮮明に加工されていることが分かる。

まずホログラムの中心をビーム径の中心に持ってきた場合に像がボケる点について考察してみる。ここで用いたホログラムは一辺の長さが 8mm であるのに対し、ビーム径は  $\phi 4.5\text{mm}$  である。ホログラムの中心をビーム径の中心に置いた場合、中心から半径 2.25mm の範囲を照射することになるが、この部分はホログラム上に描かれた干渉縞の密度が低く、外側に行くにしたがって密に描かれている。そのため情報量の密度も低いことが予想され、像の不鮮明さにつながったものと考えられる。しかし-x 方向に偏った場合にのみ鮮明になる点については、ホログラムを回転させた場合に鮮明になる方向も回転することから、光源側の影響、つまりビームの強度プロファイルの角度偏りのためであると思われる。この実験から、ビームの強度プロファイルはできる限り角度依存性の少ない分布にする必要があることと、ビーム径とホログラムの大きさは一致することが望ましいことが明らかになった。

またこの加工結果を見てみると、ホログラムの一部にしか光が当たっていない場合でも図形全体が加工できていることが確認できる。つまりそれぞれの異質相はホログラム全体からの光の干渉によって作られている。これはホログラムの特性上当然のことではあるが、ホログラムの中央を通過する光と端を通過する光との光路差について考慮する必要があることを示している。この光路差について、ホログラムの設計値を変えながら算出したデータを表 2 にまとめた。実験に用いているフェムト秒パルスレーザーは最短で 25fs までパルス幅を縮めることが可能なため、表に示した計算結果から考えるとこのような場合は中央と端の光は干渉しないことになる。しかし実際にはそのような短パルスにおいても非常に良く結像しており、光路差だけでは説明できない現象が起きていると思われる。更に、超短パルスが物質内を伝搬する際に幾つかのパルスに分割される現象が報告されており、このような現象が起きていることも可能性の 1 つとして考えられる。

#### 4-3) ホログラムを用いた 3 次元加工

##### 4-3-1) 3 次元フォトニック結晶モデル

3 次元構造の一括描画の第一段階として、まず前「ナノガラスプロジェクト」で作製された図 3-1-2-(2)-(c)-34 左側に示したような 3 つの異なる層に分布した合計 24 点のホログラムで実験を行った。設計上、第一層の焦点距離は  $1300\mu\text{m}$ 、第二層は  $1600\mu\text{m}$ 、第三層は  $1900\mu\text{m}$  となっており、各面の大きさは一辺が  $3000\mu\text{m}$  となっている。これらの値から、M5 対物レンズ (焦点距離 35mm) を用いて集光させた場合の各面間の距離は  $230\mu\text{m}$ 、各面は一辺  $83\mu\text{m}$  であることが分かる。ただしこの値は結像位置が対物レンズの焦点であるという前提のもとであり、それぞれの面が異なる位置に結像するこのホログラムを用いた場合はこの値通りではない。図 3-1-2-(2)-(c)-34 右側は実際にソーダライムガラス中に第二層の深さを  $1000\mu\text{m}$  に合わせて加工した異質相を、光学顕微鏡の焦点を  $700\mu\text{m}$ 、 $1000\mu\text{m}$ 、 $1300\mu\text{m}$  に合わせて観察した像である。この結果をみると、各面の異質相は全て加工されており、ホログラムを用いた 3 次元微細加工が可能であることを示しているが、異質相の光軸方向への伸びは著

しく、第二層の異質相は第一層にまで到達してしまっている。下方向への伸びと合わせるとおよそ  $300\ \mu\text{m}$  ほど光軸方向へ異質相が伸びていることになる。前章で示した 2 次元ホログラムの加工結果では図 3-1-2-(2)-(c)-32 の通り約  $500\ \mu\text{m}$  ほどの伸びが見られたため、それに比べると幾分伸びは抑えられているものの、やはり  $60\ \mu\text{m}$  立方体内に 100 点を加工するというプロジェクトの目標達成のためには、この結果よりも少なくとも 100 分の 1 程度に伸びを抑える必要があることが判明した。これまでも他の手法により異なる深さへの同時加工を行った例もあるが<sup>[26-34]</sup>、3 層以上への加工はこれまで成功したという報告はない。この加工ではかなり強いパルスパワー ( $500\ \mu\text{J}/\text{pulse}$ ) で 1000 パルスの照射を行ったため、光の強度が強すぎてこのように伸びが発生したとも考えられるが、それほどの高強度でも加工されていない点があるというのもまた別の課題である。伸びを 2 桁小さくしながらすべての点を加工するためには、ホログラム設計の段階で各点における光強度をある程度均等にする、あるいはある程度ばらつきが許容されるような工夫を考案する必要があることが判明した。

#### 4-3-2) 3次元マトリックスモデル

以上のように前章の 3 次元フォトニック結晶モデルの加工試験結果に様々な問題点があったことから、本プロジェクトではまず単純なモデルで実験することから始めた。まず第 1 層に 7 点が直線状に並び、第 2 層にこれと垂直な直線上に 7 点並んだ合計 14 点を結像するホログラムを作製した。このホログラムを用いた加工結果を図 3-1-2-(2)-(c)-35 に示す。このホログラムを設計する際には、できる限り全ての点の光強度が均等になるようにした。にもかかわらず、加工結果を見てみるとやはりすべての点が等しい濃さで作製されているとは言い難い。また全ての点が加工されるようにフルエンスを大きくしたため、加工は光軸方向に約  $125\ \mu\text{m}$  伸びている。この結果から、設計時に各点の光強度を均等にするだけでは、均一な加工をするためには十分でないことが明らかとなった。そもそも設計の際には入力光としてフラットな強度分布を用いており、実際に用いている光がガウシアンであることとの差異もこのような不均一性をもたらしている一因であると考えられる。このような設計時と実際の光との差については連続光かパルスか、の違いもある。設計時には連続光を入力値として与えているのに対し、実際にはパルス光が与えられる。パルスの場合、ホログラムの中央を通ってきた光と端を通ってきた光とでは光路差が生じる。この差がパルス幅に匹敵するオーダーになると、一部の点は光が十分に集まらずに加工されない場合や加工されても像が乱れる場合が起こり得る。また設計時には考慮されていないもう 1 つの要因として、加工に用いるガラスのパラメータの屈折率が挙げられる。設計時は全空間を屈折率 1 として考えているため、よりガラスの深い位置に加工すれば設計時との差が大きくなっていく。以上の事柄を考慮すると、実際の加工では各点のホログラムからの距離、レンズからの距離、光軸中心からの距離、ガラスサンプル表面からの距離に応じて光強度が複雑に変化しているものと思われる。よってこれらを厳密に計算に取り入れ、それぞれの光強度ピークを均一に揃えることは現実的ではないため、これに代わる工夫が必要なことが判明した。つまり光の強度が、設計した点に近づくに従って緩やかに増加していくような強度分布ではなく、理想的には設計した点の周囲には強度 0 の領域しかなく、設計した領域内では強度が最高になるようなデルタ関数的に設計されることが最も良い。完全にデルタ関数にすることはできないため、出来る限り急峻な強度分布とある程度同じレベルのピークの高さを設計することになる。これにより、与えられた光強度がある程度強くても弱くても、ピークの強度分布をその強度で輪切りした際にどの点も同じ大きさになる。

このような修正を踏まえて次に用意したホログラムは、第 1 層に 2 点、第 2 層に 2 点というさらに単純な 4 点モデルである。この加工結果を図 3-1-2-(2)-(c)-36 に示した。直径約  $3\ \mu\text{m}$  長さ  $22\ \mu\text{m}$  のほぼ等しい大きさの点が 4 点加工できているのが確認できる。前章で示した結果と比べると、およそ  $200\ \mu\text{m}$  におよぶ光軸方向への伸びは 10 分の 1 程度にまで抑えられていることがわかる。この加工によ

り、一辺  $60\mu\text{m}$  立方体内への 2 点加工というプロジェクト中間目標を無事達成することができた。これをさらに拡張し、点の数を 2 倍にしたホログラムの設計図が図 3-1-2-(2)-(c)-37、加工結果が図 3-1-2-(2)-(c)-38 である。 $2\times 2$  と比べると異質相はより広い領域に分布しているにもかかわらず、光軸方向への伸びは  $12\mu\text{m}$  にまで抑えることに成功している。

次のステップとして作製したホログラムはさらに倍の  $2\times 8$  の 16 点ホログラムである。各層ごとに 2 点ずつ配置されている点は同じだが、2 点を結ぶ直線が  $45$  度ずつ右回りに傾いていくように設計されており、第 1 面と第 5 面とが同じ配置になっている（図 3-1-2-(2)-(c)-39 参照）。つまり二重螺旋が 2 周りする構造であり、次章で示す 3 次元螺旋モデルの原形となっている。図 3-1-2-(2)-(c)-40 は左側がモデル図、右側が実際に加工したサンプルの光学顕微鏡像を 2 方向から観察したものである。この加工で特筆すべきは、光源方向から見て他の異質相の影になる領域、例えば図中の A の異質相の影に入っている位置 B にも異質相を作製できている点である。仮に逐次描画法によって上側の異質相を先に作製してしまうと、その影になる領域にはそのままでは加工できなくなる。我々の三次元一括加工法ではこのような制約がないため、これもこの加工法の利点の 1 つということができる。ただしこの加工結果を見てみると、下の層にいくほど異質相が外に広がっており、設計とのずれが大きくなっているのがわかる。この原因は対物レンズのもつ性質に依るもので、焦点からの距離が異なれば倍率も異なってくることに起因する。つまりレンズ焦点から遠い異質相ほど光軸に近い位置に補正して設計しなければならないことが明らかとなった。この補正は設計する位置だけにとどまらず、その強度についても異質相の位置によって変化させる必要がある。倍率が異なるということは、すなわちその加工領域に集まるフォトンの密度も異なってくることを意味するからである。ホログラムパターンを計算する際にこれら位置と強度の補正をかけることが、より高精度な加工のためには必須となる。

#### 4-3-3) 3次元螺旋モデル

三次元加工を明確に示すためのモデルとして、本プロジェクトでは 24 点の異質相が 3 次元螺旋状に並ぶ構造を作製することを 100 点加工への足がかりと位置付けた。このモデルの設計図を図 3-1-2-(2)-(c)-41 に示す。各レイヤーに 1 点ずつ配置され、レイヤー間距離は  $1\text{mm}$  となっている。時計のように 12 層で一周し、合計 24 点で 2 周分の螺旋を描いている。各点の大きさは 1 ピクセルであり、ピクセルサイズは  $20\mu\text{m}$  角である。また同図には実際の加工結果も併せて記載した。この加工はパルスパワー  $150\mu\text{J/pulse}$ 、パルス幅  $30\text{fs}$  で行われたものである。これまでの加工結果と比較してみると、光軸方向への伸びが全くなく、ほぼ球状に近い異質相が 24 個加工できており、前章までの結果から飛躍的に進化したことが確認できる。その直径も約  $2\mu\text{m}$  と、回折限界に近い値まで縮めることができている。またそれぞれの異質相の相対位置も、設計した通りのスケールになっている。これまでも 1 点のみの加工であれば、ND フィルタなどを用いてできる限りレーザーの強度を閾値付近まで抑えることで伸びのない加工は可能であったが、このように比較的高いパワーで多くの点を同時に加工しながら光軸方向への伸びを完全に抑えるという加工は、間違いなく世界でも初めての成功であるといえる。このような加工に至ることができた要因としては、やはり各点における光強度の補正や相対位置の補正をかけたことが挙げられるが、パルス幅やフルエンス、ホログラムーレンズ間距離などの最適化も大きく貢献した。同図にはこれらのパラメータを最適化する前の加工も比較のために載せているが、その差は歴然である。これらのパラメータの最適値は用いるホログラムや被加工サンプルの材質、表面研磨の状態、レーザーの波長など様々な要因によって変化してくるため、それぞれの加工条件に合ったパラメータを用いることが肝要である。

ただしここで注意しなければならないのは、ホログラム自体は直径  $2\mu\text{m}$  の球体を加工するようには設計されていないことである。各異質相は  $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}\times 1\text{mm}$  の大きさに設計されており、M20 の対物

レンズを通すことでこれは約  $0.3\mu\text{m}\times 0.3\mu\text{m}\times 0.2\mu\text{m}$  となる。つまり設計より大きい加工になっている。この設計値との差は、おそらく上に挙げたすべてのパラメータを最適に設定したとしても埋められるものではないと考えている。フォトンの吸収により発生するプラズマが仮に設計通りの大きさであったとしても、そのあとに続いて起こる衝撃波や熱の伝搬により、加工領域の大きさはこれより大きくなるものと思われる。またこれらの影響により加工領域は液体と気体の共存する状態を経由するため、流体力学的に安定する球体に落ち着く。つまり加工領域と設計時の異質相の大きさに差が生じるような微細加工の条件下では加工形状は球状になるものと推測される。この差が生じるのは、設計の大きさが衝撃波や熱の伝搬する特徴的なスケールよりも小さい場合であり、これらのスケールは材質によって異なってくる。

#### 4-3-3) 100点加工

プロジェクト最終目標のひとつである 100 点一括加工を達成するために、我々は 3 次元フォトニック結晶モデルで設計を行った。全体は 4 層から成り、各層に  $5\times 5$  の 25 点ずつ配置している。第 1 層と第 3 層の各点の xy 座標は同じで、第 2 層と第 4 層はこれに対して半ピッチ分 xy 両方向にずらした構造となっている。図 3-1-2-(2)-(c)-42 に、このホログラムを用いた加工結果を横から見た光学顕微鏡像を示した。3 次元螺旋の結果に比べると光軸方向への伸びがあり、上の 2 層と下の 2 層とで異質相の濃さに差があるものの、 $60\mu\text{m}$  立方体内に 1 回のフェムト秒パルスレーザー照射により 100 点の異質相を一括で加工することに成功した。3 次元螺旋の結果に比べてこのように強度ムラや相対位置のずれがあるのは、この加工情報をホログラムの設計にフィードバックして再設計する時間が不足していたためであり、これによって解決できるものと思われる。ただし、各異質相の強度や相対位置の補正については、異質相の配置によって補正の度合いが異なってくるため、この点については様々なバリエーションの設計を行って検証してみる必要がある。

#### 4-3-5) 応用 3 次元加工

ここまでのホログラムでは点状の異質相のみを作製してきたが、ホログラムによる集光は任意の図形に対して行うことが可能なため、導波路にも応用可能な線型の異質相も試みた。図 3-1-2-(2)-(c)-43 に加工例を示す。開発当初は同図左側のように直線にはならず、途切れ途切れの点線しか加工することができなかった。これは当初は直線領域内の光強度をそこまで厳密に揃えていなかったため、部分的に加工されてしまったものと思われる。そこで次章に示したような光強度分布の改善を行った結果、同図右側のように直線状の異質相を形成することに成功した。またこの加工をさらに発展させ、点と直線の両方を一度に加工することも試みた。図 3-1-2-(2)-(c)-44 左側は図 3-1-2-(2)-(c)-6 の 3 次元螺旋ドット異質相に直線状異質相を加えたモデルであり、実際の加工結果をその右側に示した。

さらに、光軸に垂直な方向から見た際に V 字に見えるような形の異質相を作るようなホログラムを作製し、これによって図 3-1-2-(2)-(c)-45 のような V 字を作製することにも成功した。これまで光軸に垂直な面内への 2 次元加工が行われた例は多数あるが、このように光軸方向へ分布する像を作製するためには光軸方向への伸びを制御しなければ実現不可能であり、このような加工が行われたのは我々の知る限り世界でも初めてである。そういった意味でも本報告書にまとめた伸びの抑制に関する議論は非常に大きな成果であるといえる。

### 4-4) レーザーおよびホログラムパラメータの加工への影響

#### 4-4-1) 光強度分布

本加工法で最も重要になるのは、各異質相における光強度分布の制御である。それは前述のように、



光強度のバラつきがこれまで三次元一括加工法のネックであり、これによって三次元加工の自由度に制限があったことから明らかである。光強度は、特に光軸方向に対して複雑に依存する。原理的には、描く点と CGH との距離が長いほど、あるいは対物レンズの焦点位置からの距離が長いほど、同じ濃さに設計されたはずの光の強度は低くなる。また、光軸に垂直な面内においても、光軸中心からの距離の増加に伴い強度は減少していく。さらに同一面内あるいは同一光軸上の異質相の数も、強度に影響を与える可能性が考えられる。このように強度の変化は種々の影響を受けて非常に複雑なものとなる。またその変化量は、例えば光軸方向に大きく離れた点の場合のように非常に大きい可能性もある。そのようなクリティカルなケースにも対応するため、各点の光強度はできる限り広い範囲で可変であることが求められる。仮に全ての点が同じ光強度で設計されたとすると、一部の点は加工されそれ以外は加工されないという事態が生じる。また全ての点が加工されたとしてもそれらの物理的・化学的性質は異なってしまうことがほとんどである。

被加工部分は、大きく分けて 3 つに分類することができる。1 つめは屈折率変化領域である。屈折率の変化は、レーザーパルスと物質との相互作用により生じる変化のマクロ的な指標であり、この屈折率が照射によって変化するというだけで、実際どのような変化が被加工部分に生じているかについては、まだ詳細は明らかにされていないのが現状である。シリカガラスのバンドギャップは約 1.54eV あるため、波長 800nm のレーザーで加工するためにはおそらく光子 5~6 個の多光子吸収がトリガーとなり、それに引き続いて起こる電子なだれによって Si-O-Si ネットワークの共有結合電子（主に価電子帯を占める  $O_2$  の 2p 軌道電子）が伝導帯に励起され、被加工部分の原子分布に偏りが生じることで屈折率の変化を起こしているものと思われる。実際、被加工部分の断面を SEM で観察し元素分布を EDS により解析したところ、図 3-1-2-(2)-(c)-46 のように加工中心部分に Si 原子が偏り、逆に O 原子が減少しているのが分かった。この元素分布変化に関する知見はまだ詳細には得られていないが、ガラスの組成によっては被加工部分の屈折率が増加するものだけでなく減少するものについても確認されており、屈折率の大きな異質相を効率よく形成するためには、このような元素分布の変化と屈折率の変化量との関係を明らかにする必要がある。また、元素分布に偏りを生じさせるほどの大きな変化でなくても、例えば  $SiO_2$  tetrahedra 間の結合角の変化によっても消衰係数  $1100cm^{-1}$  付近のピーク波数はシフトするため、理論的には屈折率の変化をもたらすはずである。この場合、原子スケールを遥かに超える距離の原子の移動を伴わないため、加工にかかる時間は分子振動周期より遥かに短いオーダーになり得る。これが現実的に可能かどうかについても、今後は明らかにしていく必要がある。

2 つめは複屈折変化領域である。これは屈折率変化に必要な光強度よりさらに強いレーザーを照射することで、加工部分に偏光の向きと垂直方向に回折限界以下の幅で縞模様が描かれるものであり、この縞模様が屈折率の異方性をもたらしている。この縞模様を利用した回折限界以下の微細加工については多くの研究が行われているが、まだ明らかにされていない部分が非常に大きい。また、この微細構造を利用してフッ酸処理を行うことで極細管の加工を行っている例もあり、今後注目を集めるものと思われる。

そしてさらに光強度を上げると加工部分にはマイクロボイドが生じる。多くのデバイス作製の際には屈折率変化領域もしくは複屈折率変化領域が用いられ、形状の再現性が低いマイクロボイドが用いられるケースは稀である。ここで生じる変化は対象領域からの物質の除去という意味では表面アブレーションと類似している部分もあるが、実際にはその閾値もメカニズムも全く異なる。表面アブレーションの場合は取り除かれた物質は周りに飛散するが、内部のマイクロボイドの場合は逃げ場所がないため、加工中心はボイドになりその周りはその分高密度な領域が形成される。そのため加工部分とその周辺との屈折率差は非常に大きいものとなる。しかしマイクロボイドの閾値は屈折率変化

および複屈折率変化の閾値より高いため、ボイドの周りにそういった変化の領域ができてしまいマイクロボイド単体での加工には何かしらの工夫が必要である。

このように光強度によって加工される領域の性質は全く異なってくるため、集光点における光強度のプロファイルを厳密に制御することは加工精度向上のために不可欠である。しかしこの光強度は、集光点と CGH との距離、あるいは対物レンズの焦点との距離、光軸中心からの距離に依存して複雑に変化する（図 3-1-2-(2)-(c)-47 参照）。つまり各点における光強度を等しく設計してしまうと、ある点は加工されても別の点は加工されないといった問題が生じる。また全ての点が加工できたとしても、異質相（屈折率変化領域）とマイクロボイドとが混在してしまう。そこで、それぞれの点の位置を考慮に入れた計算により各点の光強度を算出する必要がある。

このように各点の光強度の制御は本加工法の重要なポイントである。よって光強度の設計値を変えたときに実際の光強度分布がどのようになるか、また加工の形状がどのように異なってくるかを調べるため、図 x0505 左側に示すような CGH を作製した。つまり 7 つの点が同一面内（焦点距離 60cm）かつ光軸中心から同一距離に存在し、それぞれの光強度設計値が強度最大の点を 100%としたとき 90%、80%、70%、60%、50%になるようにそれぞれ設計されている。これらの点は同じ光強度で設計すれば同じ形状・性質に加工されるものである。つまりこの CGH を用いて光強度プロファイルや実際の加工形状を見ることで設計上の光強度変化がどの程度影響を与えるかが判明する。

この CGH を用いた際の光軸方向への光強度分布の計算値を 3-1-2-(2)-(c)-48 右側に示した。括弧内の数字は強度 100%の点のピーク値に対する各点のピーク値を示している。つまりこの値は本来設計上のパーセントと一致しなければならない。これはこの誤差をフィードバックして計算を繰り返すことで時間さえかければ容易に到達可能であるが、設計値に対して実際の加工がどのように反応するかを知ることが目的であるため、ここでは行わない。特に注目されるのは、このプロファイルが非常に特殊な形状をしている点である。ガウシアン分布上に 3 つの鋭いピークが重なった形になっている。このような特殊な形状を示す要因は以下のように考えられる。本来 1 点に集光された光は、その焦点距離に比例して光軸方向に伸びた形になる。本加工法で用いる CGH あるいは対物レンズももちろんこの性質を持っているため、特に工夫をしなければ集光領域は数百  $\mu\text{m}$  近く伸びてしまう。しかし我々の計算ではこの伸びをできる限り抑えるようにしているため、数  $\mu\text{m}$  レベルの加工が可能となっている。このとき集光点は光軸方向に対してある長さの中に抑えるように設計されるため、このような特殊なプロファイルになっているものと思われる。外側の 2 つの鋭いピーク間の距離はおよそ  $10\mu\text{m}$  である。つまりこの  $10\mu\text{m}$  の範囲内と範囲外とで強度に大きな差が出るように設計されており、これにより光強度にある程度のバラつきが生じる場合でも比較的均一な加工が実現できている。理想的には真中の鋭いピークを取り除きトップフラットなプロファイルを実現できれば加工の均一性はさらに向上するため、今後はこれを計算上で実現できるように改良を加えていく必要がある。

またこの CGH を用いて実際にシリカガラスの表面にアブレーション加工を行ったサンプルの SEM 画像を 3-1-2-(2)-(c)-49 右側に示した。アブレーション加工で確認を行ったのは、内部加工よりも明確に大きさを測定できるためである。内部加工でもこの 7 点加工は実現できているが、光学顕微鏡の分解能の限界のため、大きさを明確に比較するには至っていない。アブレーション半径を比較してみると、光強度に非常に強い相関を持っていることが分かるが、一方で加工形状にバラつきがあるのも確認できる。加工形状は CGH により作られる光強度プロファイルだけでなくパルスレーザーの光強度プロファイルの影響も受けるため、これらいずれかの光軸方向に対して垂直面内のプロファイルが真円からずれていれば光強度によってアブレーション形状が異なってくる可能性はあるが、この加工自

体がアブレーションの加工精度に近いオーダーで行われているため、加工精度による影響の方が強いことが予想される。実際この真円からのずれは再現性がないため、この点からも後者の影響によるものと思われる。

#### 4-4-2) パルス幅

フェムト秒パルスレーザーのパルス幅は、フォトンが電子に吸収されるタイムスケールを特徴づける重要なパラメータであり、これによって吸収のメカニズムが変わってくる。加工形状のパルス幅への依存性は複雑で、これまでも数多くの実験や理論計算が行われてきた<sup>[23, 30-34]</sup>。特に加工閾値のパルス幅依存性については多くの研究がなされており、 $\tau^{1/2}$  に比例することが知られている<sup>[23]</sup>。これに関しては様々な解釈があり、パルス幅が広がることで閾値を超えるフォトンの割合が減ることや、多光子吸収の際に仮想準位にとどまることのできる寿命やカスケード衝突で得たエネルギーを再放出するまでの時間に対してパルス幅が長すぎることで再放出が起きフォトンの利用効率が下がることなどが原因ではないかとされている。また、この  $\tau^{1/2}$  依存領域は数 ps より長いパルス幅領域において見られる現象であり、これよりも短いパルス幅になるとこの法則からずれて閾値の減少がにぶくなっていく。このパルス幅領域ではパルス幅が短くなるほどカスケード衝突による電子増倍の割合が減り、徐々に多光子吸収が支配的な吸収チャネルとなってくる。そして 30fs 程度の短パルス領域になると、今度は  $\tau^{1/2}$  よりも急峻な別の漸近線に近づいてくる。この漸近線は、すべてのフォトン吸収が多光子吸収のみを介して起こったと仮定した場合の近似曲線であり、これよりもフォトンの利用効率が下がることはないため、この曲線より左側に行くことはない。我々は多光子吸収とカスケード衝突による電子増倍の割合が変化する 30-300fs の過渡領域において、ガラス内部加工試験により吸収チャネルの加工への影響について調べた。まずパルスのフルエンス  $F$  一定の条件、つまりパルスのピークパワーは一定であり、パルス幅とともにフォトン数が増加する条件でパルス幅を変えながら測定を行った。この結果のうち、フルエンスを  $150 \mu\text{J}/\text{pulse}$  に固定したときの値を図 3-1-2-(2)-(c)-50 に示す。パルス幅が狭くなるにしたがって加工形状の光軸方向への伸びが減少しているのが分かる。パルス幅が狭ければ、ホログラムの異なる部分を通過してきた光同士がある点に集まるときに、その重なり合う体積もその分狭くなり、加工される体積も減少する。ここで得られた結果はこの傾向に矛盾しないものであるが、その効果だけが抽出されたデータとはいえない。それはフルエンス一定でパルス幅を変えているため、1 パルスに含まれるフォトン数  $N$  はパルス幅に比例して増加してしまうためである。本システムにおいて可変となるパルスのパラメータにはパルス幅  $\tau$ ・フルエンス  $F$ ・フォトン数  $N$  がある。これらのうち 1 つを固定し 1 つを変化させると、残りの 1 つもそれに従って変化してしまう。図 3-1-2-(2)-(c)-50 の場合では  $F$  を固定したうえで  $\tau$  を変化させているため、 $N$  も同時に変化している。つまりパルス幅を狭くしたときのパルス中のフォトン数の減少も加工形状に影響を与えていることになる。フォトン数が減少すれば加工体積は小さくなるため、この効果と前述の効果の両方が同図には現れているといえる。

このように、パルス幅の加工への影響を把握するためには、3 つのパラメータそれぞれに対する依存性を全て調べ、抽出する必要がある。そこで次に  $N$  を一定にして  $\tau$  を変化させながら光軸方向の加工長さを同様に調べたところ、図 3-1-2-(2)-(c)-51 のような結果が得られた。このグラフを見てみると、ここで用いたフルエンスの値であれば、パルス中の光子数が一定であれば加工される長さも一定ということが分かる。Groff らはアルミニウムにアブレーション試験を行い  $\tau$  依存性を調べており、ここでも 80fs~1ps の範囲においては同様にパルス幅依存性が無いことを確認しており<sup>[30]</sup>、我々の結果はこのデータとも矛盾しない。ホログラムを用いた加工の場合、原理的にはパルス幅が短くなるとホロ

グラムによって異なる光路を通ってきた光同士が干渉する領域はその分狭くなるため、加工閾値を超える領域も狭くなり、これによって加工体積は減少するものと考えられる。しかし今回用いたホログラムの場合、それぞれの点は光軸方向に 1mm の長さに設計されている。対物レンズに M20 を用いた場合、横倍率は約 1/67 となるため、縦倍率はこの 2 乗となり、完全に光軸方向への伸びがない加工となった場合、長さは 0.2  $\mu\text{m}$  ということになる。

一方で前述のように、フォトンから電子へのエネルギー移行には主に多光子吸収 (multi photon absorption : MPA) とカスケード衝突 (avalanche ionization : AI) による電子増倍が考えられ、パルス幅が長ければ AI が主なチャネルとなり、短ければ MPA 主体となる。MPA は一度に 6 個のフォトンが 1 つの電子の相互作用領域内に同時に到達して初めて吸収できるのに対し、AI は 1 個のフォトンでも衝突すれば吸収可能である。つまり MPA は 6 光子でバンドギャップを超えるものとすればフォトン密度の 6 乗に比例し、AI は 1 乗に比例する。このことがフォトンが高密度になる短パルス領域において MPA がメインで起こる根拠とされているが、MPA の場合、”同時に”存在しなければならないといっても、どの程度”同時”でなければならぬかは、仮想準位の寿命に依存する。仮想準位とは、電子と 1 つのフォトンとが相互作用する際にそのフォトンのエネルギーがバンドギャップよりも低い場合、これを吸収することはできないが一時的にとどめておくことのできる現象を表した概念である。フォトンとは量子であり、エネルギーと時間のパラメータ間に不確定性を持つ。つまり非常に短い時間であれば本来のエネルギーと大きくずれた量子として振る舞うことができる。このエネルギーの不確実さを利用して、電子は吸収することのできないエネルギーをもったフォトンを受取り励起状態になることができる。ところが励起状態にとどまることはエネルギー保存則から許されない。そのため、この「非常に短い時間」の後には必ずフォトンを出して基底状態に戻る。この時放出されるフォトンは、エネルギー保存則から吸収されたフォトンのエネルギーと同じエネルギーを持つ。つまり不確実性原理により決まる時間以上の時間スケールで観測してもこの吸収過程を見ることはできない。このような遷移を仮想遷移と呼び、このときに使われる準位を仮想準位と呼ぶ。この寿命は振動数の逆数程度であり、800nm の光であれば 2.66fs となる。これに対してカスケード衝突により自由電子が得たエネルギーはおおよそ 100fs 程度の寿命を持つ。つまりこの寿命の差が MPA と AI との発生確率の差を生んでいるが、測定した範囲内において加工される体積はパルス幅にほとんど依存していないため、前述のパルス幅減少に伴う干渉領域の減少の効果を加味すると、主な吸収過程がパルス幅に依存して AI から MPA に変化したとしても、吸収効率はむしろ若干増えている可能性がある。

パルス幅が長くなるとコヒーレンス時間も長くなると誤解しやすいが、群遅延分散などにより異なる周波数の平面波の位相にずれを生じさせてパルス幅を広くする場合には、広くしても  $t_{\text{coh}} \sim 1/\Delta\nu$  の関係は成り立っており、スペクトル分散によってパルス幅が広がっても Fourier 変換限界パルスのパルス幅程度しかコヒーレンス時間はないということである。逆に言うと、Fourier 変換限界パルスに近い場合だけが、コヒーレンス時間としてパルス幅を用いることができる。

## 5) 結論

三次元一括加工法によるガラス内部の三次元微細加工をフェムト秒パルスレーザーとガラス・ホログラムを用いて実現し、一辺  $60\mu\text{m}$  のガラス内部立方体領域内に 100 個の異質相を一括で作製することでプロジェクトの最終目標をクリアした。実現するためにはフェムト秒パルスレーザーのフルエンス、パルス幅、それにホログラムの焦点距離やホログラム-レンズ間距離を適切にすることが必須であり、これにより最大の問題であった異質相の光軸方向への伸びを抑え、伸びの全くない球状の加工にも成功した。本加工法の確立により、導波路や 3 次元光メモリなどの光学デバイスをはじめとする様々なデバイスの製造工程に本加工法が組み込まれることが期待される。

## 参考文献

- [1] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," *Opt. Lett.* **21** (1996) 1729.
- [2] L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz, "Study of damage in fused silica induced by ultra-short IR laser pulses," *Opt. Comm.* **191** (2001) 333.
- [3] P. D. Maker and R. W. Terhune, "Study of optical effects due to an induced polarization third order in the electric field strength," *Phys. Rev.* **137** (1965) A801.
- [4] N. Bloembergen, "Laser-induced electric breakdown in solids," *J. Quantum Electr.* **10** (1974) 375.
- [5] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nottle, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, "Femtosecond, picoseconds and nanosecond laser ablation of solids," *J. Appl. Phys. A* **63** (1996) 109.
- [6] S. Nottle, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling, "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *J. Opt. Soc. Am. B* **14** (1997) 2716.
- [7] K. Sugioka, Y. Hanada, and K. Midorikawa, "3D integration of microcomponents in a single glass chip by femtosecond laser direct writing for biochemical analysis," *Appl. Surf. Sci.* **253** (2007) 6595.
- [8] D. Hülseberg, A. Harnisch, and A. Bismarch, "Microstructuring of glasses," Springer Berlin Heidelberg (New York, 2008), ISBN 978-3-540-26245-9.
- [9] S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich, T. L. Perel' man, "Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses," *Sov. Phys. JEPT* **39** (1974) 375.
- [10] R. Stoian, M. Boyle, A. Thoss, A. Rosenfeld, G. Korn, and I. V. Hertel, "Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses," *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 353.
- [11] M. Toulemonde, J. M. Costantini, Ch. Dufour, A. Meftah, E. Paumier, and F. Studer, "Track creation in SiO<sub>2</sub> and BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> by swift heavy ions: a thermal spike model," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **116** (1996) 37.
- [12] B. Rethfeld, A. Kaiser, M. Vicanek, and G. Simon, "Ultrafast dynamics of nonequilibrium electrons in metals under femtosecond laser irradiation," *Phys. Rev. B* **65** (2002) 214303.
- [13] A. Brodeur, C. Y. Chien, F. A. Ilkov, S. L. Chin, O. G. Kosareva, V. P. Kandidov, *Opt. Lett.* **22** (1997) 304.
- [14] O. G. Kosareva, V. P. Kandidov, A. Brodeur, C. Y. Chien, S. L. Chin, *Opt. Lett.* **22** (1997) 1332.
- [15] V. Koubassov, J. F. Laprise, F. Théberge, E. Förster, R. Sauerbrey, B. Müller, U. Glatzel, and S. L. Chin, "Ultrafast laser-induced melting of glass," *Appl. Phys. A* **79** (2004) 499-505.
- [16] B. Rethfeld, K. Sokolowski-Tinten, D. Von der Linde, and S. I. Anisimov, "Timescales in the response of materials to femtosecond laser excitation," *Appl. Phys. A* **79** (2004) 767.
- [17] M. Lenzner, J. Kruger, W. Kautek, F. Krausz, *Appl. Phys. A* **69** (1999) 465.
- [18] H. O. Jeschke, M. E. Garcia, K. H. Bennemann, *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 18.
- [19] D. Bauerle, "Laser processing and chemistry," Springer, Berlin-Heidelberg, 3rd ed., 2000.
- [20] R. J. Hemley, C. T. Prewitt, and K. J. Kingma, "Silica - Physical Behavior, Geochemistry, and Materials Applications, Review of Mineralogy, 29," (Mineral. Soc. America, Washington, DC 1994) p. 41.
- [21] R. J. Hemley, C. T. Prewitt, and K. J. Kingma, "Silica - Physical Behavior, Geochemistry, and Materials Applications, Review of Mineralogy, 29," (Mineral. Soc. America, Washington, DC 1994) p. 369.
- [22] M. Lenzner, J. Kruger, S. Sartania, Z. Cheng, C. Spielmann, G. Mourou, W. Kautek, and

F. Krausz,

- [23] B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, "Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics," *Phys. Rev. B* 53 (1996) 1749.
- [24] M. Watanabe, "Study of femtosecond laser ablation of multicomponent glass," *Reports Res. Lab. Asahi Glass Co. Ltd.*, 55 (2005) 27.
- [25] Eugene Hecht, *Optics*, Addison Wesley (2002).
- [26] Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao, *Proc. SPIE* 5339, (2004) 185.
- [27] Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao, *Opt. Exp.* 12 (2004) 1908.
- [28] S. Hasegawa, Y. Hayashi, and N. Nishida, *Opt. Lett.* 31 (2006) 1705.
- [29] B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, "Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses," *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 2248.
- [30] B. Le Brogoff, F. Vida, S. Laville, M. Chaker, T. Johnston, O. Barthelemy, J. Margot, and M. Sabsabi, "Laser-ablated volume and depth as a function of pulse duration in aluminum targets," *Appl. Opt.* 44 (2005) 278.
- [31] F. Brygo, Ch. Dutouquet, F. Le Guern, R. Oltra, A. Semerok, J. M. Weulersse, "Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation," *Appl. Surf. Sci.* 252 (2006) 2131.
- [32] X. Zeng, X. Mao, R. Greif, and R. E. Russo, "Ultraviolet femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon: ablation efficiency and laser-induced plasma expansion," *Proc. of SPIE* 5448 (2004) 1150.
- [33] B. Sallé, O. Gobert, P. Meynadier, M. Perdrix, G. Petite, and A. Semerok, "Femtosecond and picoseconds laser microfabrication: ablation efficiency and laser microplasma expansion," *Appl. Phys. A* 69 (1999) S381.
- [34] C. Momma, S. Nottle, B. N. Chichkov, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, "Precise laser ablation with ultrashort pulses," *Appl. Surf. Sci.* 100 (1997) 15.

## Appendix

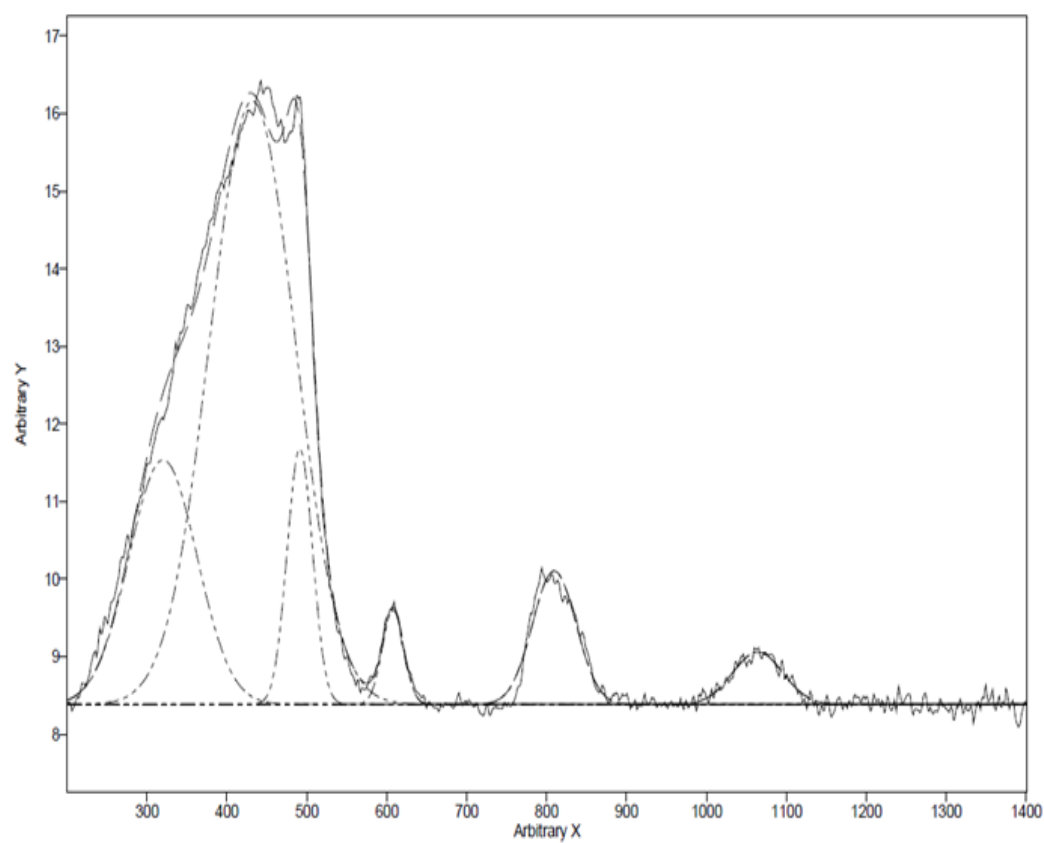
表 1 ホログラム一覧

ホログラム番号	設計仕様	焦点距離 [mm]
01	文字(NGF)	1600
02	文字(NGF ロゴ)	1600
03	3層フォトニック結晶モデル	1300,1600,1900
04	1点モデル	1600
05	点バリエーションモデル	1600
06	7点モデル	1600
07	ラインモデル	1600
08	5x5モデル	1600
09	24点螺旋モデル	100
10	24点螺旋+ラインモデル	100
11	V字モデル	100



表 3-1-2-(2)-(c)-2: ホログラムからの光の波数差

ホログラム一辺の長さ	4mm					
ホログラム対角長さ	5.7mm					
半対角	2.8mm					
時間		100fts	200fts	300fts	400fts	500fts
光の進む距離(nm)		30000	60000	90000	120000	150000
$\lambda=800\text{nm}$ の波数		37.5	75	112.5	150	187.5
再生距離(mm)	波数差					
200	25.0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5
400	12.5	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0
600	8.3	4.5	9.0	13.5	18.0	22.5
800	6.2	6.0	12.0	18.0	24.0	30.0
1000	5.0	7.5	15.0	22.5	30.0	37.5
1200	4.2	9.0	18.0	27.0	36.0	45.0
1400	3.6	10.5	21.0	31.5	42.0	52.5
1600	3.1	12.0	24.0	36.0	48.0	60.0
1800	2.8	13.5	27.0	40.5	54.0	67.5
2000	2.5	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0
2200	2.3	16.5	33.0	49.5	66.0	82.5
2400	2.1	18.0	36.0	54.0	72.0	90.0
2600	1.9	19.0	39.0	58.5	78.0	97.5
2800	1.8	21.0	42.0	63.0	84.0	105.0
3000	1.7	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5
ホログラム一辺の長さ	5mm					
ホログラム対角長さ	7.1mm					
半対角	3.5mm					
時間		100fts	200fts	300fts	400fts	500fts
光の進む距離(nm)		30000	60000	90000	120000	150000
$\lambda=800\text{nm}$ の波数		37.5	75	112.5	150	187.5
再生距離(mm)	波数差					
200	39.1	1.0	1.9	2.9	3.8	4.8
400	19.5	1.9	3.8	5.8	7.7	9.6
600	13.0	2.9	5.8	8.6	11.5	14.4
800	9.8	3.8	7.7	11.5	15.4	19.2
1000	7.8	4.8	9.6	14.4	19.2	24.0
1200	6.5	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8
1400	5.6	6.7	13.4	20.2	26.9	33.6
1600	4.9	7.7	15.4	23.0	30.7	38.4
1800	4.3	8.6	17.3	25.9	34.6	43.2
2000	3.9	9.6	19.2	28.8	38.4	48.0
2200	3.6	10.6	21.1	31.7	42.2	52.8
2400	3.3	11.5	23.0	34.6	46.1	57.6
2600	3.0	12.5	25.0	37.4	49.9	62.4
2800	2.8	13.4	26.9	40.3	53.8	67.2
3000	2.6	14.4	28.8	43.2	57.6	72.0



1=	Gauss	(320,3.1509,100)	2=	Gauss	(431.88,7.7771,125.82)	3=	Gauss	(491.14,3.2985,37.28)
4=	Gauss	(607.73,1.2198,31.229)	5=	Gauss	(809.53,1.7207,64.112)	6=	Gauss	(1064.2,67597.73.953)
7=	Offset	(8.3824)						

図 3-1-2-(2)-(c)-53: 加工部のラマンスペクトルフィッティ  
、ノイズ甲

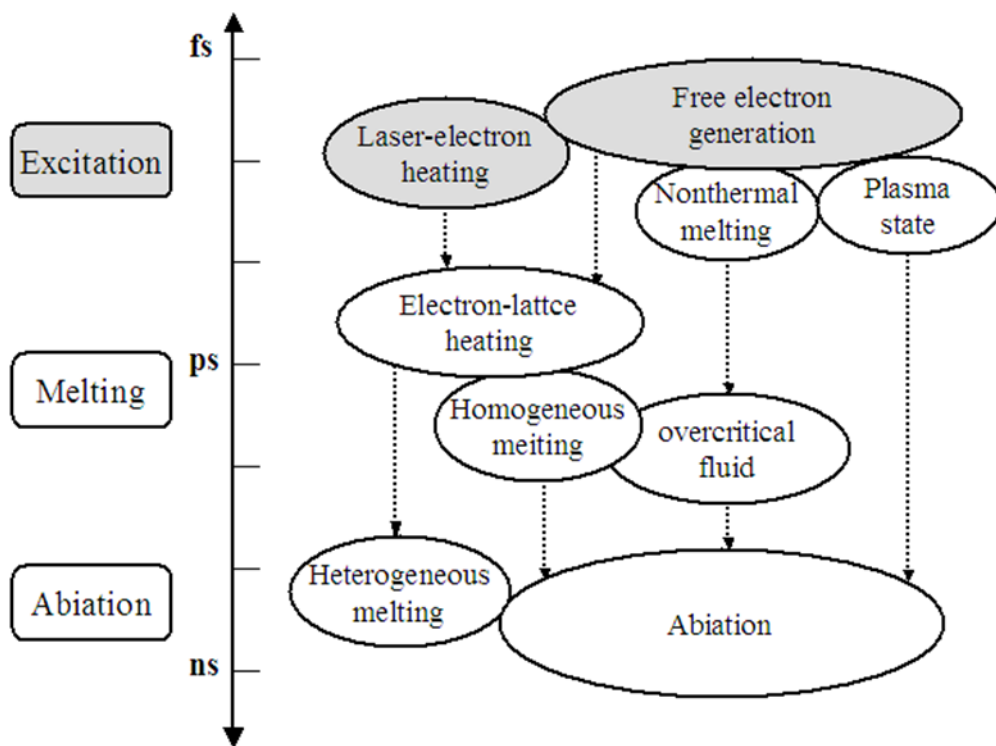


図 3-1-2-(2)-(c)-1 : 光と物質との(およびそれに引き続いて起こる)相互作用の時間スケール

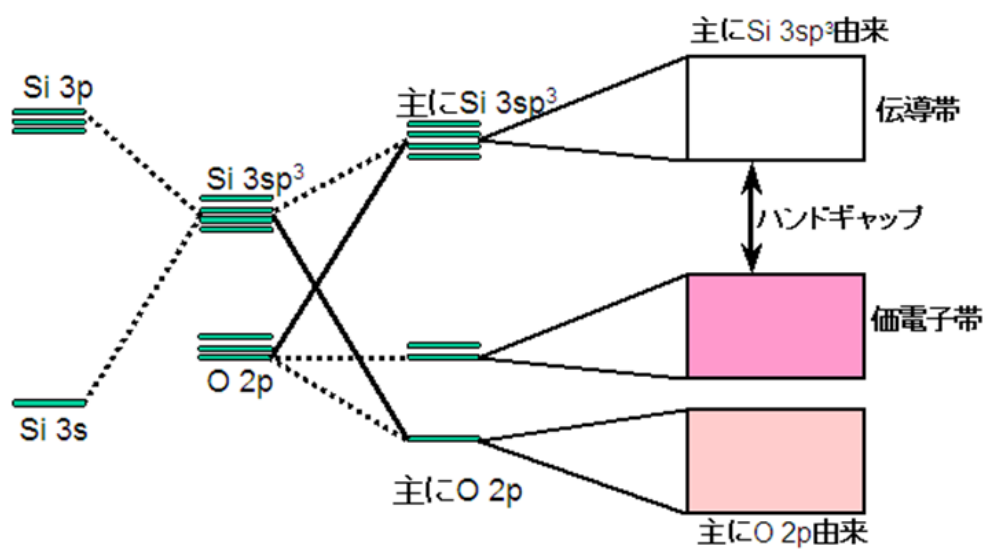


図 3-1-2-(2)-(c)-2: シリカガラスのバンド構造

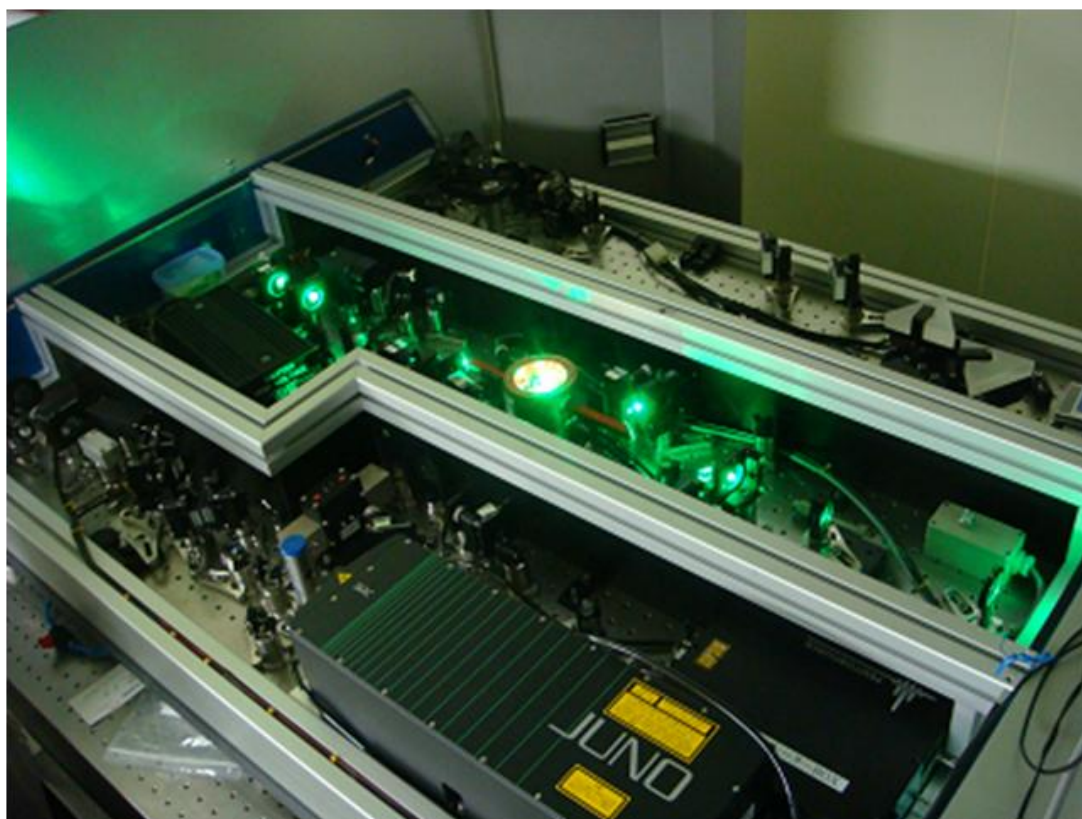
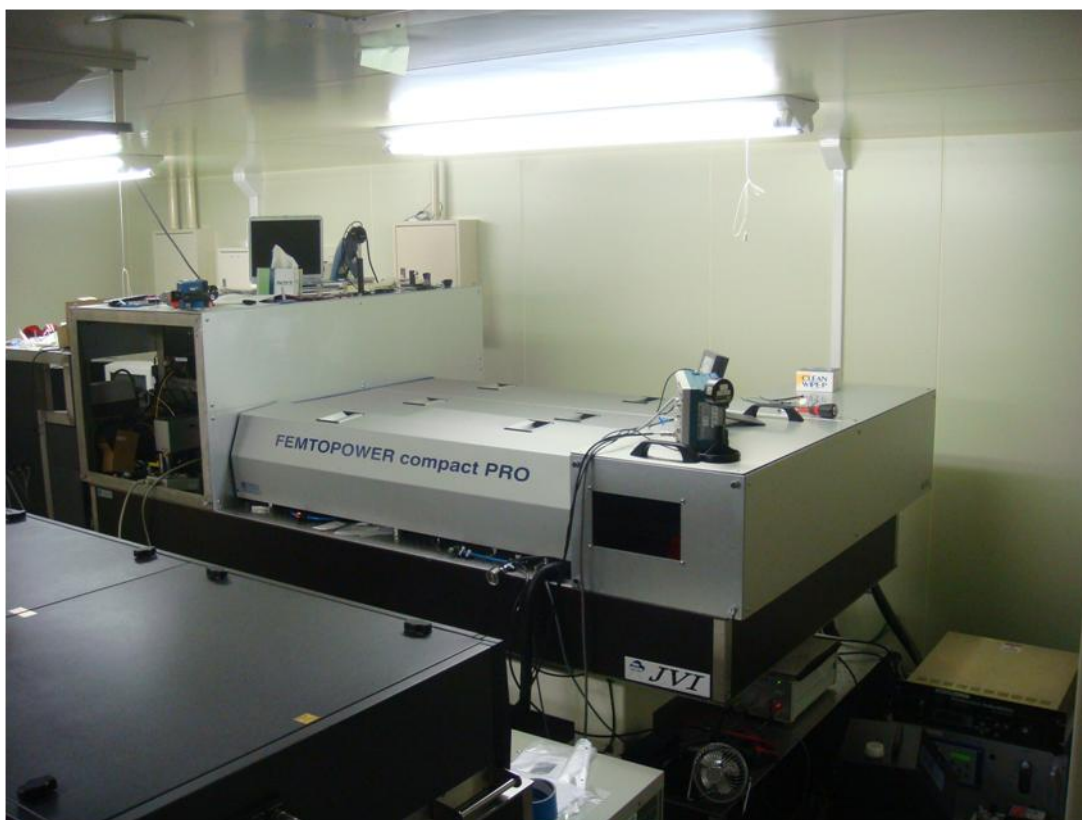


図 3-1-2-(2)-(c)-3、3-1-2-(2)-(c)-4: フェムト秒パルスレーザーの外観

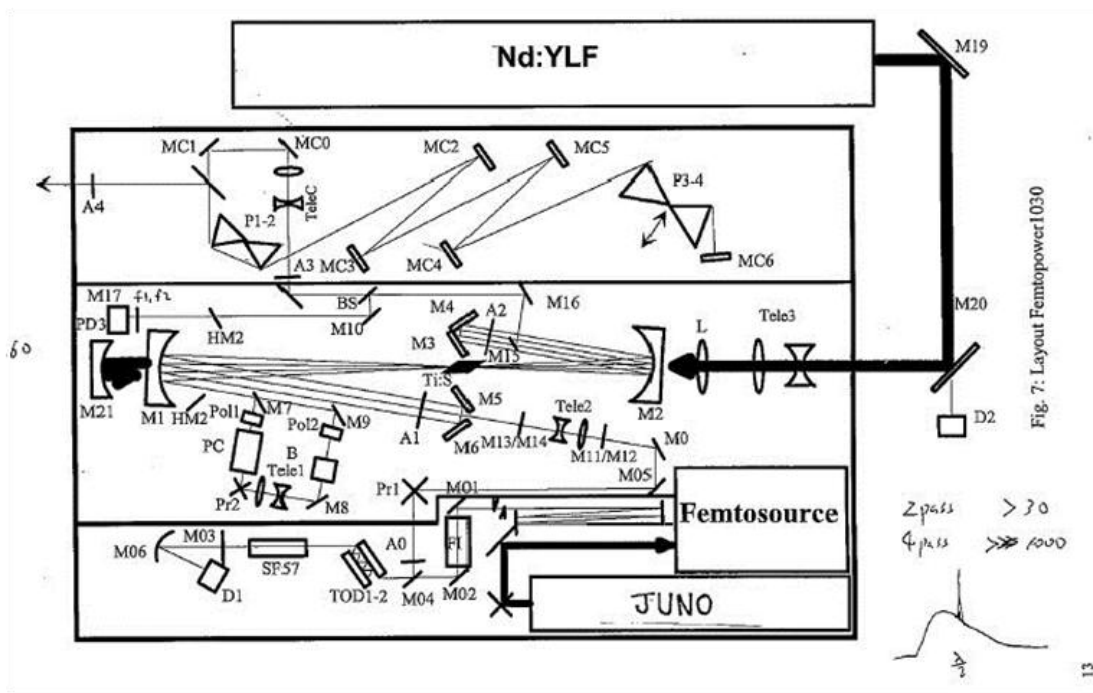


図 3-1-2-(2)-(c)-5: フェムト秒パルスレーザーの光学系概略図

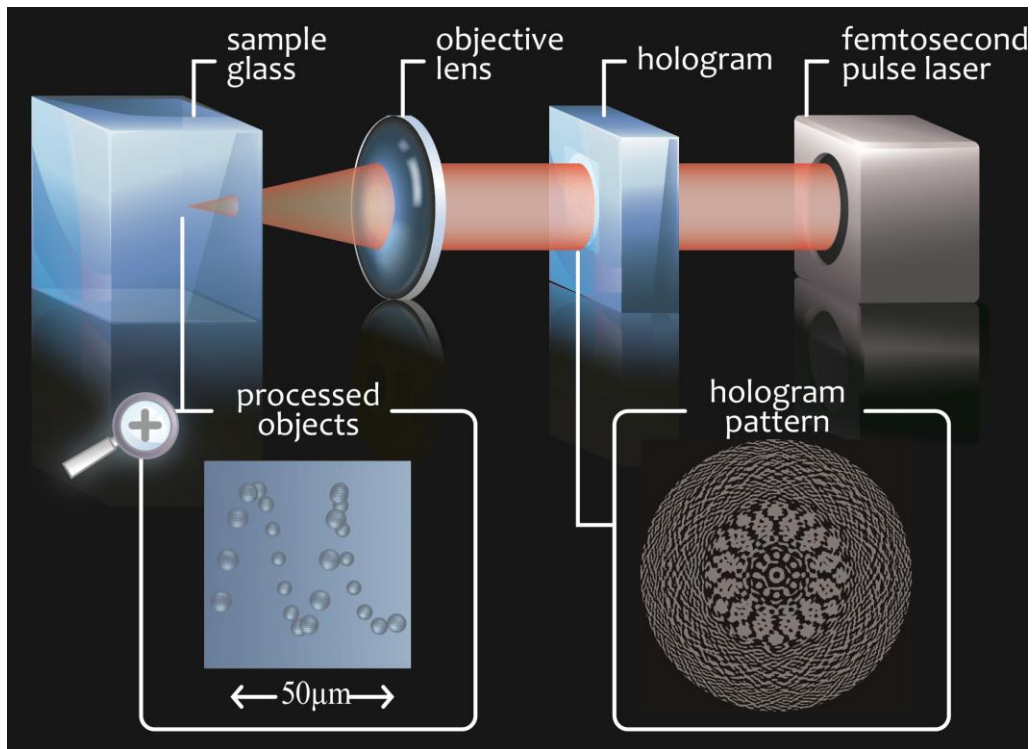


図 3-1-2-(2)-(c)-6: 三次元一括加工法光学システム概略図



図 3-1-2-(2)-(c)-7: Ti:S チャンバー内の結露状況





圖 3-1-2-(2)-(c)-8: 立方体粹型加工結果

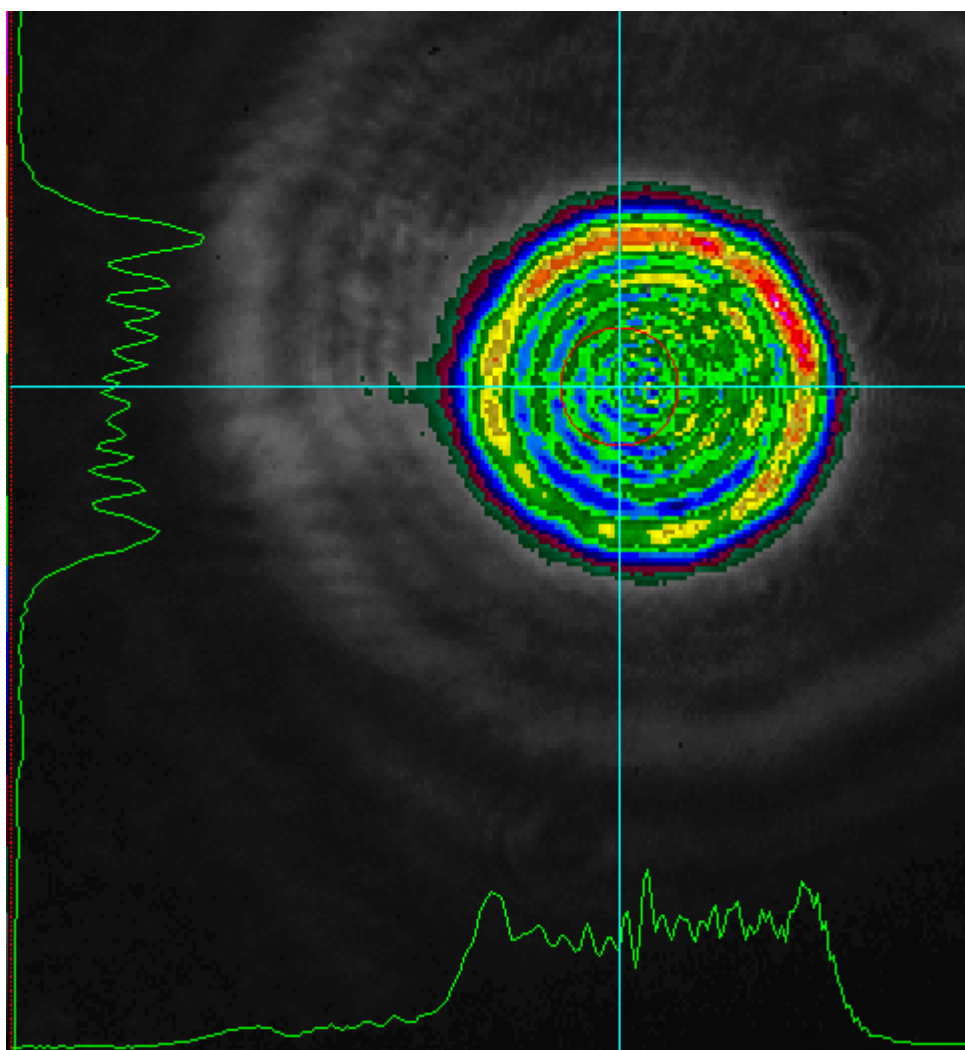


図 3-1-2-(2)-(c)-9 : ビームの強度プロファイル(横モード)

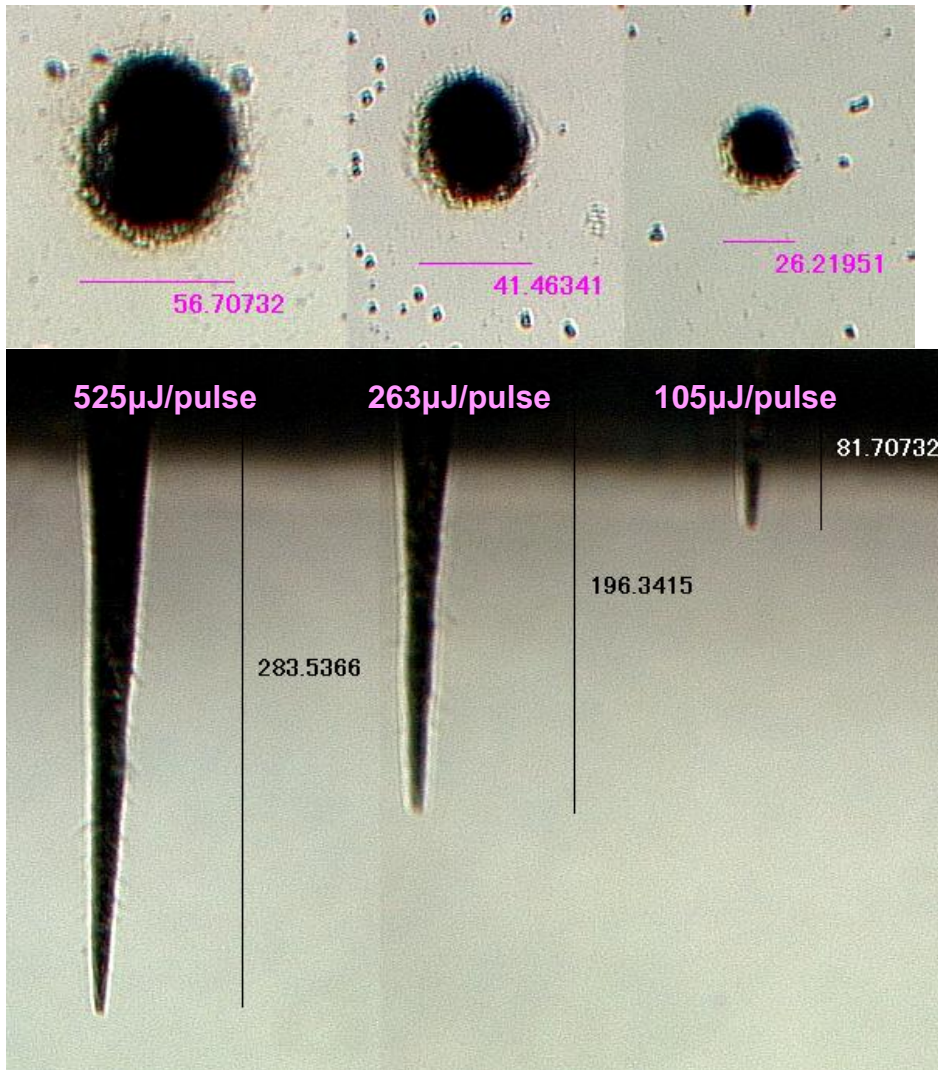


図 3-1-2-(2)-(c)-10: パルスパワーとアブレーション深さとの相関  
(ソーダライムガラスに加工)

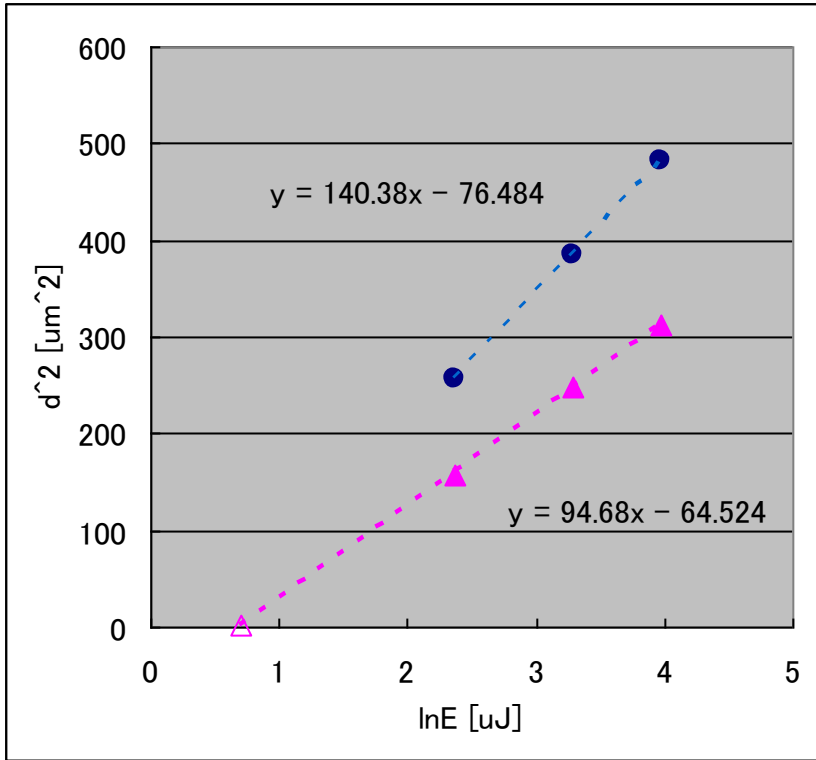


図 3-1-2-(2)-(c)-11: パルスパワー $E$ とアブレーション半径  $d_{abl}$ との関係; ●:ソーダライムガラス、▲:合成石英ガラス。△は文献値。

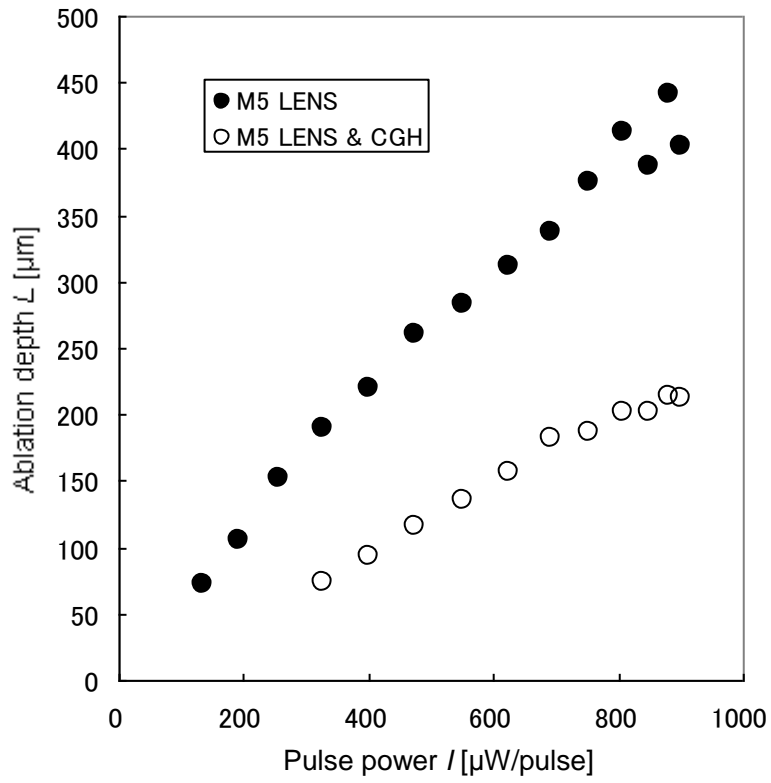


図 3-1-2-(2)-(c)-12: アブレーション深度  $L$  のパルスパワー  $I$  依存性;  
 ●:対物レンズのみ、○:対物レンズ+CGH

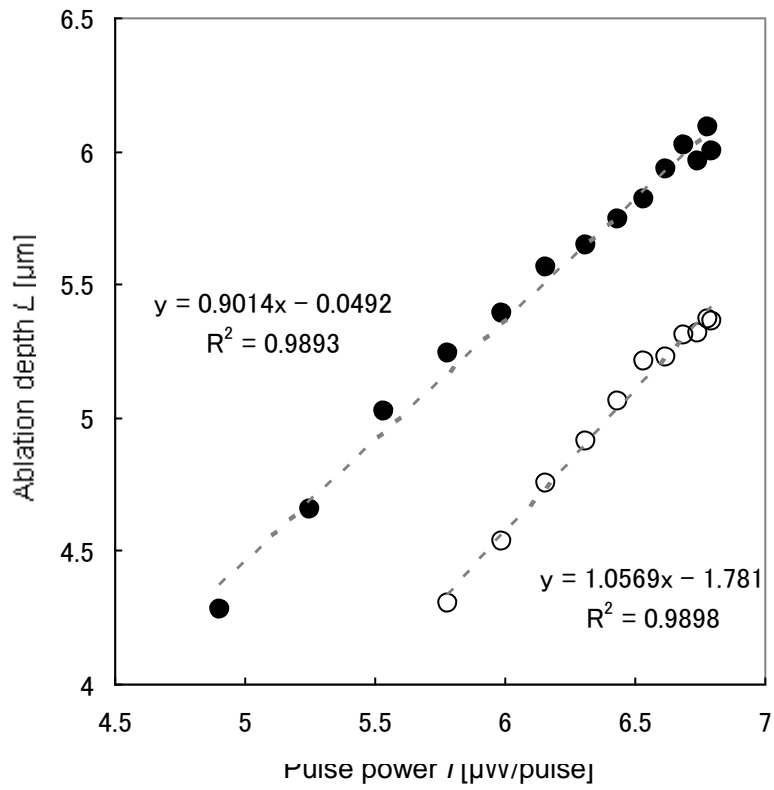


図 3-1-2-(2)-(c)-13: アブレーション深度  $L$  のパルスパワー  $I$  依存性 (両対数); ●:対物レンズのみ、○:対物レンズ+CGH

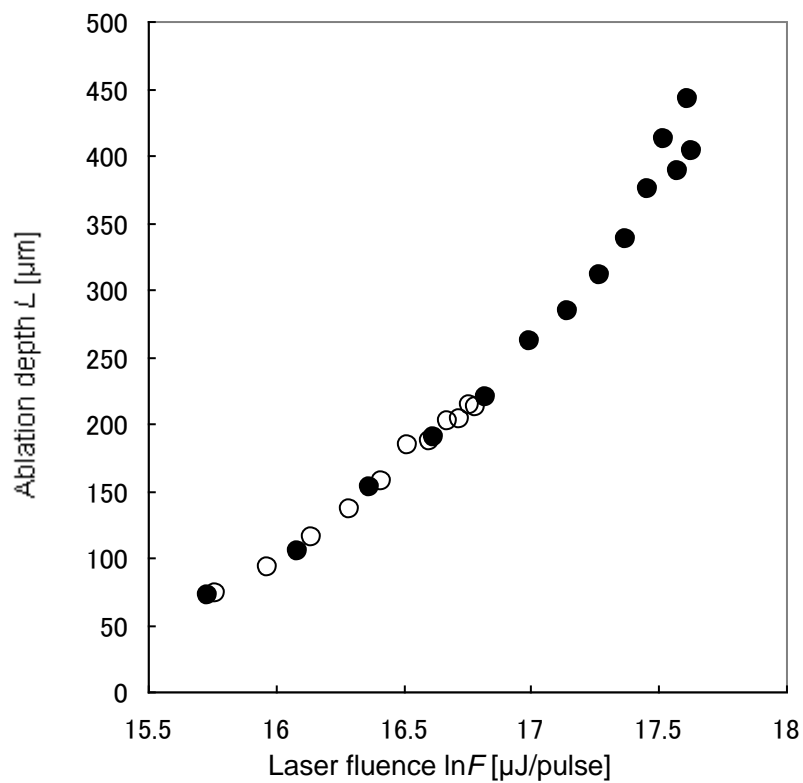


図 3-1-2-(2)-(c)-14: フェムト秒パルスレーザーのフルエンス  $F$  とアブレーション深度  $L$  との関係を両対数でプロットしたグラフ; ●: 対物レンズのみ、○: 対物レンズと CGH

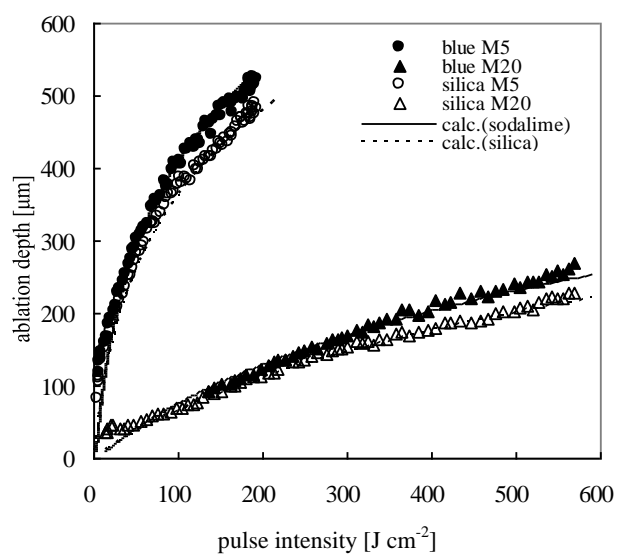
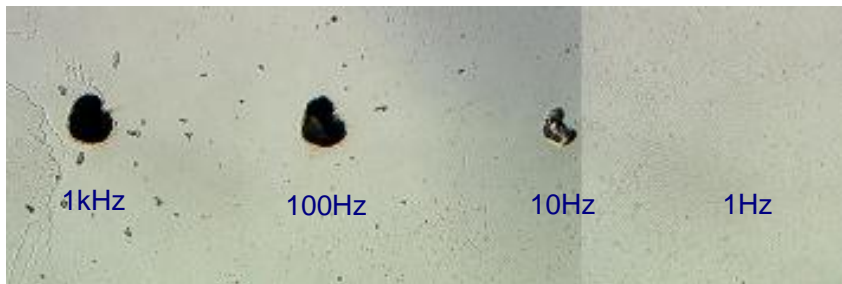
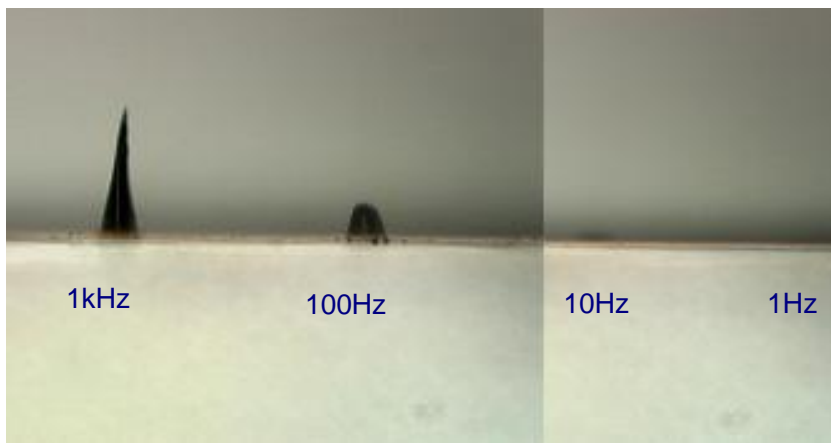


図 3-1-2-(2)-(c)-15: アブレーション深度のパルス強度依存性の計算値との比較



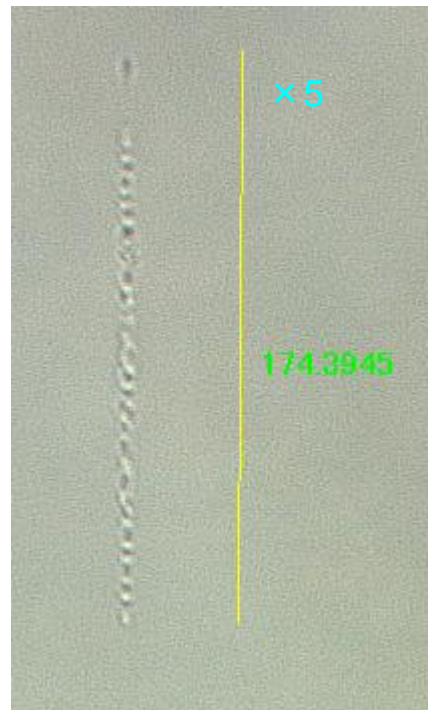
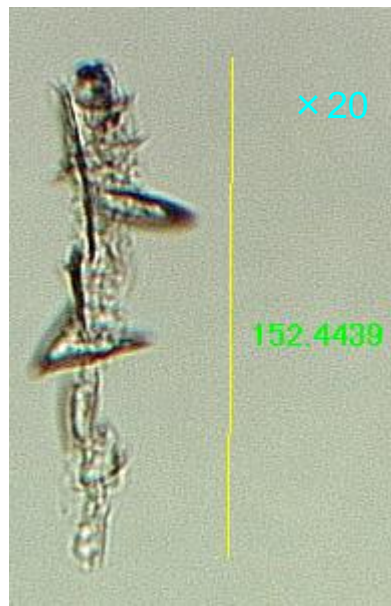


(加工面から見た図)



(側面から見た図)

図 3-1-2-(2)-(c)-16 : 対物レンズのみで作製したアブレーション形状



182 $\mu$ m

図 3-1-2-(2)-(c)-17: 対物レンズのみで集光させた場合の加工形状; (左)205 $\mu$ J/pulse, (中)100 $\mu$ J/pulse, (右)55 $\mu$ J/pulse

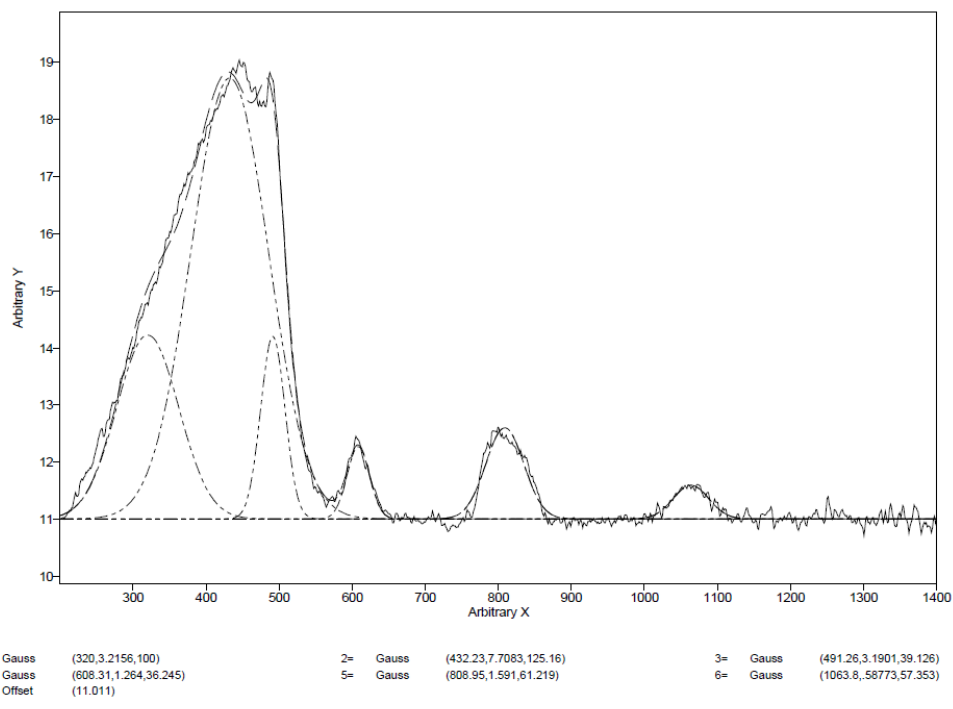


図 3-1-2-(2)-(c)-18: ラマンスペクトルのフィッティング

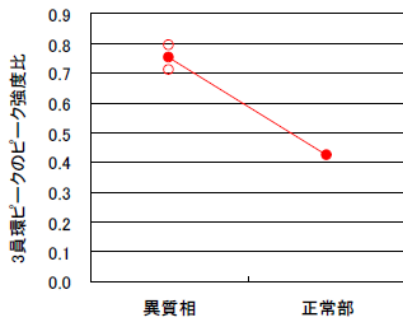


Fig.6-1 3員環(600cm<sup>-1</sup>付近)のピーク強度比

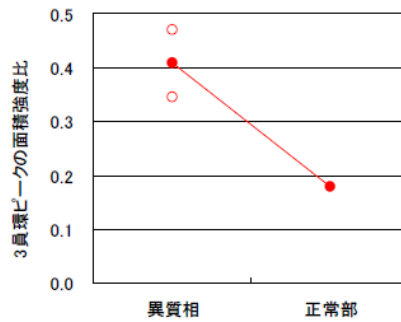


Fig.6-2 3員環(600cm<sup>-1</sup>付近)の面積強度比

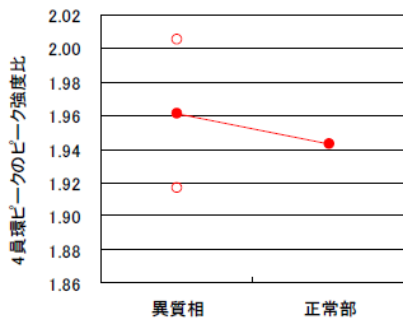


Fig.7-1 4員環(495cm<sup>-1</sup>付近)のピーク強度比

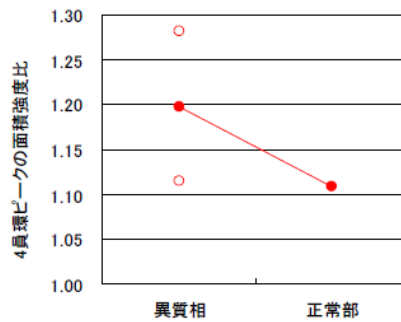


Fig.7-2 4員環(495cm<sup>-1</sup>付近)の面積強度比

800cm<sup>-1</sup>付近のラマン線に対する相対強度比較図

図 3-1-2-(2)-(c)-19: ラマンスペクトルのピーク強度比

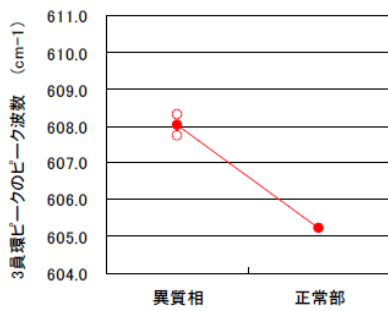


Fig.8-1 3員環(600cm<sup>-1</sup>付近)のピーク波数

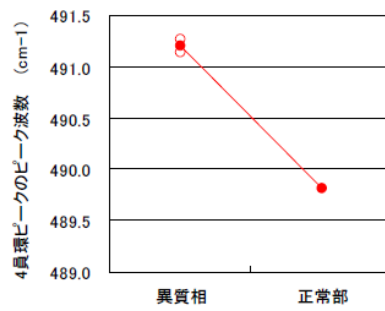


Fig.8-2 4員環(495cm<sup>-1</sup>付近)のピーク波数

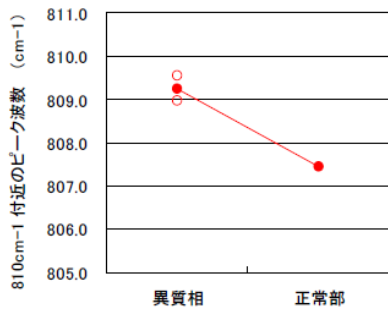


Fig.8-3 810cm<sup>-1</sup>付近のピーク波数

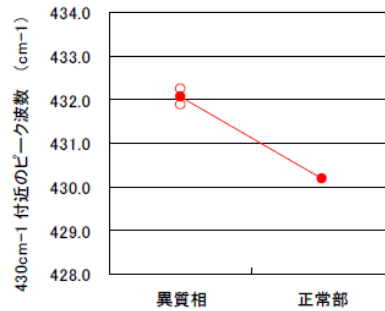


Fig.8-4 430cm<sup>-1</sup>付近のピーク波数

図 3-1-2-(2)-(c)-20:ラマンスペクトルのピーク波数比

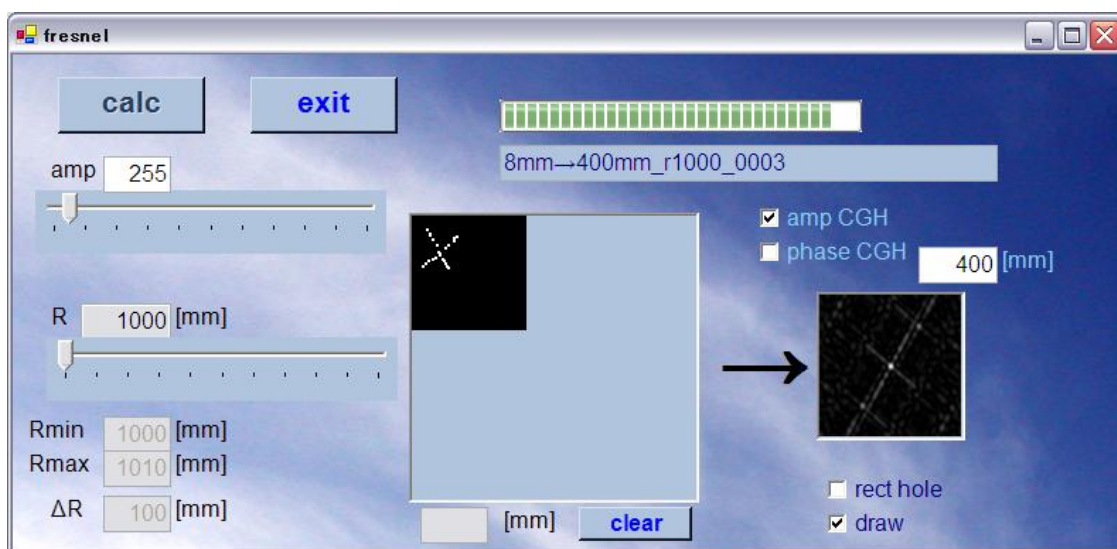


図 3-1-2-(2)-(c)-21: シミュレータのユーザーインターフェース

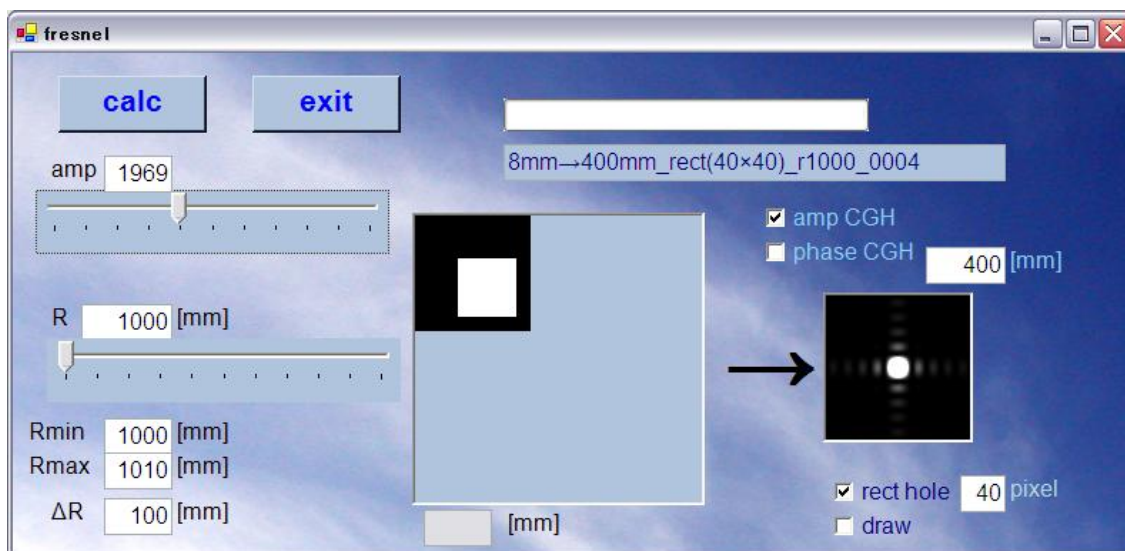


図 3-1-2-(2)-(c)-22: 方形スリットに対する計算結果

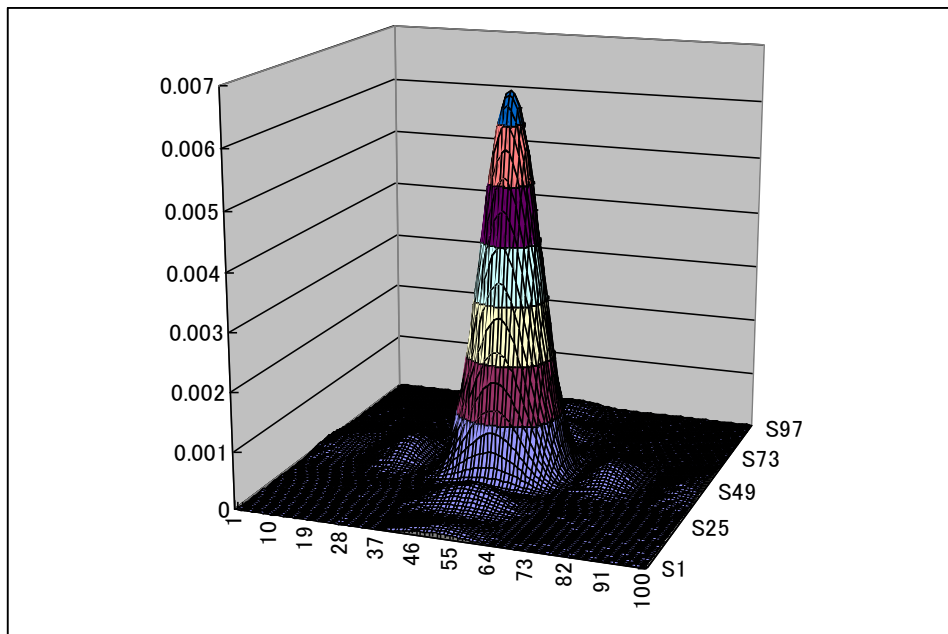


図 3-1-2-(2)-(c)-23: 方形スリットに対する計算結果  
(3D 表示)



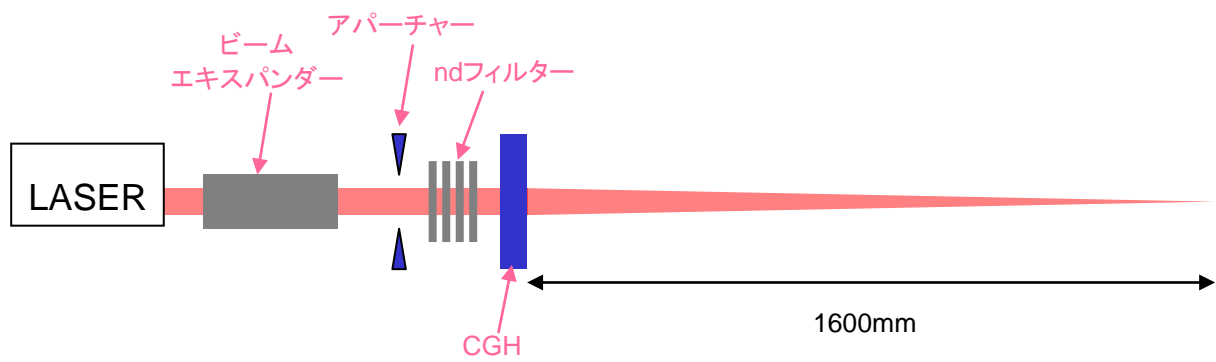


図3-1-2-(2)-(c)-24: 計算機ホログラム再生試験用光学系



図3-1-2-(2)-(c)-25: フーリエ変換ホログラム01の再生像



図3-1-2-(2)-(c)-26: フーリエ変換ホログラム02の再生像

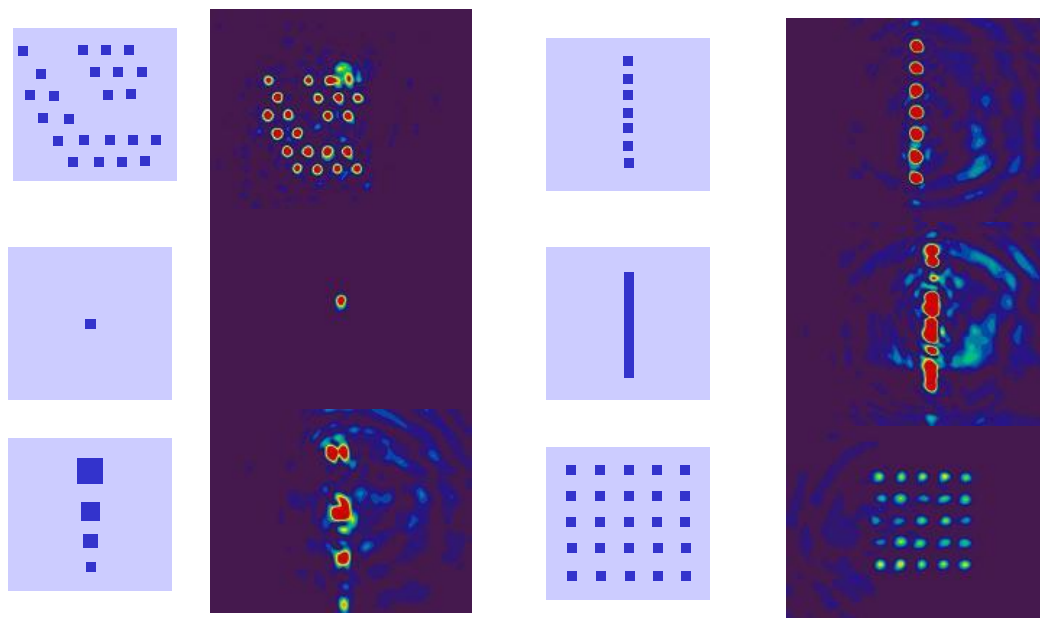


図3-1-2-(2)-(c)-27: フレネル変換ホログラム03~08の設計値および再生像

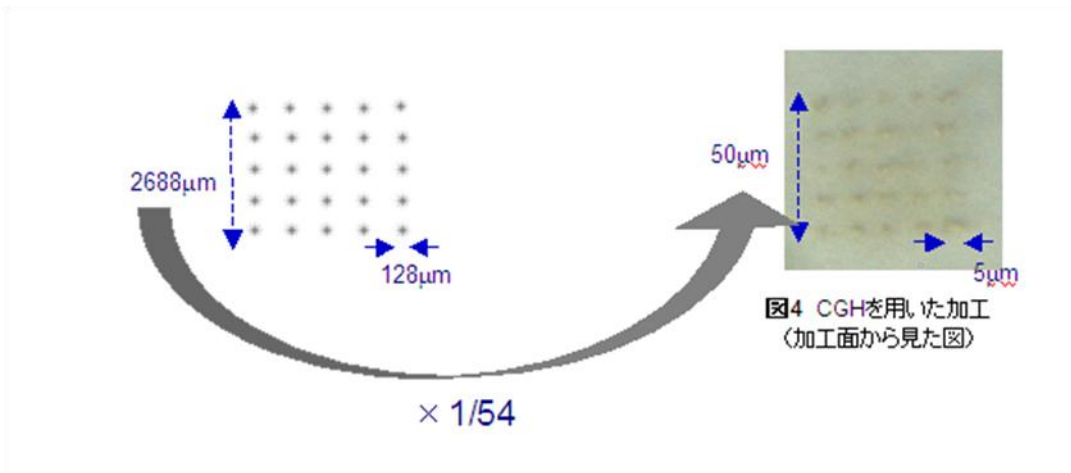


図 3-1-2-(2)-(c)-28: ホログラム 08(5×5)による内部加工結果を光源方向から見た光学顕微鏡写真

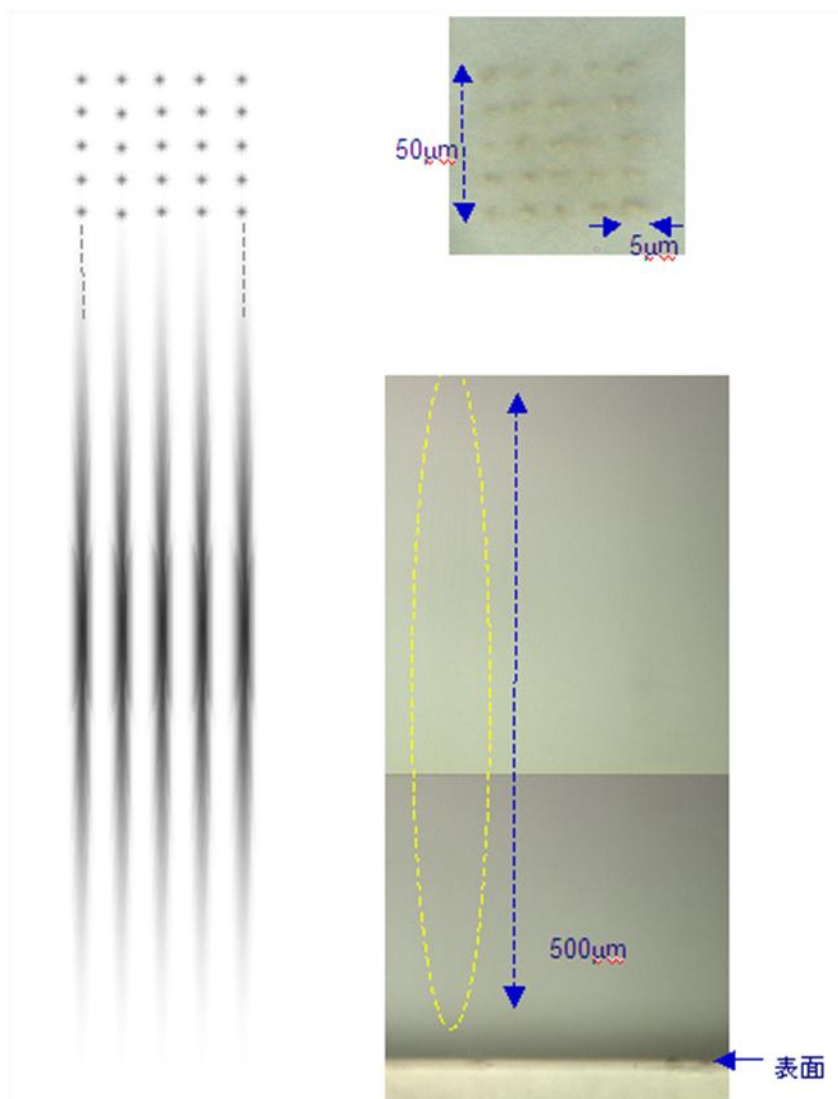


図 3-1-2-(2)-(c)-29: ホログラム 08(5×5)による内部加工結果  
(光源方向・光源に垂直な方向から見た光学顕微鏡写真)

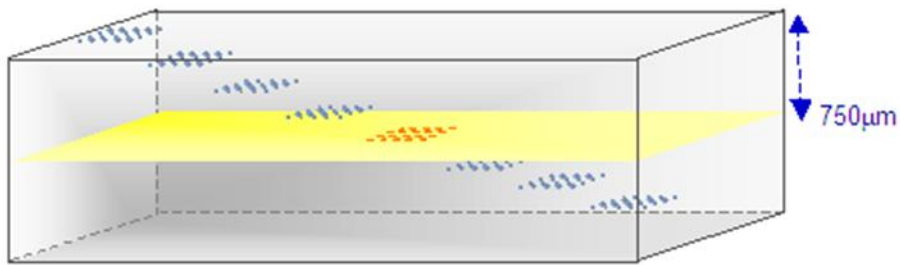
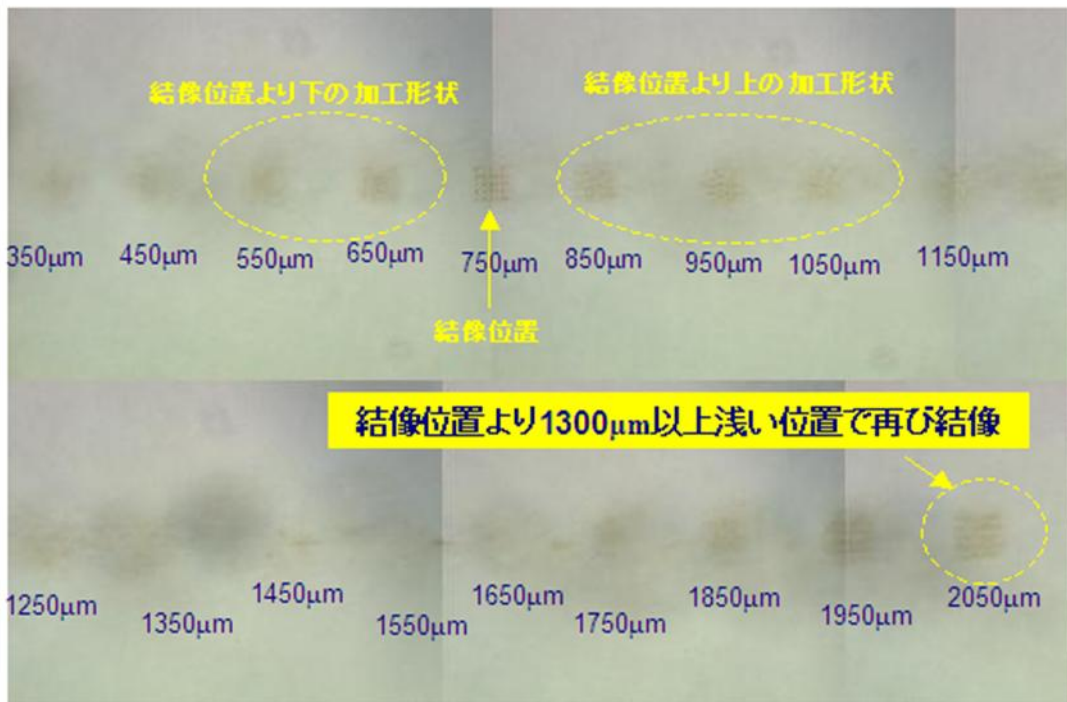


図 3-1-2-(2)-(c)-30: 結像深さを変えながらホログラム 08(5×5)による内部加工を行ったサンプルを表面から 750μ m の深さに光学顕微鏡の焦点を合わせて観察した像

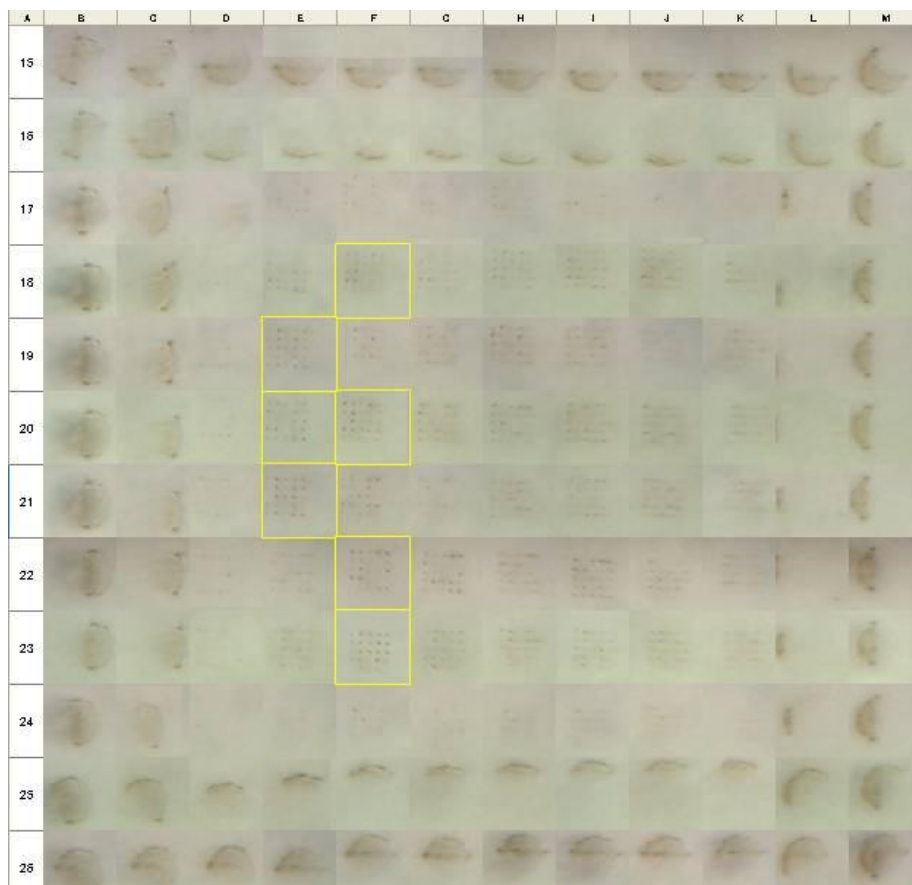


図 3-1-2-(2)-(c)-31: CGH 位置を変えた時の加工形状の変化; 図右方向が CGH を+x 方向に動かした加工、図上方向が CGH を+y 方向に動かした加工。黄色の枠=比較的鮮明になったもの

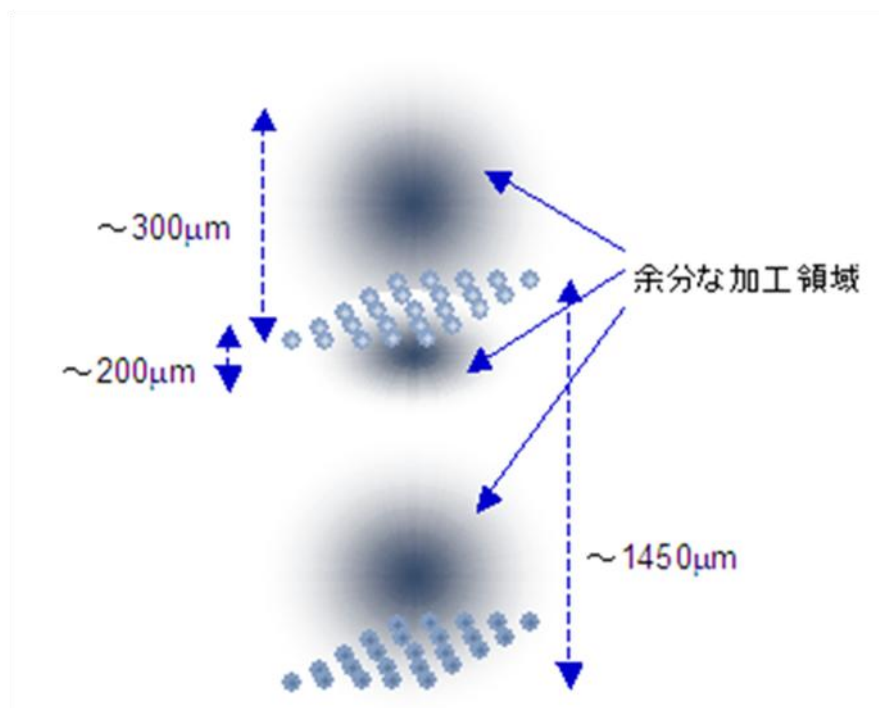


図 3-1-2-(2)-(c)-32: ホログラム 08(5×5)による内部加工された異質相形状の概念図

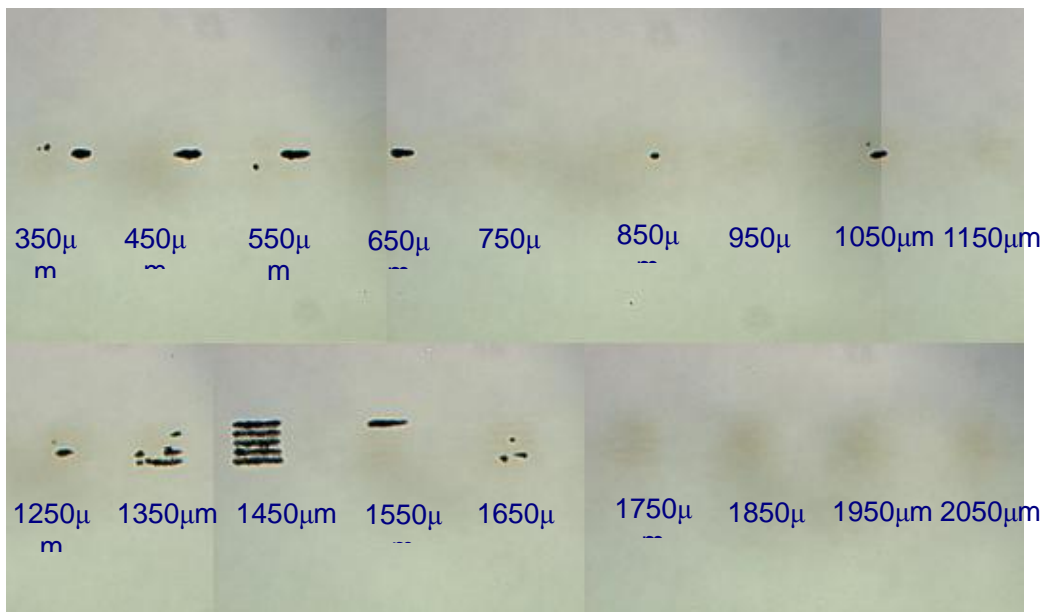


図 3-1-2-(2)-(c)-33 : 結像深さを変えたホログラム 08(5×5)による加工サンプルの表面アブレーション量の比較; 図内青字はサンプル表面から結像深さまでの距離を示す。



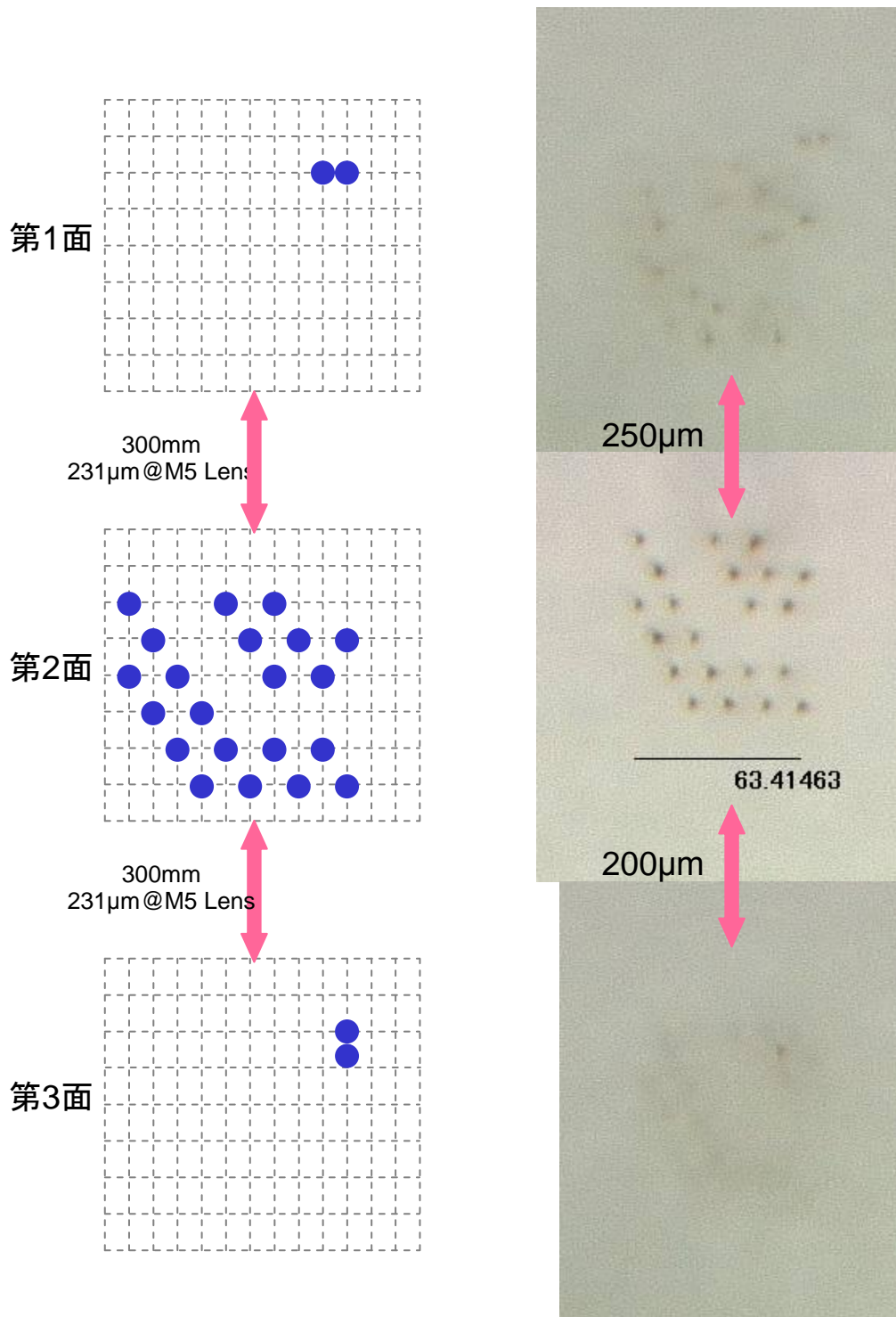


図 3-1-2-(2)-(c)-34: 3次元フォトニック結晶モデルの設計値(左)および実際の加工形状(右)



図 3-1-2-(2)-(c)-35: 7×2 ドット加工結果(上: 第 1 面、下: 第 2 面)

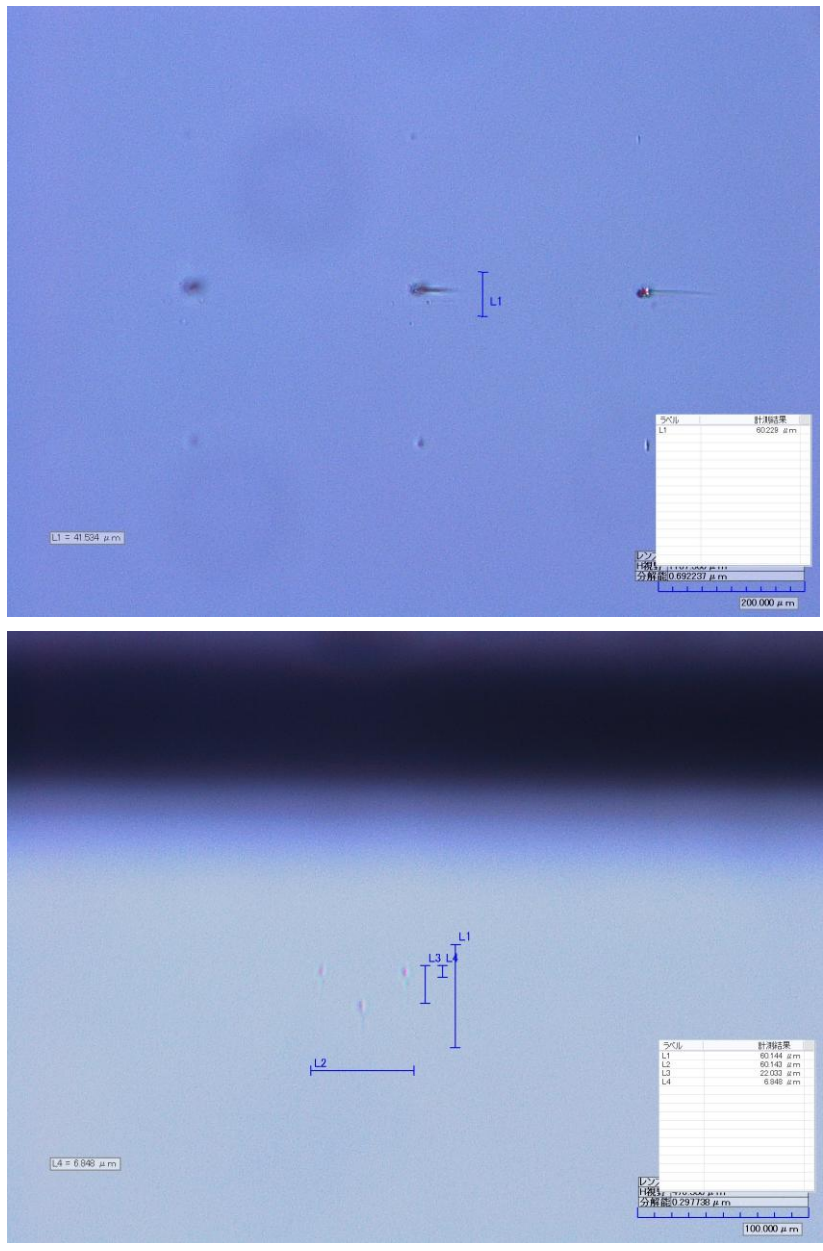


図 3-1-2-(2)-(c)-36: 2×2ドット加工結果(上:レーザー入射方向から観察、  
下:レーザー入射方向と垂直な方向から観察)

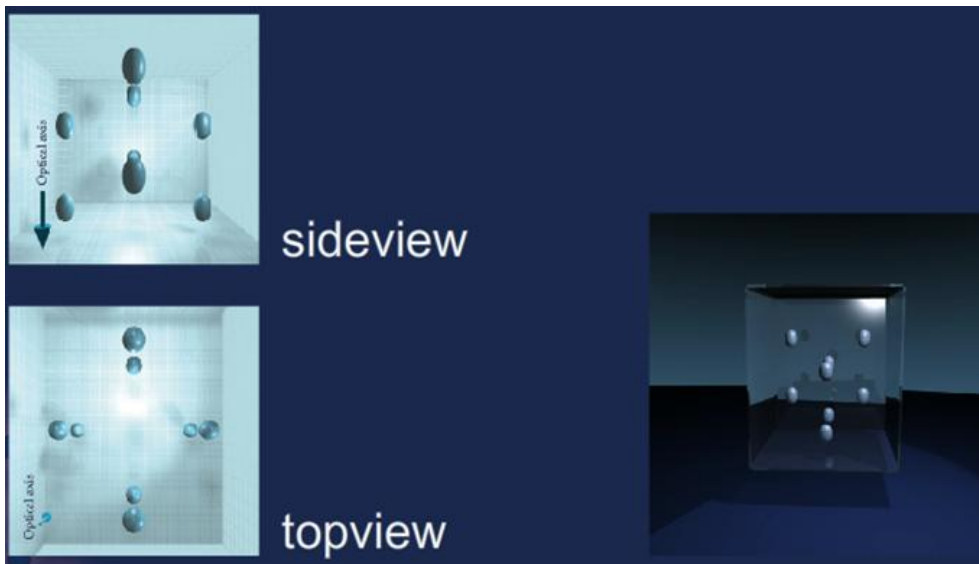


図 3-1-2-(2)-(c)-37:2×4ドット設計図

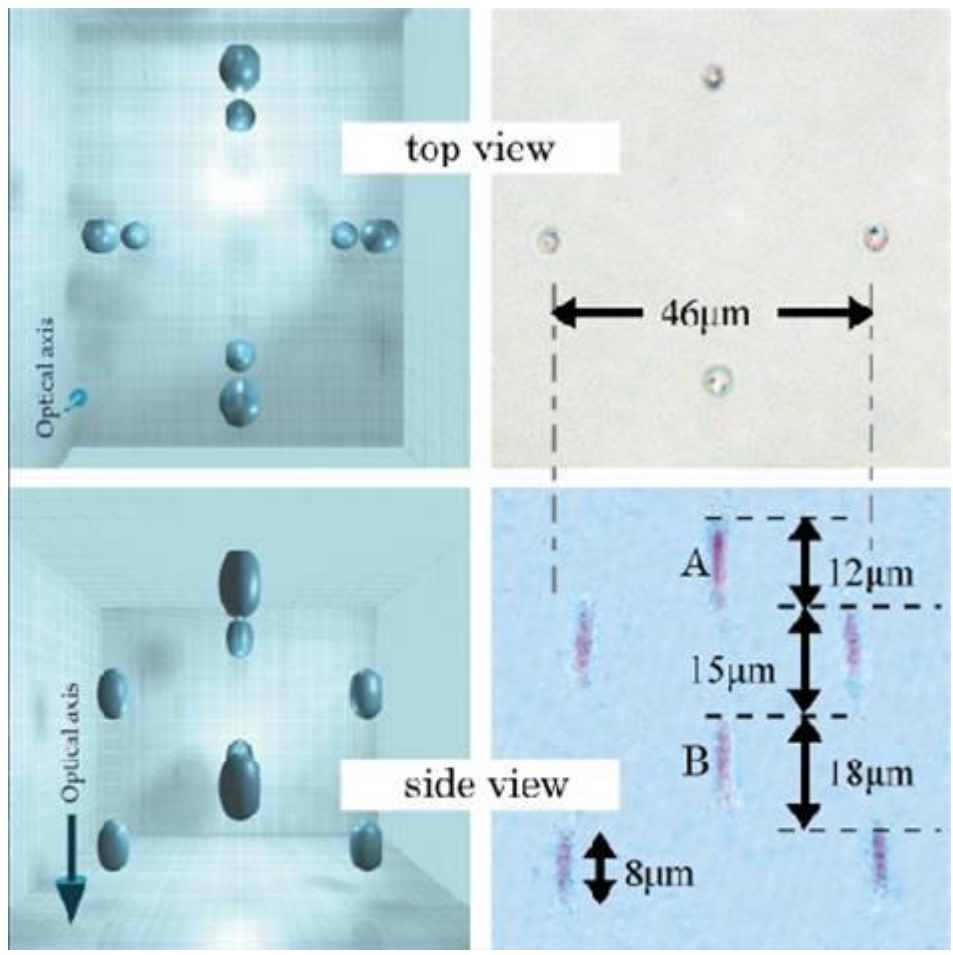


図 3-1-2-(2)-(c)-38: 2×4ドット加工結果

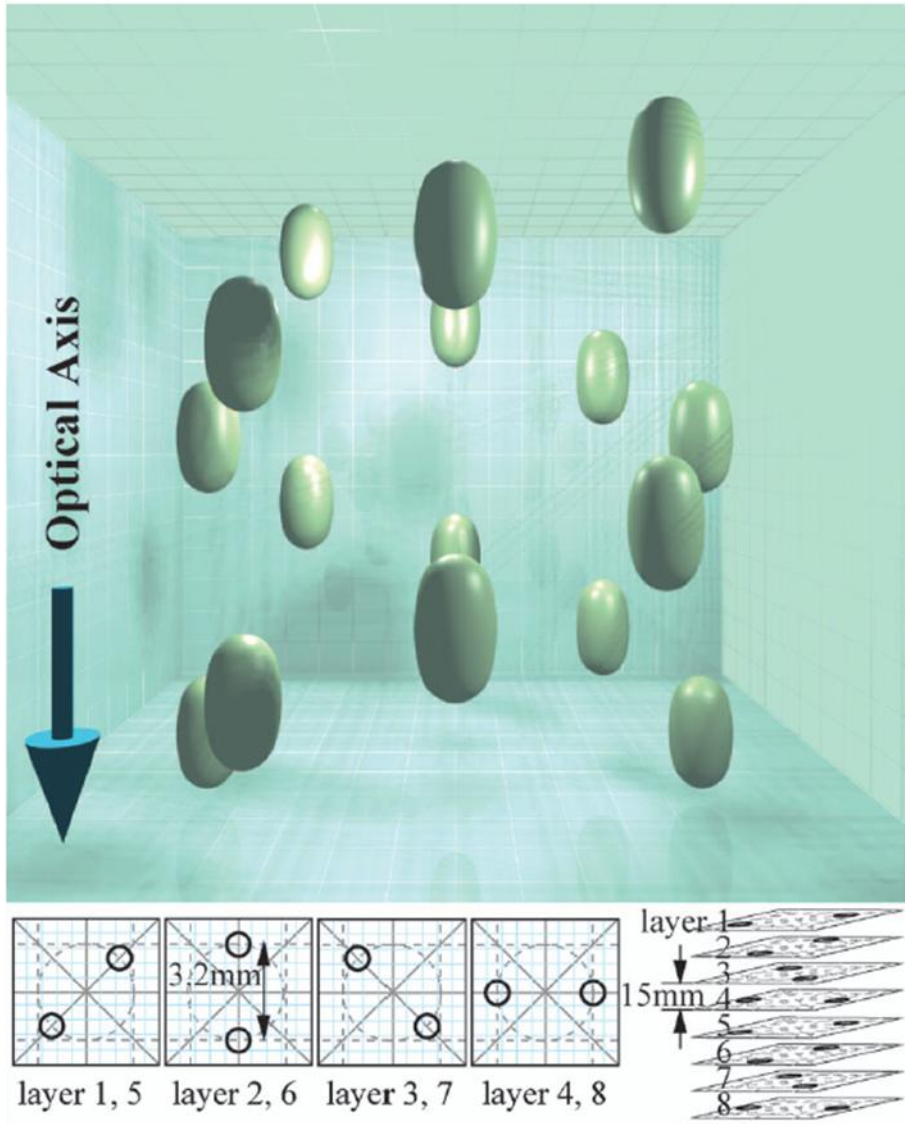


図 3-1-2-(2)-(c)-39: 2×8 モデル設計図

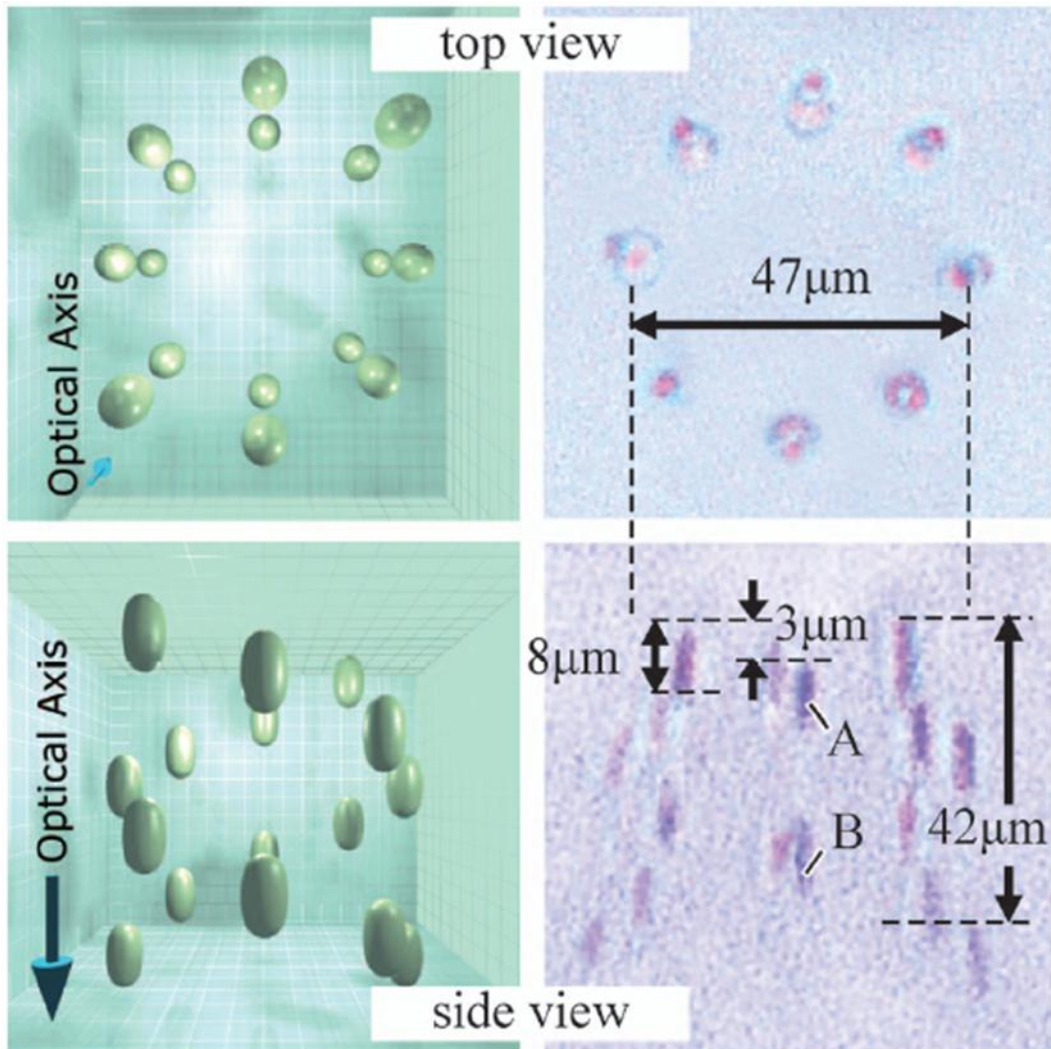


図 3-1-2-(2)-(c)-40: 2×8 モデル加工結果

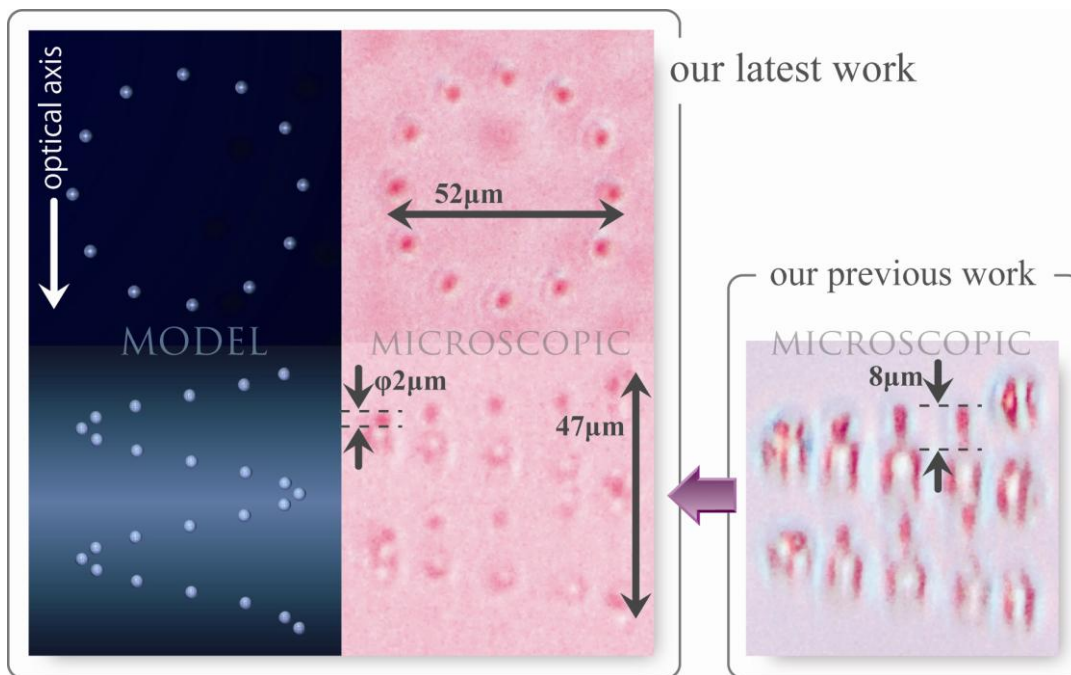


図 3-1-2-(2)-(c)-41: 加工例(モデル図と光学顕微鏡写真):左図上側は光源方向から、下側はそれに垂直な方向からの観察像。右図は過去の加工例で、現在は光軸方向への伸びを抑えた均一な加工ができていることがわかる。



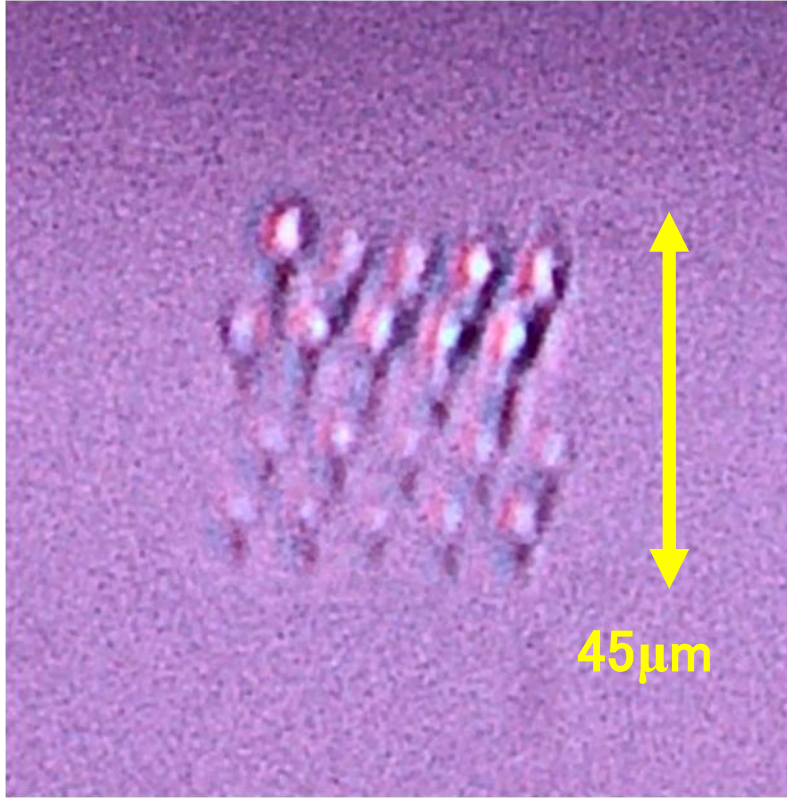


图 3-1-2-(2)-(c)-42: 100 点加工结果

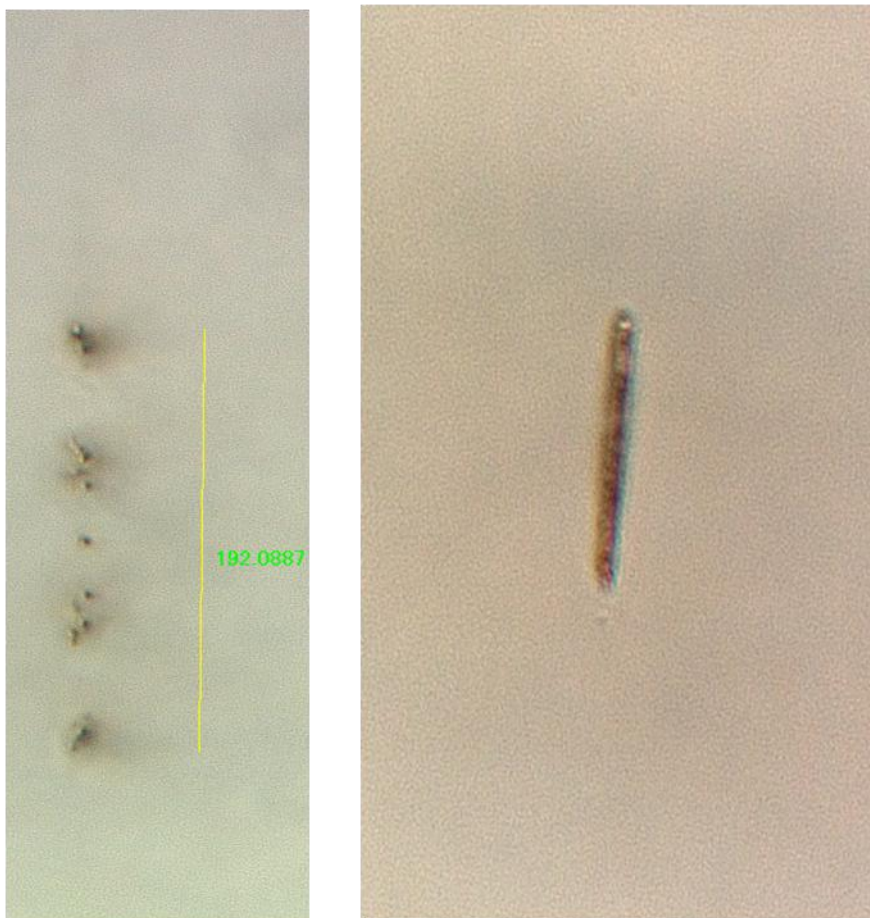


図 3-1-2-(2)-(c)-43: ライン加工

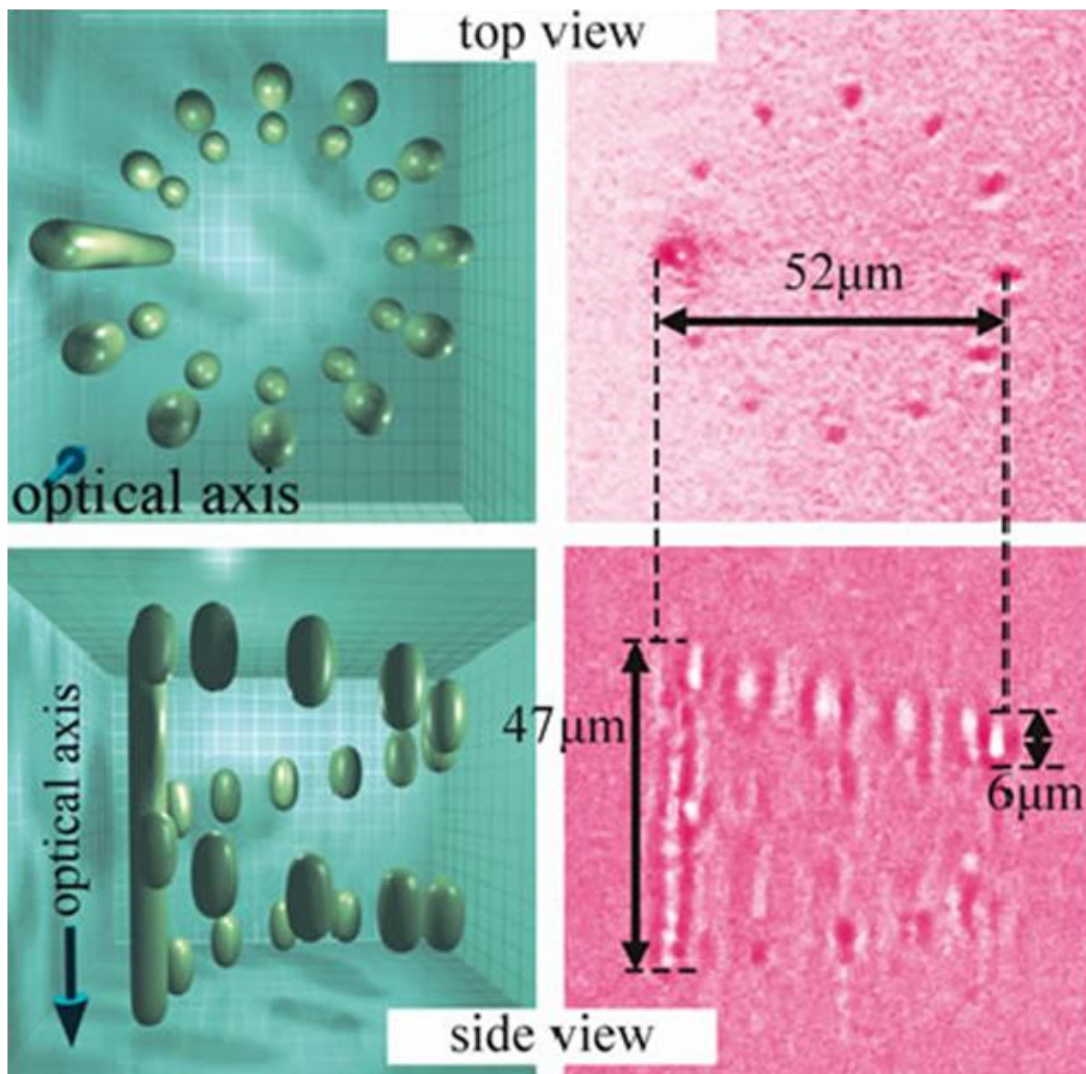


図 3-1-2-(2)-(c)-44: ライン+ドット加工

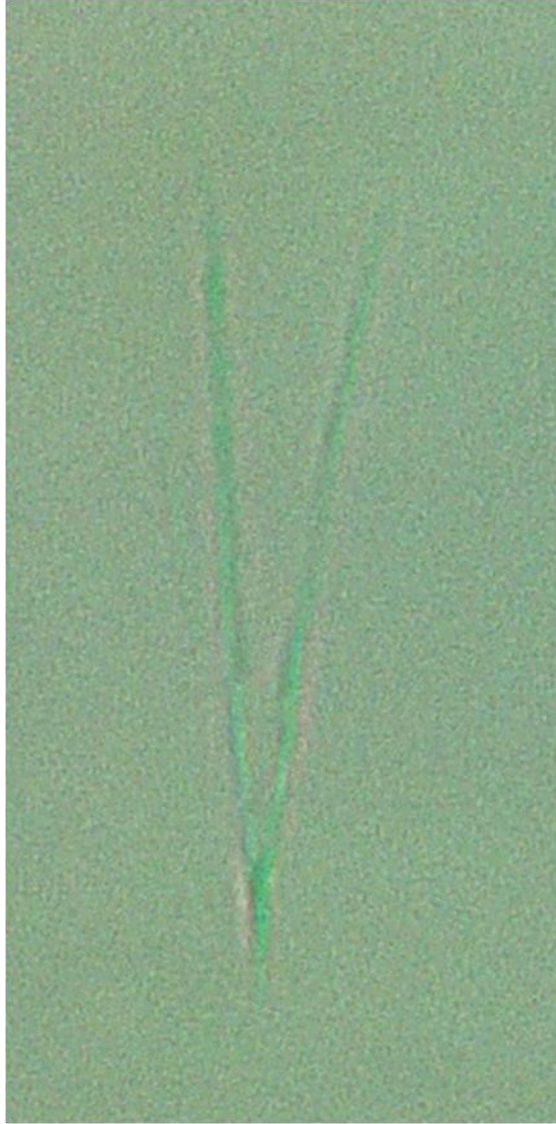


图 3-1-2-(2)-(c)-45: V 字加工

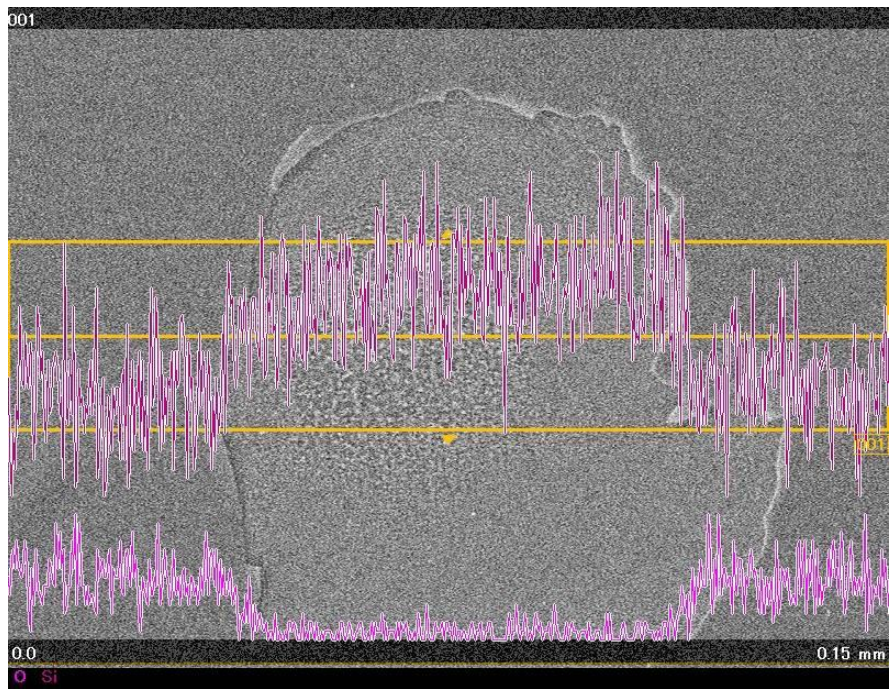


図 3-1-2-(2)-(c)-46: 異質相の EDS 観察結果

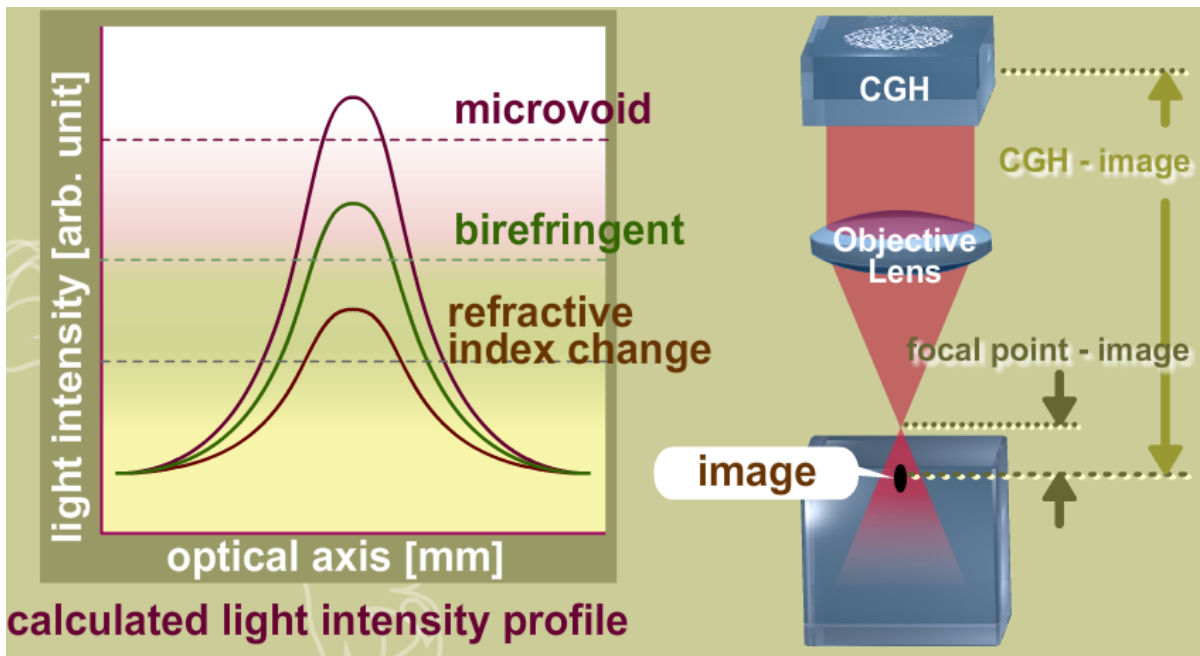


図 3-1-2-(2)-(c)-47: 異質相の種類ごとの閾値の概略図

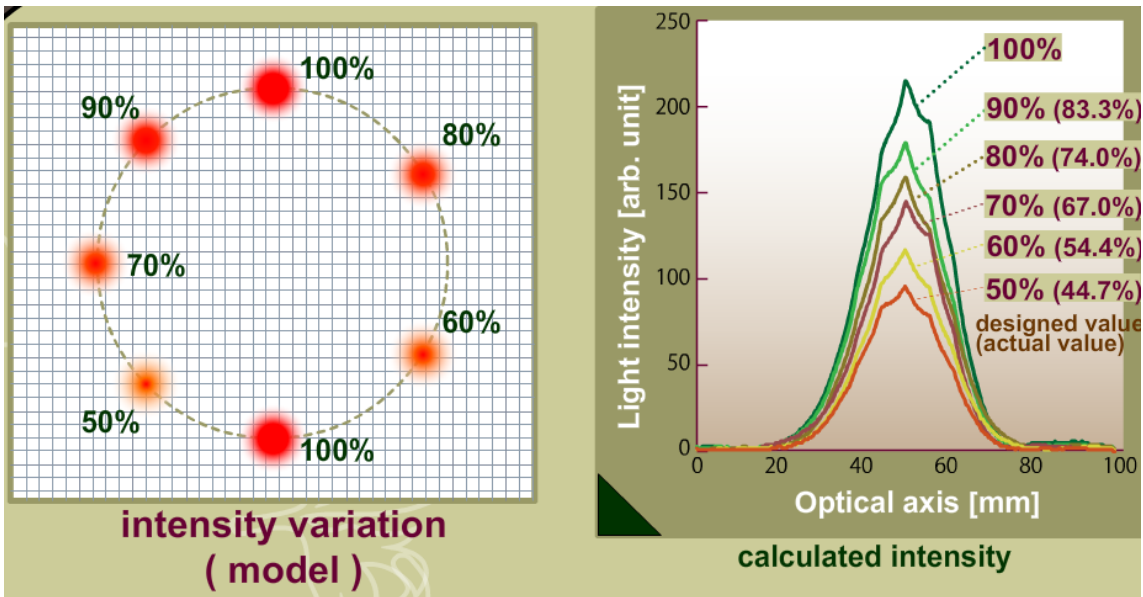


図 3-1-2-(2)-(c)-48: 強度変化ホログラム

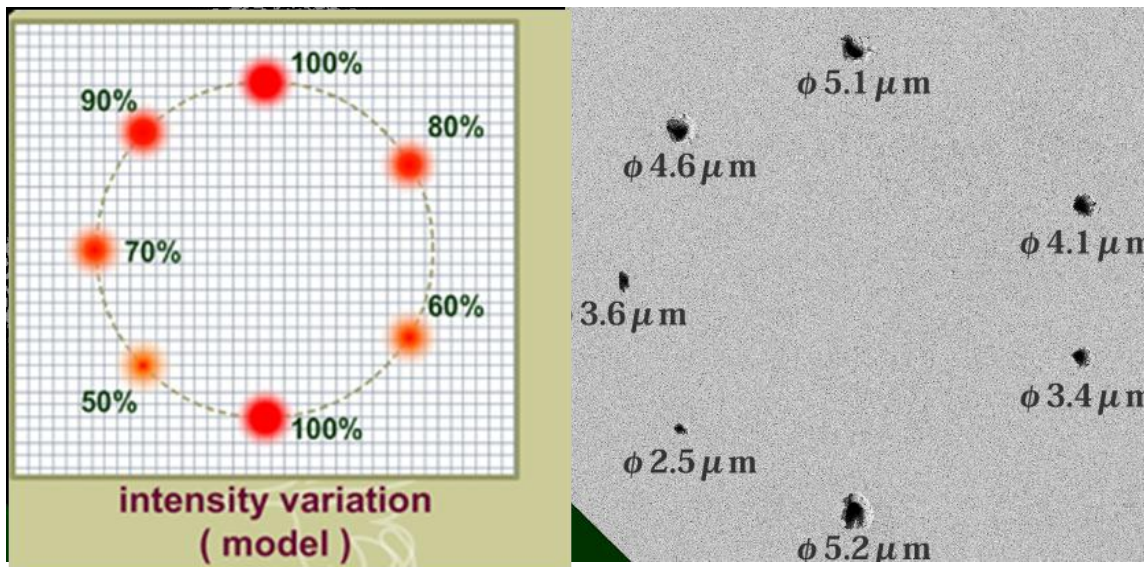


図 3-1-2-(2)-(c)-49: 強度変化ホログラムによる加工結果



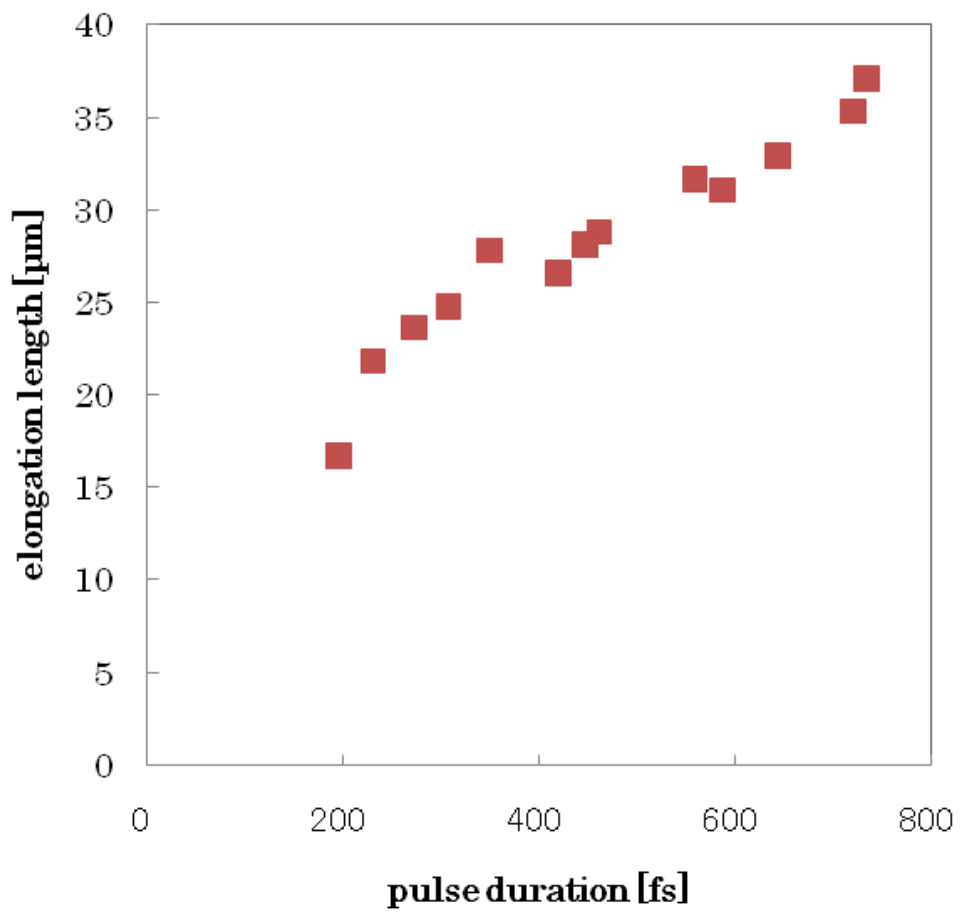


図 3-1-2-(2)-(c)-50: フルエンス一定の条件下におけるアブレーション深度のパルス幅依存性

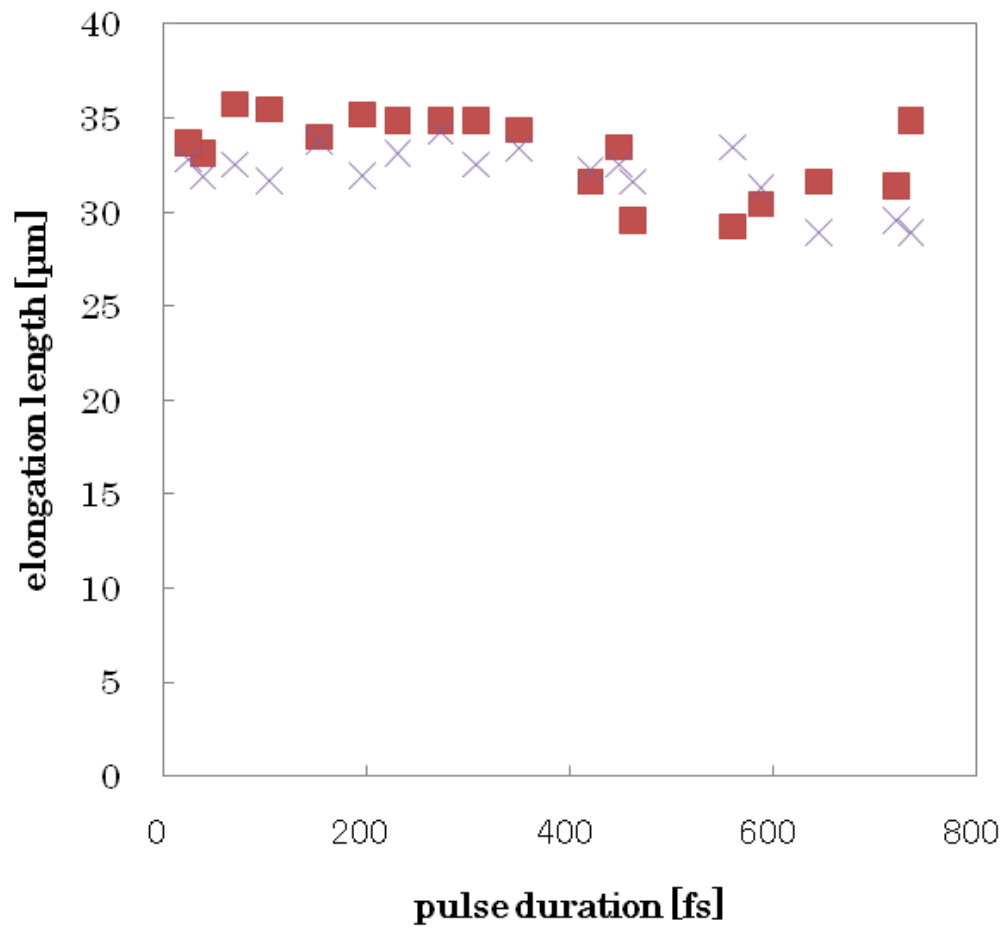


図 3-1-2-(2)-(c)-51: フォトン数一定の条件下でのアブレーション深度のパルス幅依存性

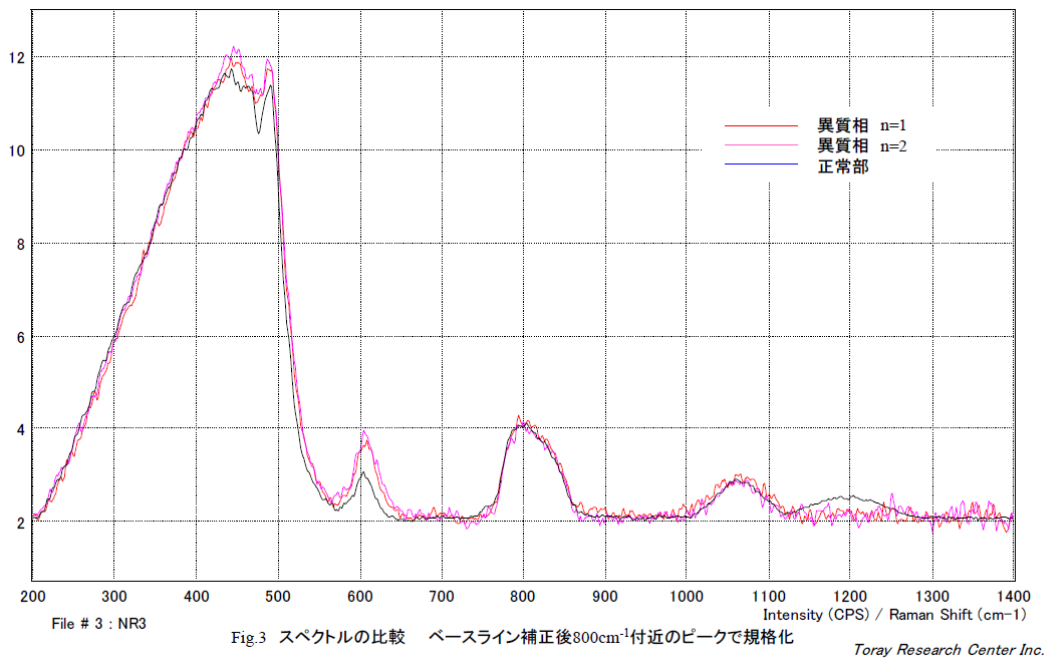


図 3-1-2-(2)-(c)-52: 加工部・非加工部のラマンスペクトル比較

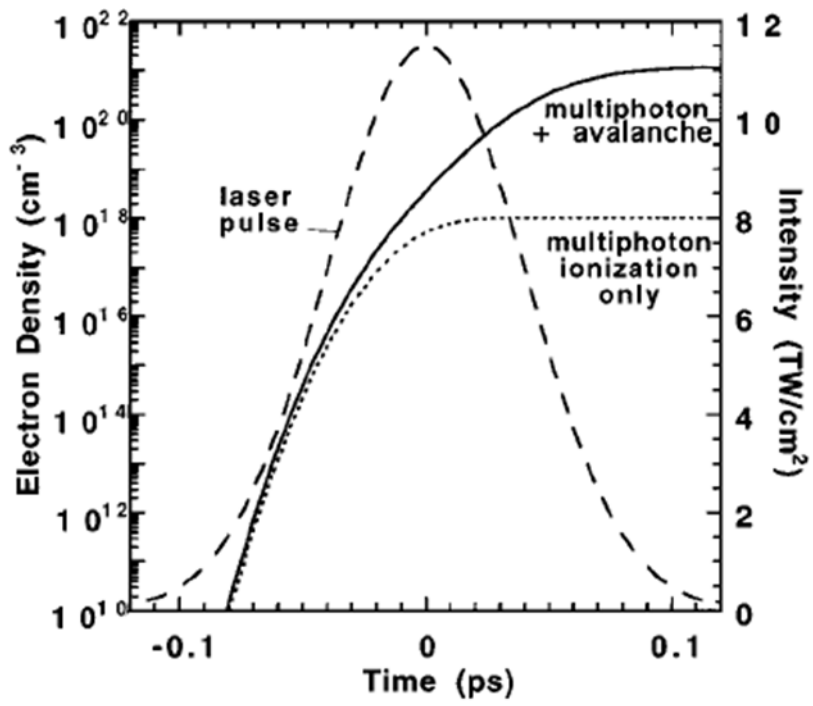


図 x030: パルスに対する多光子吸収および電子雪崩の割合の時間変化

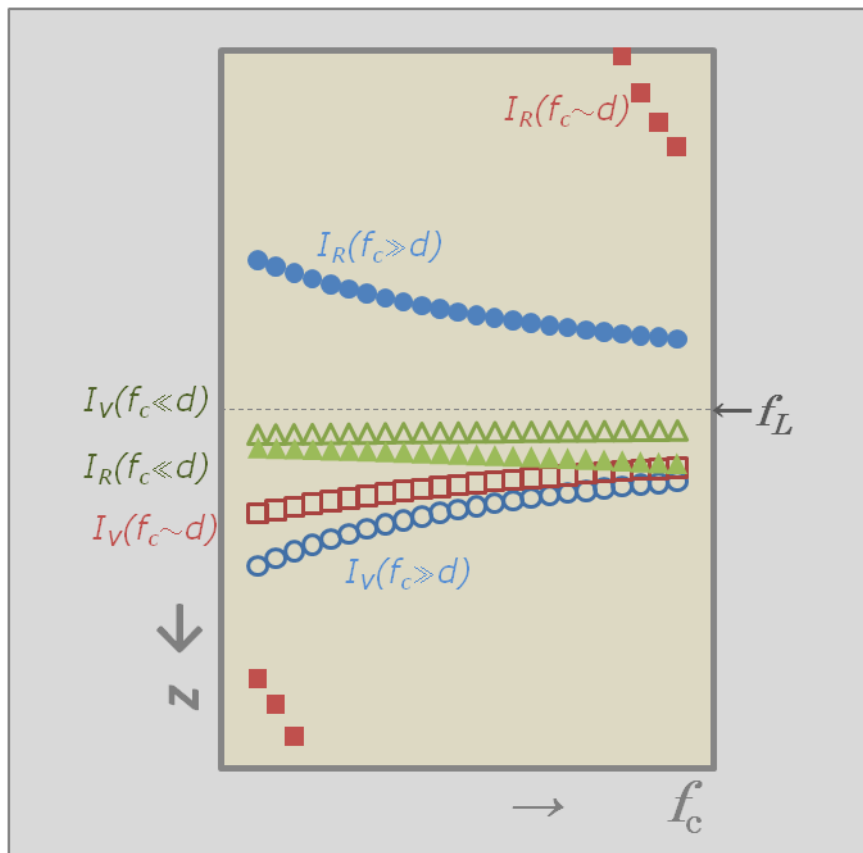


図 x052: ホログラム-レンズ間距離と結像位置の関係

#### (f)ホログラム加工に及ぼす設計技術の寄与と三次元加工例

本プロジェクトにおいて、我々はホログラムが空間的に成形する三次元光強度分布に基づくフェムト秒レーザー微細加工技術に関する研究開発を行っている[1][2]。シリカガラス基板上に表現したホログラム(以下、ガラス・ホログラムとする。)を用いて、一度のフェムト秒レーザー照射により、透明材料(例えば、シリカガラスやポリメタクリル酸メチル樹脂(以下、PMMA とする。))の内部に任意の三次元形状を形成することで微細加工を実現する。このホログラムに基づくフェムト秒レーザー加工技術は、集光レンズを用いて加工領域すべてを走査する逐次加工に比べ、効率的で生産性の高い加工処理が期待できる。

図3-2-1-f-1は、三次元ホログラム加工の利点を逐次加工との比較によって示すモデルである。逐次加工の問題点は、主に以下の2点である。

- 1度の照射で1点だけしか加工できないため、加工スループットが低い。
- 加工に必要なエネルギーは全エネルギーの一部であるため、エネルギー利用効率が低い。

これらの問題点を解決するために、我々は三次元ホログラム加工技術を構築している。フェムト秒レーザー加工にホログラムを導入する利点は、以下の通りである。

- 1度の照射で複数の点が加工できるため、加工スループットが向上する。更にステージ移動によるオーバーヘッドも削減できる。
- ホログラムによって多点或いは多体積を一度に加工するためにエネルギーを使い切れるため、エネルギー利用効率が向上する。

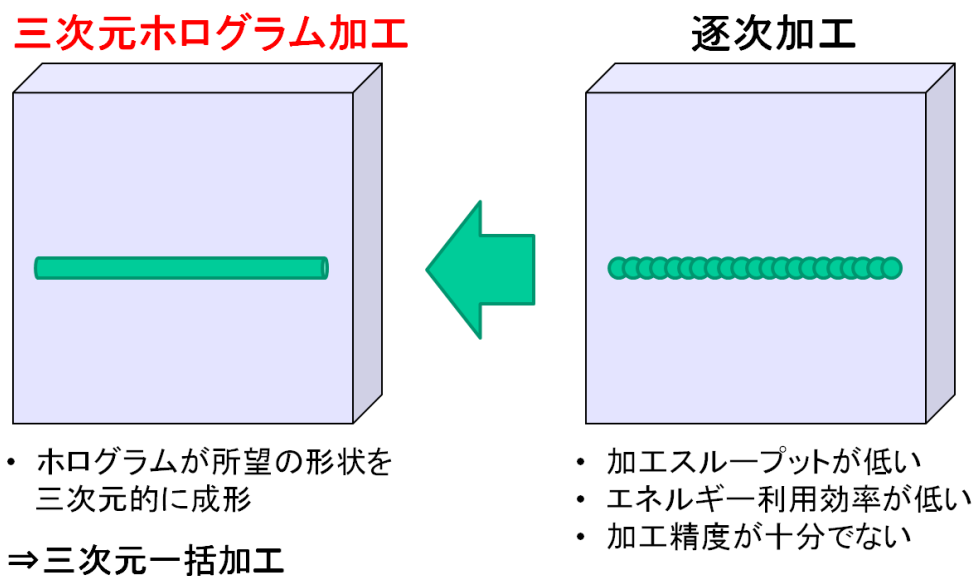


図3-2-1-f-1. 三次元ホログラム加工技術の利点

三次元ホログラム加工技術では、ホログラムパターンをシリカガラス基板表面にバイナリ・レリーフ構造として忠実に再現した「ガラス・ホログラム」を活用する。ガラス・ホログラムを用いる利点は、①フェムト秒レーザーの高出力化に対応できる高耐光性があること、②先端技術である半導体製造プロセスに基づく高精細化が可能であること、が主な理由である[10]。例えば、本プロジェクトにおいて導入した、出力5W、繰返し周波数1kHzのフェムト秒レーザー加工機のパルス光強度は、50GW/cm<sup>2</sup>である。一方、シリカガラスの耐光性

は $14\text{TW}/\text{cm}^2$ で、将来的にも十分対応できると考える。これを踏まえ、ホログラム設計では振幅を一定にし、位相のみを用いるキノフォームタイプに注目する。一般にキノフォームは、光の利用効率が高い[11]ので、透過率の高いシリカガラスで作製すれば、上で述べたエネルギー利用効率の向上の一役にもなる。

フェムト秒レーザー加工の効率化に注目した技術は、我々の三次元ホログラム加工技術だけではない。例えば、空間光変調器で表現したホログラムパターンを用いる加工技術[4][5]や回折光学素子により分散した回折ビームアレイを用いた加工技術[6]、二光束干渉や多光束干渉により生成した周期構造を用いた加工技術[7][8][9]がある。しかし、我々の知る限り、これらの加工技術は未だ光デバイス製作において広く使われていない。それゆえ、三次元ホログラム加工技術も含めて、様々な手法を考案して、その有用性を調べるのが、実用的なフェムト秒レーザー加工技術の発展に必要である。

#### **a) 基本加工技術**

ここでは、三次元ホログラム加工技術の基本加工例題として、直線加工と三次元螺旋加工、三次元ドット面心立方格子加工、光軸平行直線加工、マルチレベル強度分布加工を挙げる。これらの形状の加工には、d) 節で設計したホログラムパターンに基づくガラス・ホログラムを活用する。

i)直線加工

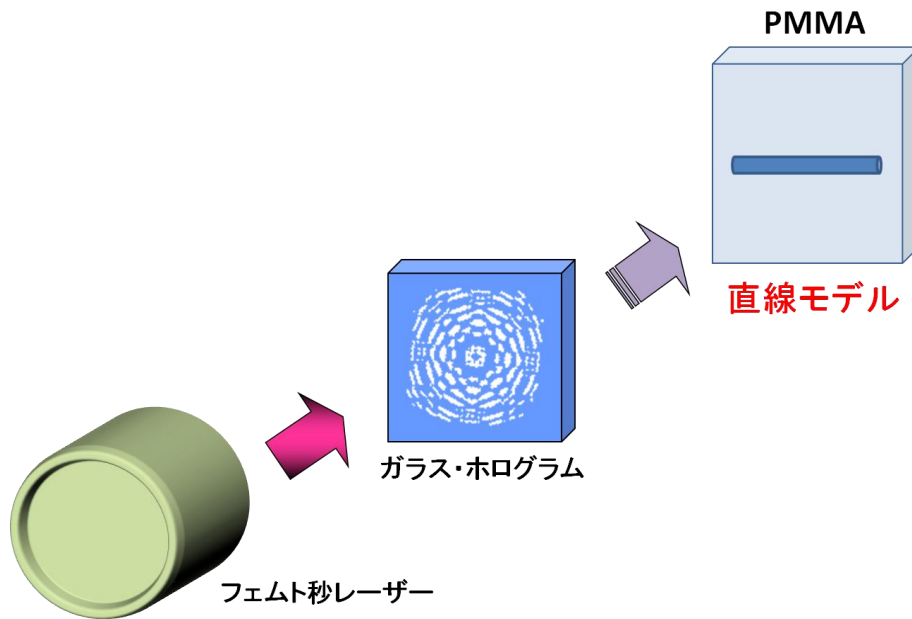


図3-2-1-f-2. 三次元ホログラムによる直線形状の加工モデル

図3-2-1-f-2は、ホログラムを用いて直線形状をフェムト秒レーザーで一括加工するための加工系の概要である。ガラス・ホログラム(直線ホログラム)から結像距離のところに加工サンプルを設置する。レンズは用いずホログラムの持つ集光作用のみで長さ2mmの直線形状をサンプル内部に異質相として加工する。これは非常にシンプルな構成である。本事例では、加工サンプルとして厚さ2mmのPMMA基板(押出板)を用いる。それは、①一般にガラスに比べ加工し易こと、②既にプラスチック製のレンズやプリズムなどが広く使われていることから三次元ホログラム加工による光学的機能の実現を十分確認できること、が主な理由である。

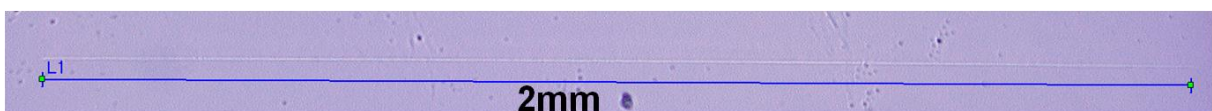


図3-2-1-f-3. 直線形状の加工結果

図3-2-1-f-3は、直線ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工の結果である。これはPMMA加工サンプル内部の顕微鏡像であり、長さ2mmの直線形状の異質相が確認できる。所望の直線形状が加工できていることから、ホログラムによるフェムト秒レーザー一括加工を実現した。主な加工条件は、表2-1-f-1の通りである。

表3-2-1-f-1. 直線ホログラムを用いたフェムト秒レーザーの加工条件

波長	800nm
パルス幅	30fs
繰り返し周波数	1kHz
入射パワー	3.44W
照射時間	0.005秒

三次元ホログラム加工では、設計技術は非常に重要な役割を果たす。ここでは、具体的にフェムト秒レー



ザーを用いて折格子を試作し、三次元ホログラム加工技術が光デバイス製作に役立つかを確認し、ホログラムの重要性を実際に示す。回折格子は基本的な光学素子の1つである。回折格子の製作の主な工程は、以下の通りである。

- ① 回折格子の基本形状となる直線を成形するホログラムの設計。
- ② ホログラムの設計に基づくガラス・ホログラムの作製。
- ③ 製作したガラス・ホログラムを通してのフェムト秒レーザー照射による直線形状の一定間隔でのPMMA内部への加工。

これらにより、部屈折率変化型の位相格子を実現する。我々の目標は、三次元ホログラム加工技術を実際に光デバイス(例えば、回折光学素子や光導波路、光学ローパスフィルタなど)製作に適用することである。これには、以下の3点の連携が重要となる。

- ① ホログラムの柔軟な結像作用。
- ② これを忠実に再現する高精度なガラス・ホログラムの製作。
- ③ フェムト秒レーザー光の多光子吸収による透明材料内部での屈折率変化現象。

本加工事例で示回折格子の製作実験は、これらの特徴が上手く連携しなければならない。このため、三次元ホログラム加工技術、特にホログラムの有効性を確認する例題として適切である。

図3-2-1-f-4は、直線ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工による回折格子製作のための加工概要である。図3-2-1-f-2と図3-2-1-f-3で示した直線形状の加工を応用して、長さ2mmの直線を80 $\mu$ m間隔で50本並べること(50回の直線加工)で回折格子を製作する。80 $\mu$ mの移動にステージを用いるが、本質的な直線形状部分はホログラムによる一括加工で済むので、効率的な加工処理である。

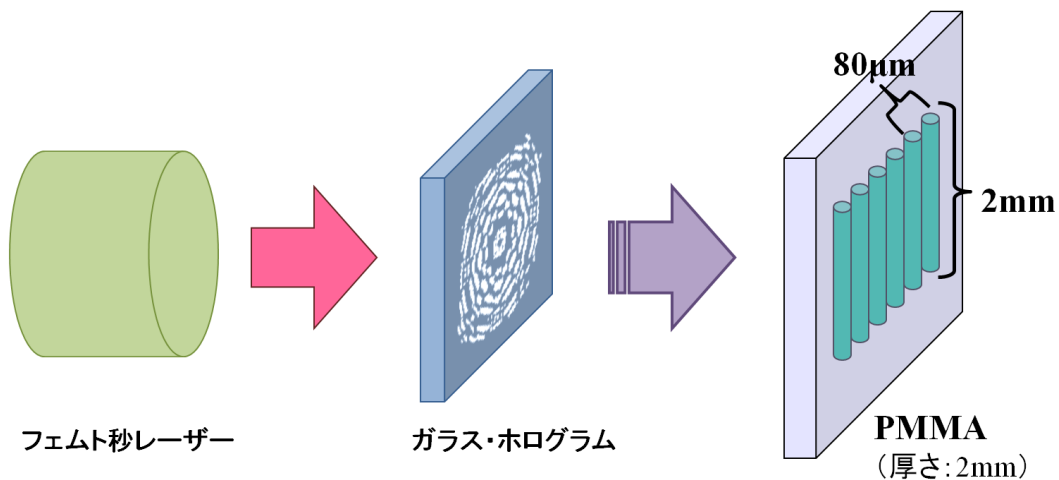


図3-2-1-f-4. 三次元ホログラムを用いた回折格子製作の概要

図3-2-1-f-5は、PMMA内部に製作した回折格子の一部分を光学顕微鏡で観察した結果である。80 $\mu$ m間隔で直線形状の異質相が並んでいることが確認できる。直線ホログラムを用いることで、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間は、わずか0.005秒で済み、2mm $\times$ 4mm(格子定数:80 $\mu$ m)サイズの回折格子の加工時間

は、直線間のステージ移動なども含めて、3分掛からない程度であった。

図3-2-1-f-6は、図3-2-1-f-5で示した回折格子にHe-Neレーザー(波長:632.8nm)光を入射し、スクリーンに投影した結果である。これは入射光が分散した回折パターンである。簡易的な評価ではあるが、直線ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工によって製作した回折格子が、基本的な光学的機能(入射光の分散)を実現することが確認できた。

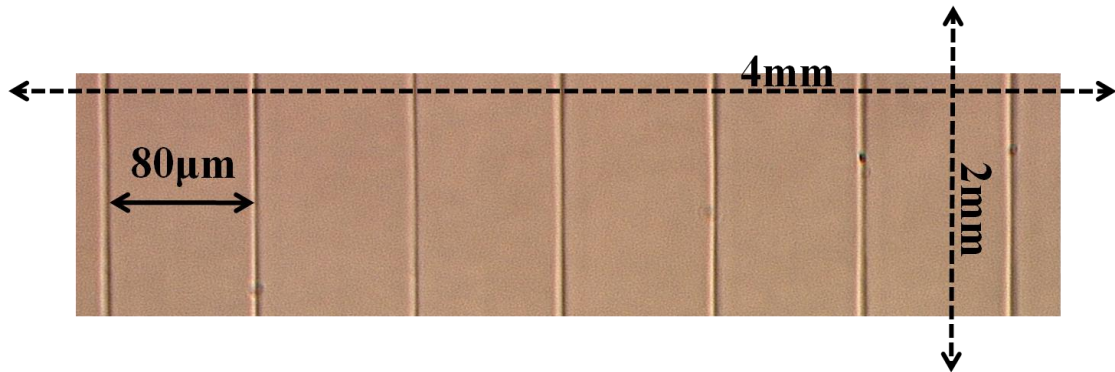


図3-2-1-f-5. 三次元ホログラムを用いて製作した回折格子の顕微鏡像

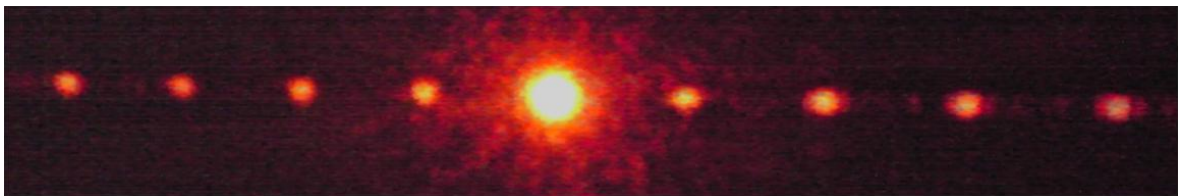


図3-2-1-f-6. 三次元ホログラムを用いて製作した回折格子の光線分離結果

ここで、直線ホログラムによって製作した回折格子を評価するために、逐次加工による回折格子の製作と比較する。図3-2-1-f-7は、レンズを用いたフェムト秒レーザー逐次加工による回折格子製作の加工概要である。図3-2-1-f-4で示した「ガラス・ホログラム」に代わり、焦点距離100mmの平凸レンズを設置する。長さ2mmの直線形状はステージ走査によって実現する。製作する回折格子の主な仕様は、図3-2-1-f-4と同様に2mm×4mm(格子定数:80μ m)である。

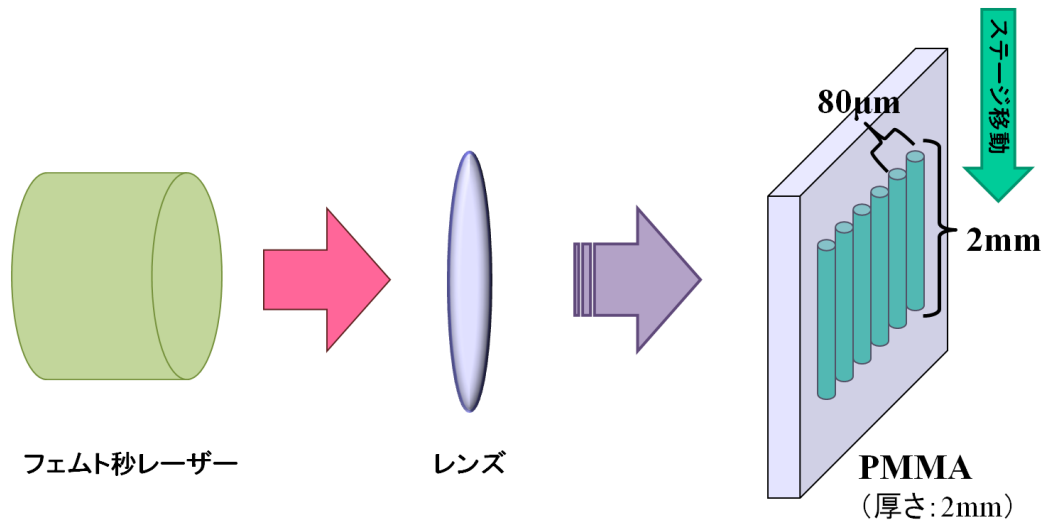


図3-2-1-f-7. レンズを用いた逐次加工による回折格子製作の概要

図3-2-1-f-8は、レンズを用いたフェムト秒レーザー逐次加工の結果である。これはPMMA加工サンプル内部の顕微鏡像であり、図3-2-1-f-5と同様に80μ m間隔で直線形状の異質相が並んでいることが確認できる。主な加工条件は、表3-2-1-f-2の通りである。ステージ速度が2mm/秒なので、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間は1秒である。これは、他の逐次加工によるPMMA内部への回折格子の製作事例[3]と同様の加工時間である。



図3-2-1-f-8. レンズを用いた逐次加工による回折格子の顕微鏡像

表3-2-1-f-2. レンズを用いたフェムト秒レーザーの加工条件

波長	800nm
パルス幅	30fs
繰り返し周波数	1kHz
入射パワー	0.005W
ステージ速度	2mm/秒

図3-2-1-f-6と同様に簡易的な回折格子の評価を行った。図3-2-1-f-9は、図3-2-1-f-8で示した回折格子にHe-Neレーザー(波長:632.8nm)光を入射し、スクリーンに投影した回折パターンである。フェムト秒レーザー逐次加工によって製作した回折格子においても、基本的な光学的機能(入射光の分散)を実現することが確認できた。

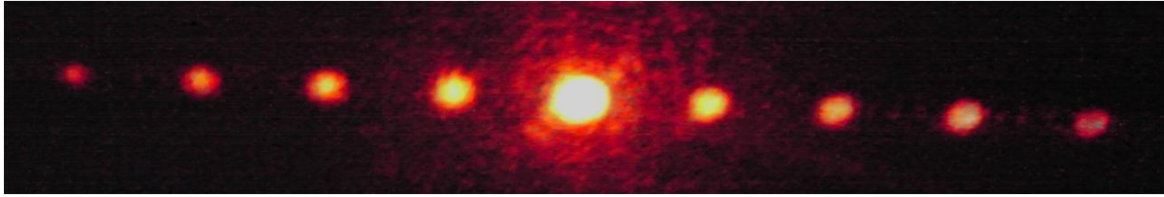


図3-2-1-f-9. レンズを用いた逐次加工による回折格子の光線分離結果

図3-2-1-f-6と図3-2-1-f-9の回折パターンを比べると、粗い評価にはなるが、共に±4次光まで同じような強度で確認できる。よって、異なるフェムト秒レーザー加工手法(「直線ホログラムによる一括加工」と「レンズによる逐次加工」)を用いても、ほぼ同等の品質を持つ回折格子を製作した。三次元ホログラム加工技術におけるホログラムの効果を改めて検証すると、ホログラムを用いることで、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間は、わずか0.005秒で済み、2mm×4mm(格子定数:80μ m)サイズの回折格子の加工時間は、直線間のステージ移動なども含めて、3分掛からない程度であった。逐次加工によりPMMA内部に回折格子を製作した場合は、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間が1秒であることから、比較的大きな回折格子の製作を考慮すると、本節の回折格子製作実験から加工時間が1/200程度に削減できた。次の3点が加工時間削減に貢献したと考える。

- ① 良く設計されたホログラム。
- ② それを忠実に再現する高精度なガラス・ホログラム作製技術。
- ③ 適切な加工条件の最適化。

特に、①のホログラム設計技術に関しては、三次元ホログラム加工にとって最も重要な要素である。

## ii) 三次元螺旋加工

図3-2-1-f-10は、三次元ホログラムを用いて三次元螺旋形状をフェムト秒レーザーで一括加工するための加工概要である。本事例では、加工サンプルはシリカガラスである。ガラス・ホログラムの後方に対物レンズ(20倍)を設置し、三次元螺旋を60μ m立方体内へ納めるための微細化を図る。i)節の加工事例ではレンズを用いずガラス・ホログラムのみの加工光学系であったが、加工対象(アプリケーション)によって、容易にレンズを導入することもできる。我々の三次元ホログラム加工技術は、加工光学系を比較的柔軟に構成できる点が特徴である。また、特に12組ある「光軸方向への重なり」の配置が、三次元ホログラム加工で実現できる点に注目する。

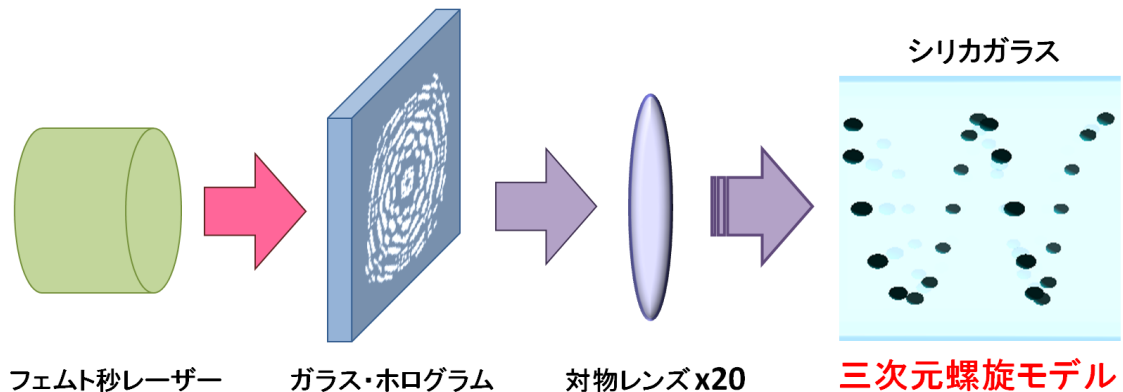


図3-2-1-f-10. 三次元ホログラムによる三次元螺旋形状の加工モデル

図3-2-1-f-11は、三次元螺旋ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工の結果である。これはシリカガ

ラス加工サンプル内部の顕微鏡像で、「加工結果」欄の側面を見ると、螺旋構造を形成するドット配列の異質相が確認できる。レーザー入射面と側面の顕微鏡写真から、三次元螺旋の外形は、 $60\mu\text{m}$  立方体内に納まっている。12組の「光軸方向への重なり」も確認できる。所望の三次元螺旋形状が微細加工できていることから、三次元ホログラムによるフェムト秒レーザー一括加工を実現した。

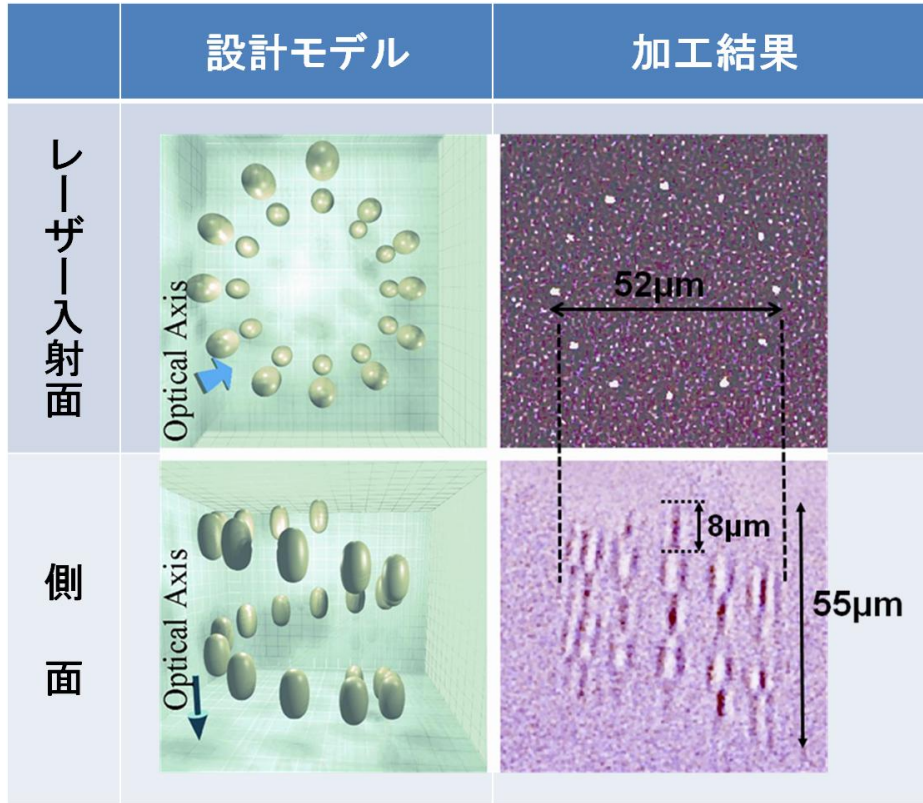


図3-2-1-f-11. 三次元螺旋形状の加工結果

iii) 三次元ドット面心立方体加工(異質相100個)

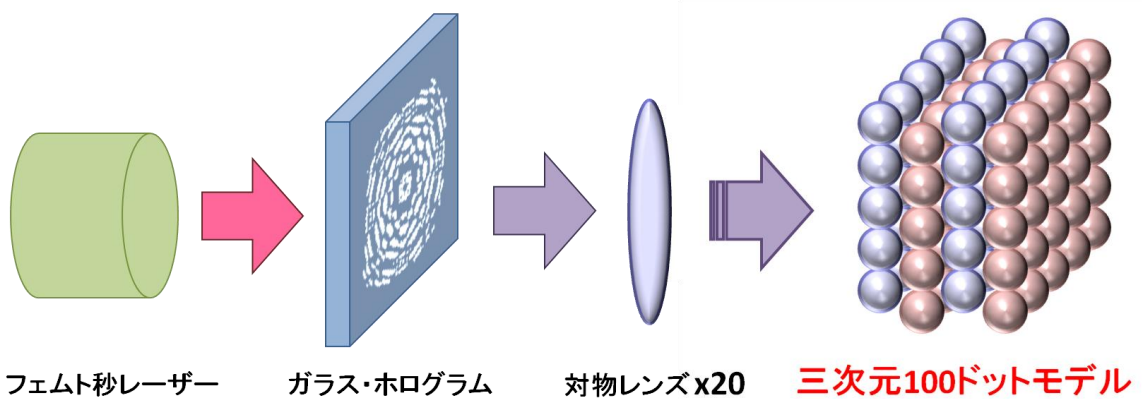


図3-2-1-f-12. 三次元ホログラムによる三次元ドット面心立方格子配列の加工モデル

図3-2-1-f-12は、三次元ホログラムを用いて三次元ドット面心立方格子形状(異質相100個)をフェムト秒レーザーで一括加工するための加工概要である。図3-2-1-f-10と同様に、加工サンプルはシリカガラスで、ガラス・ホログラムの後方に対物レンズ(20倍)を設置し、三次元ドット面心立方格子を $60\mu\text{m}$ 立方体内へ納める

ための微細化を図る。図3-2-1-f-10に比べ、同じ加工領域であるがドット(異質相)の密集度は約4倍になる。50組ある「光軸方向への重なり」の配置が三次元ホログラム加工で実現できる点に注目する。この加工事例は、最終目標を達成する内容である。

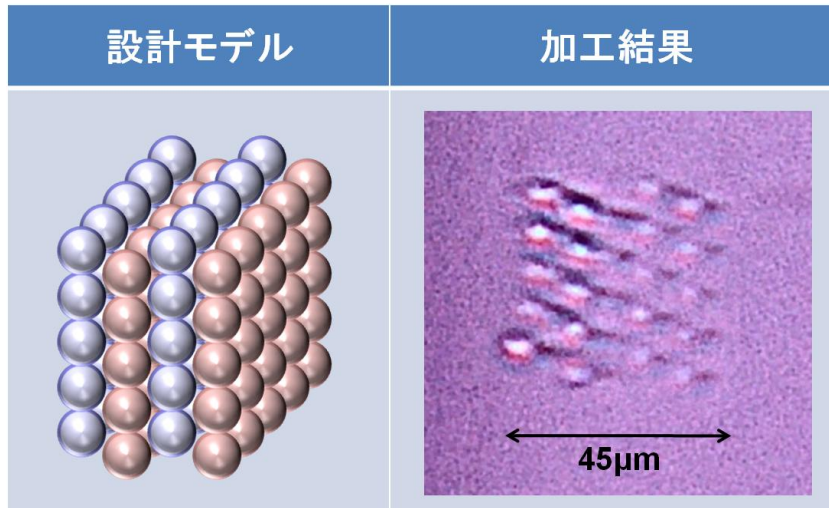


図3-2-1-f-13. 三次元ドット面心立方格子配列の加工結果

図3-2-1-f-13は、三次元ドット面心立方格子ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工の結果である。「加工結果」欄はシリカガラス加工サンプル内部の顕微鏡像で、これを見ると、面心立方格子構造を形成するドット配列の異質相が確認できる。この顕微鏡写真から、三次元面心立方格子の外形は、45µ m立方体内に納まっている。「光軸方向への重なり」も確認でき、45µ m以内に4層構造を確認できることから、図3-2-1-f-11で示した三次元螺旋形状よりも高い密集度の三次元ドット配列である。設計通りの三次元ドット面心立方格子形状が実際に加工できたことから、三次元ホログラム加工技術によるフェムト秒レーザー一括加工によって、シリカガラス内部に異質相100個を実現した。

この加工事例により、最終目標である「60µ mの立方体の中に、直径が10µ m以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する」ことの達成を確認できた。上でも述べたが、三次元ホログラム加工技術を実現するためには、以下の3つの要素技術を上手く連携させることが重要である。

- ① 良く設計されたホログラム。
- ② それを忠実に再現する高精度なガラス・ホログラム作製技術。
- ③ 適切な加工条件の最適化。

最終目標を達成する上でも、これらは重要な技術であり、特に①のホログラム設計技術の三次元一括加工への寄与は大きい。

#### iv) 光軸平行直線加工

図3-2-1-f-14は、長焦点深度ホログラムを用いた光軸平行直線形状をフェムト秒レーザーで一括加工するための加工概要である。この加工事例では、厚さ0.5mmのシリカガラスを加工対象にし、レンズを用いずガラス・ホログラムのみでシリカガラス基板を貫通するような光軸平行直線形状を一括加工する。上で示した

三次元螺旋形状や三次元面心立方格子形状のように複数のドットを三次元的に配列するのではなく、1つのドットを光軸方向へ細長く引き伸ばすイメージである。それゆえ、長焦点深度ホログラムを呼んでいる。

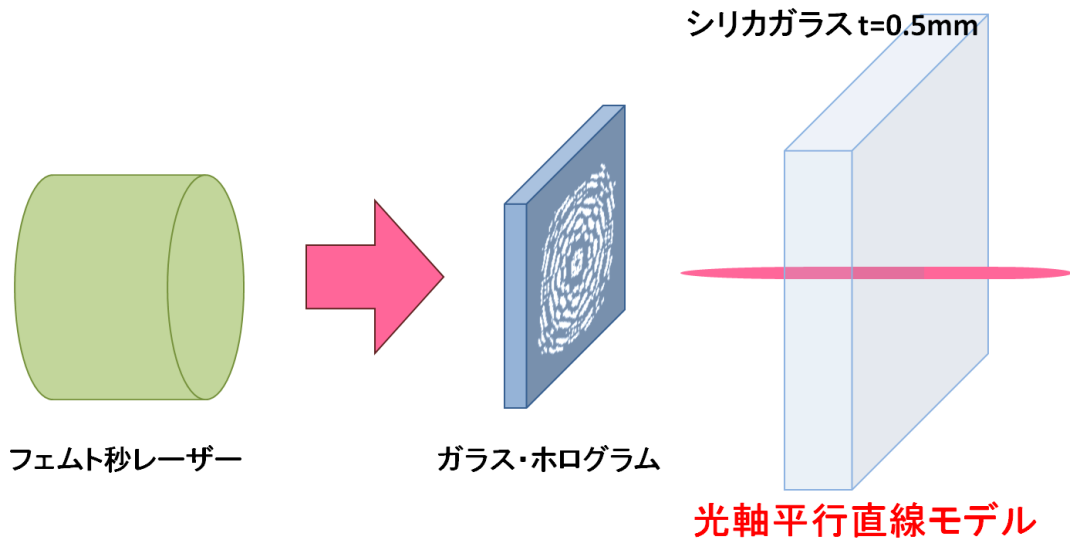


図3-2-1-f-14. 三次元ホログラムによる光軸平行直線形状の加工モデル

図3-2-1-f-15は、長焦点深度ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工の結果である。「加工結果」欄は、シリカガラス基板の断面内部の顕微鏡像で、これを見ると、レーザー入射面からレーザー射出面にかけて長さ0.5mmの直線を形成する異質相が確認できる。設計通りの光軸平行直線形状が加工できたことから、三次元ホログラム加工技術によるフェムト秒レーザー一括加工によって、ガラス基板を貫通する異質相を実現した。上で示した光軸と垂直な直線形状と組み合わせることで、例えば、三次元回路や三次元流路などのアプリケーション製作への適用が期待できる。

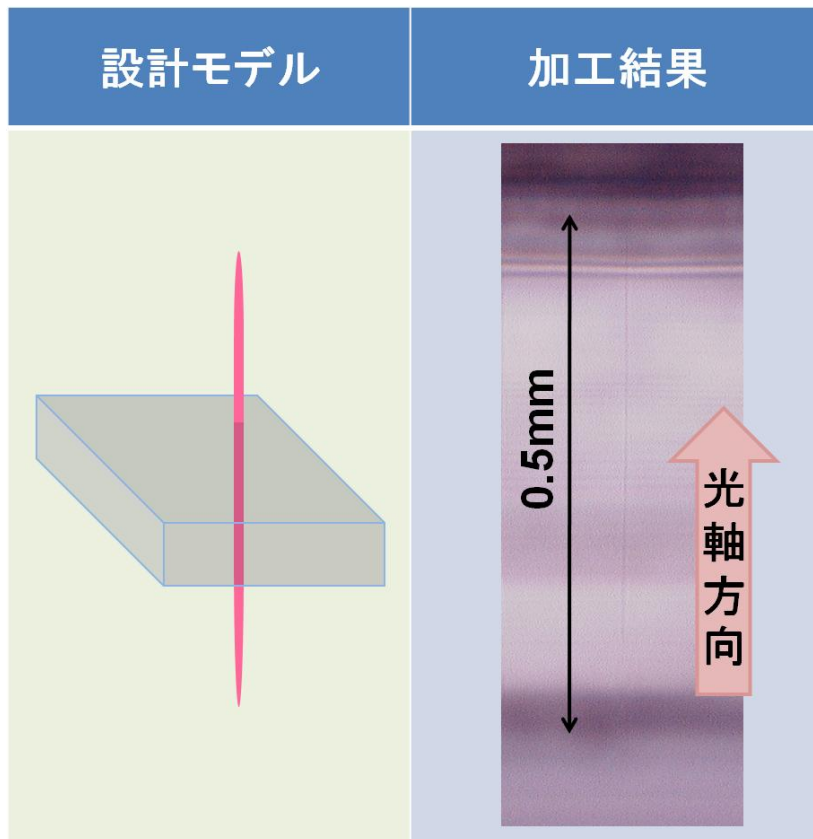


図3-2-1-f-15. 光軸平行直線形状の加工結果

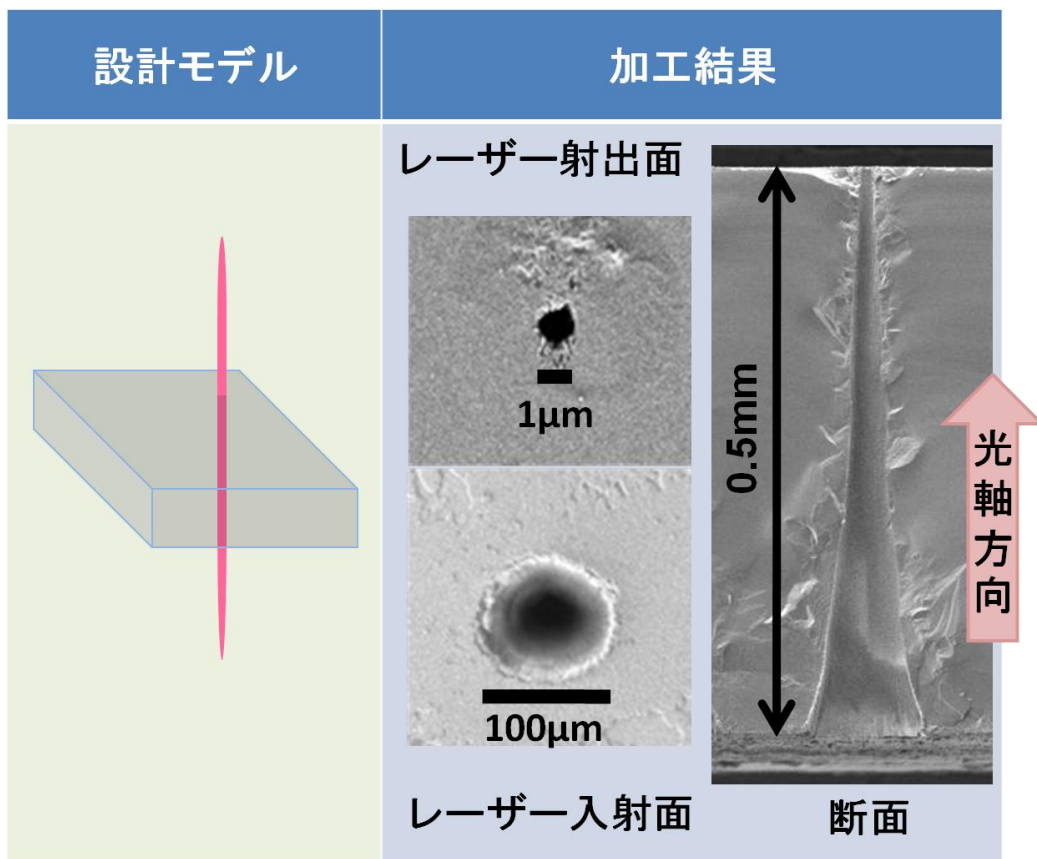


図3-2-1-f-16. 長焦点深度ホログラムを用いた微細貫通穴あけ加工の結果



図3-2-1-f-16は、応用加工事例として、長焦点深度ホログラムを用いたフェムト秒レーザーによる微細貫通穴あけ加工の結果である。「加工結果」欄は、シリカガラス基板の断面のSEM観察像で、これを見ると、レーザー入射面からレーザー射出面にかけて長さ0.5mmのテーパ形状の貫通穴が確認できる。図3-2-1-f-15と加工光学系は同じであるが、加工条件を変えることで異なる加工法になった。つまり、これまでの加工事例ではガラス内部に異質相を形成するためのフェムト秒レーザー加工技術に、本加工事例ではフェムト秒レーザーによるアプレーション加工技術に注目した。設計したホログラムにより形成した光軸平行直線形状を応用して、厚さ0.5mmのシリカガラス基板への微細貫通穴あけ加工を実現したことで、三次元ホログラム加工技術の有効性や適用範囲の広さを示した。

#### v) マルチレベル強度分布加工

図3-2-1-f-17は、マルチレベル強度分布ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工の加工概要である。本加工事例では、シリカガラスを加工対象にし、ガラス・ホログラムの後方に対物レンズ(20倍)を配置する。これまでの加工事例と異なる点は、このホログラムが複数の光強度の値(11階調)を一度に再生することである。これが加工にどのような影響を及ぼすか実家際に確認する。

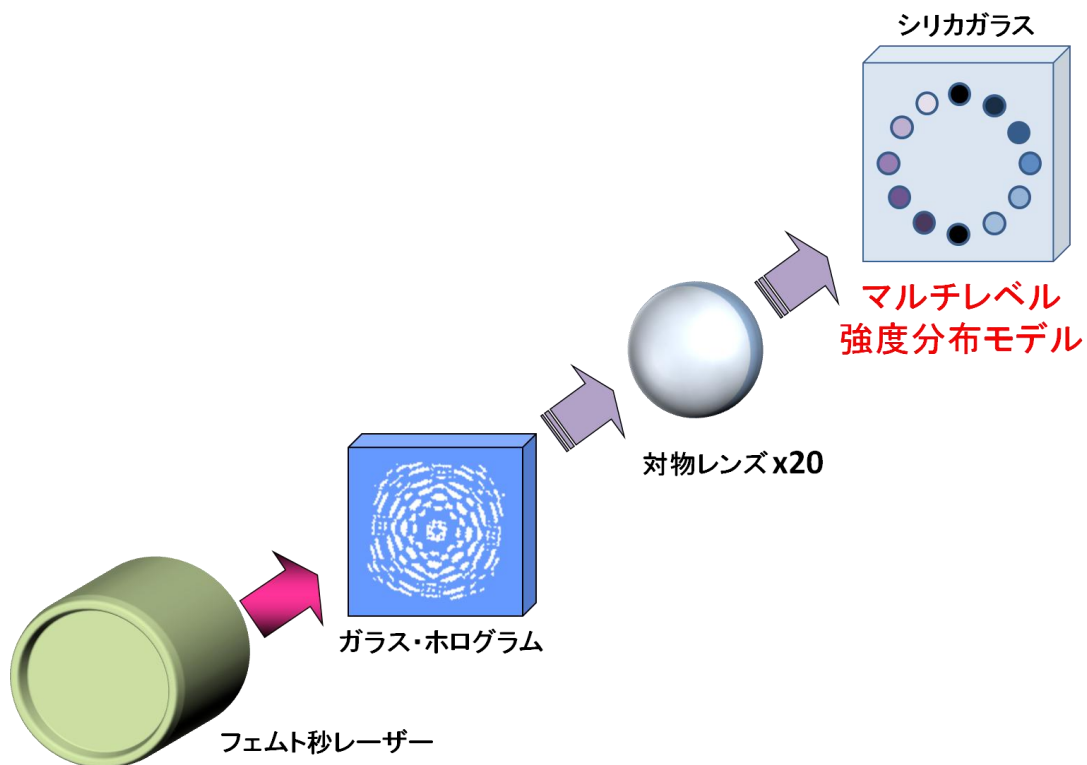


図3-2-1-f-17. 三次元ホログラムによるマルチレベル強度分布形状の加工モデル

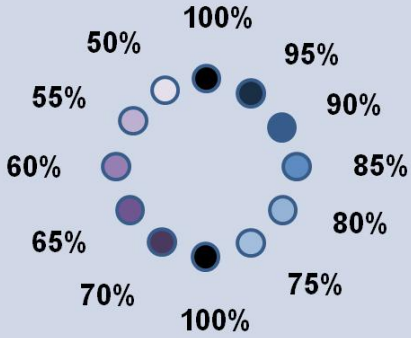
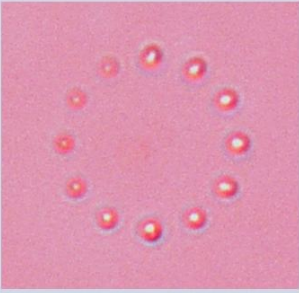
設計モデル	加工結果
	

図3-2-1-f-18. マルチレベル強度分布形状の加工結果

図3-2-1-f-18は、マルチレベル強度分布ホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工の結果である。「加工結果」欄は、シリカガラス内部の顕微鏡写真で、同一円周上にドットが配置してあることが確認できる。「設計モデル」の通り、加工した各ドットのピーク強度部分が段階的に変化している。これは設計したホログラムの影響で変化した強度分布である。これにより、XYZ方向の位置に関するパラメータに加えて、相対的ではあるが、光強度値も制御する技術を実現した。

## 参考文献

- [1] Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka and K. Hirao, "Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements", *Opt. Express* 12, 1908-1915 (2004).
- [2] M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki and S. Tanaka, "Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram", *Appl. Phys. Lett.* 93, 041116 (2008).
- [3] A. Baum, P. J. Scully, W. Perrie, M. Sharp, K. G. Watkins, D. Jones, R. Issac and D. A. Jaroszynski, "NUV and NIR Femtosecond Laser Modification of PMMA", *Proc. 8th Int. Symposium on Laser Precision Microfabrication Conference (LPM 2007)*, (2007).
- [4] Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita and N. Nishida, "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator", *Appl. Phys. Lett.* 87, 031101 (2005).
- [5] Z. Kuang, W. Perrie, J. Leach, M. Sharp, S. P. Edwardson, M. Padgett, G. Dearden and K. G. Watkins, "High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator", *Appl. Surf. Sci.* 255, 2284-2289 (2008).
- [6] J. Amako, K. Nagasaka and K. Nishida, "Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of pair of diffractive optical elements", *Opt. Lett.* 27, 969-971 (2002).
- [7] K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura, M. Hirano and H. Hosono, "Fabrication of surface relief gratings on transparent dielectric materials by two-beam holographic method using infrared femtosecond laser pulses", *Appl. Phys. B* 71, 119-121 (2000).
- [8] Y. Li, W. Watanabe, K. Yamada, T. Shinagawa, K. Itoh, J. Nishii and Y. Jiang, "Holographic fabrication of multiple layers of grating inside soda-lime glass with femtosecond laser pulses", *Appl. Phys. Lett.* 80, 1508 (2002).
- [9] T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis and H. Misawa, "Femtosecond Laser Interference Technique with Diffractive Beam Splitter for Fabrication of Three-Dimensional Photonic Crystals", *Appl. Phys. Lett.*, 79, 725 (2001).
- [10] ガラスの加工技術と製品応用 (情報機構, 2009), 10.1 節, 10.2 節 (田中修平, 鈴木潤一, 山路正洋, 川島勇人執筆)
- [11] 辻内順平, 黒田和男他編集: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 2002) 9.2.2節 B. Kress and P. Meyrueis著, 小舘香椎子 監訳, 藤野誠, 駒井友紀 訳: デジタル回折光学 (丸善株式会社, 2005) 1.4節

## (f) 光デバイスと光情報処理用TEGの作製

### a) はじめに

フェムト秒レーザーによるガラスへの内部加工により様々なデバイスの試作例が報告されている[1]。フェムト秒レーザーパルスに対物レンズでガラス内部に集光するとレンズの焦点付近でのみ吸収が起こり、屈折率が変化する。レーザー照射部の屈折率が母材のガラスの屈折率より高くなれば、照射部をコアとする導波路として機能する。このようにフェムト秒レーザー加工では、1つの工程で導波路などの光デバイスを作製できるため、従来の作製方法[2-5]に比べて光デバイスの生産方法を簡略化し、低コスト化する可能性がある。

従来のフェムト秒レーザー一括加工では、レーザーパルスに対物レンズでガラス内部に集光し、サンプルのガラスを固定したステージを走査することで導波路を作製する。ステージを3次元に移動することで、容易に3次元構造も作製可能である。しかし、ステージ移動速度が遅く、加工時間が長くなってしまふ。通常フェムト秒レーザーから供給されるレーザーパルスのエネルギーは加工に必要なエネルギーよりも高く、パルスエネルギーを下げて加工を行う必要があるため、エネルギー効率も低い。また、ステージの走行中の振動等の外乱による影響を受けるため、加工精度の限界もある。

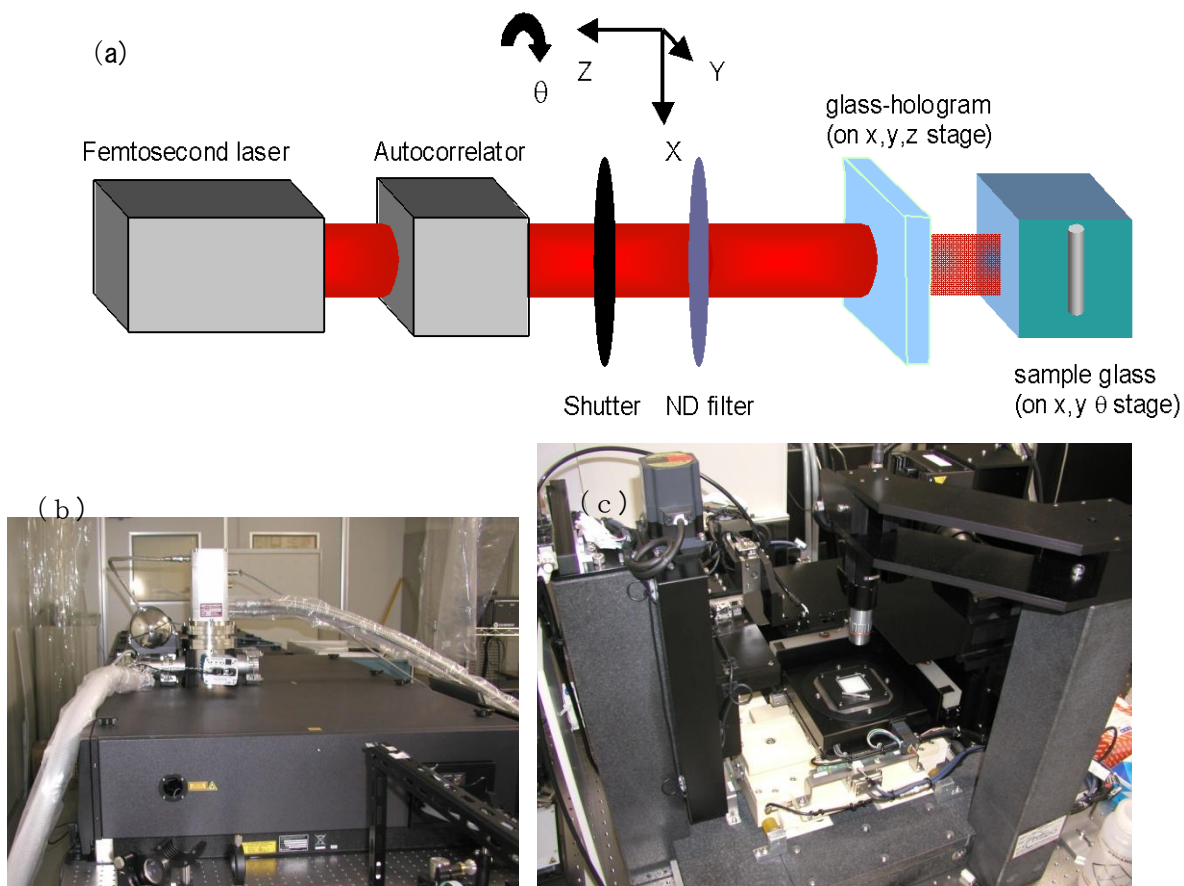
このような問題に対する1つの解決法がホログラムを使ったフェムト秒レーザー一括加工である。他にも回折格子[6]や多光束干渉[7、8]等を使った加工方法もある。これらは周期的形状の加工には有効だが、非周期形状の加工は適していない。このため、加工の自由度はホログラムを使った場合の方が高く、文献[9]では計算機ホログラフィ[10-12]を基にして設計したガラス・ホログラムを使って、非周期的に配置された多数のスポットが一括加工できることが示された。文献[13]では3次元のスポットが1つのホログラムで一括加工可能であることが示された。また、文献[14]では、LCOS-SLMを使って動的にホログラムを変えて、大面積を加工する試みも行われている。

文献[9、13、14]では、複数のスポットを配置した構造の一括加工で、直線や曲線の一括加工の報告はされていない。本章では基本的な光デバイスである直線導波路や曲線導波路を、ガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工により作製する。ここでは、対物レンズによる縮小系は用いず、ガラス・ホログラムの生成する直線や曲線を直接ガラス内部に結像する。全長約1cmの直線や曲線を合成石英内部に作製可能であることを確認した。作製した導波路の導波特性を評価した。さらに、これらの加工条件の分かったガラス・ホログラムを組み合わせて、結合器、Mach-Zehnder型干渉計等のデバイスの試作を行った。また、直線と半円を同時に再生する合成ホログラムによる一括加工も行った。

### b) ガラス・ホログラムを用いた加工システム

本章では光デバイスをガラス・ホログラムの生成する像を直接試料ガラス内部に結像して作製するための加工システムについて述べる。通常フェムト秒レーザー加工では、レーザーパルスに対物レンズでガラス内部に集光し、試料搭載ステージを走査して導波路等のデバイスを作製する。ここではガラス・ホログラムが集光作用を備えているため、対物レンズは使用しない。また、一括加工ではレーザー照射中では試料搭載ステージは停止しているため、走行精度よりは停止精度が重要となる。これらは、通常フェムト秒レーザー加工と異なる点である。

図(2)(g)-1(a)はフェムト秒レーザー一括加工システムの概略図である。フェムト秒レーザー光源、レーザーパワー調整用反射型NDフィルタ、照射時間調整用シャッター、ガラス・ホログラム搭載ステージ、サンプル搭載ステージ等から構成される。



図(2)(g)-1 ガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工概略図 (a)一括加工概念図 (b)フェムト秒レーザー光源 (c)一括加工用ステージシステム

フェムト秒レーザー光源はCoherent社製Cryo-PAシステム(図(2)(g)-1(b))で、中心波長800nm、繰り返し周波数1kHz、最大出力14W、パルス幅30fsを使用した。ビームの形状はTEM<sub>00</sub>モードのガウス分布である。パルス幅については、パルス圧縮用グレーティングの距離を変えることで、調整可能である。本章では、パルス幅は30fsを使用した。レーザー出力とパルス幅は加工システムの直前で測定した値を以下では使用している。

一括加工ステージシステム(図(2)(g)-1(c))はガラス・ホログラム搭載ステージとサンプル搭載ステージから構成される。ガラス・ホログラム搭載ステージは3軸のサーボモーターステージで、各軸は40nm分解能のリニアエンコーダーによる位置測定機能が付属している。ビーム軸方向ステージはガラス・ホログラムと試料ガラスの距離(焦点距離)を調整するために使用する。また、ビーム軸に水平な方向はビームとガラス・ホログラムの中心を合わせるために使用する。試料搭載ステージは2軸の直線ステージと1軸の回転ステージから構成されている。2軸ステージは超音波モーターで駆動することにより、レーザー照射中のステージのドリフトを抑制し、高い停止精度を持つ。また、50nm分解能リニアエンコーダーにより位置の制御を行い、分解能0.6nmのレーザー干渉計でステージ位置を高精度で測定できる。回転ステージリニアエンコーダーで制御し、角度の分解能0.01m度、±135度回転することができる。

照射時間調整用シャッター、ガラス・ホログラム搭載ステージ、サンプル搭載ステージは1つのコンピューターで制御されており、様々な条件での一括加工が可能である。

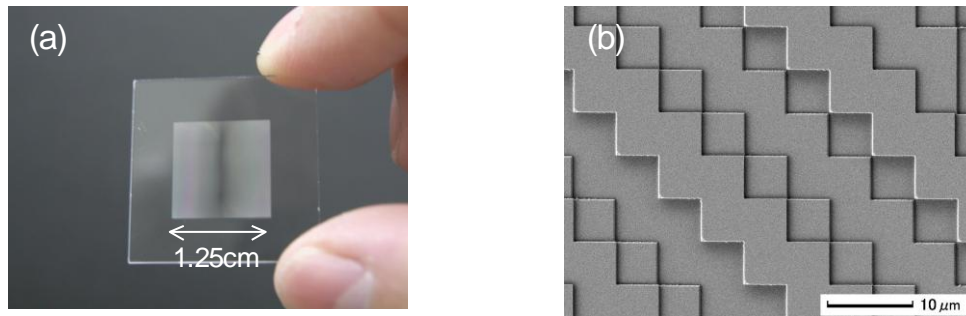
図(2)(g)-1には座標系が示されており、本章ではこの座標系を用いる。また、レーザー照射時間は、レーザーの繰り返し周波数によらない「積算照射時間」(=フェムト秒レーザーパルス幅:30fs×パルス数)を用いる。

### c) 一括加工例

導波路は光デバイスの中で最も基本となるデバイスであるが、ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工での報告はこれまでされていなかった。以下では、計算機ホログラフィを基にしたホログラムの設計を行い、ここで得られた位相分布をガラス・ホログラムとして作製した。このガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工でガラス内部に直線導波路[14-16]や曲線導波路[15]が作製可能であることを示す。

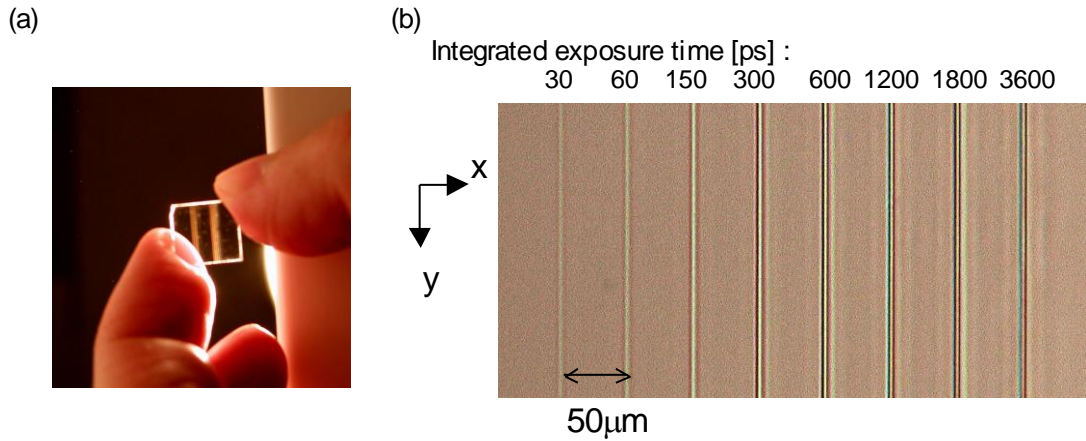
#### ・直線導波路加工

入射フェムト秒レーザービームから直線を生成する位相ホログラムを計算機ホログラフィにより計算した。入射レーザーの強度分布はガウス分布で近似し、ホログラムのピクセルサイズ:  $5\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ:  $12.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$  ( $2500 \times 2500$ ピクセル)、結像距離:  $8\text{cm}$ 、位相段数4段とした。ホログラムの生成する直線の長さは $1.1\text{cm}$ とした。得られたホログラムの位相分布は、(c)章で構築したガラス・ホログラム作製プロセスによりガラス・ホログラムとして作製した。図(2)(g)-2(a)は作製したガラス・ホログラムの全体図で、SEMで観察したパターンをSEM像を図(2)(g)-2(b)に示した。SEM像からガラス・ホログラムのパターンは良好に作製されている。



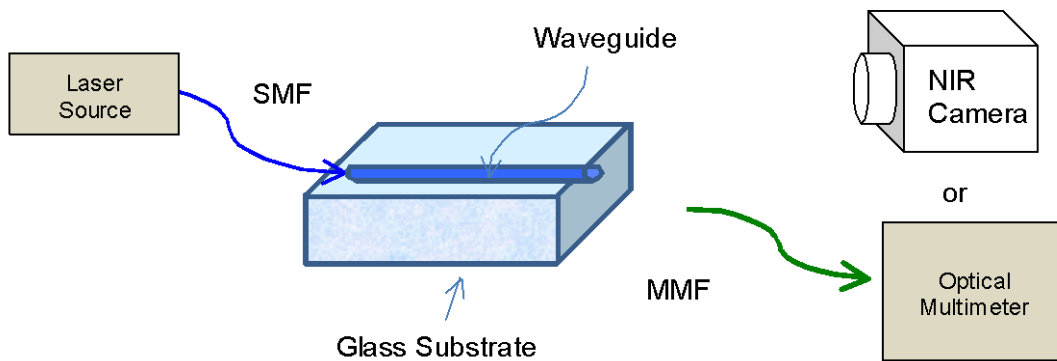
図(2)(g)-2 直線を生成するガラス・ホログラム a)全体像 b)SEMによるパターンの拡大図

作製したガラス・ホログラムにフェムト秒レーザーを照射し、一括加工で合成石英内部に直線導波路を作製した。ここでは積算照射時間を $30 \sim 3600\text{ps}$ で作製した。図(2)(g)-3(a)は一括加工後に直線の両端を切断・研磨した全長 $1\text{cm}$ の直線導波路の全体図である。図(2)(g)-(b)は光学顕微鏡での拡大図で、導波路と導波路は $50\mu\text{m}$ 間隔で作製した。積算照射時間 $30\text{ps}$ でも直線導波路が作製されており、積算照射時間が長くなると、直線のコントラストも高くなっている。また、ガラス表面から約 $100\mu\text{m}$ 下に導波路は加工されている。レーザー照射部と母材(レーザー未照射部)との屈折率差( $\Delta n$ )を定量位相顕微鏡[18]で測定した[16、19]。結果は積算照射時間に依存して $\Delta n = +0.004 \sim +0.01$ であった[16]。作製した直線はレーザー照射部の $\Delta n$ が+(正)であるため、照射部がコア、母材がクラッドの導波路として機能する。



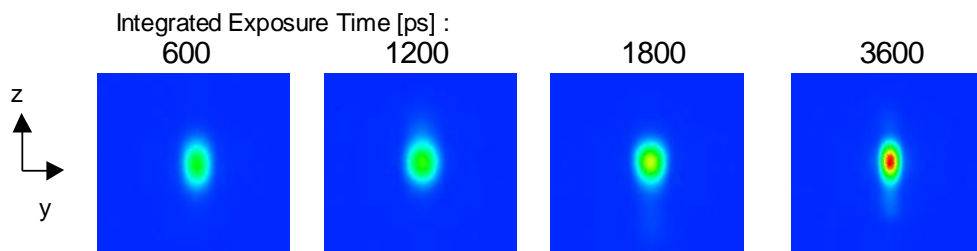
図(2)(g)－3 一括加工で作製した直線導波路(積算照射時間:30~3600ps) (a)1cm直線導波路全体図 (b)光学顕微鏡による拡大図

直線導波路の特性を調べるために、Near Field Pattern(NFP)を図(2)(g)－4に示す装置により観察した。直線導波路一方の端にシングルモードファイバー(Corning, SMF-28e)を突き合わせて結合し、ファイバーから波長1550nmのレーザー(THORLABS, S1FC1550)を入射し、近赤外カメラ(浜松ホトニクス, C5840-10)で直線導波路のもう一方の端で導波路を伝播した光のNFPを観察した。近赤外カメラにはx20対物レンズ(ミツトヨ, M Plan NIR)が取り付けられている。直線導波路と導波路との結合しているファイバー端は多軸ステージに固定され、光軸調整を行うことができる。また、反射防止のため結合部にはマッチングオイルを使用した。図(2)(g)－5は積算照射時間600~3600psまでの観察したNFPである。これらのプロファイルをガウス分布でフィットして、幅 $\sigma$ を求めた。図(2)(g)－6は積算照射時間1800psの場合のプロファイルとフィットした曲線で、ガウス分布でよく近似できている。図(2)(g)－7はフィットで得られた $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ とその比 $\sigma_z/\sigma_y$ を積算照射時間に対してプロットしたものである。NFPはz軸(レーザー照射方向)に多少の伸びがみられるが、概ね丸い形状をしている。

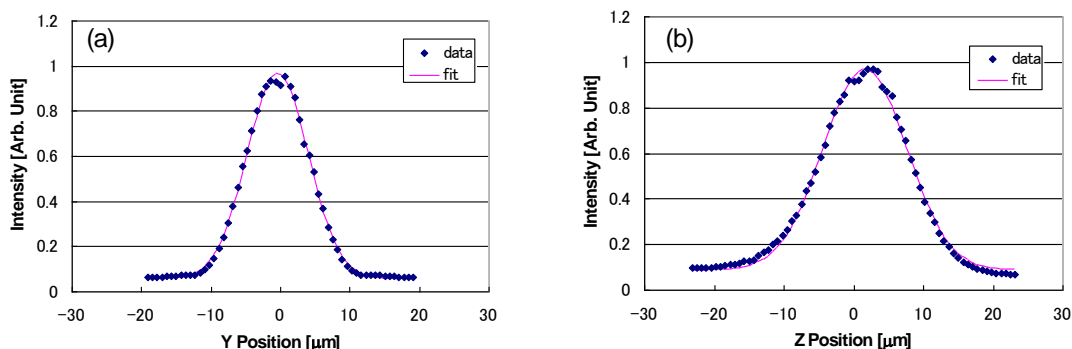


図(2)(g)－4 直線導波路評価用観察系概略図。NFP 観察は NIR カメラで導波路の端を観察する。挿入損失測定は、MMF を突き当て結合し、出力を測定する。

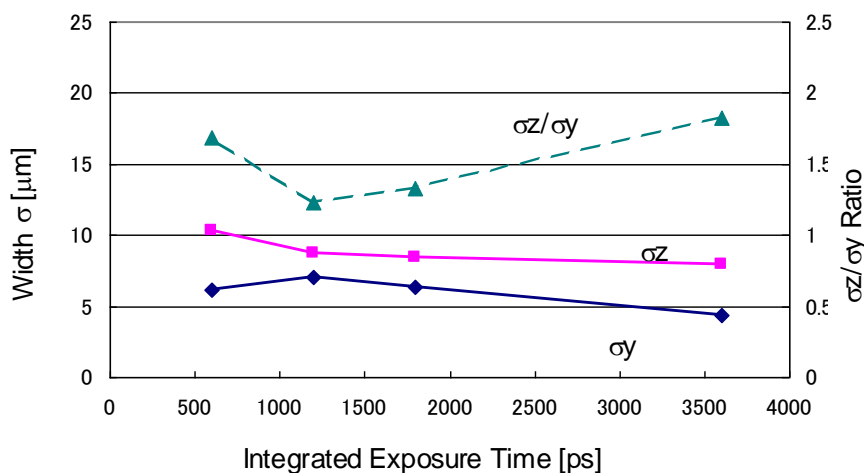




図(2)(g)－5 全長1cmの直線導波路のNFP（積算照射時間:600から3600ps）



図(2)(g)－6 1800psのNFPのプロファイル (a) y方向プロファイル (b)z方向プロファイル

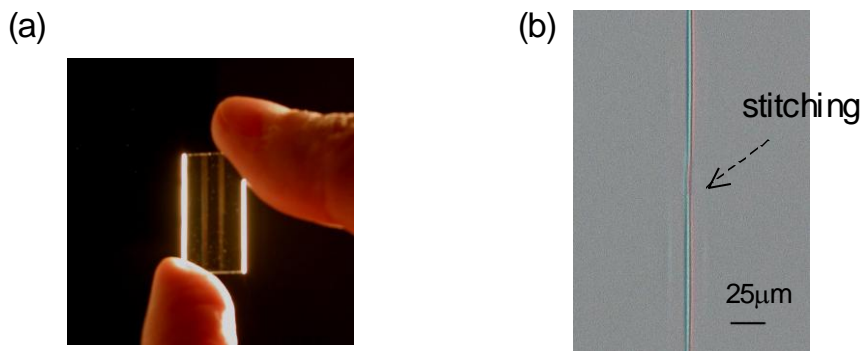


図(2)(g)－7 積算照射時間に対する $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、その比 $\sigma_z/\sigma_y$

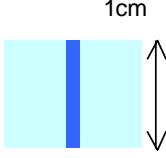
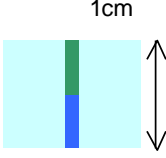
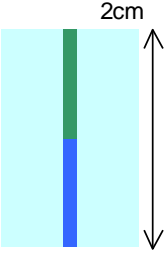
次に直線導波路の伝搬損失の評価を行った。直線導波路の伝搬損失はdB/cmの単位であり、測定には数cm程度のサンプル長が必要である。そこで、最初のショットで1cmの導波路を作製し、サンプルステージを移動し、次のショットでさらに1cmの導波路を作製し、全長2cmの直線導波路を作製した(図(2)(g)－8(a))。このように作製した2cm導波路には、導波路どうしの「つなぎ」が存在する。図(2)(g)－8(b)に導波路のつなぎ付近の光学顕微鏡像を示した。つなぎ付近でも導波路のコントラストの変化は小さいが、このつなぎによる損失も予想されるため、伝搬損失と同時につなぎ損失の評価も行う必要がある。そこで、図(2)(g)－9に示したような3種類の導波路サンプルを用意して、伝搬損失とつなぎ損失を評価した。

伝搬損失の評価にはNFP観察と同様な図(2)(g)－4に示す評価系を用いた。損失評価では、入射側のファイバーだけでなく、出射側のファイバー端も多軸ステージに固定し、光軸調整を行った。導波路とファイバーの結合をより容易にするためマルチモードファイバー(THOLABS AFS50/125Y、コア径50 $\mu$ m)を使用した。マルチモードファイバーはオプティカルマルチメータ(Ando Elec.、AQ2140)に接続し、パワーを測定した。

図(2)(g)–9に、波長1550nmでの3種類の直線導波路の挿入損失の測定結果を示した。(A)~(C)の3つのサンプルでは、ファイバーと導波路との結合損失が一定と仮定すると、つなぎ損失=(B)–(A)、伝搬損失=(C)–(B)のように評価することができる。図(2)(g)–9の1550nmでの測定結果から、つなぎ損失=-0.4 dB/stitch < 0、伝搬損失=-0.2 dB/cm < 0で、つなぎ損失と伝搬損失ともに負となった。これは、サンプル間のばらつきや測定誤差などにより、つなぎ損失と伝搬損失が負の値になったと考えられる。しかし、(A)~(C)の挿入損失はほぼ一定と見ることができて、つなぎ損失と伝搬損失はあまり大きな値ではないと予想される。ここでは、単に上限を与えることとして、(C)の2cm直線導波路の挿入損失2.0dBの結果から、波長1550nmでの伝搬損失<1dB/cmとした。確認のために、波長635nmレーザーで3種類のサンプルの挿入損失を測定した(図(2)(g)–9)。この結果から、つなぎ損失=1.4 dB/stitch、伝搬損失=2.7 dB/cmで正の値となった。今回評価している導波路は、波長635nmに対しては必ずしも最適条件で加工されていない。



図(2)(g)–8 伝搬損失評価用2cm直線導波路 (a)全体図 (b)つなぎ付近の拡大図

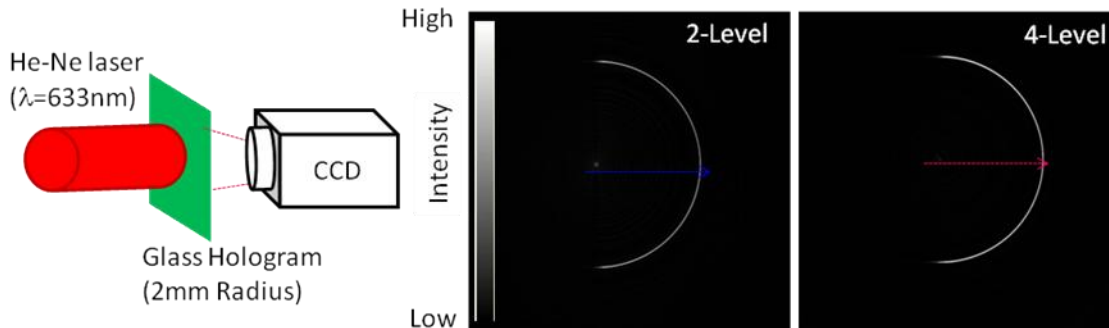
	(A)	(B)	(C)
Schematic description of samples			
# of Stitchings	0	1	1
Insertion Loss at 1550nm [dB]	2.6	2.2	2.0
Insertion Loss at 635nm [dB]	4.6	6.0	8.7

図(2)(g)–9 伝搬損失評価用サンプル、波長 1550nm での挿入損失、波長 635nm での挿入損失

### ・半円導波路

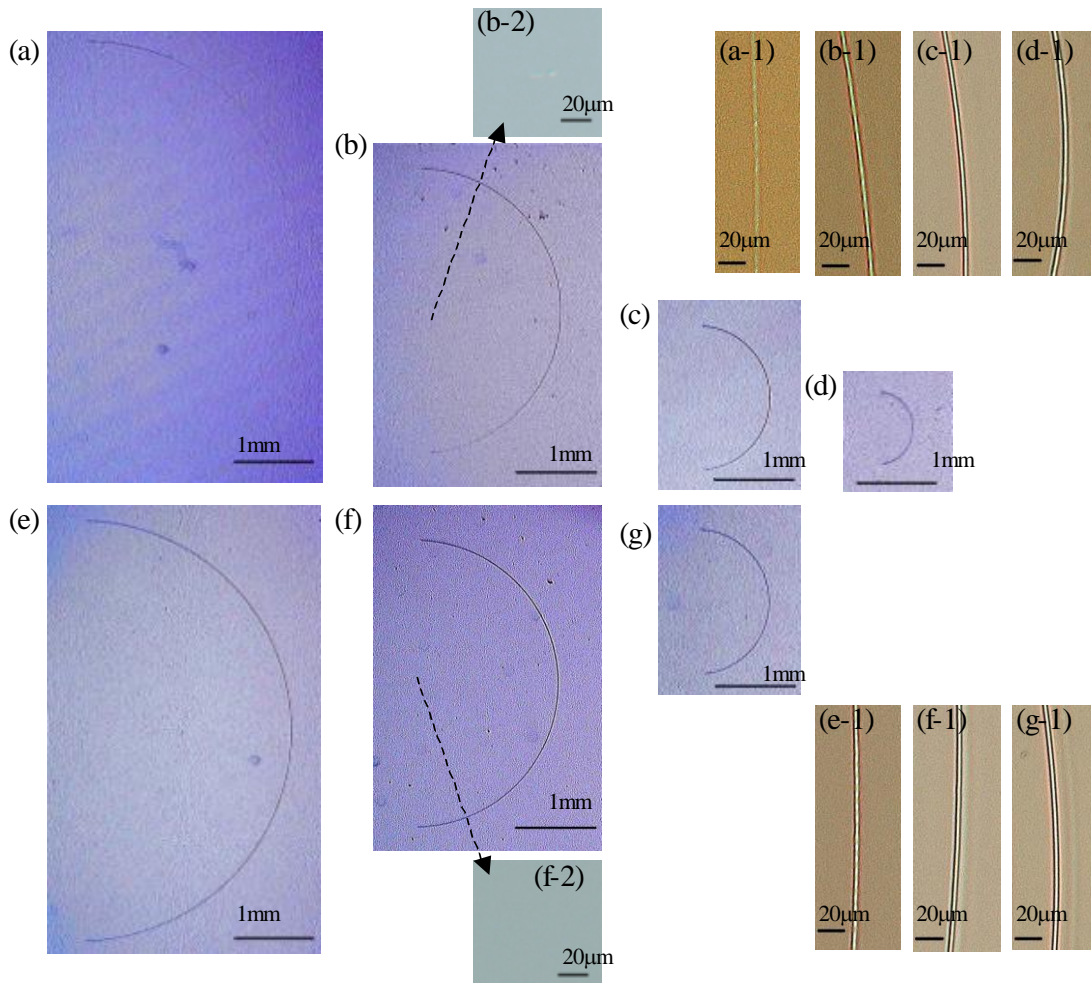
曲げ導波路は光デバイスを構成する際に欠くことのできない要素デバイスの一つである。曲げ導波路では、直線導波路の場合に問題であった伝搬損失に加えて、曲げ損失を考慮する必要がある。曲げ損失はコアとクラッドの屈折率差( $\Delta n$ )に支配されるため、 $\Delta n \approx 0.01$ では数mmの半径が必要となる[5、20]。ここでは、曲線の一例として半円導波路を一括加工で作製する。半径3mm、2mm、1mm、0.5mmの半円を生成するホログラムを設計し、ガラス・ホログラムとして作製した。ホログラムのピクセルサイズは $5\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ (1600ピクセル $\times$ 1600ピクセル)、結像距離5cmとした。比較のために、位相2段と

位相4段(半径0.5mmを除く)でガラス・ホログラムを作製した。図(2)(g)－10は設計半径2mmの場合のHe-Neレーザーで観察したガラス・ホログラムの再生像である。位相4段のホログラムの再生像は位相2段に比べて強度も高く、中心部分のスポット状ノイズ強度も低い。これらの傾向は、計算による再生像の結果とよく一致している((2)(b)章参照)。



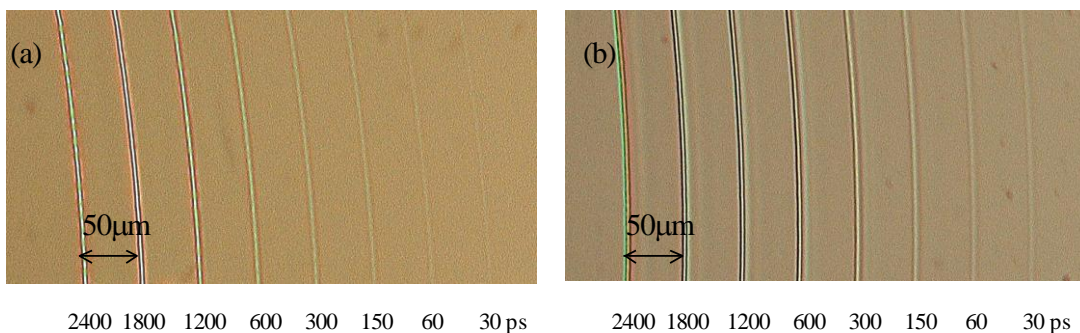
図(2)(g)－10 半径2mmの半円を再生するホログラムの He-Ne レーザーによる再生像 (a)観察装置概略図 (b)位相 2 段ホログラムでの再生像 (c)位相 4 段ホログラムでの再生像

これらのガラス・ホログラムを使用して、半径3mm、2mm、1mm、0.5mmの半円を一括加工により作製した。加工結果を図2(g)－11に示した。図(2)(g)－11(a)～(g)は半円の全体像で、位相2段で作製した半径3mmの半円以外は途切れることなく、加工されている。位相4段ホログラムでは半径3mmの半円も良好に加工(図(2)(g)－11(e))されていることから、加工に使用したガラス・ホログラムは位相2段よりも位相4段ホログラムの加工効率が高い。これは位相段数と回折効率の関係[10－12]と一致しており、ガラス・ホログラムが高精度で作製されていると考えられる。半円位相2段図(2)(g)－11(a-1)～(g-1)は拡大図で、位相2段ホログラムに比べて位相4段での加工結果の方がコントラストは高くなっている。また、位相2段で加工した半径3mmのサンプルについても図(2)(g)－11(a-1)のようにフェムト秒レーザー照射による異質相が観察できている。図(2)(g)－11(b-2)と(f-2)は半径2mmの半円の中心付近の光学顕微鏡像である。位相2段の場合は中心付近にスポットが加工されているが、位相4段では加工されていない。これは計算による再生像とHe-Neレーザーでの再生像(図(2)(g)－10)と同様な結果である。中心付近のスポットノイズが問題になる場合は、位相4段以上でホログラムを設計・作製する必要がある。



図(2)(g)－11 半円ホログラムでの一括加工結果 (a)~(d)位相 2 段ホログラムでの一括加工結果 (e)~(g)位相 4 段ホログラムでの一括加工結果 (a-1)~(g-1)円週上の拡大図 (b-2)半円の中心付近の拡大図 (位相2段ホログラム加工) (f-2)半円の中心付近の拡大図(位相 4 段ホログラム加工)

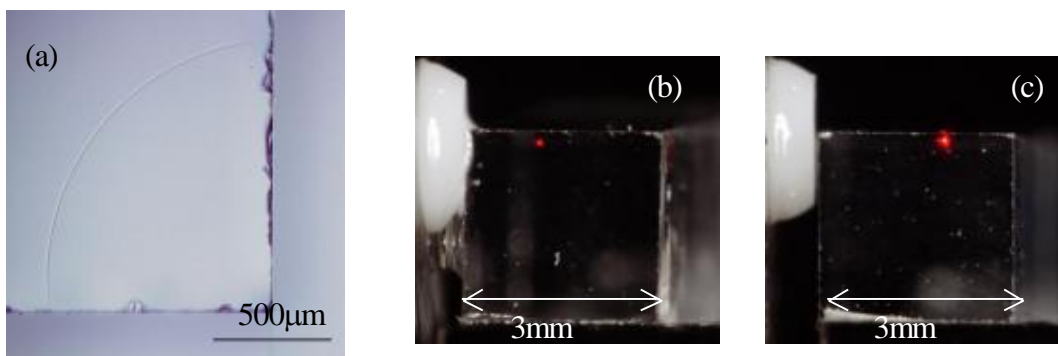
半径2mmの半円を生成する位相2段と位相4段ホログラムによる一括加工の照射時間依存性を調べた。図(2)(g)－12は光学顕微鏡での拡大図である。照射時間が長くなるに従って、照射部分のコントラストが高くなっている。また、位相2段ホログラムで一括加工した半円よりも、位相4段で加工した半円のコントラストが高くなっている。半径2mmの半円加工サンプルを定量位相顕微鏡[18]で観察し、 $\Delta n$ を測定した[19]。結果は照射時間に依存して $\Delta n = +0.002 \sim +0.01$  (位相4段ホログラムでの加工の場合)であった[15]。直線導波路加工の結果と同様に、照射部分がコア、母材をクラッドとした導波路として機能することを意味する。



図(2)(g)－12 半径2mmの半円の光学顕微鏡像(積算照射時間:30psから2400ps) (a)位相 2 段ホロ

## ガラスでの一括加工結果 (b)位相4段ホログラムでの一括加工結果

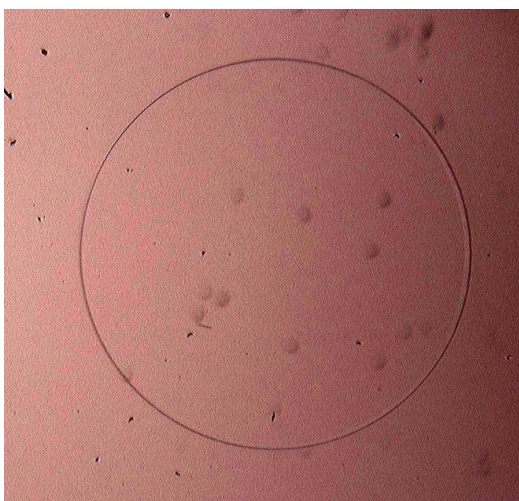
作製した半径0.5mm～3mmの半円導波路の導波特性を調べた。観察装置の制限から、180度導波した光を観察することはできないので、半円導波路を切断・研磨し、図(2)(g)－13(a)のように90度(1/4円)導波路を準備した。波長635nmのレーザー光を導波路の一方から入射し、90度伝搬した出射光を観察した。図(2)(g)－12(b)と(c)は半径1mmと半径2mmの場合の出射光で、これらは導波路として機能している。また、半径3mmの導波路でも出射光を確認できたが、半径0.5mmでは確認できなかった。曲線導波路では伝搬損失に加えて曲げ損失が存在し、半径が小さいほど曲げ損失が大きくなる[5、20]。作製した導波路の $\Delta n$ 十分な大きさではなかったため、半径0.5mmの場合は曲げ損失による導波光の減衰が大きくなったと考えられる。



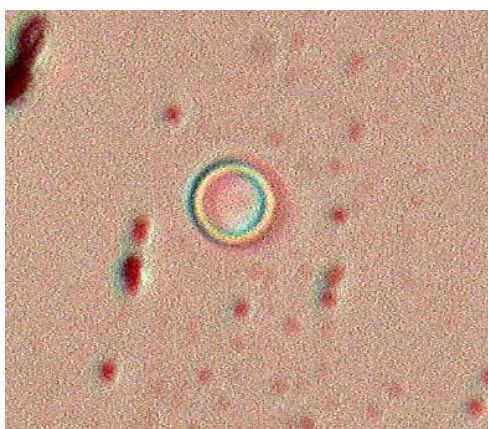
図(2)(g)－13 (a)導波光観察用半径1mmの1/4円導波路 (b)半径1mmの1/4円の635nmでの出射光 (c)半径2mmの1/4円の635nmでの出射光

### ・円導波路

閉曲線は共振器等の光デバイスに利用され、重要なデバイスの一つである。閉曲線として最も単純な形状である円をフェムト秒レーザー一括加工で作製した。一括加工での半円導波路では $\Delta n=0.01$ で、光デバイスとして使用するためには、やはりmmオーダーの半径が必要である[5、20]。ここでは、円の半径1mmの円を再生するホログラムを設計・作製した。作製したガラス・ホログラムは、ピクセルサイズ:5µm、ホログラムサイズ:8mm×8mm(800ピクセル×800ピクセル)、焦点距離5cm、位相4段で作製した。このガラス・ホログラムを使って、合成石英サンプル内部に円を加工した。図(2)(g)－14は作製した円の光学顕微鏡像である。途切れることなく、一様なコントラストで作製されている。また、小さな半径の円がガラス・ホログラムでの一括加工により作製可能かを調べるために、半径10µmの円を生成するガラス・ホログラムを設計し、作製した。図(2)(g)－12に一括加工結果をしめた。半径10µmの円が合成石英内部に良好に加工されている。 $\Delta n \approx 1$ くらいの材料が存在すれば、非常に小型の共振器が作製可能となる。



図(2)(g)－14 半径1mmの円の一括加工結果



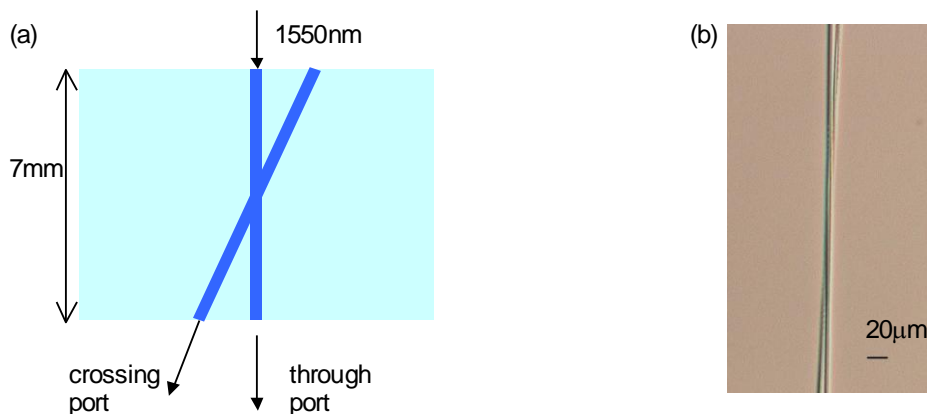
図(2)(g)－15 半径10μmの円の一括加工結果

#### d) 光デバイスの試作

c) 節では一括加工で直線導波路や半円導波路が作製可能であることを示した。以下では、これらの導波路を組み合わせて、デバイスの試作を行う。このように、デバイスをパーツ毎に分割して作製することにより、様々なパラメータでのデバイスを試作し、性能テストが可能となる。また、各導波路の加工条件と性能をあらかじめ知ることで、組み合わせたデバイスの性能も予想可能である。最適パラメータが決まったところで、各パーツを1つのホログラムへ合成し、デバイスの一括加工が可能となる。

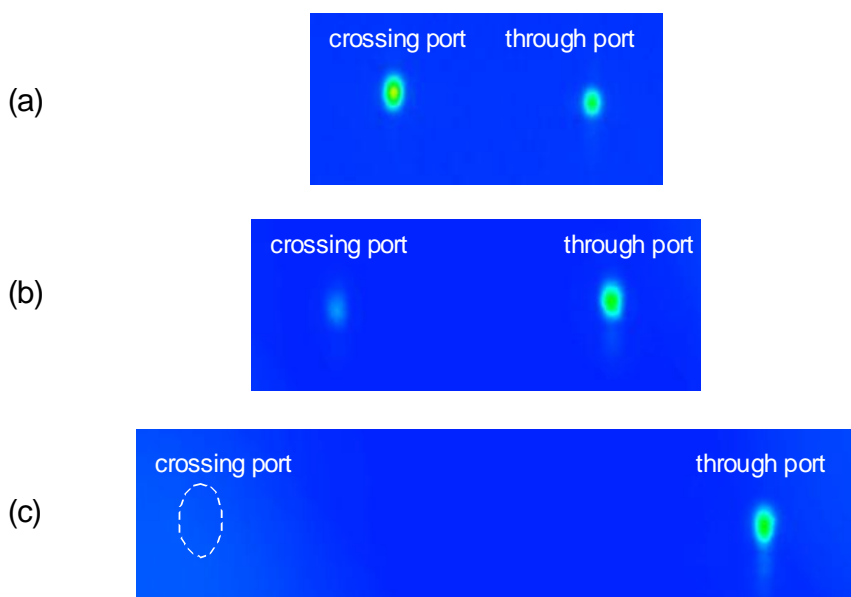
#### ・X型結合器(2×2結合器)

X型結合器は図(2)(g)－16(a)に示すように、直線導波路がX字型に交差した2×2結合器である。2つの直線導波路の角度を変えることで、有効結合長が変わり出射口でのパワー比を変えることができる。直線を再生するガラス・ホログラムを使ってX型結合器を試作した。最初のショットで直線導波路を作製し、試料ステージを回転・移動し、次のショットでもう一つの直線導波路を作製した。この作製方法では、導波路と導波路の交差部分で二重にショットすることになる。図(2)(g)－16(b)に示した交差部分の光学顕微鏡像から、交差部分での導波路のコントラストの大きな劣化は見られない。



図(2)(g)－16 (a)作製した X 型結合器の概略図 (b)作製した X 型結合器の交差部分の拡大図

交差角度を2度、3.5度、5度の3種類で X 型結合器を試作した。図(2)(g)－16(a)に示すように一方の導波路端から 1550nm の光を入射し、サンプルの反対側から近赤外カメラで NFP を観察した。観察結果を図(2)(g)－17に示した。交差角2度では0.4:0.6(through port : crossing port)、3.5度では0.8:0.2、5度では1:0のように、交差角度に依存してパワー比が変化していることを確認できた。このように、交差角度を調整することで、様々な出力比の X 型結合器を作製可能であると考えられる。

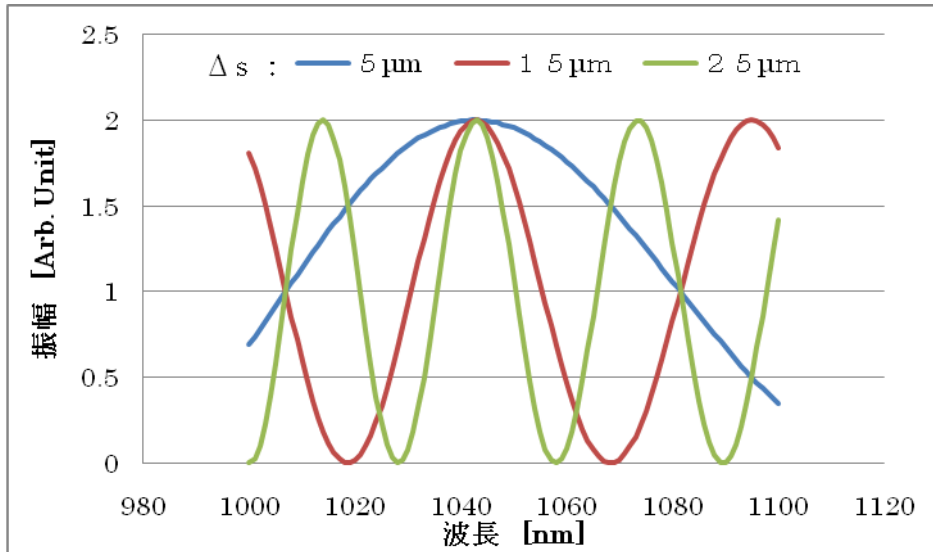


図(2)(g)－17 X 型結合器の波長1550nm での NFP (a)交差角度2度 (b)交差角度3.5度 (c)交差角度5度

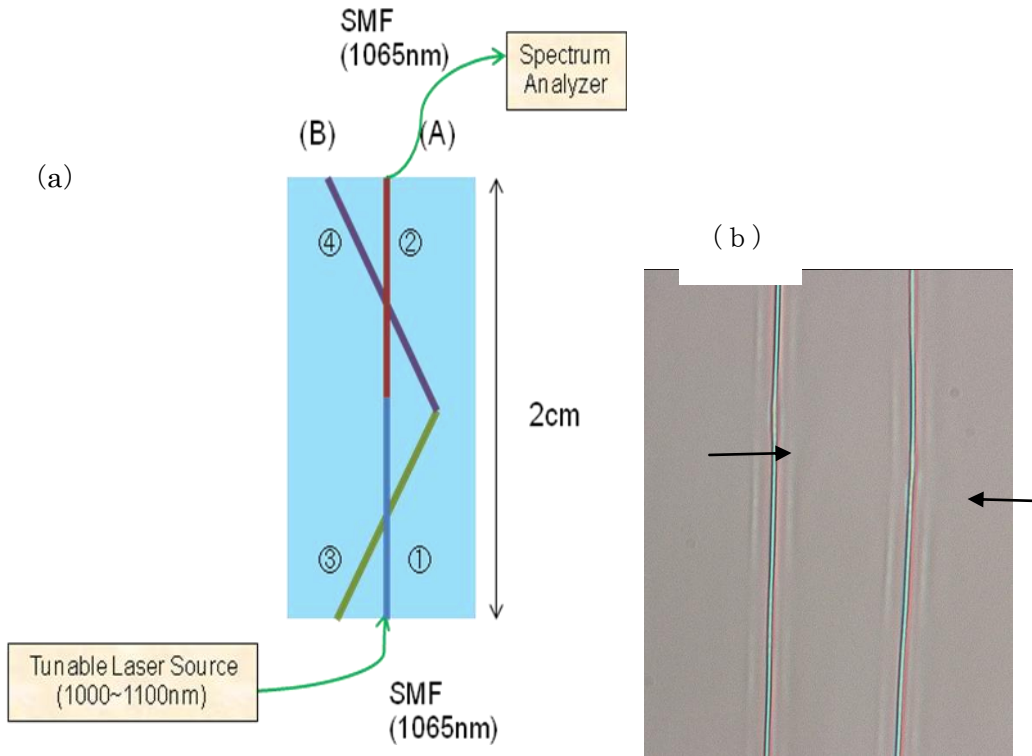
#### ・Mach-Zehnder 型干渉計

非対称経路からなる Mach-Zehnder 型干渉計(MZI)を、直線を生成するガラス・ホログラムを用いて試作する。理想的な場合、MZI の出力は図(2)(g)－18に示すような波長依存性を示し、経路長の違い $\Delta s$ により振動の周期が変わる。文献[21]では、ステージ移動によるフェムト秒レーザー加工(従来方法)で MZI を作製し、波長700nm~900nm に対して干渉計による振幅振動が観察されている。以下では1cmの直線を再生するガラス・ホログラムを使って、図(2)(g)－19のような形状の MZI を、①の導波路作製→ステージ移動→②の導波路作製→…のように4ショットで作製した。ここでは、交差角を変えて $\Delta s=6\mu m$ と $\Delta s=16\mu m$ の2種類

を試作した。図(2)(g)-19(b)は作製した MZI の導波路のつなぎ部付近の顕微鏡像で、良好に作製されている。



図(2)(g)-18 波長1000nm~1100nmに対する MZI の振幅、 $\Delta s=5\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ の場合。

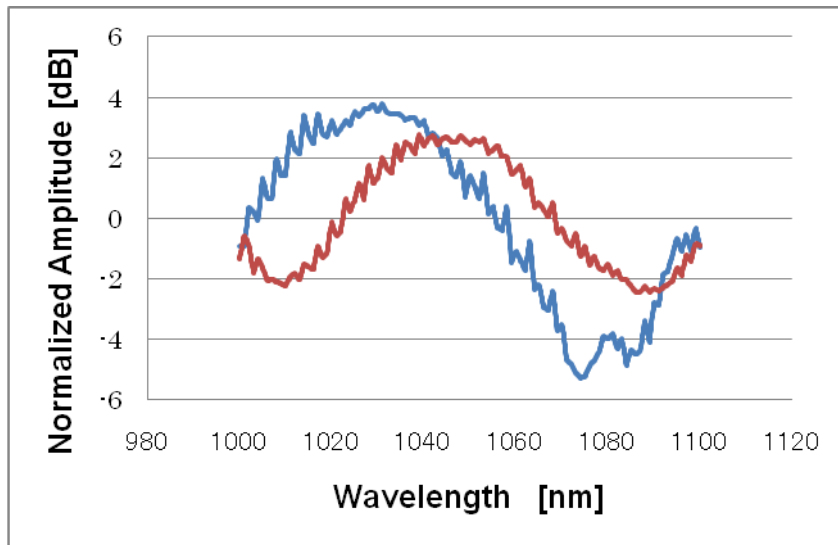


図(2)(g)-19 (a) MZI の概略図、波長依存性測定系 (b) 作製した MZI の導波路つなぎ付近の光学顕微鏡像(矢印がつなぎ部分)

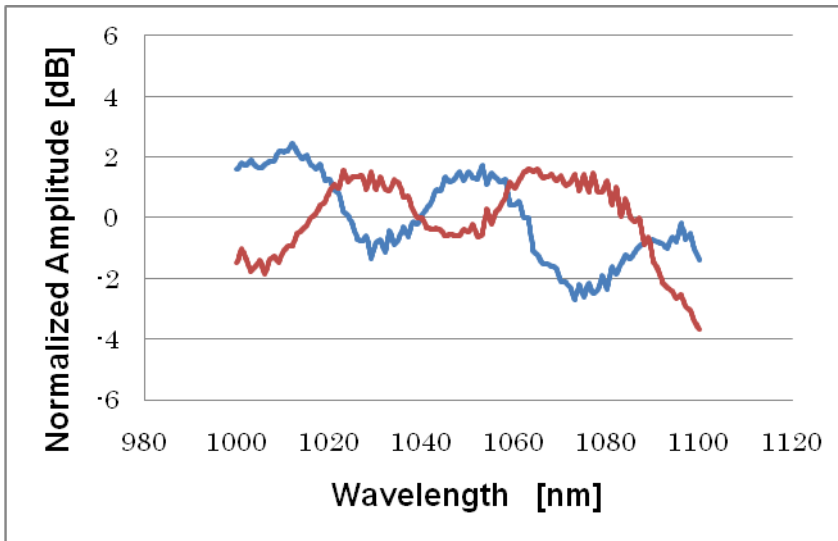
作製した MZI の一方からシングルモードファイバーを突き合わせで結合して、1000nm~1100nm の可変波長レーザーを入射した。MZI のもう一方にシングルモードファイバーを接続して、スペクトルアナライザー(Ando Elec、AQ6315A)で MZI の波長特性を測定した。図(2)(g)-20は $\Delta s=6\mu\text{m}$ (周期:114nm)の場合、図(2)(g)-21は $\Delta s=16\mu\text{m}$ (周期:42nm)の場合を示した。どちらのスペクトラムも $\Delta s$ に依存して振動周期が変化しており、 $\Delta s$ から予想される周期に近い。また、図(2)(g)-20と-21には、(A)側と(B)側の両出力でほぼ同じ周期の振動が観察されている。したがって、これらは干渉計による振幅振動であると考えられる。加工形状の不完全性、導波路加工条件は今回観察した波長域では導波路がマルチモードになっていたこと等が



振幅の小さい理由で、これらの構造の最適化により振幅の大きさは改善すると考えられる。



図(2)(g)-20 波長1100nm~1100nmに対する MZI の出力、 $\Delta s=6\mu\text{m}$ (周期:114nm)

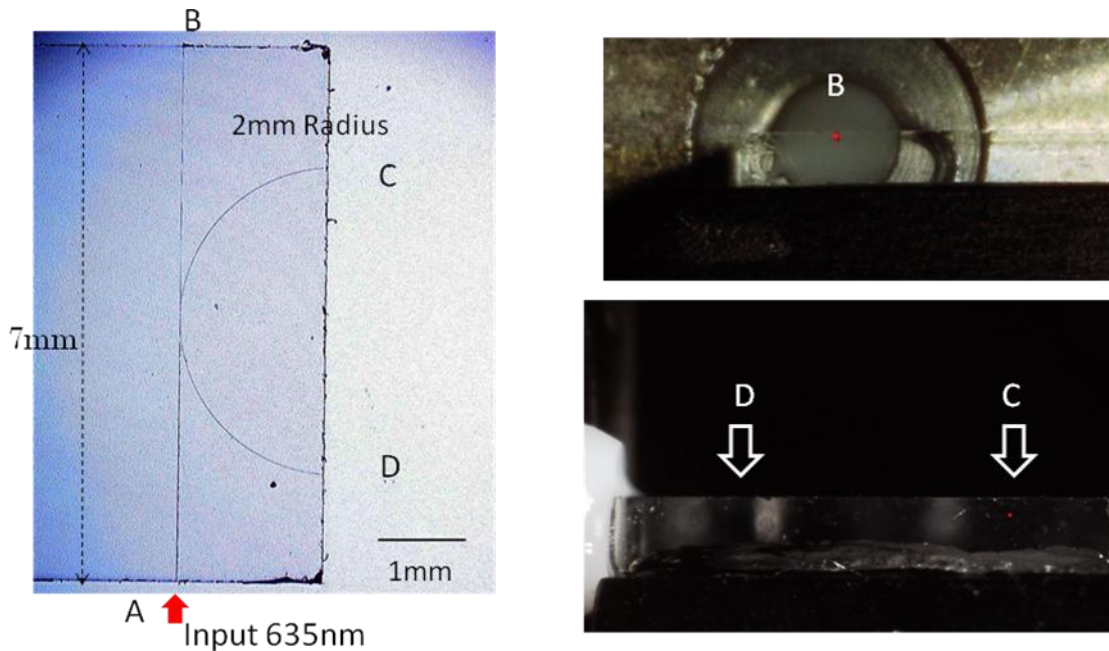


図(2)(g)-21 波長1100nm~1100nmに対する MZI の出力、 $\Delta s=16\mu\text{m}$ (周期:42nm)

#### ・K型結合器(直線と半円からなる2×2結合器)

直線導波路と半円導波路で構成された結合器(“K型結合器”)を試作する。K型結合器は「一括加工で直線導波路の作製→直線生成ホログラムから半円生成ホログラムに交換→半円導波路の作製」という2ショットで作製した。結合器の性能は直線導波路と曲線導波路の有効結合長で決まり、これは直線導波路と半円導波路の距離により制御が可能である。このように、2ショットで作製することで、様々な直線導波路と半円導波路の距離(有効結合長)のK型結合器を作製し、性能テストを行うことが可能になる。

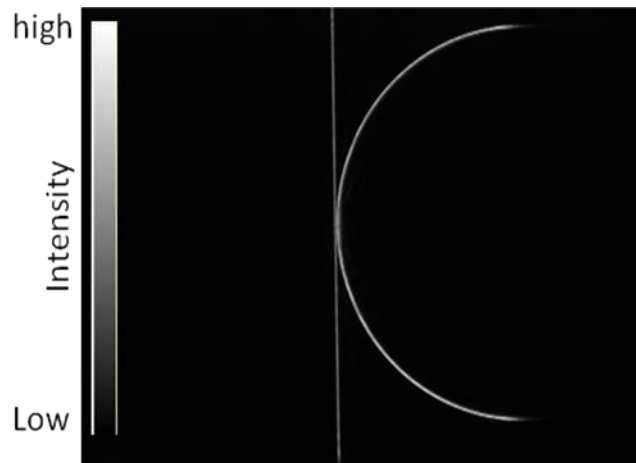
ここでは半径2mmの半円を生成するホログラムを使用し、合成石英内部にK型結合器を作製した。図(2)(g)-23(a)はK型結合器の全体像である。図(2)(g)-23(a)に示す直線導波路の一つの端(入射“A”)から波長635nmのレーザー光を入射した。結合器として機能する場合、直線導波路のもう一方の端“B”と半円導波路の端“C”でのみ導波光が観察され、半円導波路の端“D”では導波光は観察されないはずである。図(2)(g)-23(b)は直線導波路の“B”端を観察したもので、図(2)(g)-23(c)は半円導波路の端“C”と“D”を観察したものである。予想通り、直線導波路端“B”と半円導波路の端“C”でのみ導波光が観察され、半円導波路の端“D”では導波光は観察されなかった。このようにK型結合器として機能することを確認した。



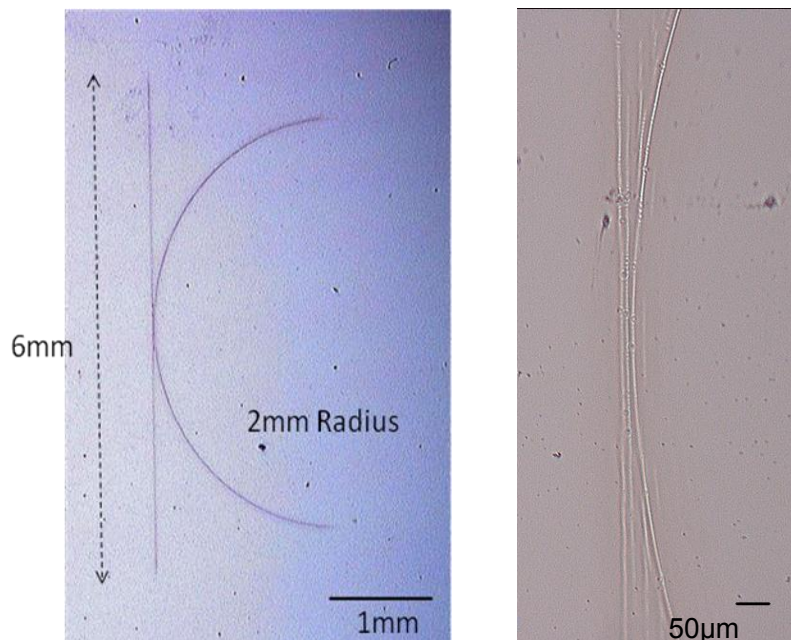
図(2)(g)－22 2ショット(直線ホログラムと半円ホログラム)での K 型結合器の試作例 (a)加工した K 型結合器の全体図 (b)635nm の出射光(直線側、図(a)の“B”から観察) (c)635nm の出射光(半円側、図(a)の“C”と“D”からの観察)

次に直線導波路と半円導波路を同時に生成するガラス・ホログラムにより、1ショットで K 型結合器を作製する。上述のように、直線導波路と半円導波路を別々に作製し、性能テストから最適な直線導波路と半円導波路間の距離(有効結合長)が得られたとすると、直線と半円を同時に生成する合成ホログラムでの一括加工は非常に有効である。

ここでは(2)(b)章で述べたように、全長6mmの直線を再生するホログラムと半径2mmの半円を再生するホログラムを合成した位相ホログラムを設計し、ガラス・ホログラムに作製した。このガラス・ホログラムは、位相4段、ピクセルサイズ10 $\mu$ m、ホログラムサイズ8mm $\times$ 8mm(800 $\times$ 800ピクセル)、結像距離12cmである。図(2)(g)－23は He-Ne レーザーをガラス・ホログラムに照射し、得られた再生像である。直線と半円が同時に良好に再生されている。次に、このガラス・ホログラムを使って、合成石英内部に K 型結合器の一括加工を行った。エネルギーが不足したため、明瞭な異質相は加工されなかった。そこで、クラウンガラスに一括加工を行い、全体像を図(2)(g)－24に示した。図(2)(g)－24から、クラウンガラス内部には全長6mmの直線と半径2mmの半円が同時に一括加工されている。このように、合成ホログラムにより K 型結合器のような複雑な形状もガラス内部に一括加工可能であることを確認した。合成ホログラムを使うことで、デバイス作製がより簡略化できる。しかし、図(2)(g)－24(b)に示すように直線導波路と半円導波路の結合部付近には、ノイズによるパターンも形成されており、さらなる合成ホログラムの設計方法の改良が必要である。



図(2)(g)－23 直線と半円を同時に再生するガラス・ホログラムに He-Ne レーザーに照射し、観察された再生像



図(2)(g)－24 1ショットの一括加工により作製した K 型結合器(全長6mm直線と半径2mmの半円)(a)K型結合器全体像 (b)直線と半円の近接部付近の拡大図

### e)まとめ

フェムト秒レーザー一括加工により、全長1cmの直線導波路、半径 0.5mm~3mmの半円導波路、半径1mmと 10µ mの円導波路を合成石英内部に加工した。直線導波路では、波長 1550nm での導波光を確認した。NFP は概ね丸い形状であり、伝搬損失は<1.0dB/cm と評価した。伝搬損失については、今後サンプル数を増やし、数 cm でのカットバック法による高精度での評価を行う予定である。半円導波路では、半径1mm、2mm、3mmでは波長635nm での導波光を確認した。半径 0.5mm では導波光が確認できず、これは曲げ損失によるためと考えられる。

これらの導波路を組み合わせて、光デバイスの試作を行った。直線導波路 2 本からなる X 型結合器では、交差角を変えることで、出力比が調整可能であることを確認した。これは交差角を変えると、有効結合長が変わるために出力比が調整できると考えられる。直線4本で構成された MZI(光路差6µ mと16µ m)を試作した。波長1000nm~1100nm において振幅振動を確認した。2 種類の MZI を試作したが、それぞれの光路差で予想される周期と観察した周期がほぼ一致していることから、干渉計による振幅振動と考えられる。

半円と直線からなる K 型結合器を、直線導波路を一括加工し、ホログラムを交換して、半円導波路を加工するという 2 ショットで試作した。合成石英内部に K 型結合器が加工され、波長 635nm での結合器としての機能を確認した。次に、直線と半円を同時に再生する合成位相ホログラムを使って一括加工を行った。クラウンガラス内部に K 型結合器が加工されていることを確認した。複雑な形状の合成ホログラムを用いることで、デバイス作製がより簡略化される。しかし、直線導波路と半円導波路の間にはノイズによるパターンも形成されており、合成ホログラムの設計方法の改良が必要である。

ホログラムを使ったフェムト秒レーザー一括加工による導波路作製は、これまで報告されておらず、本プロジェクトで初めて実証した[14-16]。今後、フェムト秒レーザー一括加工による様々な光デバイスの試作が可能である。光デバイス以外の様々なデバイスへの適用も進めて行く。

## 参考文献

- 1) R. R. Gattass, E. Mazur, "Femtosecond laser micromachining in transparent materials", *Nature Photonics* 2, 219 (2008)
- 2) 三木哲也、須藤昭一、"光通信技術ハンドブック"、オプトロニクス社、2001年
- 3) オプトロニクス社編、"光通信技術の最新資料集 V"、オプトロニクス社、2002年
- 4) 電子ジャーナル社編、"2004 オプトデバイス技術大全"、電子ジャーナル社、2004年
- 5) 末松安晴、小林功郎、"フォトリソ 光エレクトロニクスとその進展"、オーム社、2007年
- 6) J. Amako, K. Nagasaka, and K. Nishida "Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of a pair of diffractive optical elements", *Opt. Lett.* 27, 969 (2002)
- 7) T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, and, H. Misawa, "Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals", *Opt. Lett.* 26, 725 (2001)
- 8) K. Kawamura, et. al., "Femtosecond-laser-encoded distributed-feedback color center laser in lithium fluoride single crystals", *App. Phys. Lett.* 84, 311 (2004)
- 9) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, S. Tanaka, K. Hirao, "Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical element", *Opt. Express* 12, 1908 (2004)
- 10) 辻内順平、「ホログラフィー」、裳華房、1997年
- 11) (社) 応用物理学会、日本光学会 光設計研究グループ 監修、「回折光学素子入門」、オプトロニクス社、2006年
- 12) B. Kress and P. Meyrueis, "Digital Diffractive Optics", JOHN WILEY & SONS, New York, 2000
- 13) S. Hasegawa, Y. Hayasaki, and N. Nishida, "Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses", *Opt. Lett.* Vol.31, 1705 (2006)
- 14) Y. Hayasaki, T. Sugimoto, and N. Nishida, "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator", *Appl. Phys. Lett.* 87, 031101 (2005)
- 15) J. Suzuki, M. Yamaji and S. Tanaka, "Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram", *Proc. SPIE* 7201, 72011C (2009)
- 16) J. Suzuki, Y. Arima, M. Yamaji, H. Kawashima and S. Tanaka, "Curved-waveguide fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram", *Proc. SPIE* 7589, 75890T (2010)
- 17) J. Suzuki, Y. Arima, and S. Tanaka, "Optical device fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram", *Proc. SPIE* 7925, 79251D (2011)
- 18) G. Popescu, T. Ikeda, G. A. Best, K. Badizadegan, R. R. Dasari, and M. S. Field, "Erythrocyte structure and dynamics qualified by Hilbert phase microscopy", *J. Biomed. Opt.*, vol. 10, 060503 (2005)
- 19) T. Hashimoto and S. Tanaka, "Large negative refractive index modification induced by irradiation of femtosecond laser inside optical glasses", *App. Surf. Sci.* 257, 5429

(2011)

20) 岡本勝就、「光導波路の基礎」、コロナ社、1992年

21) K. Minoshima, A Kowalevich, E. Ippen, and J. Fujimoto, "Fabrication of coupled mode devices in glass by nonlinear femtosecond laser materials processing", Opt. Express 10, 645 (2002)

## (g)ホログラムを用いた光学ガラスの加工

### ・光学ガラスへのホログラムを用いた加工

#### (1)はじめに

光学デバイス加工用ガラス材料技術で開発された材料に対して、ガラス・ホログラムを用いた加工の適用について検討する。より具体的には、前項においてレンズを用いた逐次照射加工により屈折率差 $\Delta n > 0.015$ となる材料の検討を行い、従来よりも $\sim 1/8$ 程度の比較的低エネルギーで $\Delta n > 0.015$ となるガラス材料(ガラス A)を開発した。一方で、光学デバイスを高速に加工するためには、開発中のホログラム加工を適用する必要があり、一方でホログラムを用いた加工自体が開発段階であるので検討を行う必要がある。そこで、前記で得られたガラスに対して、ホログラムを用いた加工について検討する。

#### (2)実験方法

##### 1)ホログラムを用いた加工

ガラス A に対して、ホログラムを用いて一括加工を行う。最初の検討として、ホログラムのみの加工でどの程度の加工ができるかを確認することにした。図 KF1 にホログラムを用いた加工配置の模式図を示す。また、レーザー加工条件は表 KT1 のとおりである。パルス幅は 250kHz の逐次照射のときと同じ 300fs (AC)とした。

##### 2)ホログラム設計の差の影響

光学デバイス加工を高効率に製造するためには、ホログラムを用いた加工において、短時間で大きな $\Delta n$ を実現する必要がある。図 KF2 に対物レンズを併用してガラス内部に集光照射するホログラム加工の配置の模式図を示す。これにより、擬似的に開口数の高い状態にして加工を行う。また、レーザー加工条件は表 KT3 のとおりである。

#### (3)実験結果および考察

##### 1)ホログラムを用いた加工

ホログラムを用いた加工において、入射するパワーと時間を変化させた場合の異質相の外観を比較した。図 KF3 から 6 に加工の光学顕微鏡像を示す。一定のパワーで照射時間を変化させた。比較的高いパワー 5W、3W では加工結果に大きな差は見られなかった。いずれのパワーにおいても、短時間(0.5 秒)で長さ 3mm 程度のラインの形成が確認できた。異質相のコントラストは比較的低かった。一方、照射時間が長くなると、1 秒ではライン周辺部(表面近傍)の屈折率変化が目立つようになった。

次に、照射時間を 10 秒に固定してパワーを変化させた場合の検討を行った。結果としては、図 KF7 より 1W 程度以上では入射面近傍に微細な粒状の異質相が多数形成されていることが確認された。これは、投入パワーが強いため、ラインの結像位置手前にも関わらず吸収が起きたことに起因すると考えられる。一方、0.6W で照射時間が 10 秒では、ライン周辺の微細な異質相は比較的小なくなり、ライン状の異質相が明瞭になった。しかし、異質相のコントラストだけで比較すると、図 KF8 の逐次照射(250kHz 10x レンズ)で確認された $\Delta n$ には達していないことが予想された。以上のパワーと加工時間を変えたときの異質相の外観の関係を図 KF9 に示す。

次に、パワーを 0.6W で固定し、照射時間(照射パルス数)を 10 秒、100 秒、1000 秒と変化させた。図 KF10 より、照射時間が長くなることで異質相のコントラストは向上した。また、ライン周辺部(表面近傍)の微細な屈

折率変化も目立つようになった。図 KF11 に、異質相の断面方向からの光学顕微鏡像を示す。照射時間の増加に伴い、異質相が光軸方向に伸びている様子が確認された。1000 秒の場合、着色した部分を全体では 3mm であった。照射時間 10 秒と 100 秒の場合、着色は発生しているが、屈折率はほとんど変化が無い様であった。一方、1000 秒では屈折率が増加しているように観察され、長さは $\sim 200\mu\text{m}$  であった。図 KF8 に示される逐次照射(250kHz)で加工したときの結果では、光軸方向の長さは $\sim 10\text{--}30\mu\text{m}$  であった。表 KT3 に逐次照射加工と、ホログラムを用いた加工との比較表を示す。図 KF8 の逐次照射加工(250kHz)での加工において、単位面積あたりのパルスエネルギーは、 $9.8 \times 10^8 \text{J}/\mu\text{m}^2$  であり、今回のホログラムを用いた照射における平均出力で表すと 1.2W 以上に相当する。しかしながら、前述のとおり、0.6W を越えると(例えば 1.5W のように)、結像位置手前に微細な異質相が形成される。一方、単位面積あたりの照射量で比較すると、250kHz では、仮に 3mm のラインを形成するのに $\sim 3$  秒(1mm/秒でスキャン加工)必要であるが、ほぼ定点とみなしたとき、 $7.33 \times 10^2 \text{J}/\mu\text{m}^2$  となる。表面近傍の吸収が目立たない程度の低パワー(例えば、0.6W)に設定すると、1000s よりも長い時間照射に相当し、高効率加工という観点では加工条件を見直す必要がある。

## 2)ホログラム設計の差の影響

前述のとおり、レンズのみの加工において、高開口数のレンズを用いた照射に相当する照射状態について述べたが、実際に高開口数のレンズを使用した加工で異質相の屈折率が高くなるかを確認することにした。図 KF12 は対物レンズ 40x(0.55)のみでレーザーを集光照射して形成された異質相の光学顕微鏡像である。このように比較的高いコントラストの異質相が確認された。また、0.002 秒と非常に短時間(1、2 パルス程度)で比較的高いコントラストが形成されることから、同様な集光状態が実現できれば、短時間で大きな $\Delta n$  の異質相を形成できると考えられる。

### ①ガラス・ホログラム+レンズ

次に、図 KF2 に示すような配置でホログラムと対物レンズを組み合わせレーザー加工を行った。図 KF13 に加工結果の光学顕微鏡像を示す。照射時間を 10 秒に固定したとき、パワー250mW で長さ  $160\mu\text{m}$  程度のラインが確認された。ホログラムのライン長さの設計値は 1.5mm であるが、レンズを利用することで縮小されて加工される。異質相のコントラストは比較的低かった。断面方向からの観察像では、光軸方向の長さは  $100\mu\text{m}$  程度であり、目標とする $<0.3\text{mm}$  の加工ができることを確認した。また、表面からより深い位置でも同様な加工が出来ていた。一方で、ライン上部には微細な粒状の異質相が確認された。これは先と同様にラインの結像位置よりも手前で吸収に起因すると考えられる。このような結像位置手前の微細な異質相はパワーが $\sim 250\text{mW}$ (照射時間 10s の場合)から顕著に見られた。

### ②4 段型の回折効率の高いホログラムを用いた場合の検討

前述のとおり、レンズを併用することで光軸方向の長さを抑えることが可能であることは確認できた。しかし、形成されるラインのコントラストは比較的低く、ライン結像位置の手前で微細な異質相が形成されることから、更に結像位置手前の吸収を抑えつつ結像位置での強度を上げる必要があると考えられた。

そこで、このレンズを併用した照射光学系において、2 段型の位相型のホログラム(理論回折効率 $\sim 40\%$ )よりも回折効率の高い 4 段型ホログラム(理論回折効率 $\sim 81\%$ )を利用してレーザー加工を試みた[K1]。その結果、図 KF14 に 4 段型のホログラムを利用した加工結果を示す。図 KF13 の 2 段型の場合と比較すると異質相のコントラストが僅かに高くなった。表 KT4 の加工結果の表より、2 段型と 4 段型のホログラムの結果は、それぞれ、条件②と③であり、29 行目(L29)のパワー密度でみると、 $0.09\mu\text{J}/\mu\text{m}^2$  と  $0.14\mu\text{J}/\mu\text{m}^2$  であり、結像位置手前の吸収が起きることなく、約 1.6 倍程度のパワー密度が投入できた。

### ③パルス幅を変化させたときの影響

次に、4 段型のホログラムを利用し、パルス幅を長くした場合の加工検討を行った。この検討の目的はとして、文献[K2]によると、パルス幅を長くすることで内部に周期構造が形成できたとの報告がある。ここでは、パルス幅が長くなることでレーザーパルスのピークパワー密度が下がり、表面のアブレーションが低減され、内部に周期構造を加工している。図 KF15 に 4 段型のホログラムを利用し、パルス幅を長くした場合の加工結果を示す。パルスエネルギーは同じであるが、ラインはシャープになり、コントラストは若干高くなった。更にパワーを増加させた場合、比較的高いコントラストの異質相が確認された。(図 KF16) 表 1 に加工条件をまとめた表を示す。図 KF14、KF15、KF16 の加工条件は、それぞれ条件②、条件③、条件④に相当する。4 段型ホログラムを用いた加工条件に関して、パルス幅が 300fs(AC)の場合、570fs(AC)の場合、それぞれ、条件③と④であり、表 1-L29 の「パワー密度」で見ると、それぞれ、 $0.14\mu\text{ J}/\mu\text{ m}^2$  と  $0.18\mu\text{ J}/\mu\text{ m}^2$  であり、約 1.3 倍程度のパワーを投入したにも関わらず、結像位置手前が加工されなかった。これは、条件②の 2 段型の場合と比較して約 2 倍に相当する。また、パルス幅を考慮した「ピークパワー密度」(表 1-L30)で見ると、条件③と④では、それぞれ、 $48\text{ TW}/\text{cm}^2$  と  $32\text{ TW}/\text{cm}^2$  であり、パルス幅が長い条件④では、「ピークパワー密度」は低い状態であると見積もられる。これより、投入したパルスのピークパワー密度が下がった分、結像位置手前で吸収が起こり難くなったと考える。また、条件④のピークパワー密度  $32\text{ TW}/\text{cm}^2$  は、レンズのみの場合の条件①L30 の場合の  $31\text{ TW}/\text{cm}^2$  とほぼ同程度であった。

### 3)ホログラムを用いた短時間加工の検討

高速加工の検討として、ホログラムを用いた加工において、少ないパルス数で加工できるかを検討した。レンズ  $40\times(0.55)$  を併用したホログラム加工に関して、図 KF17 と KF18 にそれぞれ加工時間が 0.005 秒、0.002 秒の加工の光学顕微鏡像を示す。加工時間が短いほど途切れた個所が目立つが、0.002 秒の加工でも比較的高いコントラストの異質相形成が確認できた。先の  $40\times(0.55)$  レンズのみの場合と同様に、少ないパルス数でも高いコントラストの異質相形成が可能であり、短時間加工の可能性が確認できた。

次に、実際に加工された異質相の  $\Delta n$  を測定した。加工時間 0.005 秒とし、図 KF19 のように、長さ  $240\mu\text{ m}$  のラインをライン方向に  $200\mu\text{ m}$  ずつずらすことにより、一部ラインを重複させながら長いラインを作製した。また、隣のラインは開始点を  $20\mu\text{ m}$  ずつずらして加工し、ラインと垂直方向にサンプルを切出し、ライン断面方向から  $\Delta n$  測定を行った。これは、形成される異質相ラインの長さが  $240\mu\text{ m}$  と短く、またラインのコントラストにムラが多く、後の  $\Delta n$  測定用において、できるだけ異なる部位の  $\Delta n$  を測定するために行った。

図 KF20 に実際に加工した異質相の光学顕微鏡像を示す。部分的に  $240\mu\text{ m}$  ラインに散乱性の異質相が形成されていた。加工深さやホログラムの設置な僅かな設定の差で生じることがあり、現状の加工の許容範囲が狭いことに起因するものと考えられる。次に、図 KF21 に、上記ライン構造のライン断面からの屈折率差の測定画像を示す。測定位置は重複部や散乱性のムラのない位置を選択した。また図 KF22 には、異質相部を含む点 A-B 間の  $\Delta n$  のラインプロファイルを示す。照射時間 0.005 秒で形成されたガラス A 内部の異質相の屈折率差( $\Delta n$ )は  $-0.006$  から  $-0.015$  の範囲でムラがあった。これより、逐次照射加工で  $\Delta n$  が 0.015 を越えることが確認されたガラスにおいて、ホログラムを用いた一括加工を適用した短時間加工(0.005 秒)で形成された異質相でも  $\Delta n$  が 0.015 を越えることが確認された。異質相のムラは照射条件の改良により改善できると考えられる。ここで、目安として逐次照射加工(250kHz)の場合と加工時間の比較を行った。ライン幅、屈折率差が同じであると仮定して、逐次照射で  $1\text{ mm}/\text{sec}$  の走査速度の加工では  $0.25\text{ mm}$  のラインは 0.25 秒かかる。一方で、上記の  $\Delta n$  測定を行った加工では照射時間が 0.005 秒であるので、50 倍( $0.25\text{ 秒}/0.005\text{ 秒}=\text{50}$ )の高速化に相当すると考えられる。1 パルス(0.001 秒)でも加工できるようになれば更に 5 倍の 250 倍程度に高速化できる可能性がある。



#### (4) まとめ

次照射加工により屈折率差 $\Delta n > 0.015$  となることが確認されたガラス A に対して、ホログラムを用いた一括加工の適用を検討した。照射時間が 0.005 秒以下の短時間で長さ 250 $\mu\text{m}$  のライン状の異質相が加工できることが確認された。また、光軸方向の長さは約 100 $\mu\text{m}$  程度であり、目標とする 300 $\mu\text{m}$  以下の加工が可能であることが示された。また、形成されたライン状異質相の $\Delta n$  を測定したところ、逐次照射加工と同様に $\Delta n$  が 0.015 を越えることが確認された。現状はライン状異質相に欠けやムラが生じているが、照射条件の改良により改善できると考えられる。また、目安として逐次照射加工(250kHz)の場合と加工時間の比較を行ったところ、照射時間が 0.005 秒の場合、逐次加工の 50 倍の高速化に相当する加工が確認できた。更なる検討で 250 倍程度に高速化できる可能性がある。

・図表

表 KT1 ホログラムを用いた加工のレーザー照射条件

中心波長	nm	:	800	
パルス幅	fs	:	200	300fs(AC)
繰返し周波数	kHz	:	1	
平均出力	mW	:	660-1550	(0.6-1.55mJ/パルス) ホログラム前
照射時間/ショット	s	:	10-1000	
対物レンズ		:	なし	
ガラス・ホログラム		:	L=3 mm	2 段型
加工深さ	μ m	:	~200	

表 KT2 逐次照射加工とホログラム加工結果比較

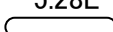
	250kHz加工(逐次加工)	ホログラム加工
波長	800 nm	800 nm
パルス幅(AC:オートコリレーター読み)	300 fs(AC)	300 fs(AC)
くり返し周波数	250 kHz	1 kHz
照射時間	3 sec	1000 sec
スポット直径(又はライン幅)	5 μ m	5 μ m
ライン長さ	-	2500 μ m
加工面積	19.6 μ m <sup>2</sup>	12500 μ m <sup>2</sup>
平均出力	0.48 W	0.66 W
パルスエネルギー	1.92E-06 J/パルス	6.60E-04 J/パルス
単位面積あたりのパルスエネルギー	9.78E-08 J/μ m <sup>2</sup>	5.28E-08 J/μ m <sup>2</sup>
単位面積あたりのパルスエネルギー×パルス数(移動が無いものとして)	○ 7.33E-02 J/μ m <sup>2</sup> 定点と見なし て	5.28E-02 J/μ m <sup>2</sup> ライン状 

表 KT3 ホログラムを用いた加工においてレンズを併用する場合のレーザー照射条件

中心波長	nm	:	800	
パルス幅	fs	:	200	300fs(AC)
			370	570fs(AC)
繰返し周波数	kHz	:	1	
平均出力	mW	:	660-1550	(0.6-1.55mJ/パルス) ホログラム前
照射時間/ショット	s	:	10-1000	
対物レンズ		:	なし	
			40x(N.A.=0.55)	
ガラス・ホログラム		:	(A)、L=1.5 mm	2 段型
			(B)、L=2.5 mm	4 段型
加工深さ	μ m	:	~200	

表 KT4 加工結果まとめ

L1	条件	①	②	③	④
L2	CGH		a (2段)	b (4段)	c (4段)
L3	1辺サイズ (mm)		5	5	5
L4	設計結像距離 $f_{CGH}$ (mm)		60	60	60
L5	設計L (mm) [L1]		1.5	2.5	2.5
L6	併用レンズ	40x(0.55)のみ	40x(0.55)	40x(0.55)	40x(0.55)
L7	開口 (mm)	6.3	6.3	6.3	6.3
L8	レンズ焦点距離 $f_{LNS}$ (mm)		4.5	4.5	4.5
L9	CGH-レンズ距離 (mm)		0.5	0.5	0.5
L10					
L11	繰り返し周波数 (kHz)	1	1	1	1
L12	Power (mW)	2	250	300	400
L13	時間 (sec)	0.002	10	10	1
L14	照射パルス数 (パルス)	2	10000	10000	1000
L15	パルス幅(AC) (fsec)	300	300	300	570
L16					
L17	加工L (mm) L2		0.16	0.24	0.25
L18	加工直径 ( $\mu$ m)	4	2	2	2
L19	dz ( $\mu$ m)	30	100	130	97
◆面積あたりの比較					
L20	パルスE ( $\mu$ J/pulse)	2	250	300	400
L21	照射E ( $\mu$ J)	4	2500000	3000000	400000
L22	面積 $\mu$ m <sup>2</sup>	12.6	320	480	500
L23	$\mu$ J/ $\mu$ m <sup>2</sup>	0.16	0.78	0.63	0.80
L24	ピークパワー密度 TW/cm <sup>2</sup>	53.05	260.42	208.33	140.35
L25	$\mu$ J/ $\mu$ m <sup>2</sup>	0.32	7812.50	6250.00	800.00
L26	レンズ 透過率 ⑤	0.60	0.60	0.60	0.60
L27	CGH効率 ⑥	1	0.4	0.8	0.8
L28	開口 ⑦	1	0.48	0.48	0.48
L29	④の補正 $\mu$ J/ $\mu$ m <sup>2</sup> ⑧	0.10	0.09	0.14	0.18
L30	④の補正 ピークパワー密度 TW/cm <sup>2</sup>	31.83	30.00	48.00	32.34

※パ  
度はパ  
(オートコ  
ター読み  
計算。

ワー密  
ルス幅  
リレー  
(AC))で

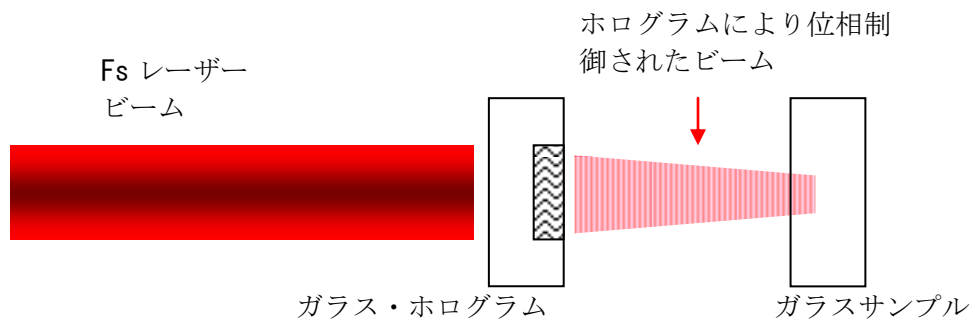


図 KF1 ガラス・ホログラムを用いてレンズを併用する加工の配置の模式図。

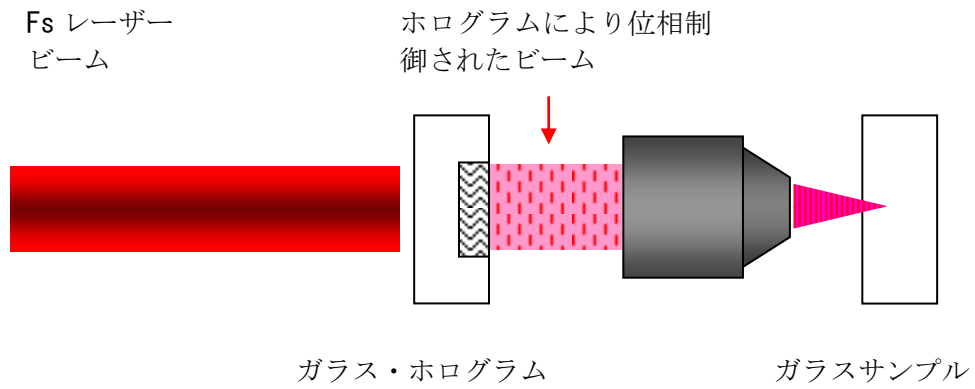


図 KF2 ガラス・ホログラムを用いてレンズを併用する加工の配置の模式図。

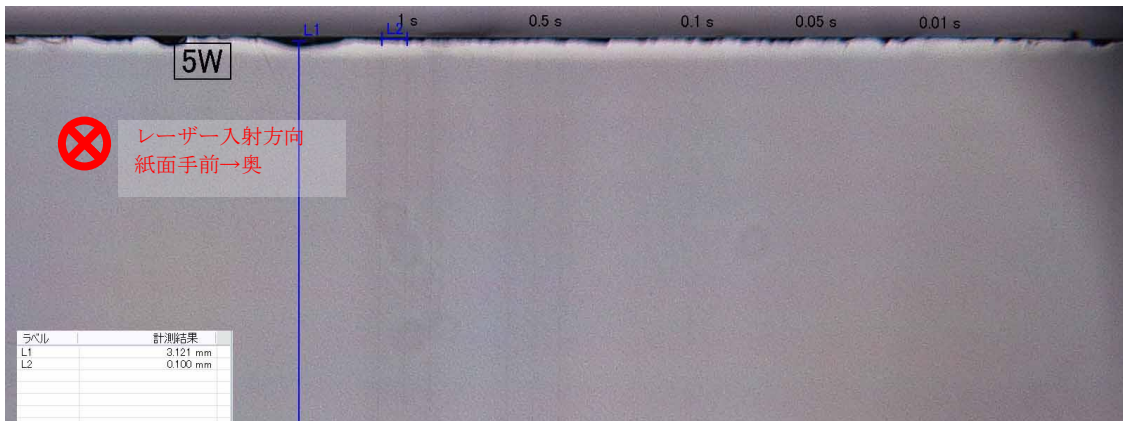


図 KF3 パワー5W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（入射面側から観察）

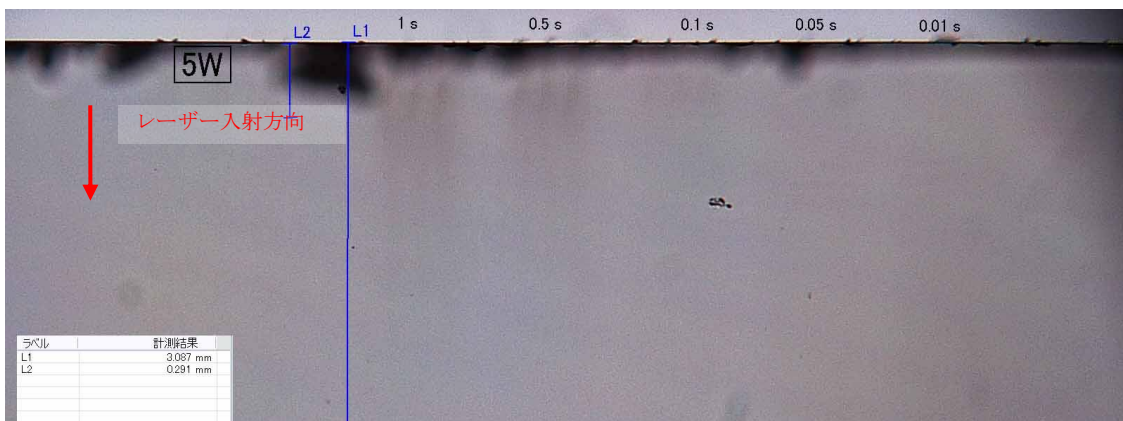


図 KF4 パワー5W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（断面側から観察）

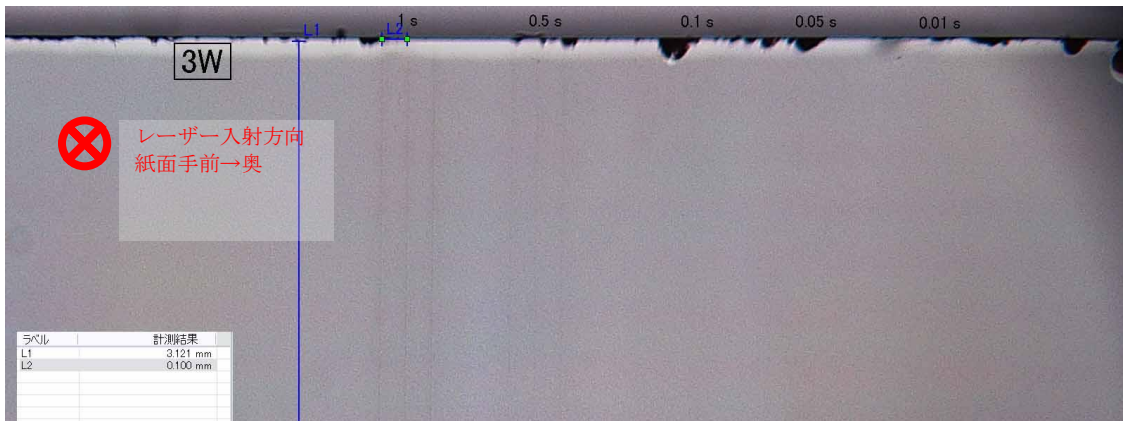


図 KF5 パワー3W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（入射面側から観察）

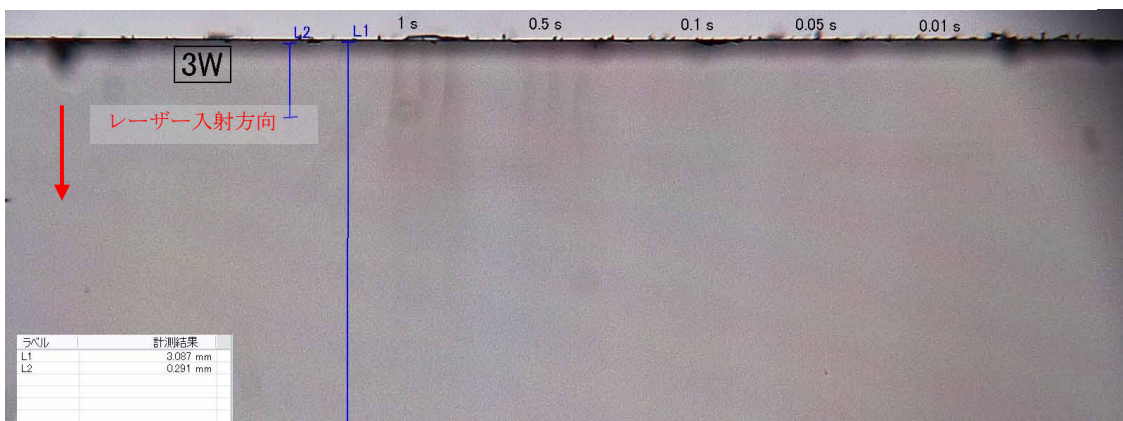


図 KF6 パワー3W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（段面側から観察）

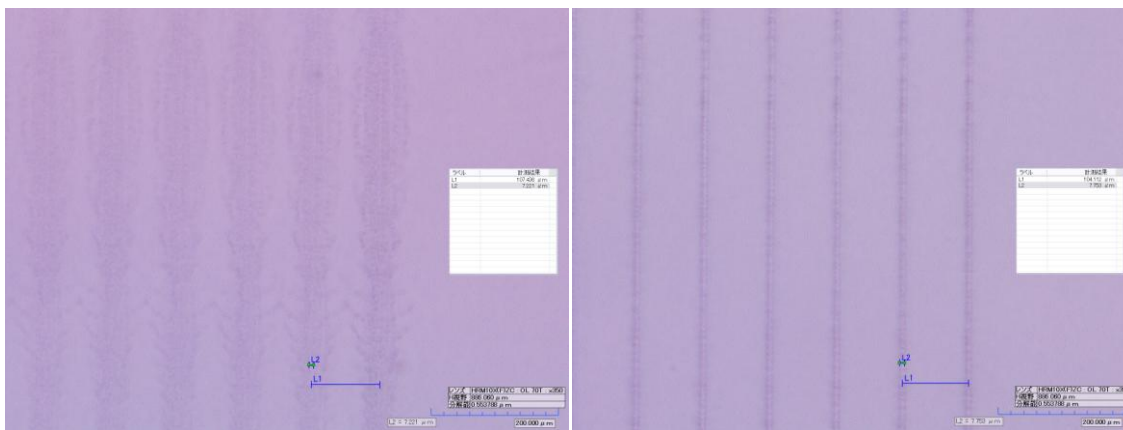


図 KF7 照射時間 10 秒の加工結果の光学顕微鏡像。（入射面側から観察。左 1.5W、右 0.6W）

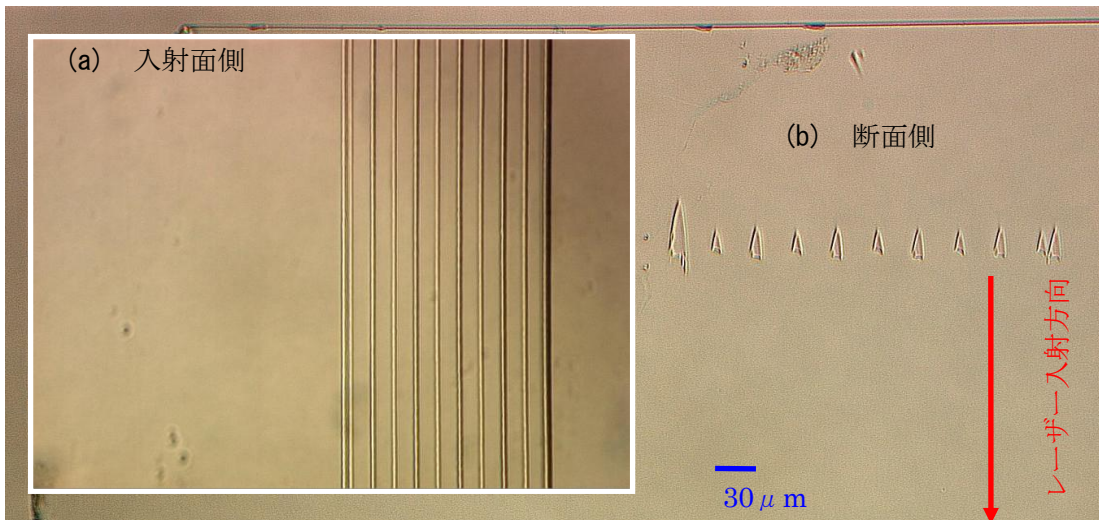


図 KF8 光学顕微鏡像。(250kHz で逐次照射加工)

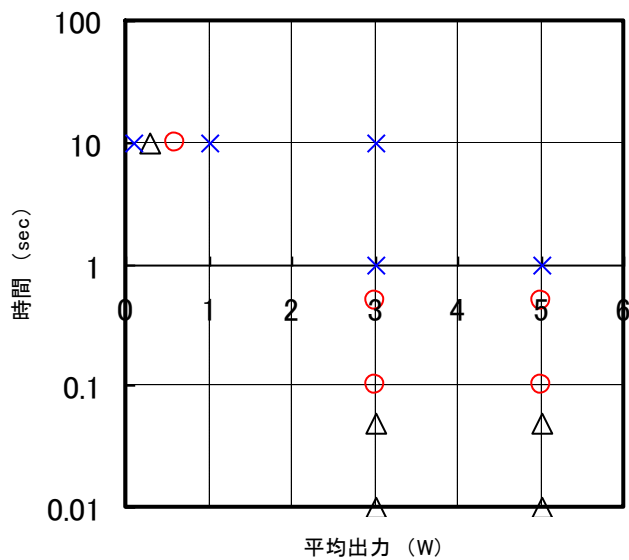


図 KF9 形成された異質相の外観評価結果

○：ライン形成、△：着色のみ

×：ライン周辺部(表面近傍)に微細な屈折率変化が多い、又は、ライン形成なし



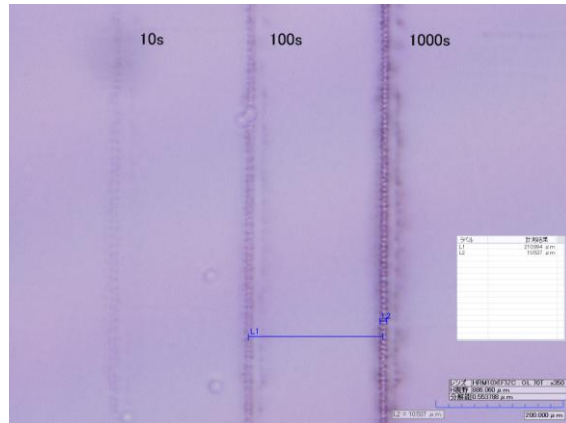


図 KF10 0.6W で照射時間を変えたときの光学顕微鏡像。(入射面から)

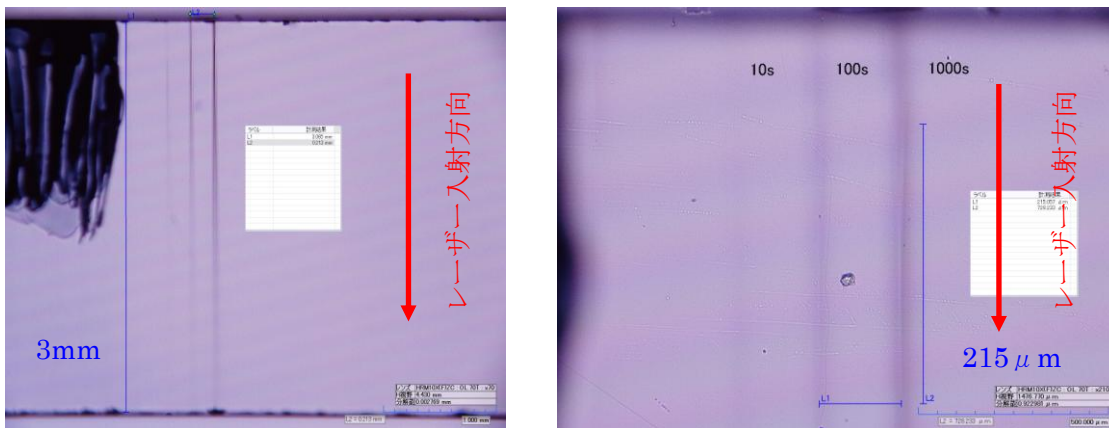


図 KF11 0.6W で照射時間を変えたときの光学顕微鏡像。(断面観察)(左)表面近傍の拡大像。

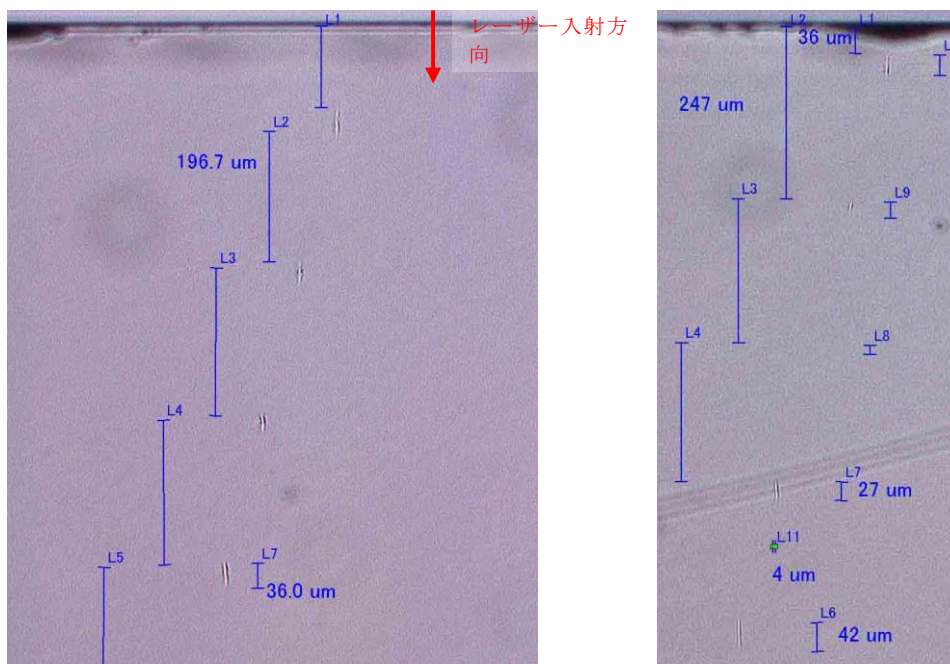


図 KF12 40x(0.55) レンズのみで加工した異質相ドットの断面からの光学顕微鏡像。パルス幅：300fs(AC)、平均出力：2mW、照射時間：10sec(左)、0.002sec(右)

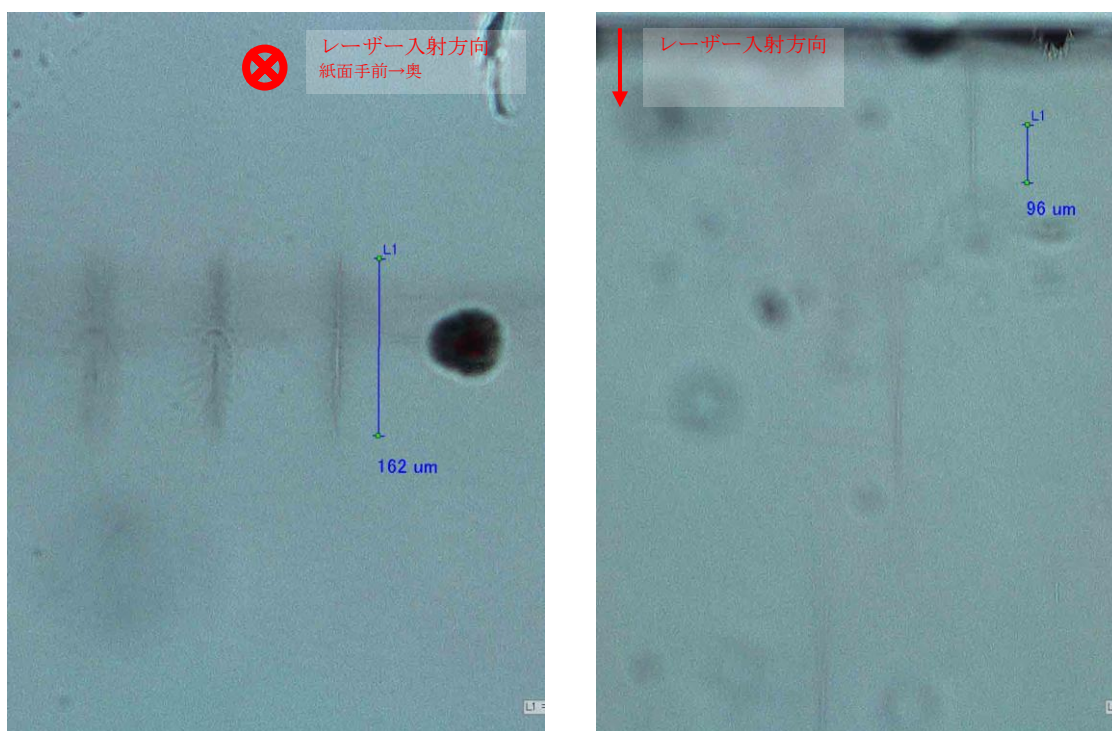


図 KF13 40x(0.55) レンズを併用したホログラム(2 段型)加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅：300fs(AC)、平均出力：250mW、照射時間：10sec

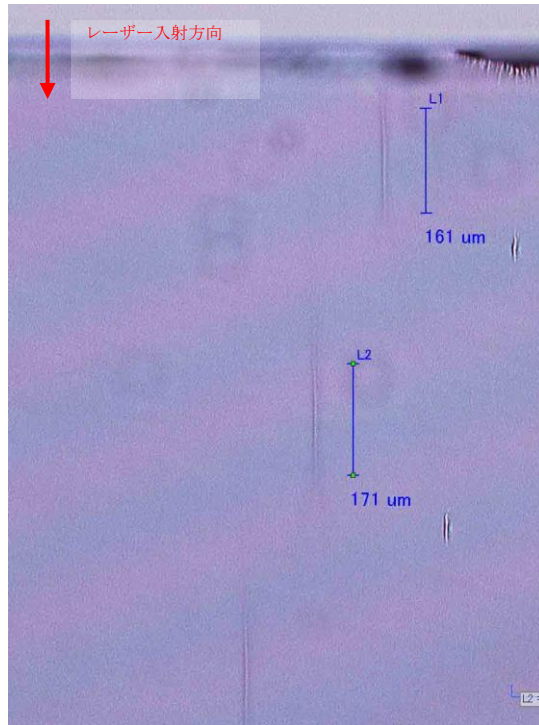
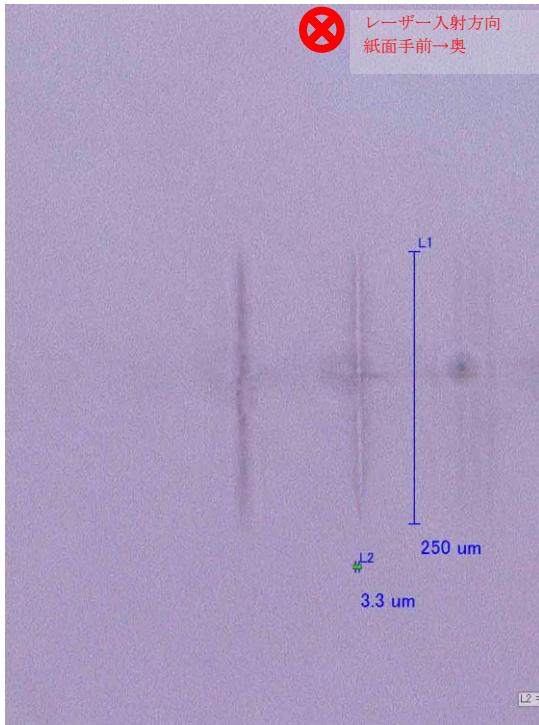


図 KF14 40x(0.55) レンズを併用したホログラム(4 段型)加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅 : 300fs (AC)、平均出力 : 300mW、照射時間 : 10sec

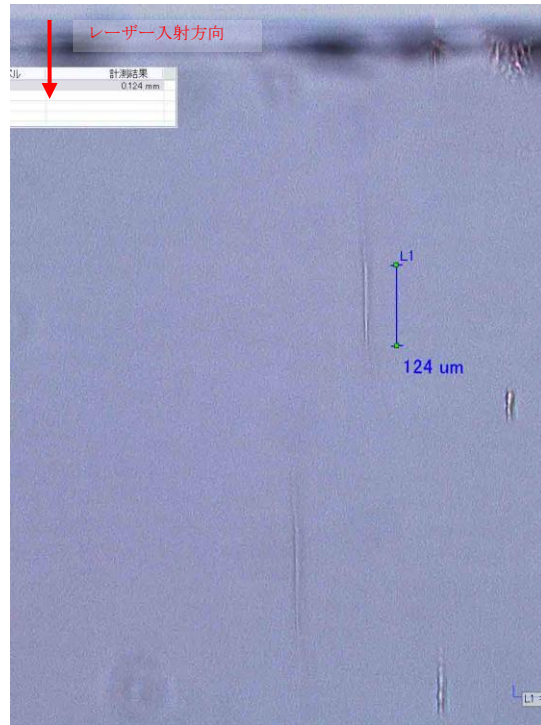


図 KF15 40x (0.55) レンズを併用したホログラム (4 段型) 加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅 : 570fs (AC)、平均出力 : 300mW、照射時間 : 10sec

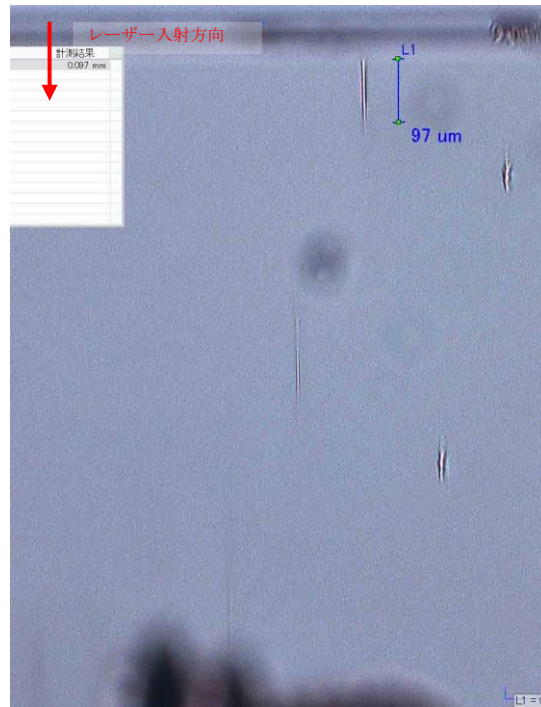
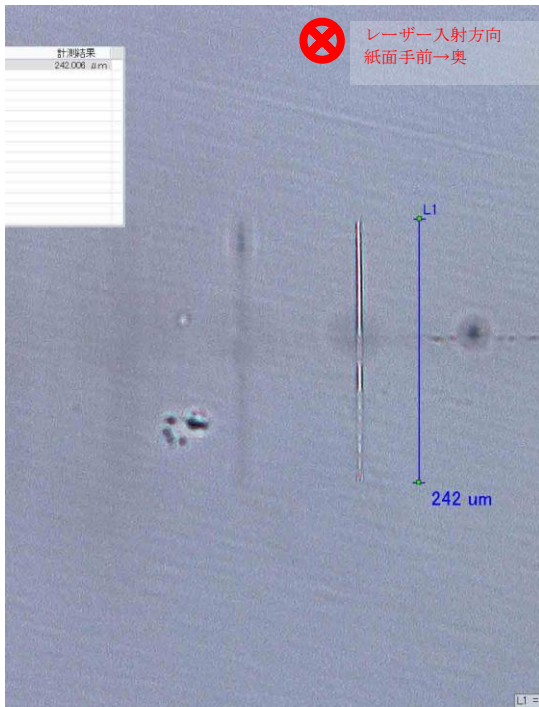


図 KF16 40x (0.55) レンズを併用したホログラム (4 段型) 加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅 : 570fs (AC)、平均出力 : 400mW、照射時間 : 10sec

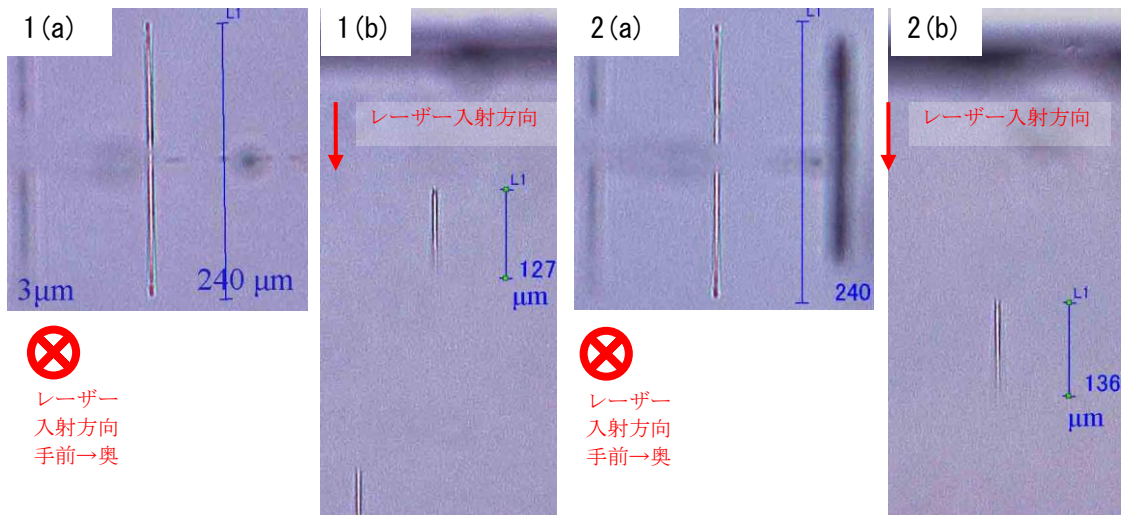
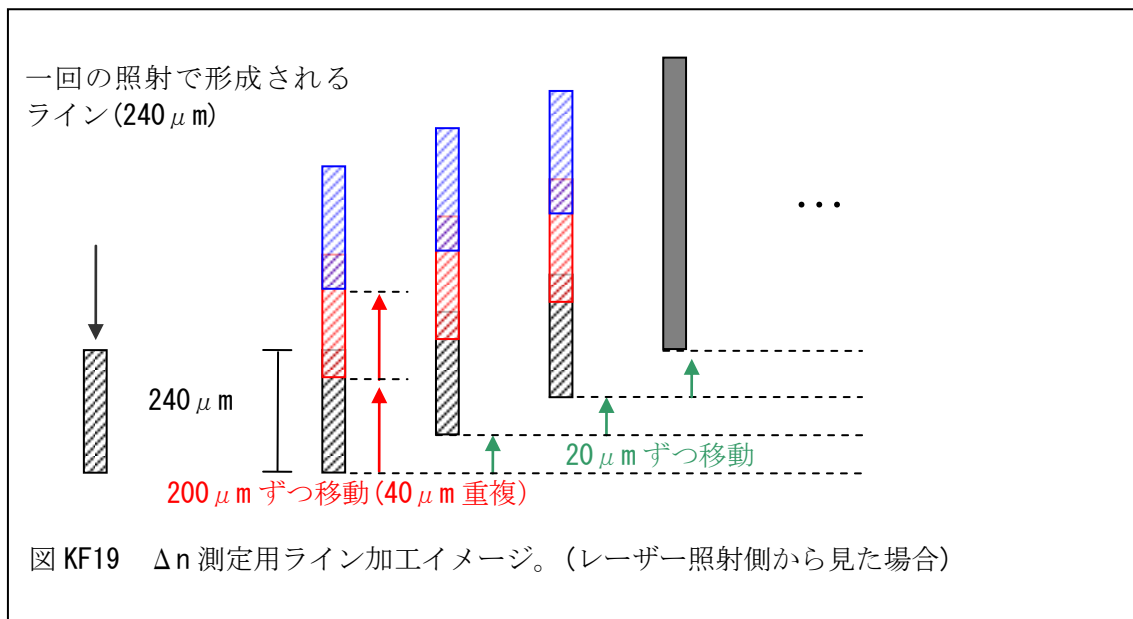


図 KF17 照射時間 0.005 秒のときの異質相光学顕微鏡像。  
(a) レーザー入射面から、(b) ライン断面方向から観察

図 KF18 照射時間 0.002 秒のときの異質相光学顕微鏡像。  
(a) レーザー入射面から、(b) ライン断面方向から観察



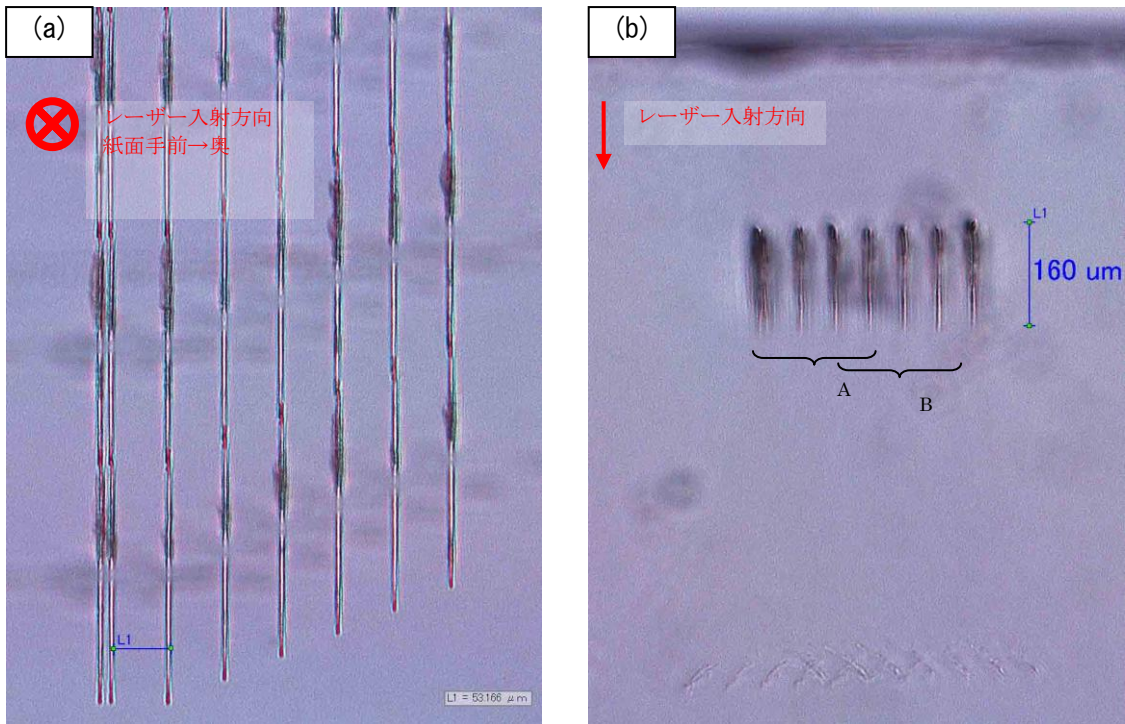


図 4 KF20  $\Delta n$  測定用ライン加工の光学顕微鏡像。(a) レーザー入射面から、(b) ライン断面方向から観察

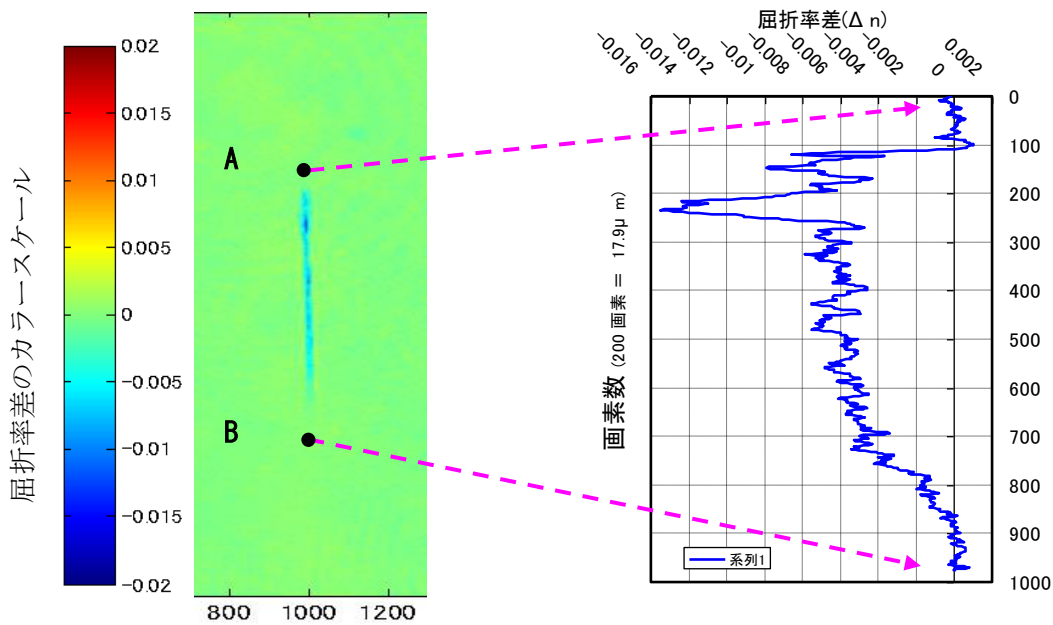


図 KF21 ライン断面方向からの屈折率差測定結果。

図 KF22 図 KF21 における点 A-B 間の屈折率差のラインプロファイル。

## 参考文献

[K1] Digital Diffractive Optics: An Introduction to Planar Diffractive Optics and Related Technology, by B. Kress, P. Meyrueis, pp. 396., p43.

[K2] K. Kawamura, M. Hirano, T. Kamiya, and H. Hosono, "Holographic writing of volume-type microgratings in silica glass by a single chirped laser pulse", Appl. Phys. Lett., 81, no. 6, pp1137-1139.

## (i) 三次元形状計測技術

### a) ガラス内部の形状測定

#### i) 三次元測定器

##### ① 概要

今回用いた三次元測定器は、表面の反射光を捉えて表面形状を測定する市販の測定器である。しかし、透明ガラスの内部形状を測定評価するためには、従来の方法では母材との屈折率の違いが少ないため非常に難しかった。今回、Z軸分解能が非常に高い三次元測定器に改良を行い、光路長の変化により形状を測定することが可能となった。

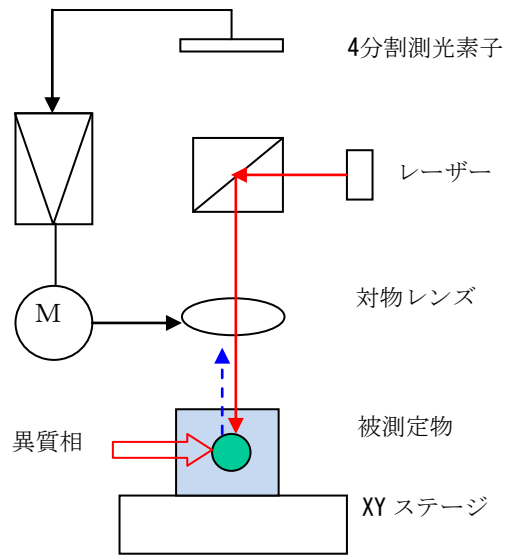
##### ② 装置及び測定

この装置のオートフォーカスはレーザー光の最高反射強度位置をフォーカス面とする方式で、対物レンズの移動により反射結像点を分割測光素子の中央へ移動する構造となっている<sup>1)</sup>。ピント調整は対物レンズをピエゾ素子で駆動させる方式で、分解能は  $0.001\mu\text{m}$  (10nm) である。対物レンズは50倍(20倍・100倍のレンズも持つ)で、この時の測定用レーザービームスポットは  $1.5\mu\text{m}$  である。この三次元測定器は物体表面の反射を利用して物体表面の形状を測定するために開発されている。ガラスの屈折率を 1.5、異質相の屈折率差を 0.01 とすると異質相での反射率は 0.001% となり反射光強度が極端に弱くなる。このため、ガラス内部の異質相を三次元測定器で測定しようとする異質相からの反射光が弱いため測定できない。高強度反射位置に焦点を結ぶという、この測定器の特性を利用すべく、被測定ガラスの下面に高反射面を設け、測定用レーザー光の結像点が常に高反射面に結ぶようにした。この結果、異質相のない部分でも、異質相のある部分でも高反射面にピントを合わせるように対物レンズを駆動させることができた。屈折率が異なる異質相を光が透過する場合、屈折率が高いと光路長が伸び、逆に屈折率が低いと光路長が短くなる。これによりガラス内部の異質相の形状を測定することが可能になった。

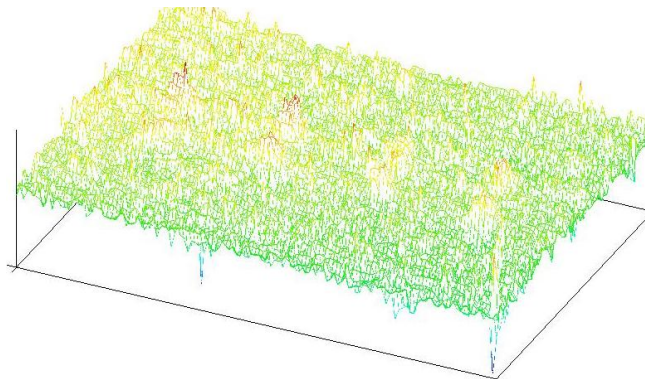
図(i)a-1は改良前の構造図であり、図(i)a-3は改良後の構造図である。図(i)a-2は図(i)a-1での測定結果を示し、図(i)a-4は図(i)a-3での測定結果を示す。両測定結果とも同じ部分の測定である。改良前は何らかの構造が見受けられるがノイズに埋もれ、形状は分からない。これに対し改良後はノイズが少なく明瞭な形状が見られる。

図(i)a-5はフェムト秒レーザーを照射してガラス内部に作製した異質相の光学顕微鏡画像で、図(i)a-6はこれを三次元測定器で測定した結果である。図(i)a-8は逐次描画法で作製したガラス内部の三次元構造体の光学顕微鏡画像で、図(i)a-9はこれを三次元測定器で測定した結果である。図(i)a-11は一括描画法で作製したガラス内部に異質相を円周状に配置した構造体の光学顕微鏡画像である。図(i)a-12はこれを三次元測定器により測定した俯瞰画像である。

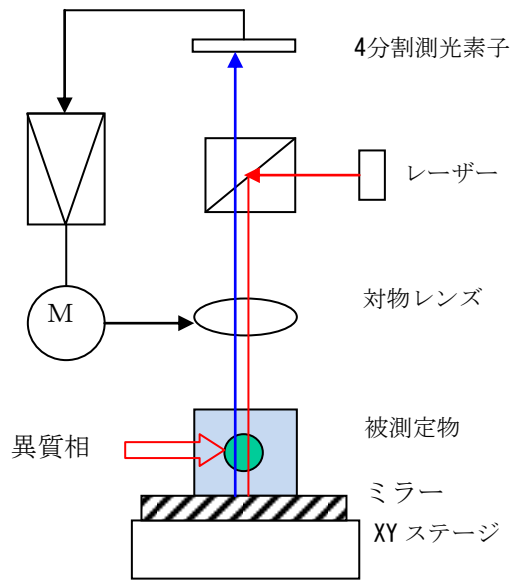




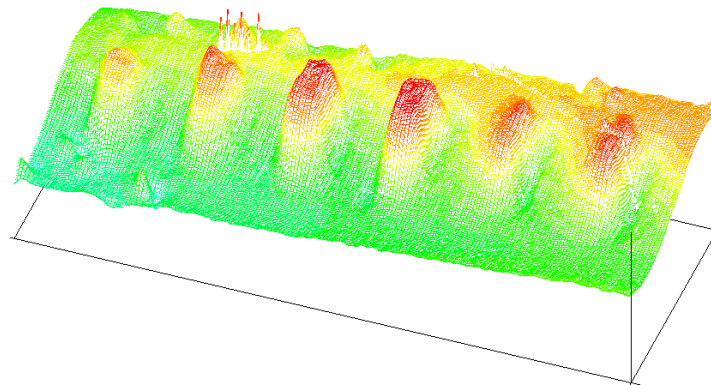
図(i)a)-1 改良前の構造図



図(i)a)-2 改良前の測定結果



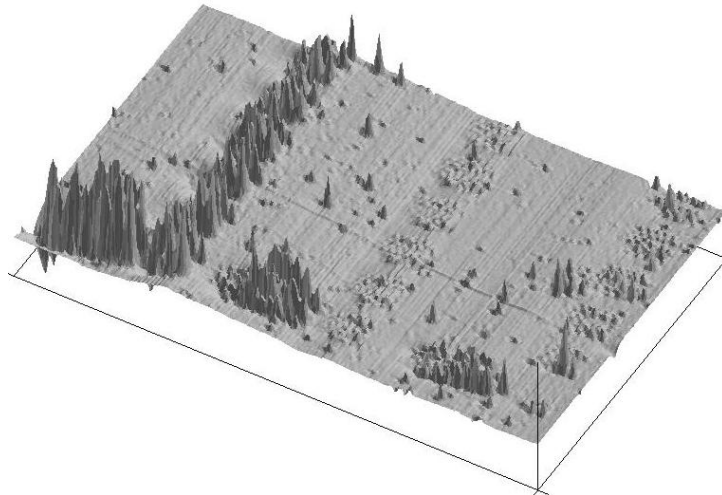
図(i)a)-3 改良後の構造図



図(i)a)-4 改良後の測定結果



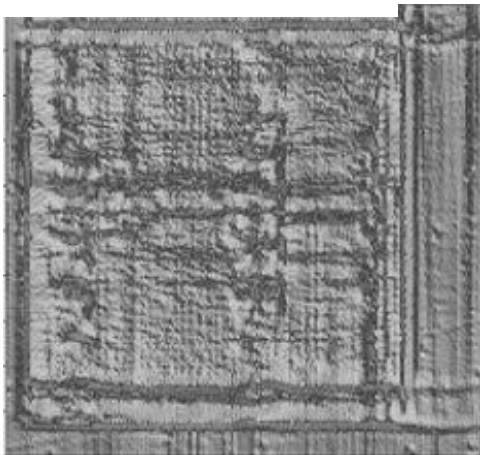
图(i)a)-6 三次元測定結果



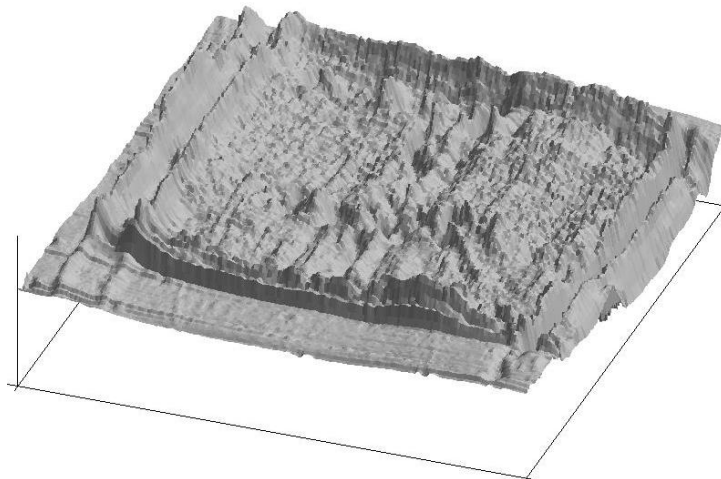
图(i)a)-7 三次元測定俯瞰像



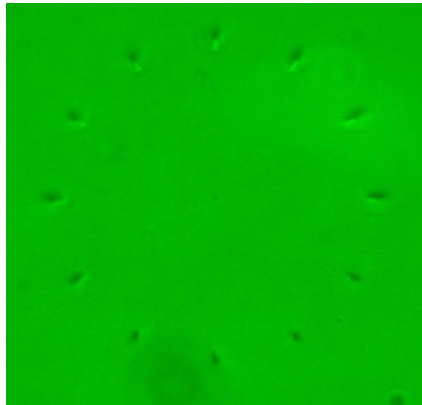
图(i)a)-8 光学顯微鏡像



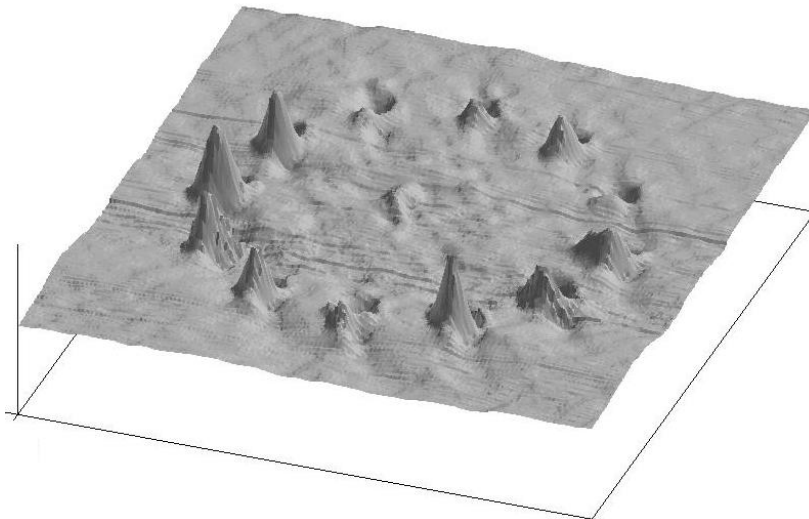
图(i)a)-9 三次元測定結果



图(i)a)-10 三次元測定器俯瞰像



图(i)a)-11 円周多点構造顕微鏡像



图(i)a)-12 円周多点構造三次元測定器俯瞰像

## b) ガラス内部の屈折率の非破壊測定

### i) 三次元測定器と光線追跡を用いる方法（円柱状構造体を主として）

#### ① 概要

使用した三次元測定器は反射強度の強いスポットに焦点を合わせるオートフォーカス機構を持っている。異質相の母材屈折率 1.5、屈折率差 0.01 の場合、表面反射率は 4%、異質相での反射率は 0.001%となる。このように屈折率差が小さい場合には三次元測定器では表面の測定は行えるが内部の測定はできない。屈折率差が小さい試料で測定を可能とするため、試料の下面に高反射面を配置しレーザー結像点がこの面となるようにし、この反射像位置を検出するようにした。これによりレーザーの光路中にある異質相の屈折率差に応じた光路長変化を検出できるようになった。

円柱異質相断面を同心円状に屈折率勾配を持たせた構造とし、これにスキューレイ追跡を行い各面間の光路長を求め、三次元測定器で測定した光路長差となるように屈折率及び円の半径等を最適化し屈折率を求めた。

#### ② 三次元測定器と測定結果

今回測定に用いた三次元測定器の構造を図(i)b-1に示す。レーザーから射出した光は、対物レンズを通り異質相を含むガラス等の透明体に入射し、ミラーを反射した光は再び対物レンズを通り測光素子へと入射する。ピエゾ素子により対物レンズを駆動し、入射結像点が測光素子の中央部すなわちミラーにピントが合った状態にする。測定物を保持しているXYのステージの移動によりXY平面内の座標を決定し、対物レンズの移動によりZ軸の座標を決定して三次元計測を行う。この測定器により測定した結果が図(i)b-2である。この一部を切り出したのが図(i)b-3である。図(i)b-4は図(i)b-3の一断面を示す。

#### ③ スキューレイ追跡<sup>2)</sup>と計算結果

図(i)b-5に示すベクトルにより、光線の面から面への移行と面での屈折を考える。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}_{i-1} + p_i \mathbf{Q}_i &= d_{i-1} \mathbf{i} + \mathbf{M}_i \\ \mathbf{M}_i + (q_i - p_i) \mathbf{Q}_i &= \mathbf{T}_i \\ \mathbf{T}_i + r_i \mathbf{E}_i &= r_i \mathbf{i} \end{aligned} \right\} \quad \text{移行式}$$

$$\mathbf{E}_i \times \mathbf{Q}_{i+1} = \left| N_i / N_i' \right| (\mathbf{E}_i \times \mathbf{Q}_i) \quad \text{屈折式}$$

$\mathbf{T}_i$ : 面(i)の頂点を基点とした、この面上の光線の通過位置を示すベクトル

$\mathbf{Q}_i$ : 面(i-1)から射出する光線の方向を示す単位ベクトル

$\mathbf{M}_i$ : 面(i)の頂点から $\mathbf{Q}_i$ に下ろした垂線を表すベクトル

$\mathbf{E}_i$ : 面(i)における光線の通過点から面の曲率中心に向かう単位ベクトル

$\mathbf{i}$ : x軸方向の単位ベクトル

$N_i$ : 面(i-1)と面(i)の間の媒質屈折率

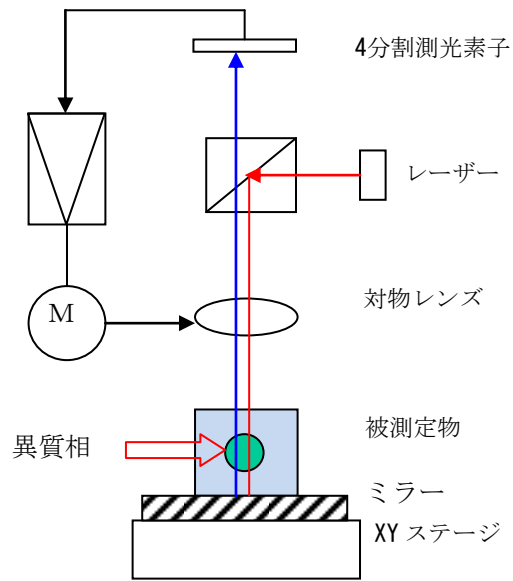
$q_i$ : 面(i-1)と面(i)の通過点間の幾何学距離

今回の計算では初期値 $\mathbf{Q}_1$ を  $X_0=1, Y_0=0$  とした。

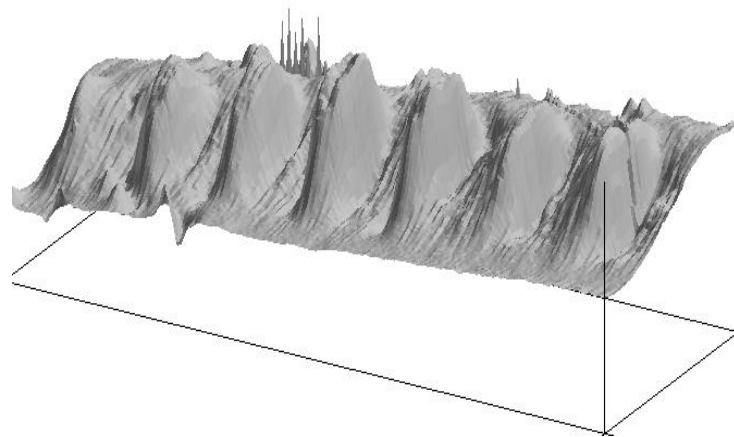
異質相構造モデルを図(i)b-6のように同心円構造とし、光軸に平行に入射させる光線の高さを変えてスキューレイ追跡により各面の光線通過点間の幾何学距離(q)を求め、これに屈折率を掛けて光路長を求めた。異質相の無い部分とある部分との光路長差を求め、三次元測定器による測定値の形状や寸法と一致するように屈折率や円半径等を変えて最適化し、屈折率を求めた。

図(i)b-7は図(i)b-2で示した測定結果の一断面で、幅は $200\mu\text{m}$ で光路長は $12\mu\text{m}$ である。この

寸法となるように屈折率と球面半径等を変化させスキューレイ追跡計算をした結果が図(i)b-8である。屈折率は外側より  $n_1=1.46$ ,  $n_2=1.47$ ,  $n_3=1.49$ ,  $n_4=1.52$  のときであり、屈折率差は 0.06 となり、屈折率分布は図(i)b-9のようになった。

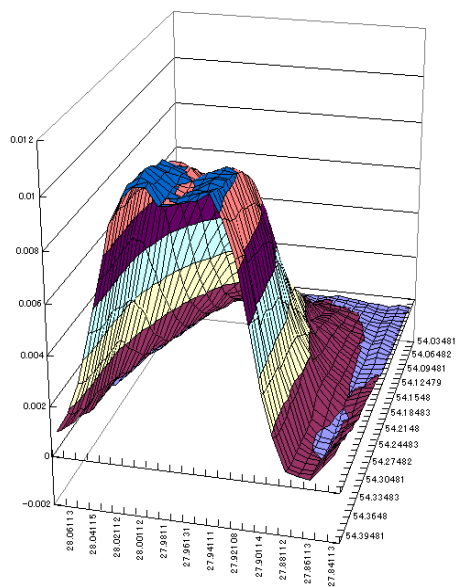
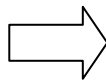
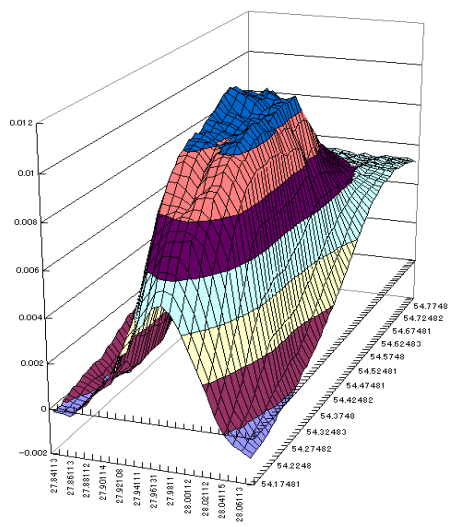


図(i)b)-1 三次元測定機構造



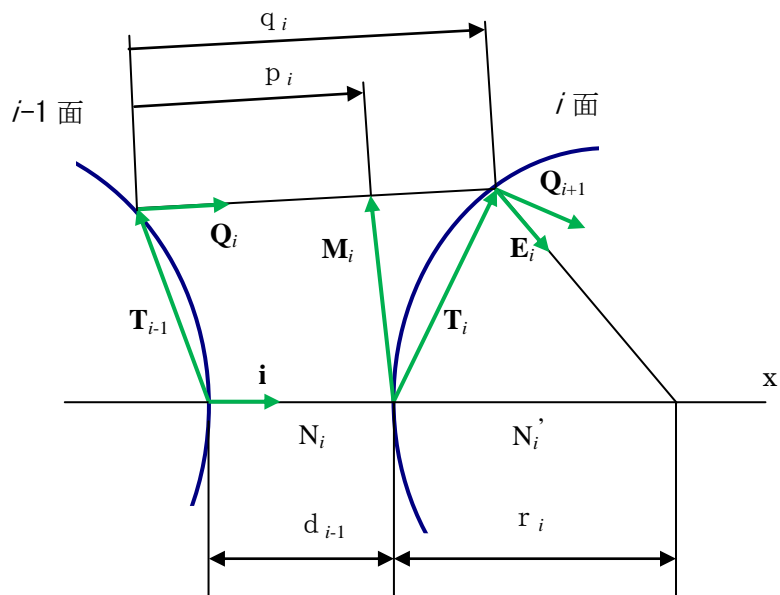
図(i)b)-2 三次元測定器測定結果



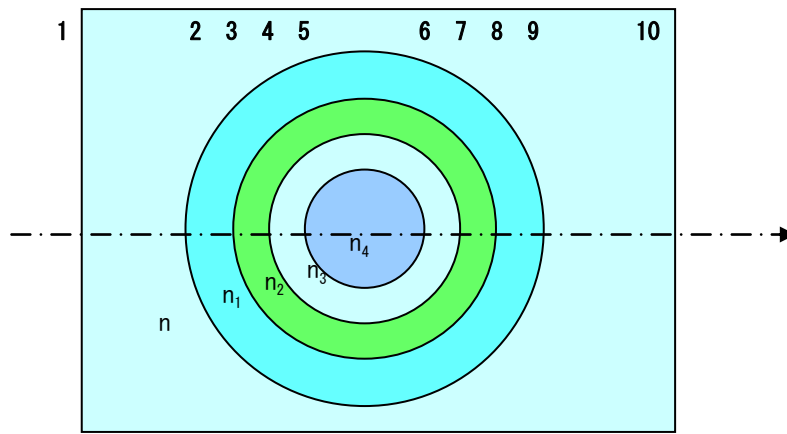


図(i)b)-3 一部切出し

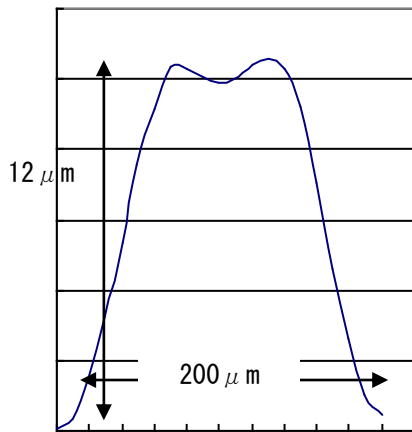
図(i)b)-4 切断面



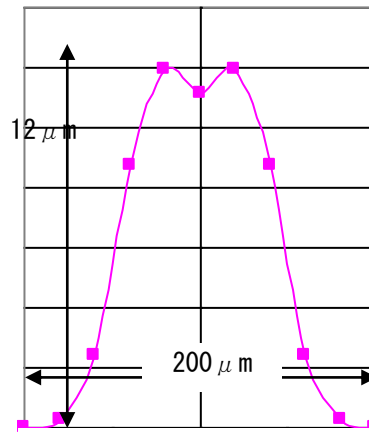
図(i)b)-5 スキューレイの追跡



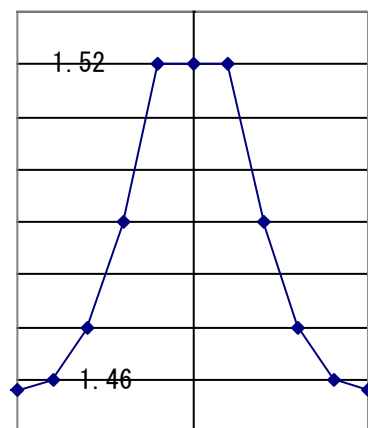
図(i)b)-6 異質相構造モデル



図(i)b)-7 測定結果



図(i)b)-8 計算結果



図(i)b)-9 屈折率分布

## ii) ダブルスリットによる方法（層状構造体の屈折率差測定）

### ① 概要

表面にある層状構造体の屈折率測定は分光反射率を測定することにより計測が可能であるが、屈折率差が小さくなり、また内部構造になると層状構造体の表面と裏面からの反射強度が弱くなるため光の反射を用いる方法では計測が困難になる。光の反射を用いずにガラス内部の屈折率差が小さい層状構造体の測定方法を開発した。ダブルスリットを配置し、コヒーレントな光を照射すると干渉縞が発生するというヤングの実験として知られている方法を用いた。これにより 0.0001 の精度で屈折率差を求めることができた。

### ② 装置及び測定

層状構造体の屈折率差を測定するためダブルスリットによる干渉法を用いた。この方法はレーレー・レーベの干渉屈折率計<sup>3)4)5)</sup>として気体の屈折率測定に用いられている。

図(i)b)-10 はダブルスリットに平面波が照射し、スリット部より球面波となった光が干渉縞となる所を光軸断面より見た配置図である。図(i)b)-11 はダブルスリット部を試料側から見た図で、スリット部への試料の配置を示している。この図に示すようにダブルスリットの一方のスリットの半分に異質相を持つ部分を配置し、他方半分ともう一方のスリットに異質相を持たない部分を配置した。この配置にしてスリット部にコヒーレント光を照射すると、干渉縞に変位が生じることが予想される。予想される干渉縞は図(i)b)-12 に示すように、屈折率差がないときは左図のように変位がないが、屈折率差があるときは右図のような変位が発生する。この変位量を測定することにより屈折率差を求めることができた。

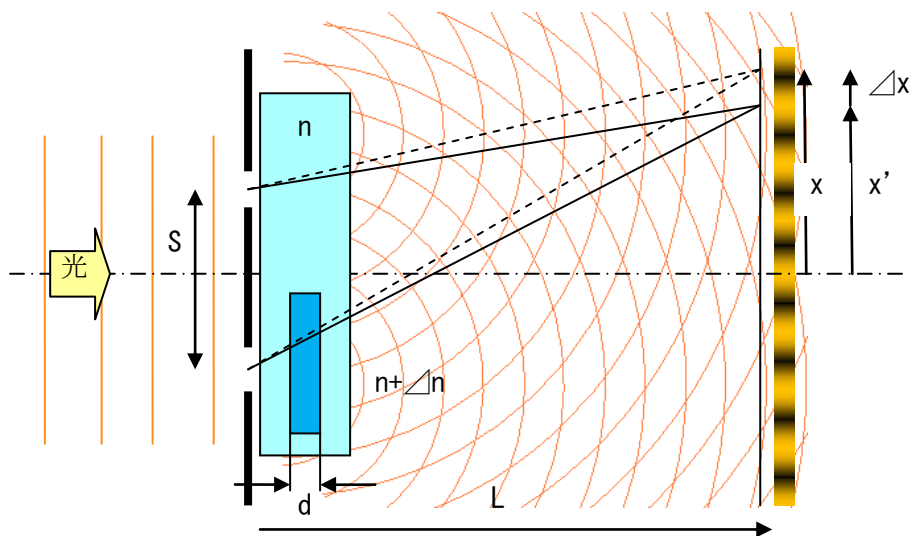
スリット間隔  $S$ 、層状厚み  $d$ 、評価面までの距離  $L$ 、母材屈折率  $n$ 、屈折率差  $\Delta n$  として、スリットから出る波面の光路差を求める。

$$A \text{ 部での光路差} : \Delta L = S \cdot x / L - (n + \Delta n) d + nd = m \lambda$$

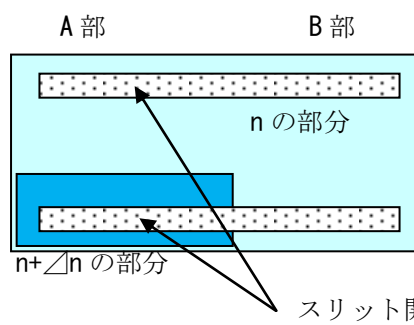
$$B \text{ 部での光路差} : \Delta L' = S \cdot x' / L - nd + nd = m \lambda$$

$$\text{よって} \quad \Delta n = \Delta x \cdot S / L d$$

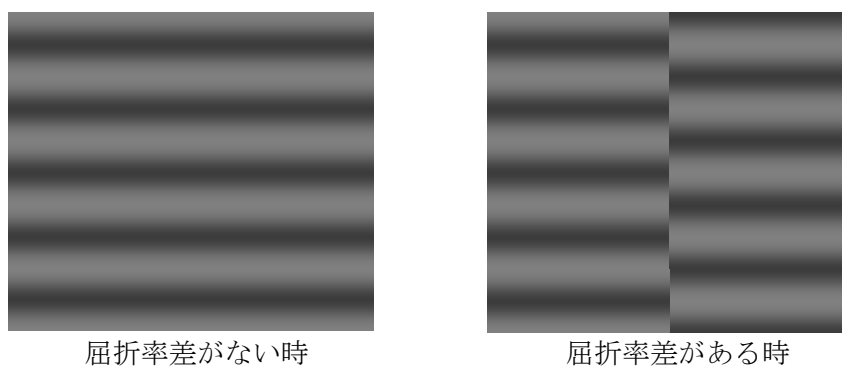
図(i)b)-13 に示す回折格子型 OLPF(Optical Low Path Filter)の屈折率差を、ダブルスリットを用いた干渉縞の変位量により測定した。表(i)b)-1 はスリット間隔： $S=108 \mu\text{m}$ 、厚み： $d=90 \mu\text{m}$ 、評価面までの距離： $L=70\text{mm}$  のとき、波長  $\lambda=535\text{nm}$ ,  $633\text{nm}$ ,  $670\text{nm}$ ,  $784\text{nm}$  の四波長で測定した結果で、屈折率差は各々 0.0063, 0.0069, 0.0074, 0.0081 となった。図(i)b)-14 はその時の干渉縞である。



図(i)b)-10 ダブルスリット測定配置図



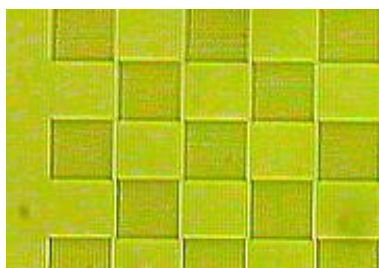
図(i)b)-11 スリット開口部への試料配置図



屈折率差がない時

屈折率差がある時

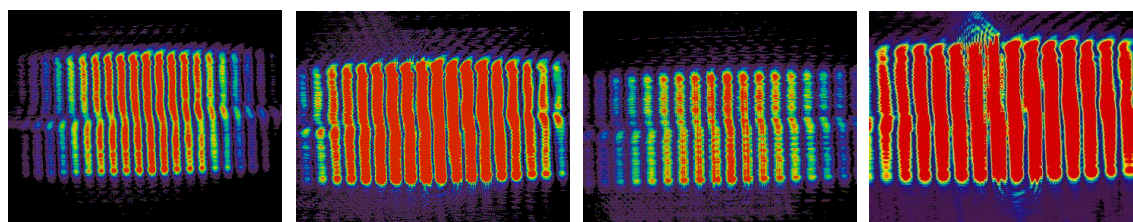
図(i)b)-12 干渉縞の変位



図(i)b)-13 OLPF 顕微鏡像

表(i)b)-1 測定結果

$\lambda$ (nm)	535	633	670	784
$\Delta x$ (mm)	0.3661	0.3994	0.4326	0.4742
$\Delta n$	0.0063	0.0069	0.0074	0.0081



535nm

633nm

670nm

784nm

図(i)b)-14 ダブルスリットによる干渉縞

### iii) 干渉計による方法（微小球状構造体の屈折率差測定）

#### ① 概要

微小屈折率差を求める方法は様々報告されているが測定対象物が小さくなるに従い非破壊測定での困難さが増してくる。すなわち、微小屈折率差を求めるためには、その部分を切り出して干渉計により測定していた。しかし大きさが小さくなると切出しも困難になり、また屈折率差も小さくなると干渉縞の変位量が僅かになり測定が困難になる。これを解決するため、干渉縞をフーリエ変換しある次数のスペクトルを用いて逆フーリエ変換することにより干渉縞間隔狭くし短波長で求めたのと等価な干渉縞を発生させた。さらにこの干渉縞にデコンボリューションアルゴリズムによる超解像処理を施して干渉縞の幅を細くすることに成功した。これによりガラス内部の微小球状構造体の屈折率差を非破壊で測定することができた。

#### ② 位相差増幅法

図(i)b-15 a)に示すように位相差が小さな物体では干渉縞の変位量はわずかしかない。波長が短ければ図(i)b-15 b), c)に示すように干渉縞の変位量は大きくなるが、透明体が短い波長で透明である保証はなく、可視光での位相差を求めたいのにもかかわらず短波長での位相差となってしまう。

そこで見かけ上、波長を短くすることを考える。このため干渉計で得られた干渉縞をフーリエ変換し、スペクトル領域のある次数のスペクトルのみを用いて逆フーリエ変換を行った。図(i)b-16 及び図(i)b-17 に示すように、±1次スペクトルを用いて逆フーリエ変換を行うことにより縞数を2倍に、±2次スペクトルを用いて逆フーリエ変換を行うことにより縞数を4倍に、±3次スペクトルを用いて逆フーリエ変換を行うことにより縞数を6倍にすることができた。これにより±N次スペクトルのみを取出し逆フーリエ変換し干渉縞の縞数を2N倍に増やすことができることが判明した。この方法により試料のもつ位相差は変わらず測定波長を短くしたのと同じ効果が得られた。図(i)b-16 は直線縞に、また図(i)b-17 は円周状縞に一次スペクトルを用いて、二次スペクトルを用いて、三次スペクトルを用いて逆フーリエ変換をした像を示す。これにより直線縞でも円周状縞でも縞数を増やすことができることが判明した。

#### ③ 超解像法

光学系を通して結像した像はレンズの透過特性により元の像よりも劣化している。これを実空間で表現すると、光学系を通り結像した像の明るさは元の像の明るさと透過特性（PSF）の重畳積分（コンボリューション）となる。これをフーリエ変換したスペクトル空間で表現すると、光学系を通り結像した像のスペクトルは、元の像のスペクトルと透過スペクトル（OTF）との積となる。光学系を通り結像した劣化像を復元するためには、この逆すなわち結像した像のスペクトルを透過スペクトルで割れば元のスペクトルが得られると考えられる。しかし、図(i)b-18 e)に示すように透過スペクトルの周辺部は”0”であるため、この部分では割り算が出来ない。図(i)b-18 d)と f)に示すように、劣化像のスペクトル f)はレンズを通ったことにより元の像のスペクトル d)の一部が失われている。失われたスペクトルを回復する方法は様々あり、リチャードソン等により報告されている<sup>6)</sup>。江口はリチャードソンの考えを更に進めて結像方程式の逆問題を確率論のベイズの定理を用いて逐次計算することにより復元していくことを示した<sup>7)8)</sup>。

結像方程式は

$$G(x,y) = F(x,y) * S(x,y)$$

またベイズの定理は

$$\rho[V(x)|A(x')] = \frac{\rho[A(x')|V(x)]\rho[V(x)]}{\int \rho[A(x')|V(x)]\rho[V(x)]dx}$$

ここで  $F(x, y)$  は元の像であり、 $G(x, y)$  は光学系を通して結像した像である。 $S(x, y)$  は光学系の持つ点像強度分布である。\*は重畳積分（コンボリューション）を表す。

図(i)b-18のa), b), c)は実空間での結像を、d), e), f)はスペクトル空間での結像を表している。今回の測定には江口が示したデコンボリューションアルゴリズムを用い、解像限界を超える超解像処理を行った。

#### ④ 超解像による干渉縞の鮮鋭化

##### ④.1 デフォーカス像の鮮鋭化

位相差増幅法で見かけの波長を短くし干渉縞間隔を狭くしたとしても、干渉縞に幅があることや干渉縞の強度が均一でないため、干渉縞の変位量を求めることは難しい。パターン認識による細線化処理や線幅中心化処理などは物理的な意味が乏しく、計測には使用できない<sup>9)</sup>。また二値化処理にしても干渉縞の強度が同じ場合はピーク又はバレー検出が可能であるが、一般的には測定干渉縞は強度が異なるため二値化処理では検出が困難である。

これまでは干渉縞の鮮鋭化を図るため繰返し反射干渉<sup>4)</sup>が用いられていた。しかし繰返し反射干渉を用いても図(i)b-19に示すように干渉縞の広がり避けられない。

ここで線像について考えてみる。結像光学系を通して線像に焦点を合わせると回折限界までの解像が得られるが、デフォーカス状態になると図(i)b-20のように線像は広がった像となる。この像に超解像処理を施し元の線像にすることができるかを試みてみた。図(i)b-21は一本のラインがデフォーカスした像に、図(i)b-22は強度が等しい多数のラインがデフォーカスした像に、そして図(i)b-23は強度差を持つ多数のラインがデフォーカスした像に超解像の処理を行った。図(i)b-21・図(i)b-22及び図(i)b-23に示すように演算処理回数を増やすことにより元の像に近づき、ついには広がりの無い元の線像となった。これにより超解像処理を施すと線幅が鮮鋭化し強度分布もそろえることが判明した。

##### ④.2 超解像処理による間隔

超解像処理により線幅が鮮鋭化することができたことを述べたが、線と線の間隔が正しくなければ干渉縞の測定には適用できない。そこで図(i)b-22と図(i)b-23で示した多数の線像を超解像した場合の線間隔について調べる。

図(i)b-24 a)は図(i)b-22で示した等しい強度の多数の線をデフォーカスした像を、図(i)b-24 b)は図(i)b-23で示した強度差を持つ多数の線をデフォーカスした像を超解像処理した像を示す。各図の上半分はデフォーカスする前の像を示している。この結果、等しい強度を持つ多数の線でも、強度差を持つ多数の線でも線間隔が変わらないことが判明した。

#### ⑤ 装置及び測定

##### ⑤.1 装置

一般に干渉計における干渉縞は、反射型干渉計では半波長毎に生じ透過型干渉計では一波長毎に生じる。測定対象物がガラス内部の微小屈折率差をもつ小さな構造体なので、測定には透過型干渉計である三角光路干渉計<sup>6)</sup>を用いた。この干渉計では、光源を射出した光はビームスプリッタで二つの光路に分岐した後、二つの光束が同じ光路を互いに逆周りに進み、ビームスプリッタで再結合し干渉

縞を生じる。このため、この干渉計は透過型干渉計でありながら反射型干渉計と同じ半波長毎の干渉縞を生じる。

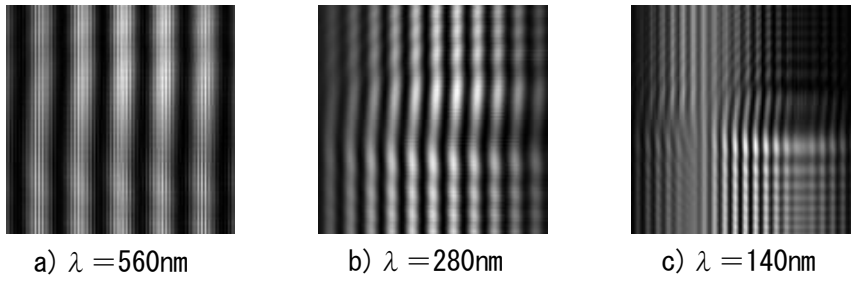
図(i)b)-24 に装置原理図と作製した干渉装置を示す。光源は波長 532nm のレーザーを用いたので、観測される干渉縞間隔は 266nm である。

## ⑤.2 微小位相差測定

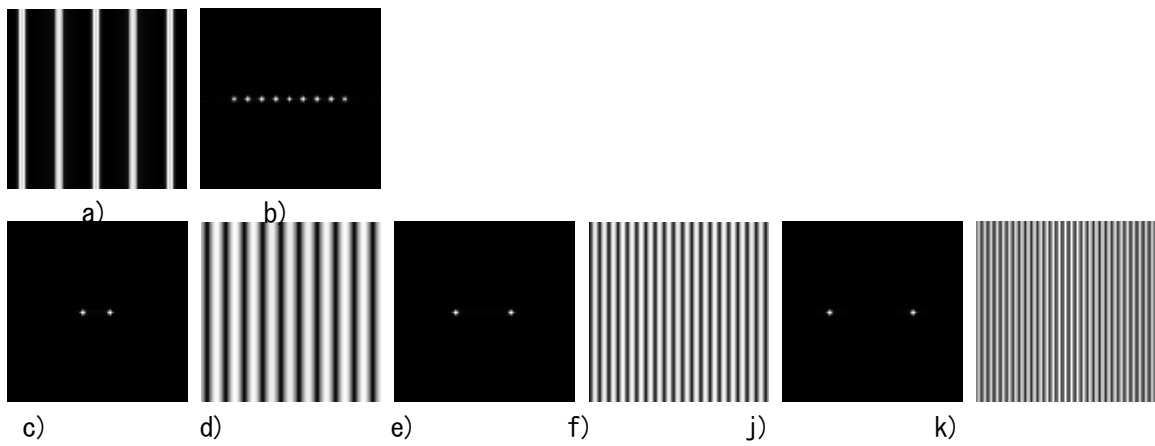
試料は、ガラス・ホログラムにフェムト秒レーザーを照射し、ホログラムによりできた実像を対物レンズで集光結像させシリカガラスの内部に円周上に配置した円柱状の屈折率差をもつ異質相である。図(i)b)-26 に観察光学系で試料を側面から観察した像と上面から観察した像を示す。

これまでフーリエ変換し $\pm N$ 次スペクトルを取出して逆フーリエ変換を行うことにより位相差増幅ができることを、また超解像処理によりデフォーカスした像を細線化することを、更に超解像により線の間隔が変動しないことを示した。これらの方法を干渉縞に適用してみた。図(i)b)-27 で示した測定干渉縞に位相差増幅と超解像の処理を行った。図(i)b)-28 a), d)は図(i)b)-27 で示した測定干渉縞の中央部を切り出した画像である。図(i)b)-28 の a)は異質相のない部分の干渉縞で b)はフーリエ変換スペクトルの二次スペクトルを抽出し、これを逆フーリエ変換した干渉縞である。c)はこれに超解像処理を施した干渉縞である。図(i)b)-28 d)は異質相のある部分での干渉縞で e)は b)と同じ処理を行い、f)は c)と同じ処理を行った。測定には波長 532nm のレーザーを用いたので図(i)b)-28 a)と d)の干渉縞間隔は 266nm となり、さらに二次スペクトルを用いて逆フーリエ変換し 4 倍の位相差増幅を行ったので図(i)b)-28 b), e)及び図(i)b)-28 c), f)の干渉縞間隔は 66.5nm である。二つの画像の論理和を求め、干渉縞の最大変位量を求めた。図(i)b)-29 に示すように図(i)b)-28 の c)と f)との超解像干渉縞の変位量は 31nm となった。ガラス内部の位相物体の直径が  $3\mu\text{m}$  で二つの異質相を通った位相波面であるので幾何学長は  $6\mu\text{m}$  となり、光路長差が 31nm であるので異質相の屈折率差は 0.005 となった。

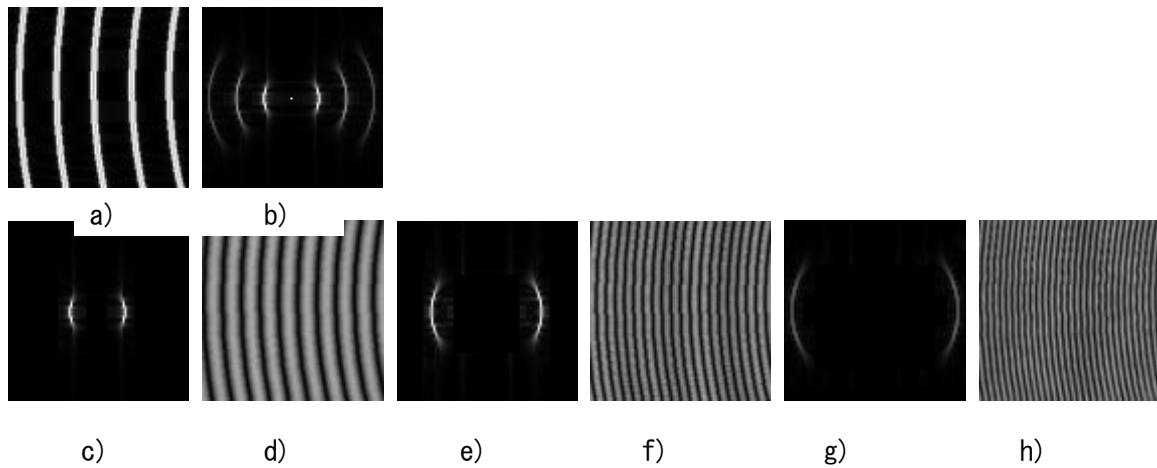




図(i)b)-15 波長の違いによる干渉縞 (位相差 50nm)  
位相角度 : a) 32° b) 64° c) 129°

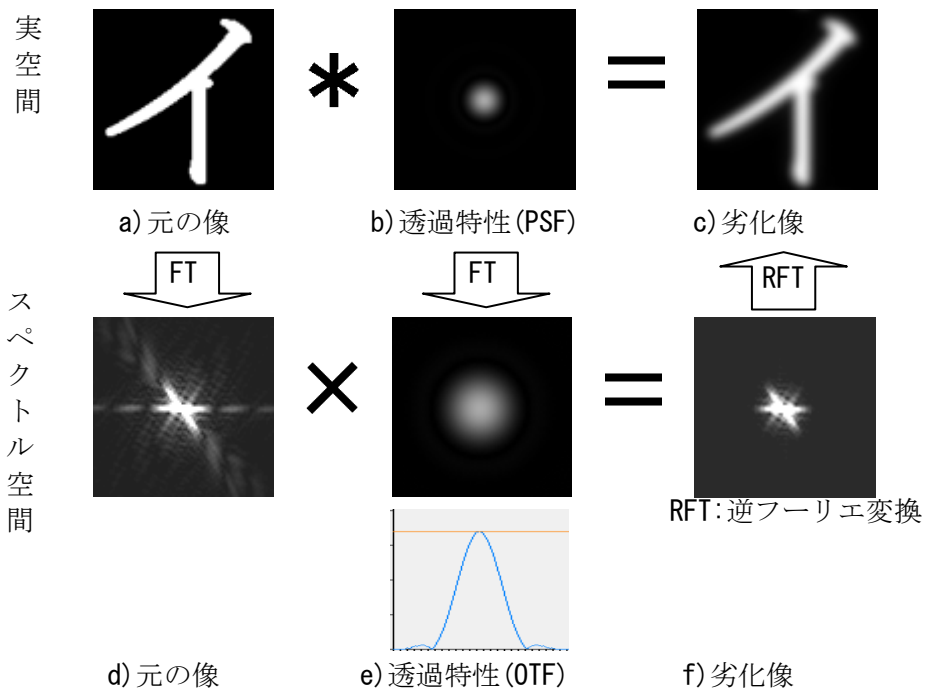


図(i)b)-16 直線縞に対する位相差増幅  
a) 直線縞 b) フーリエスペクトル  
c) 一次スペクトル d) c)を用いた逆フーリエ像 e) 二次スペクトル  
f) e)を用いた逆フーリエ像 g)三次スペクトル h) g)を用いた逆フーリエ像



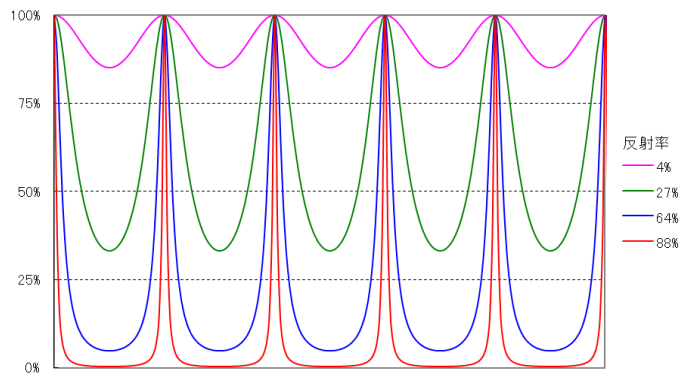
図(i)b)-17 円周状縞に対する位相差増幅

- a) 円周状縞 b) フーリエスペクトル  
 c) 一次スペクトル d) c)を用いた逆フーリエ像 e) 二次スペクトル  
 f) e)を用いた逆フーリエ像 g) 三次スペクトル h) g)を用いた逆フーリエ像

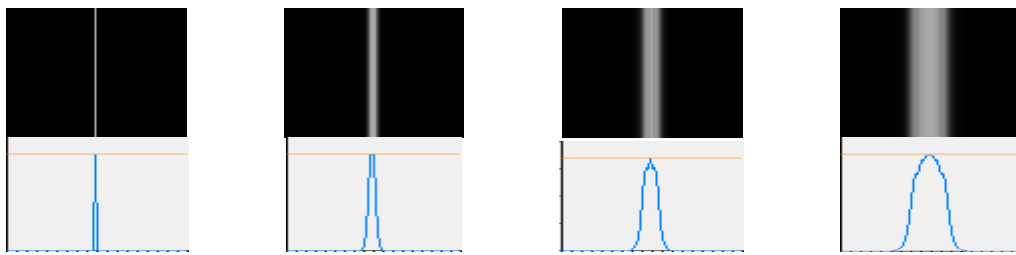
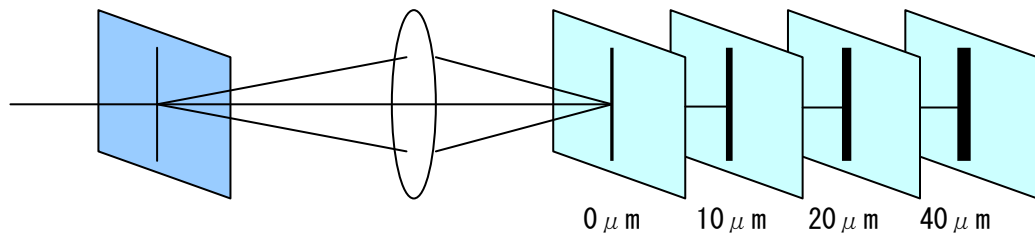


図(i)b)-18 実空間とスペクトル空間での結像方程式

FT: フーリエ変換

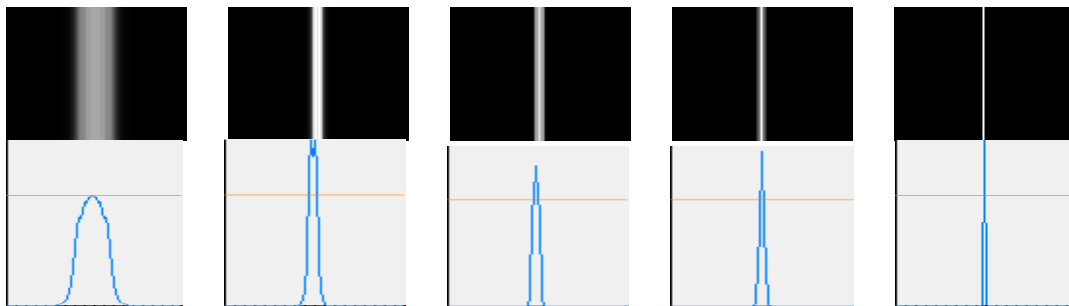


図(i)b)-19 繰返し反射干渉による透過光強度



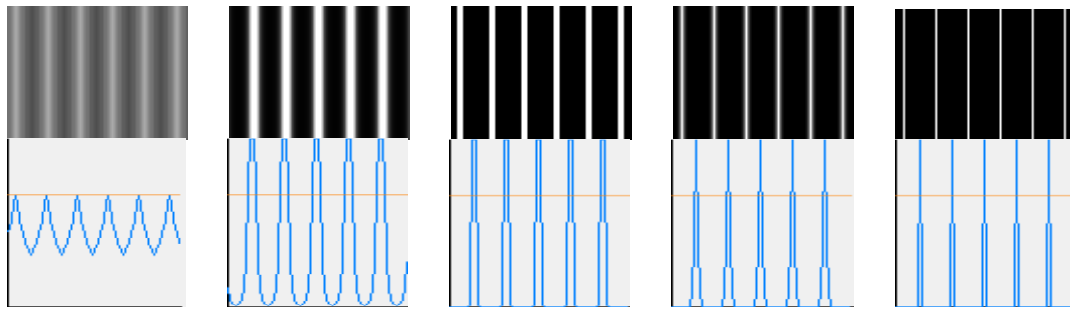
a) defocus  $0 \mu\text{m}$     b) defocus  $10 \mu\text{m}$     c) defocus  $20 \mu\text{m}$     d) defocus  $40 \mu\text{m}$

図(i)b)-20 線像のデフォーカス結像



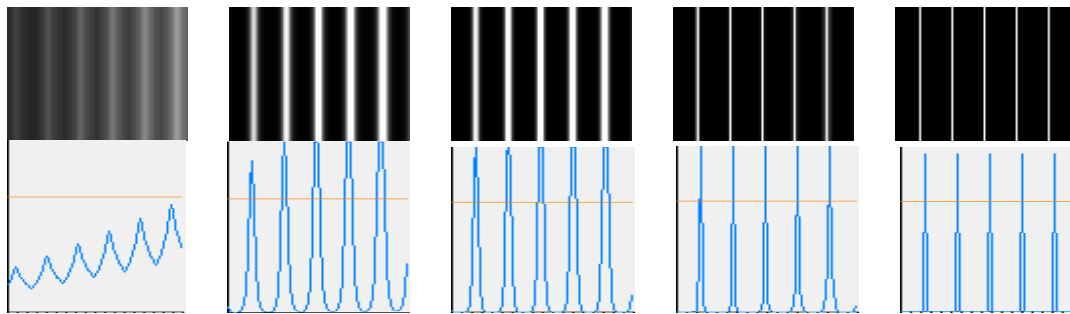
a) original    b) 100回    c) 200回    d) 300回    e) 359回

図(i)b)-21 デフォーカスした一本の線像の超解像処理回数による変化



a) original    b) 100回    c) 200回    d) 300回    e) 407回

図(i)b)-22 デフォーカスした多数の線像の超解像処理回数による変化



a) original    b) 100回    c) 200回    d) 400回    e) 605回

図(i)b)-23 強度差のあるデフォーカスした線像の超解像処理回数による変化

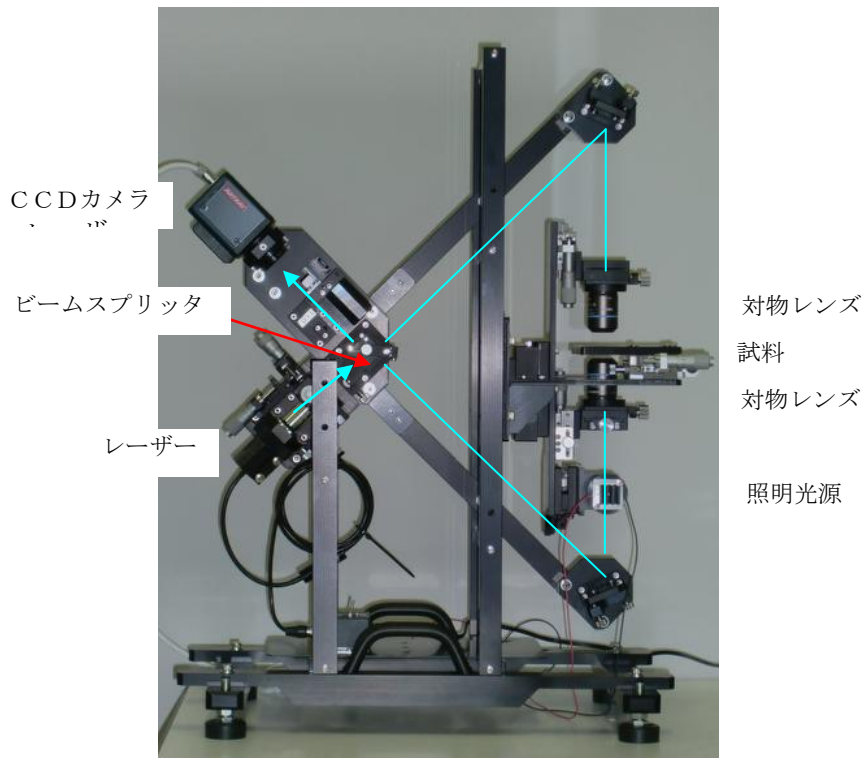
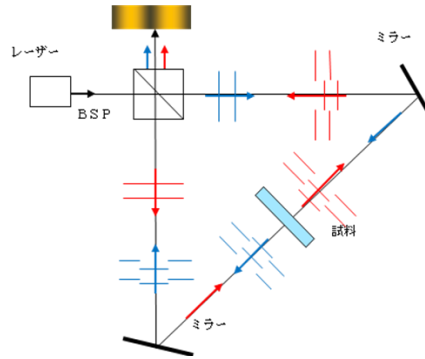


a) 等しい強度を持つ線

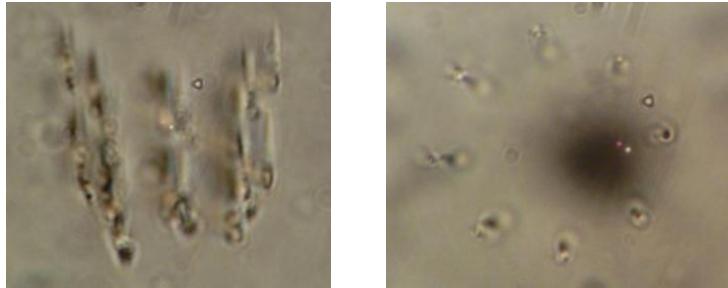


b) 強度差を持つ線

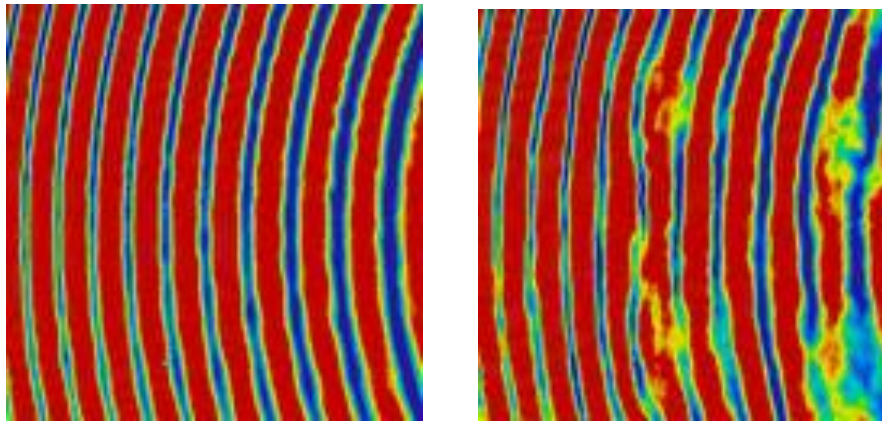
図(i)b)-24 超解像処理像とデフォーカス前の像の位置間隔  
各図の上半分はデフォーカス前の線 下半分は超解像処理をした線



図(i)b)-25 三角光路干渉計原理図と作製干渉計



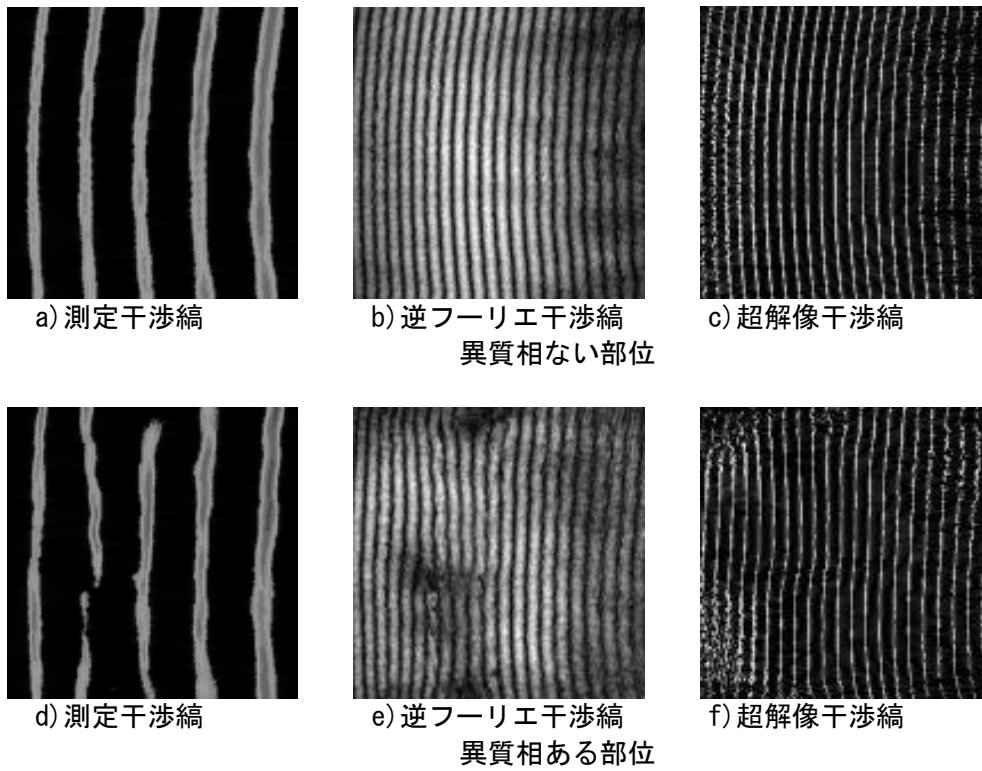
図(i)b)-26 異質相部像(左：側面より 右：上面より)



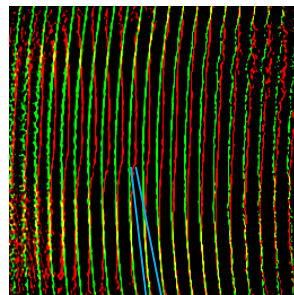
異質相なし

異質相あり

図(i)b)-27 測定干渉縞



図(i)b)-28 干渉縞と逆フーリエ干渉縞及び超解像干渉縞



→ ← 31nm

図(i)b)-29 干渉縞の変位量

## 参考文献

- 1) 上田良司、田村雄一：特開 2004-78069.
- 2) 松居吉哉：レンズ設計法（共立出版 1972）.
- 3) 石黒浩三：光学（共立出版 1970）.
- 4) 久保田広：波動光学（岩波書店：1971）.
- 5) Max Born and Emil Wolf 草川徹・横田英嗣訳：光学の原理Ⅱ（東海大学出版会 1975）.
- 6) W.H.Richadson: Bayesian-based iterative method of image restoration  
(J. Opt. Soc. Am. 62, 55-59 1972).
- 7) 江口満男：虫眼鏡でナノの世界を見る  
(新技術コミュニケーションズ 2006 Vol. 28 No. 3).
- 8) 江口満男：劣化情報復元方法と復元装置（国際特開 W02006/041127）.
- 9) 山田朝治・横関俊介編著：モアレ縞・干渉縞応用計測法（コロナ社 1996）.



## 2) 空間光変調器三次元加工システム技術

### ① 空間光変調器三次元加工システム技術の概要

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを高精度かつ高速に作成するためには、三次元的に成形された加工用ビームを順次形状を変化させながら作成する必要が生じる。図1のようなレーザーパターンを順次変更できる可変型の三次元加工システム構築のため、フェムト秒レーザーの高エネルギーパルスに適合しかつ高精細・高変調速度を有する位相変調型液晶空間光変調器(以下LCOS-SLM)、LCOS-SLMと最適な光学系を融合した光波面制御モジュール、および空間光変調器を用いた波面制御技術を開発した。

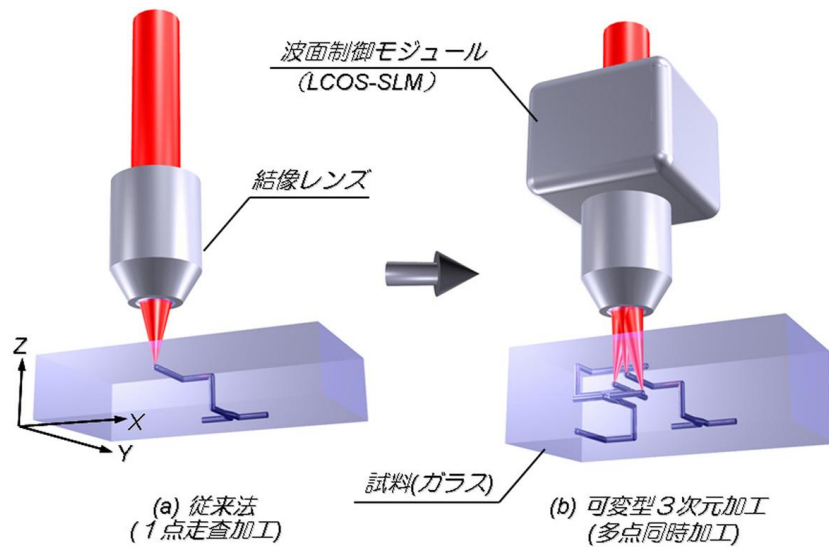


図1 可変型三次元加工システムの概念図

### ② 最終目標

フェムト秒レーザー光波面制御モジュールとして、空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10 Hzの変調速度を50 Hzに高める。光位相変調度として $2\pi$ ラジアン以上を実現すると同時に0から $2\pi$ までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで50 GW/cm<sup>2</sup> (100 fs、1 KHz) を達成する。最終目標の設定理由は以下のとおりである。

フェムト秒レーザー光波面制御モジュールに関し、画素数に関してはレーザービームを100点以上に分岐することおよび折り返しにより10波長以上の波面を表現できることを念頭においた。また速度はビデオレート以上でパターンが書き換えできれば実用上問題がないこと、および外部回路との整合性も考慮した。位相変調度は波面制御のためのホログラムを表現するために必要な特性を目標とした、さらに耐光性では、ガラスに100点以上の異質部を一度に形成するのに十分な値として設定した。

### ③ フェムト秒レーザー加工用空間光変調器(LCOS-SLM)の開発

可変型三次元加工システムにおけるキーデバイスである空間光変調器は、2次元に広がった読み出し光の位相・偏波面・強度・伝播方向の分布を、書き込み情報によって変調させるデバイスで、アドレス部と光変調部から構成される並列3端子デバイスである。図2に、本プロジェクトで研究開発しているLCOS-SLMの構造と位相変調の原理を示す。アドレス部は、シリコン基板にCMOSアクティブマトリクス回路が形成され、その上に画素電極が配置されている。光変調部は、シリコン基板とガラス基板の間に保持されたネマチック液晶層から成り、液晶分子は基板に平行に配向されている。書き込

み信号の大きさに応じて液晶分子が傾き屈折率が変化するので、読み出し光に位相変化を与えることができる。

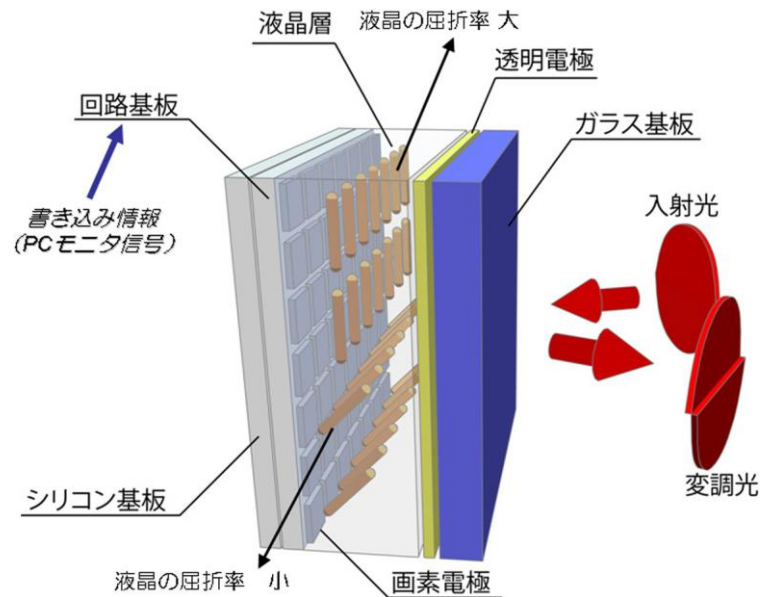


図2 LCOS-SLMの構造と原理

基本となる LCOS-SLM では、光吸収のあるアルミ画素電極が反射面を兼ねているので、レーザー耐光性が低いという問題があった。そこで本プロジェクト開始前に当社で開発した LCOS-SLM ではアルミ電極上に誘電体多層膜ミラーを用いることでこの問題を解決した。しかしながら、加工に用いるフェムト秒レーザーは波長帯域が通常のレーザーよりも広く、ピークパワーも大きいため、誘電体多層膜ミラーはその全域をカバーする広帯域性と高反射率による高耐光性が必要である。同時に、基本 LCOS-SLM の有する光学的・電気的特性を劣化させない必要がある。このような条件を満足する誘電体多層膜ミラーを製造する技術を開発し、LCOS-SLM のレーザー光耐力を高める改良を行った。さらに誘電体多層膜ミラーの上に、入射光と反射光の位相をずらす位相シフト層を導入した。これらの薄膜形成は、本プロジェクトで導入した薄膜蒸着装置を用いた。また応答速度の向上や位相変調度の向上のために、液晶層や CMOS 回路部の設計や試作を行ってきた。これらを図で纏めたものが図3である。

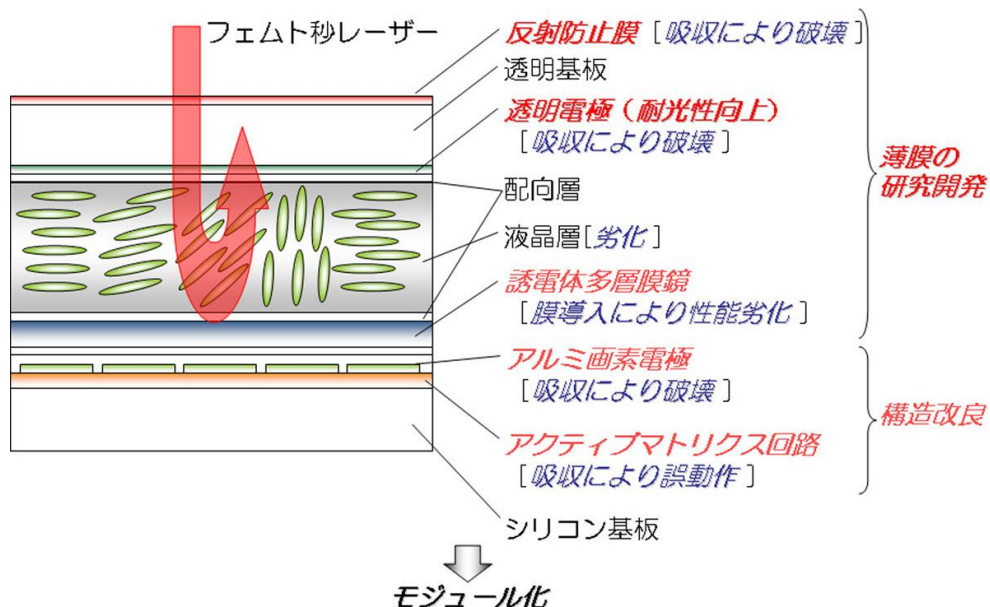


図3 LCOS-SLMの構造（断面図）と検討項目

### (i) 耐光性の向上

LCOS-SLM では光の利用効率向上、アルミ電極保護、アクティブマトリクス回路保護のために誘電体多層膜鏡を用いている。しかしながら、誘電体多層膜鏡自体が抵抗媒体であるために、回折効率の低減、応答速度の低下、位相変調量の減少といった性能劣化が生じる。そこで、本プロジェクトで導入した薄膜蒸着装置（スパッタ装置）を用いて質の高い薄膜を生成することによって、性能向上を検討した。ここではまず、従来用いていた真空蒸着装置で作製した誘電体多層膜鏡と、スパッタ装置で作製した誘電体多層膜鏡との耐光性を比較した。

真空蒸着装置の概念図を図 4 に示す。真空排気された装置内底部に設置された、膜材料（蒸発源）を抵抗加熱、あるいは電子ビーム加熱などの手法により溶解、蒸発させる。蒸発粒子は、直線的に装置内上方に飛散し、基板に付着して膜となる。特に電子ビーム加熱では高融点材料も容易に融解でき、さらに蒸発源を多点用意することで異なる材料の多層化も容易となる。このように真空蒸着法では、様々な材料の薄膜を比較的容易に作製でき膜厚の制御性も良く、さらに大量生産もできるという利点を有する。

その反面、蒸着では付着粒子の運動エネルギーが小さいため、得られる膜がポーラスになりやすく密度や屈折率が低く、膜強度が不足する欠点を有する。この欠点を補うためには、基板を 300 °C 以上に加熱しながら成膜を行うが、熱に弱い基板を用いることは困難である。

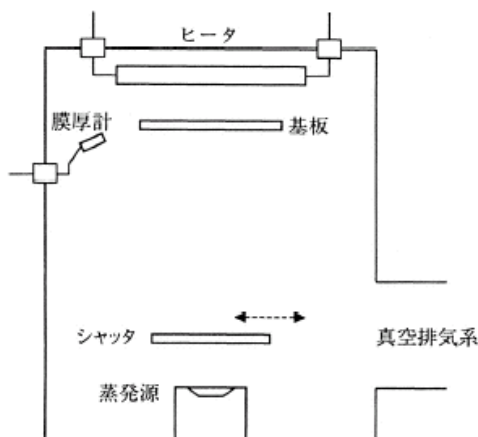


図 4 真空蒸着装置の概念図

次に今回導入したスパッタ装置の概念図を図 5 に示す。真空槽内で成膜を行うことは真空蒸着法と同様である。基板は、ドラムと呼ばれる回転する円柱の側面に取り付けられ、ニオブやシリコン等の膜材料（ターゲット）前を通過する際に、プラズマにより膜が生成される。続いて基板は酸化源を通過するが、ここでは反応性の高いラジカルな酸素が発生しており、ここを通過することにより酸化膜となる。

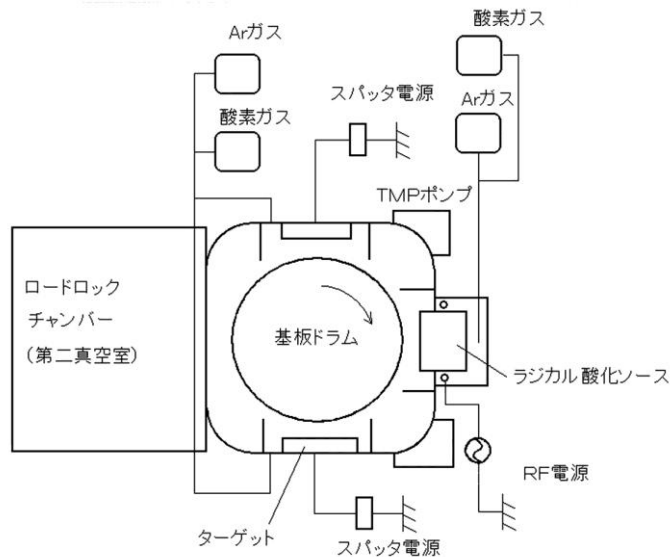


図5 本プロジェクトで導入した薄膜蒸着装置（スパッタ装置）

基板ドラムは 100 rpm と高速で回転しており、一回転の間に付く膜はほぼ一原子層の薄さなので、完全な酸化を行うことができる。そして、所望の膜厚になるまでこの過程が繰り返される。

このように、スパッタ法では、付着粒子の運動エネルギーが大きいため、密着性が良く、高密度で隙間やピンホールが少ない膜が得られる、基板を加熱する必要が無いといった利点を有する。また、同じ膜材料を使用した場合でも、スパッタ法を用いることにより高い屈折率を得ることが可能であるため（表1参照）、高い反射率を実現することができる。

表1 蒸着法とスパッタ法による膜の屈折率（実測値）

高屈折率材料	屈折率		低屈折率材料	屈折率	
	蒸着	スパッタ		蒸着	スパッタ
TiO <sub>2</sub>	2.25	<b>2.48</b>	SiO <sub>2</sub>	1.46	<b>1.48</b>
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.08	<b>2.35</b>			
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.03	<b>2.18</b>			

引き続き、作成した薄膜の耐光性評価実験を行った。

実験の構成を図6に示す。光源には中心波長 800 nm、パルス幅 50 fs、繰返し 1 KHz、パルスエネルギー 2.5 mJ（集光レンズ直後 2.37 mJ）の再生増幅器（Coherent社、Legend-USP）を用いた。前記フェムト秒レーザー光を焦点距離 1000 mm の平凸レンズ（合成石英）で集光し、サンプルをレンズから遠ざけていく。この際、マクロズームアップレンズを装着した CCD カメラにて集光位置を観測する。図7に示すように、誘電体ミラーが損傷を受けることにより散乱光が発生するので、このときの光強度を損傷しきい値とした。

サンプルとして、スパッタ装置により作製した誘電体多層膜鏡を用いた。全てのサンプルは、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>（nd= 200 nm）およびSiO<sub>2</sub>（nd= 200 nm）の膜総数24層により構成される。誘電体ミラー自体の損傷閾値は、フェムト秒レーザーのピークパワーで3 TW/cm<sup>2</sup>程度であり、膜自体は全く問題ないことが分かった。

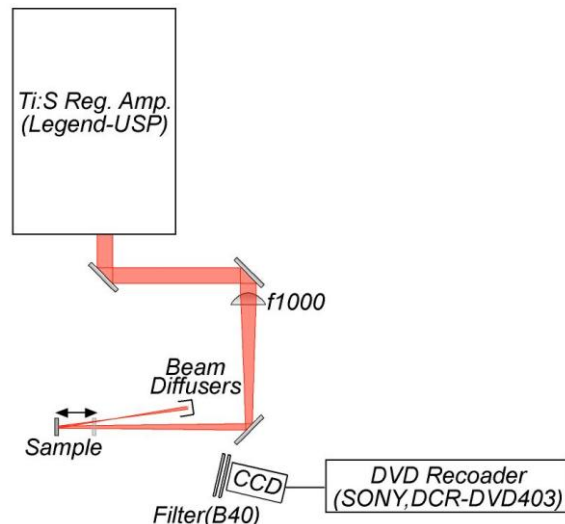


図6 耐光性実験光学系

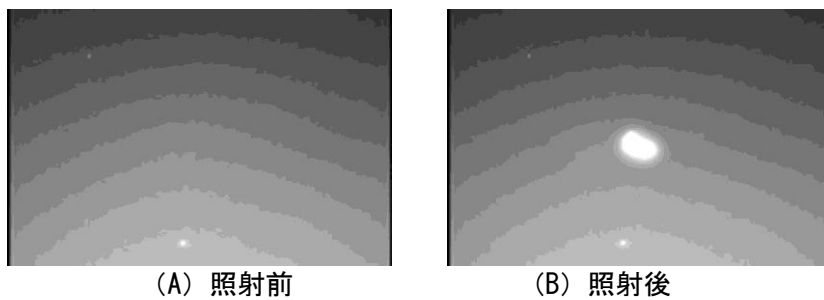


図7 誘電体ミラーが損傷を受けた際に生じる散乱光の様子

LCOS-SLM のレーザーパルスによる破壊においては、液晶層における蓄積熱に依存した熱的破壊が支配的であると考えられる。まず誘電体ミラー上への位相シフト層の導入は、液晶界面における入射光と反射光との重複状態を緩和させることにより、液晶層における光強度が低減され、その結果として素子の耐光性を向上させることを可能とさせるものである。さらに、耐光性を向上させるために、LCOS-SLM を構成する誘電体ミラーの反射率向上を試みた。誘電体ミラー後段に配置されるアクティブマトリクス回路等に到達する光量が減少し、回路に蓄積される熱量を緩和させることが可能となった。

開発した LCOS-SLM の耐光試験結果を図 8 に示す。図中縦軸はフェムト秒レーザーの照射時間、横軸は、ISO11254 に準拠した(1)式に基づいて算出した単位面積当たりのピーク強度である。

$$I(r) = \frac{2P}{\pi \times \omega_2^2} \times e^{-2r^2 / \omega_2^2} \quad (1)$$

以上の結果、位相シフト層による液晶層での熱蓄積の緩和と、高反射ミラー層の開発によるアクティブマトリクス回路での熱蓄積の緩和の効果により、耐光性に関する目標値 (50 GW/cm<sup>2</sup>) を達成することができた。

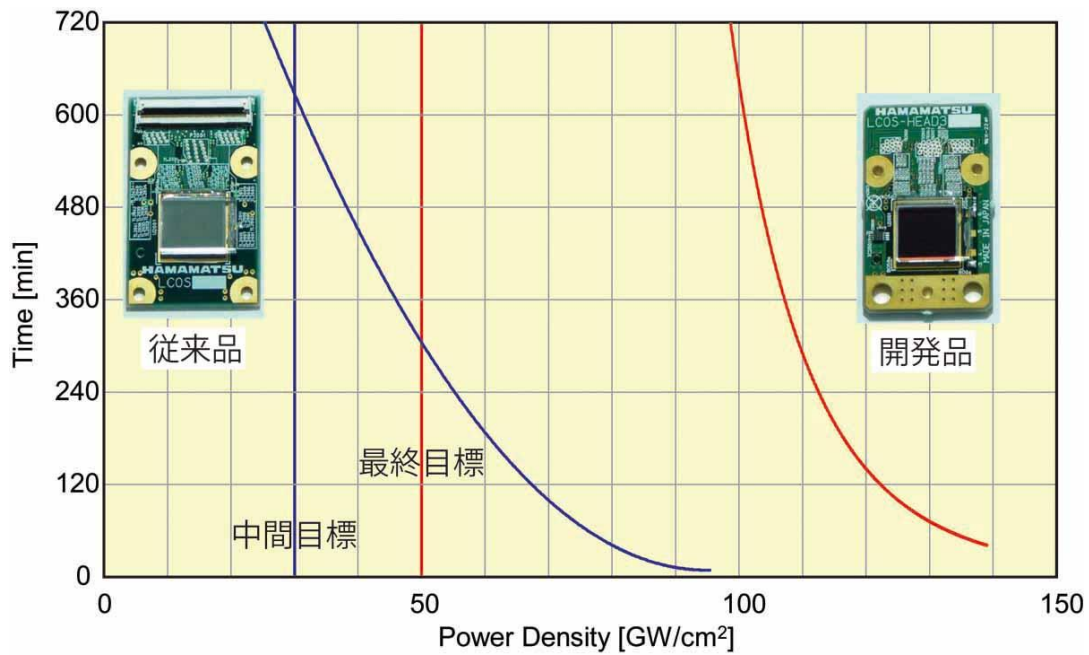


図8 耐光性実験結果

(ii) LCOS-SLM の応答速度

図9の測定光学系にて、パソコン(PC)からLCOS-SLMに8値の位相格子パターンを入力させるとレンズ焦点面に回折光が現れる。その回折光の応答速度をフォトダイオードとオシロスコープで測定した。その結果を図10に示す。波形の振幅10% - 90%の上昇時間、下降時間の結果はそれぞれ、12.75 msec、19.73 msecが得られ、50 Hzの応答速度が達成されていることを確認した。

(iii) LCOS-SLM の位相変調特性

図9と同様の測定光学系で、位相変調特性を評価した。図11に示すように、光位相変調度 $2\pi$ ラジアン以上で256レベルの中間値制御が可能であることも確認できた。

なお開発したLCOS-SLMの画素数は48万画素(800×600)であり、最終目標の45万画素以上になっている。

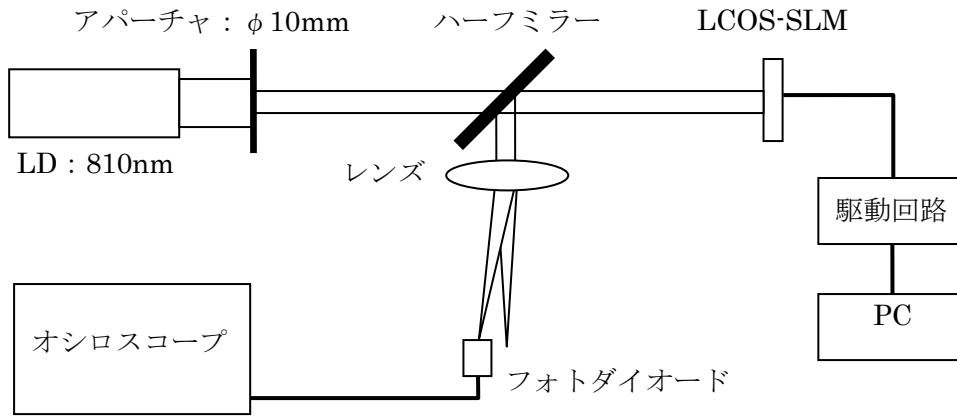


図9 測定光学系

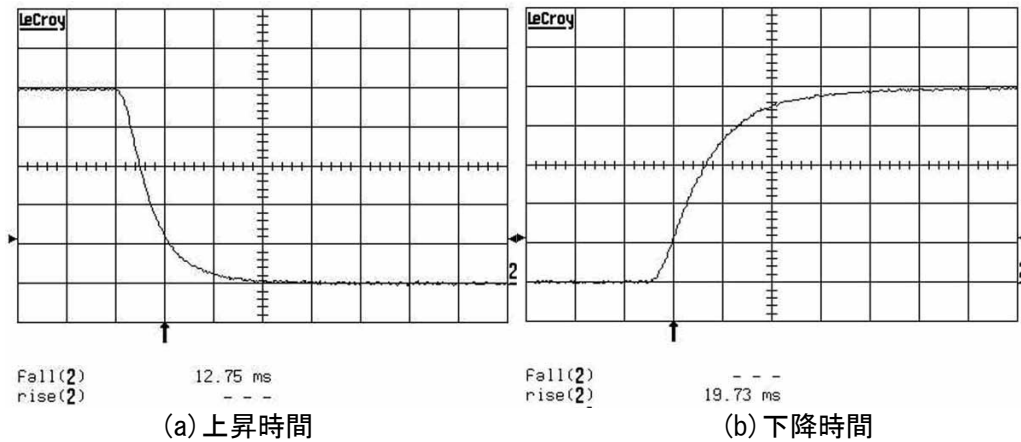


図10 測定結果

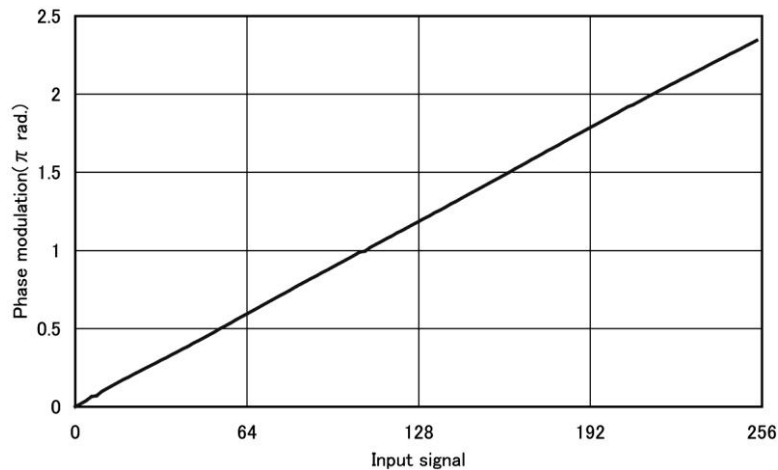


図11 位相変調特性

#### ④ フェムト秒レーザー光波面制御モジュールの開発

開発した LCOS-SLM の性能を最大限に活かし、かつ可変型の三次元加工システムへの導入を簡易にする光波面制御モジュールの開発をおこなった。

開発した光波面制御モジュールの概念図を図12に、外観写真を図13に示す。またモジュールの構造を図14に示した（別途試作した結像モジュールと合体したもの）。従来、空間光変調器により波面制御を行う場合には、専用の光学系を構築する必要があった。この場合、光学系が煩雑になるばかり

で無く、綿密な光学調整技術を必要とした。これに対し、本光波面制御モジュールは、既存の光学系に配置するだけで、容易に波面制御を行うことを可能とするものである。特に、プリズム型のミラーを用いることにより、既存の光軸を維持した状態で波面制御を行うことが出来るため、小型化、操作性の向上が実現された。

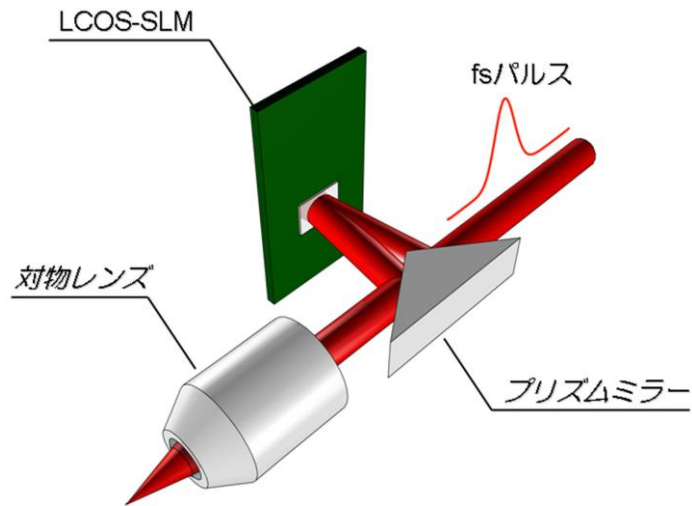


図 1 2 光波面制御モジュール概念図



図 1 3 光波面制御モジュールの外観 (右) (左はコントローラー)



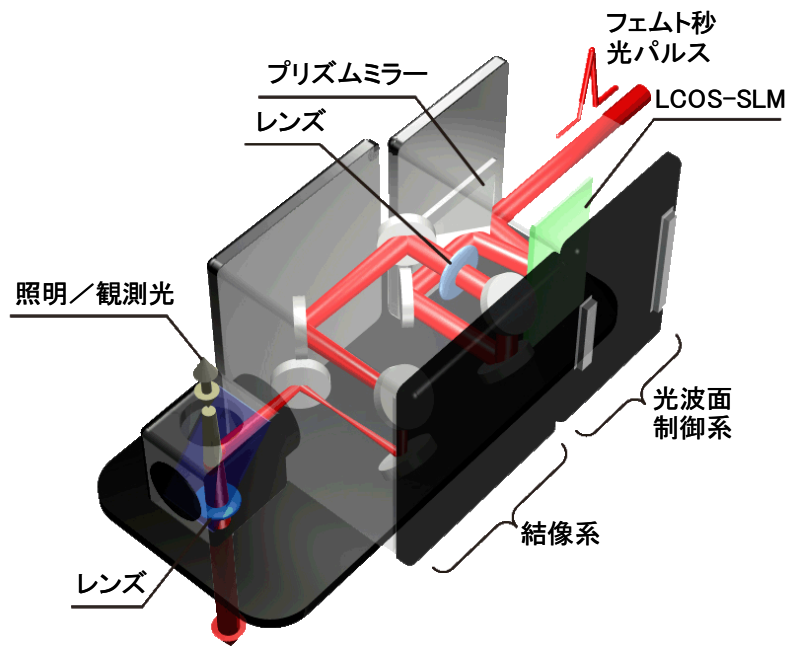


図 1 4 光波面制御モジュールの構造（結像モジュールと合体した様子）

さらに、試作した光波面制御モジュールの特性評価や、光波面制御モジュールを用いて波面制御の実験を行うため、図 15 に示す実験システム系を構築した。

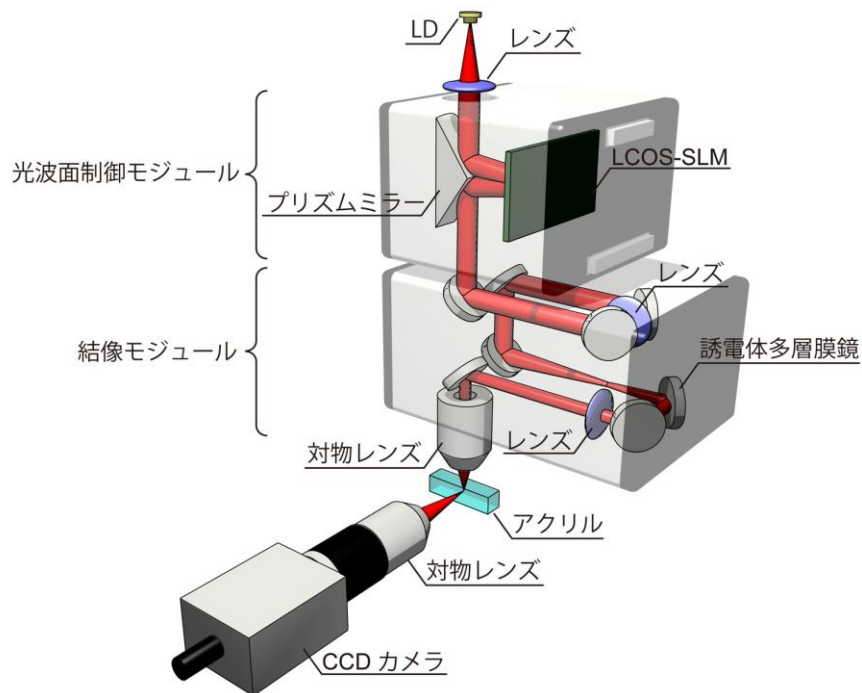


図 1 5 波面制御実験システム

⑤ 高機能三次元加工のための LCOS-SLM による波面制御技術の開発

任意の光パターンを生成するためには LCOS-SLM に入力する計算機合成ホログラム (CGH) の作成が重要な技術となる。CGH パターンを LCOS-SLM に書き込むことにより、単一のレーザービームを多点のレーザービームに変換することができる。このようにすれば、透明材料内部にレーザー光の集光点を多点とし、多点同時加工できるので、加工効率を向上できる。

図 16 に示すように、奥行き方向を制御することのできるフレネルレンズパターンと 2 次元の光パターンを生成する CGH を足し合わせることで三次元加工のためのホログラムを作製した。このホログラムを光波面制御モジュールに入力し、He-Ne レーザーで読み出すことにより図 17 のような三次元の光パターン生成を実現した。再生面が奥行き方向 (10 倍の対物レンズで再生した場合、およそ  $60 \mu\text{m}$  間隔) に異なる 3 つの CGH を同時に再生させた結果である。再生像はレンズに近いほうから “2” “3” “4” という数字が生成されていることが確認できた。図 15 の実験システムにフェムト秒レーザーを導入し、実際にガラス (BK7) 加工実験を行った結果を図 18 に示す。この場合、38 点を同時に加工できたことになる。

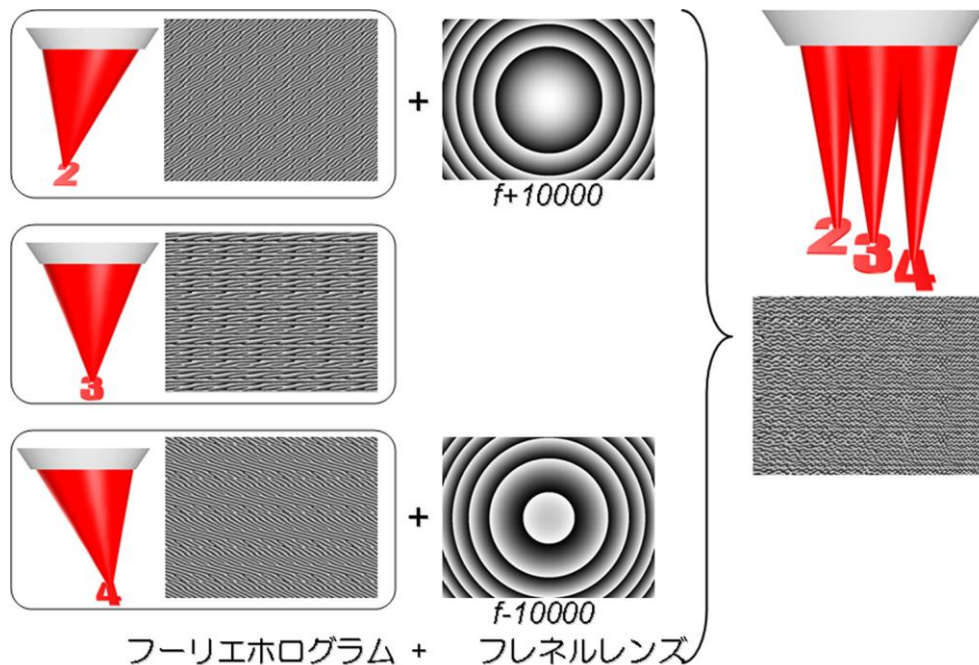


図 16 三次元加工のための計算機合成ホログラム (CGH) パターン

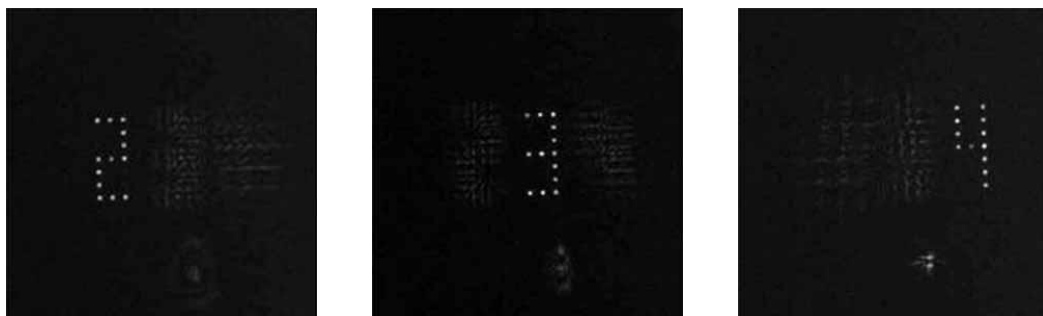


図 17 ホログラム再生像

(「2」「3」「4」の文字がそれぞれ  $60 \mu\text{m}$  間隔で再生されている)

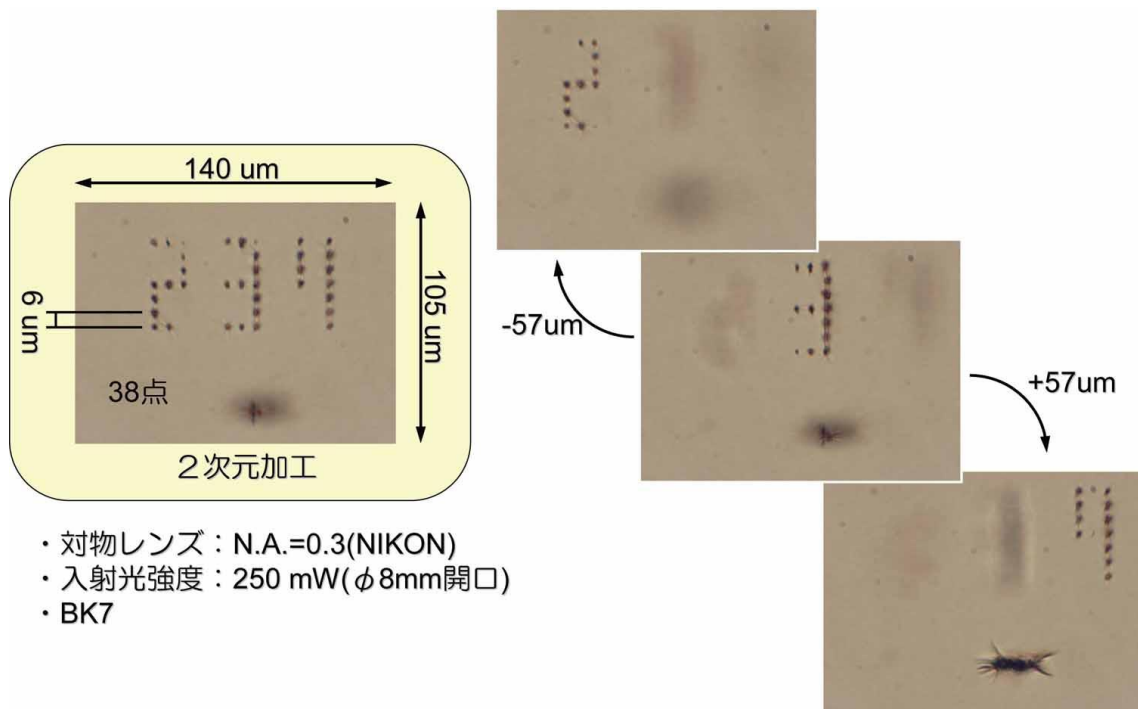


図 18 CGH を LCOS-SLM に書き込みフェムト秒レーザーでガラス内部を加工した結果

一方で、透明材料内部に光を集光する際には球面収差が生じるため、集光領域が大きくなると共にピーク強度も低下し、加工の精度と効率が悪化する。そこでレーザー多点形成と球面収差補正を一台の LCOS-SLM で同時に実現した。図 19 のホログラムパターンを LCOS-SLM に書き込むことで、図 20 に示すように 2 つのレーザービームが縦横異なる位置に集光され、かつ収差補正をしないときに比べて集光点が小さくて明るいことがわかる。この手法を用いて、球面収差を補正しながら、集光位置が 3 次元的に制御されたフェムト秒レーザーを多点に形成し、ガラス内部を加工できることも実験で確認した。

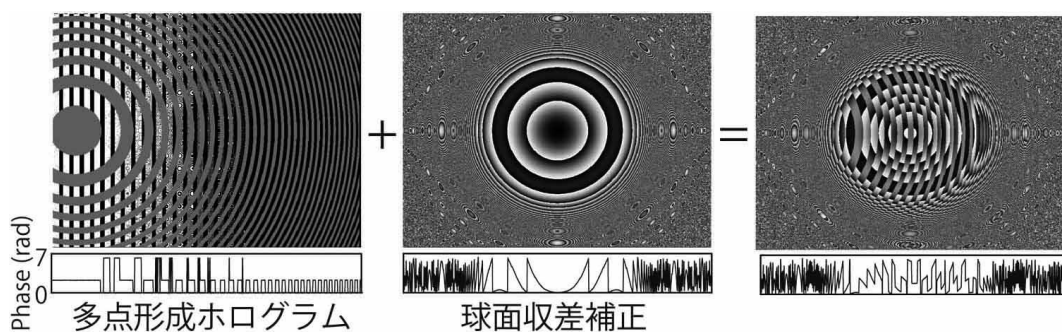
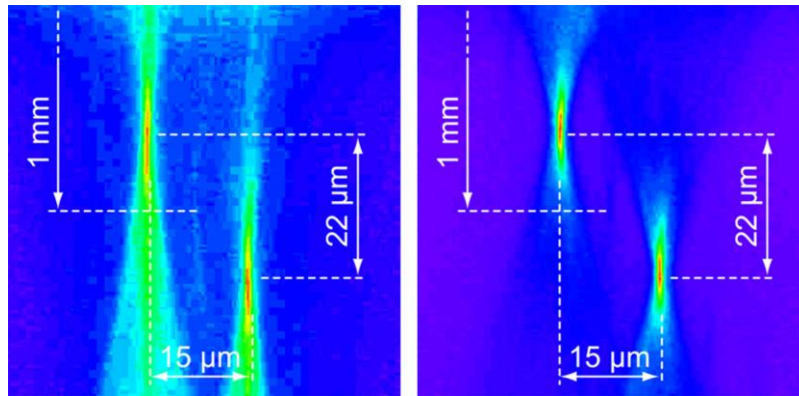


図 19 多ビーム形成と収差補正を同時に行うための CGH パターン



(左) 収差補正なし (右) 収差補正あり

図 20 透明材料内部のレーザービームの集光の様子

### ⑥ 光波面制御モジュール試作機

以上の結果に基づいて、光波面制御モジュールおよび結像モジュールを顕微鏡に組み込んだ「光波面制御モジュール試作機」を試作・評価した。

顕微鏡のベースに取り付けた「光波面制御モジュール試作機」の外観を図 21 に、概念図を図 22 に示す。顕微鏡のベースは、本体（オリンパス、BX61）、電動レボルバ（オリンパス、U-D6REMC）、水平面自動ステージ（中央精機、MSS-50MC）により構成される。これらの部材を、ブレッドボード（外注加工品）に取り付けることで、可搬と同時に光学台に固定できるように設計した。顕微鏡のフォーカス（Z 軸）および水平面自動ステージ（X、Y 軸）は、コンピュータによる外部制御も可能である。

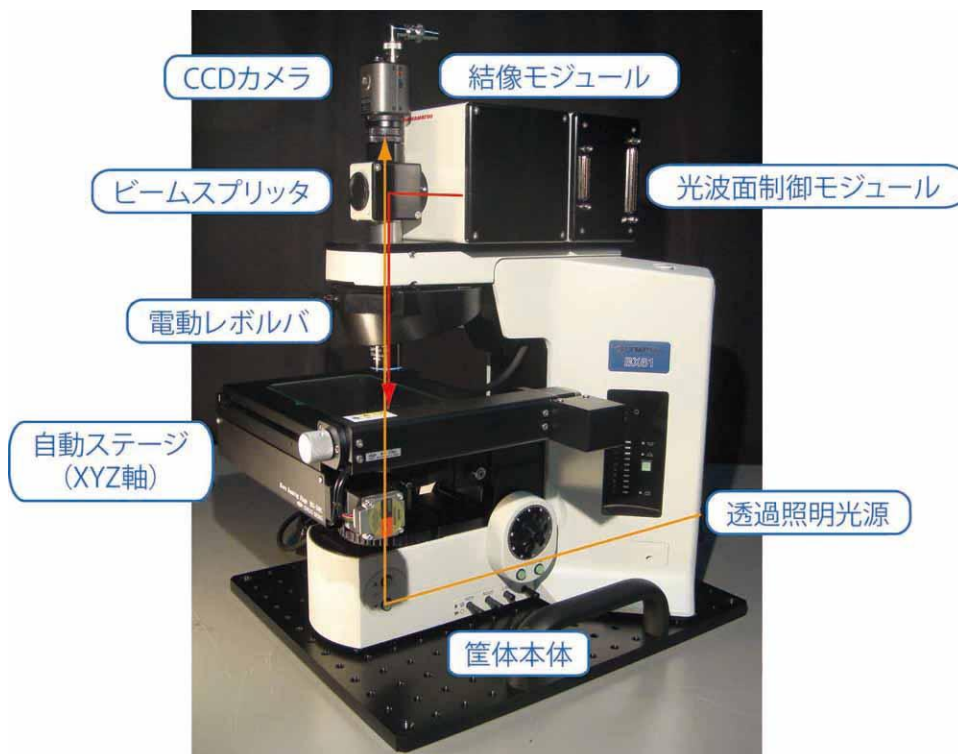


図 21 光波面制御モジュール試作機の外観

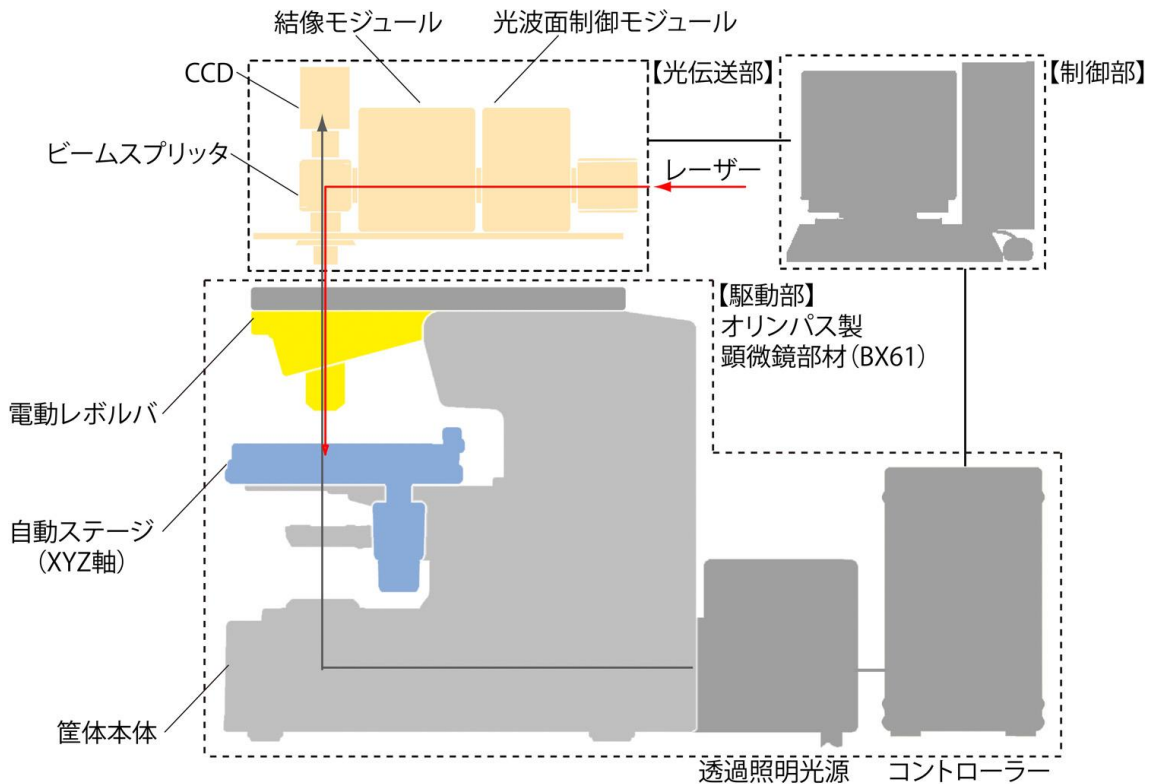


図 2 2 光波面制御モジュール試作機概念図

完成した光波面制御モジュール試作機を用いて、フェムト秒レーザーによるガラス内部加工実験を行った。透明材料の内部加工において球面収差が加工品質を劣化させる要因となるため、フェムト秒レーザーを用いたガラス内部加工に前項で述べた球面収差補正技術を適用することによって、加工品質の向上を図ることができた。

実験の構成を図23に示す。レーザー光には、再生増幅フェムト秒レーザー（Coherent Inc、Legend-USP）を、加工サンプルにはスライドガラス（合成石英）を用いた。また、レーザー光がサンプル表面に集光された状態から、サンプルをレンズ方向に  $300 \mu\text{m}$ 移動させ（集光部の深さは  $570 \mu\text{m}$ ）、サンプルを光軸垂直方向に走査することでサンプル内部の加工を行った（移動速度  $2.5 \text{ mm/sec}$ ）。対物レンズ射出後の光強度は、1点加工の場合は  $28.3 \text{ mW}$ 、2点加工の場合は  $45 \text{ mW}$ とした。加工結果を図24に示す。球面収差を補正することによって加工痕が半分以下に縮小された。

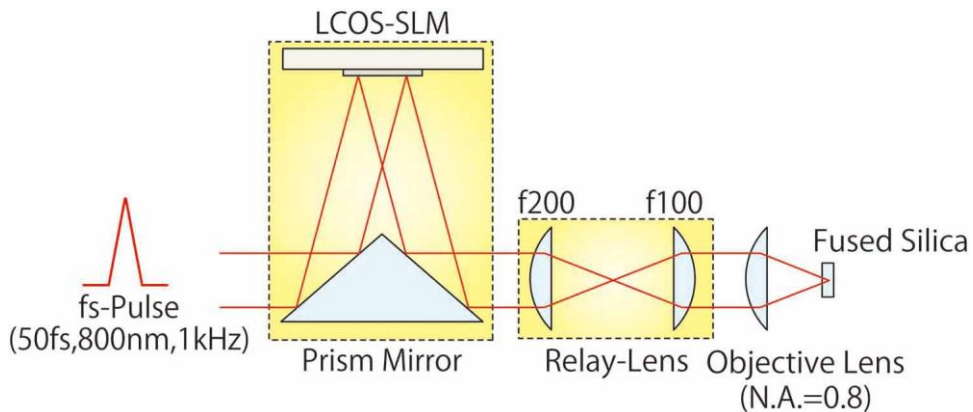
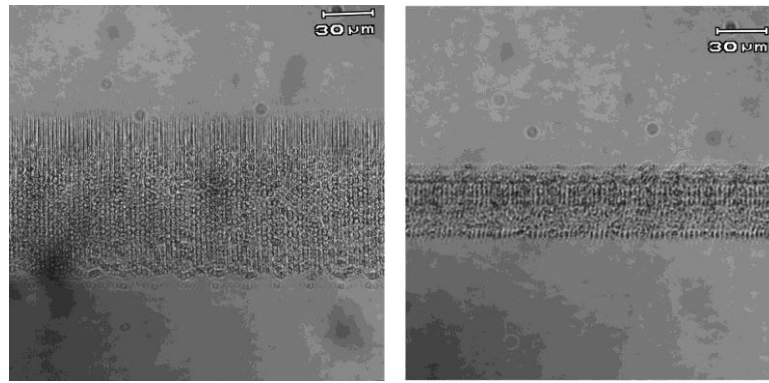


図 2 3 ガラス加工実験系



収差補正無

収差補正有

図 2 4 フェムト秒レーザーによるガラス内部加工結果

次に、2点走査加工を行った。図 19 に示すホログラムを用いて、図 25 に示すようにガラス内部の異なる深さに集光部を形成し、サンプルを走査することによって2点同時加工を行った。球面収差補正量を変化させた場合の加工結果を図 26 に示す。

以上により、球面収差を補正することにより、加工痕が縮小（=加工品質の向上）されることが確認された。また、3次元多点同時加工においても球面収差を補正することにより加工品質が向上することが確認された。

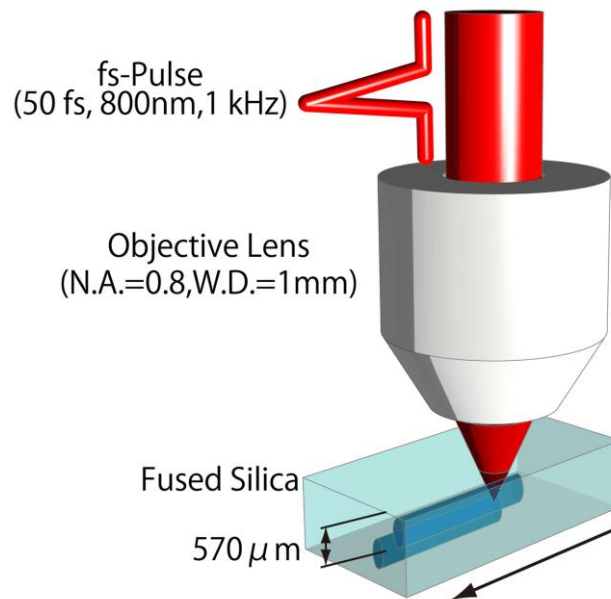


図 2 5 ガラス内部加工実験の模式図

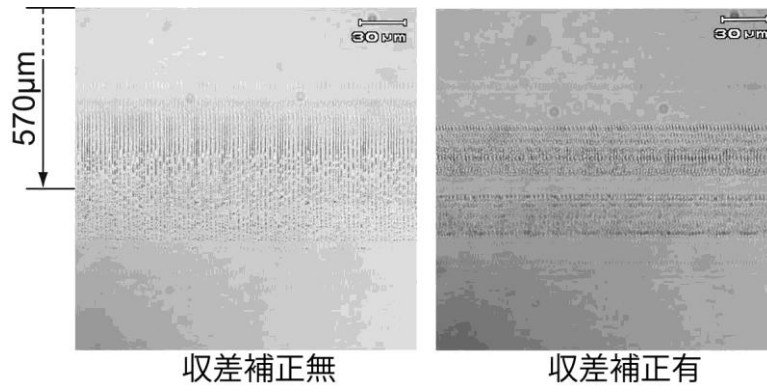


図 2 6 球面収差補正を導入したフェムト秒レーザーによる加工結果

## 【研究項目③三次元加工システム応用デバイス技術】

### 1) 三次元光学デバイス技術

#### (a) モアレ除去フィルタの設計

##### a) デジタルカメラとモアレ

デジタルカメラではしばしばモアレが発生し画質を低下させるので問題となる。モアレとは、被写体にはない偽の周期的模様を言う。モアレは、細かな周期模様を持った被写体をデジタルカメラで撮影した際に発生しうる。モアレの例を図3. 1. 2 (3) 1) (a) a) ①に示す。

##### b) モアレと光学ローパスフィルタ

モアレを低減する光学部品が存在し一般に光学ローパスフィルタと呼ばれている。入射光がデジタルカメラのイメージセンサ受光面上で受光素子間隔と等しい幅の2本の光に等しい光量に分離されれば、その方向へのモアレが低減することが知られている。

##### c) 通常の光学ローパスフィルタ — 水晶光学ローパスフィルタ — 特徴

通常の光学ローパスフィルタは水晶を素材とした板状の部品である。水晶の光学軸に対して傾いた面に沿って平行平板として切り出し、デジタルカメラの光軸に垂直に置く。このとき入射光線は、水晶のもつ複屈折性により、光軸を含む平面内で図3. 1. 2 (3) 1) (a) c) ①のように常光線と異常光線とに分離する。この分離幅をイメージセンサの受光素子間隔に一致させることで、モアレを除去している。

水晶光学ローパスフィルタは広く用いられているが、一枚の水晶板だけでは一方向にしか光線分離しないため、水平垂直の両方向のモアレを低減するためには複数枚の水晶の貼り合わせが必要となり、フィルタのコストアップの要因となっている。また、分離角は最大で $0.236^\circ$ であり、常光線と異常光線の分離幅は事実上水晶板の厚みのみで調整するため、場合によってはレンズ系の製品デザイン上あるいは組み立て上の問題が生じる場合があるという課題があった。

##### d) 本PJで試作した光学ローパスフィルタ

###### — ガラス光学ローパスフィルタ — 設計と数値計算による検証

通常の水晶光学ローパスフィルタには、先に述べた課題がある。そこで我々は、当PJのフェムト秒レーザー照射によるガラス内部への異質相形成の高効率形成技術の応用の一例として、ガラスで光学ローパスフィルタを試作・検証することを目標とした。

##### i) ガラス光学ローパスフィルタの検証のために用いたデジタルカメラ

一般に、モアレを低減させるためには、デジタルカメラに搭載されているイメージセンサの受光面サイズおよび受光素子間隔に光学ローパスフィルタをマッチングさせる必要がある。通常は先にカメラが決まっていて、そのカメラの撮像性能をあげるために光学ローパスフィルタを設計あるいは選定するが、今回は逆に、ガラス光学ローパスフィルタの試作・検証のしやすいイメージセンサを搭載したカメラを選定する必要がある。

今回のガラス光学ローパスフィルタの試作・検証用として望ましいと思われるイメージセンサの条件としていくつかあげられる。



1. イメージセンサの受光面サイズが大きすぎないこと。

通常の水素光学ローパスフィルタと同じようにイメージセンサのカバーガラスに密着させてガラス光学ローパスフィルタをデジタルカメラのレンズ系に組み込むとするならば、イメージセンサの受光面サイズとガラス光学ローパスフィルタの有効サイズを等しくする必要があります。機能検証という今回試作の目的を考えると受光面サイズの大きすぎるイメージセンサを搭載したデジタルカメラを選定すると、ガラスに異質相を形成するためのフェムト秒レーザー加工に時間がかかり望ましくない。

2. できれば白黒デジタルカメラ用イメージセンサであること。

通常、カラーデジタルカメラ用イメージセンサでは、受光素子ごとにRGBの3色の色フィルタのいずれかを配置させている。従って、まず、隣り合う受光素子に装着される色フィルタが異なるというこの構造が、ガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減性能に影響を及ぼす可能性がある。また、カラーデジタルカメラ用イメージセンサでは、一種の画像処理（画素補完）をしてカラー画像出力を構成しているため、同じく、ガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減性能に影響を及ぼす可能性がある。

3. 受光素子数が大きすぎないこと。

光学ローパスフィルタとして機能するためには、すなわち、モアレを低減させるためには、先に触れたように像を形成する光線をイメージセンサの受光素子間隔で分割する必要がある。仮にイメージセンサの受光素子と1対1に対応するような異質相構造を採用した場合には、ガラスに形成する構造の数が多くなるほど加工時間が長くなることが予想されるので望ましくない。また、一般に出力画像のデータ容量も大きくなり、開発段階としては、後の検証の面からも望ましくない。

以上の技術的条件を考慮しつつも、入手性や取り扱いの容易さもあわせ考え、今回のガラス光学ローパスフィルタの試作・検証用デジタルカメラとして、ビデオ出力のある25万画素の監視用途CCDカメラを選んだ。以下にその仕様を記す。

ECN230/N（台湾製、メーカー不明）

1/3インチカラーインターライントランスファーCCDカメラ

画素数25万画素（水平510画素×垂直492画素）

CCD受光面サイズ 4.8mm×3.6mm

受光素子サイズ（水平9.4μm×垂直7.3μm 測定による推定）

出力 NTSC（水平解像度380TV本）

最低照度 0.95Lux/F=1.2 AGCon

SN比 48dB以上

F1.4バリフォーカルレンズf3~8mm・CSマウント

このビデオカメラはNTSCビデオ出力であるためモニターに接続すれば容易に像を目視することができ、また、TVライン方向に関してはNTSC出力信号の空間変化をオシロスコープで直接観察できるため、検証が容易である。また、レンズが取り外し式であり、レンズを取り外すとイメージセンサが露出するため、ガラス光学ローパスフィルタを装着しての撮影実験を確実に行うことができる。また、イメージセンサの実装された回路基板も簡単に外すことができるので、イメージセンサへのガラス光学ローパスフィルタの付けはずしを精度よくかつ効率的に行うことができる。

## ii) 異質相の回折格子構造によるガラス光学ローパスフィルタ

既に述べたように、一般に、入射光がイメージセンサの受光面上で受光素子間隔の2本の光に分離されればその分離方向に対して光学ローパスフィルタとなることが知られている。そこで我々は、異質相の周期配置によりガラス内部に市松状の回折格子を形成し、これにより入射光を分離することとした。回折格子をXY方向に市松状の構造とし回折格子間隔を適切に設定すればXY方向それぞれにイメージセンサ受光素子間隔の光に分離することができるので、このとき、貼り合わせなく異質相の回折格子が形成されたガラス1枚で、XY両方向へのモアレ低減性能を持つ光学ローパスフィルタとなることが期待できる。

まずはフェムト秒レーザー加工中に被加工対象のガラスの移動を伴う逐次加工法による試作にて光学ローパスフィルタとしての機能確認を行い、次に、一括加工法の適用を検討することとした。

なお、異質相による回折格子をスリット状にすれば、スリットと直交する方向にしか光線は分離できないが、同様にして回折格子間隔を適切に選んで光線を分割することで1方向へのモアレの低減が確認できれば、回折格子構造を市松状にしたときXY両方向へのモアレの低減を実現できることは明らかである。このため、装置のシェアの関係上など実際の加工のやりやすさから、場合によっては異質相のスリット状回折格子を形成したガラスにて、試作・検証を行った。

## iii) 異質相の回折格子構造によるガラス光学ローパスフィルタの基本設計

異質相の回折格子構造の基本設計について図③(1)～3を用いて具体的に説明する。受光素子間隔を $p$ 、カバーガラス厚みを $L_1$ 、イメージセンサのカバーガラス下面から受光面までの距離を $L_2$ とする。また、光学ローパスフィルタとなるガラス回折格子中の異質相の間隔を $d$ としたときの1次光の分離角 $\theta_1$ 、カバーガラスに入射角 $\theta_1$ で入射した1次光がカバーガラスを出射するときの出射角を $\theta_2$ とする。さらに、カバーガラスと画素であるフォトダイオードの間は通常の水素が満たされていると仮定してこの空気の屈折率を $n_0$ とおき、カバーガラスの屈折率は回折格子を形成するガラス材料と同一であると仮定して両者のガラスの屈折率を $n_1$ とおく。

このとき、以下の式が成り立つ。

分離した光が受光面で受光素子間隔 $p$ で分割されることより

$$L_1 \tan \theta_1 + L_2 \tan \theta_2 = p \quad \dots \text{式①}$$

カバーガラスの出射境界にスネルの法則を適用して

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_2 \quad \dots \text{式②}$$

回折格子の入射光波長 $\lambda$ と回折格子間隔 $d$ と分離角 $\theta_1$ の関係から

$$n_1 \sin \theta_1 = \lambda / d \quad \dots \text{式③}$$

以上①②③式を連立して回折格子間隔 $d$ について解けば、

$$d \doteq (n_0 L_1 + n_1 L_2) \lambda / n_0 n_1 p = (L_1 / n_1 + L_2 / n_0) \lambda / p$$

となる。

以下、実際の数値を用いて計算する。用いたカメラのCCD (1/3インチカラーインターライントランスファースタCCD、画素数25万画素(水平510画素×垂直492画素) CCDエリアサイズ4.8mm×3.6mm) ではCCD画素サイズ水平9.4 $\mu\text{m}$ ×垂直7.3 $\mu\text{m}$ であったので、 $\lambda = 0.633 [\mu\text{m}]$ ,  $n_0 = 1$ ,  $n_1 = 1.5$ ,  $L_1 = 1200 [\mu\text{m}]$ ,  $L_2 = 600 [\mu\text{m}]$ を代入して計算すると、

$$p = 9.4 [\mu\text{m}] \text{ に対しては } d \doteq 94 [\mu\text{m}]$$

$$p = 7.3 [\mu\text{m}] \text{ に対しては } d \doteq 120 [\mu\text{m}]$$

となる。

回折格子の間隔が決まったので、次に格子の深さの最適値を検討する。

RWCA (Rigorous Coupled Wave Analysis : 厳密結合波解析法) 理論の結論によると、格子の単位構造が長方体の場合の透過型体積回折格子の1次回折光の効率 $\eta$ は、判別パラメータ $Q = 2\pi\lambda H / (n \cdot d^2) \cong 0.045 \sim 0.09 < 1$ であるから、通常のRaman-Nach回折またはDamman回折と思われるので、Damman回折に近いとすると、 $f$ をfilling factorとして、

$$\eta = 2 \left( 1 - \cos \left( 2\pi H \Delta n / \lambda \cos \theta_0 \right) \right) \cdot \left( f \cdot \text{sinc} (mf) \right)^2$$

で与えられる。よって、垂直入射光に対し1次回折効率が最大となる格子の深さ $H$ は

$$\Delta n = 0.001 \sim 0.002, \lambda = 0.633 [\mu\text{m}] \text{ として}$$

$$H = \lambda / (2 \Delta n) \cong 150 \sim 300 [\mu\text{m}]$$

であるので、0次回折光を利用する今回の場合では、格子の深さ $H'$ は、 $H' = 0.755 \cdot H \cong 110 \sim 220$ とすればよいことがわかる。

## (b) ガラス光学ローパスフィルタの作製と評価

### a) 加工方法と装置、試作したガラス光学ローパスフィルタ

図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) に加工方法の概略と加工装置の写真を示す。使用したフェムト秒レーザー加工装置の説明をする。使用した装置は、大まかには、フェムト秒レーザー光源部とステージ部からなる。

フェムト秒レーザー光源部は、チタン・サファイア結晶を用いたモードロックレーザーで800nmのフェムト秒レーザーを作り出し、それを再生増幅器で増幅を行なう構成となっている。それぞれの励起光源として連続発振のLD励起固体レーザーを用いている。以下にフェムト秒レーザー光源部の主要仕様を記す。

モードロックチタン・サファイアレーザー：  
Mira Optima 900-F (コヒレント社製)  
繰り返し周波数 76 MHz  
中心波長 800 nm  
パルス幅 200 fs 以内  
平均出力 650 mW 以上  
ビーム品質  $M^2 < 1.3$

再生増幅器：  
Reg A 9000 (コヒレント社製)  
繰り返し周波数 10 KHz ~ 300 KHz  
中心波長 800 nm  
パルス幅 160 fs 以内 (100 KHz 時)  
パルスエネルギー 4  $\mu$ J 以上 (100 KHz 時)  
平均出力 400 mW 以上  
ビーム品質  $M^2 < 2.0$

モードロックチタン・サファイアレーザー励起用固体レーザー：  
Verdi-V5 LD 励起固体レーザー (コヒレント社製)  
出力波長 532 nm  
出力 5 W

再生増幅器励起用固体レーザー：  
Verdi-V10 LD 励起固体レーザー (コヒレント社製)

出力波長 532nm  
出力 10W

ステージ部はサンプルを載せるエアベアリング式のXYステージと対物レンズが連結されたZステージからなり、更にZステージは粗動ステージと微動ステージからなっている。以下にステージ部の主要仕様を記す。

XYステージ：  
ストローク 各50mm  
再現性 各±20nm

Zステージ：  
ストローク 10mm（粗動ステージ）、100μm（微動ステージ）  
再現性 ±10μm（粗動ステージ）、±5μm（微動ステージ）

ガラス光学ローパスフィルタを作りこむためのガラス基板は、デジタルカメライメージセンサカバーガラス用途のガラス材料とした。将来的にイメージセンサカバーガラスの中に光学ローパスフィルタを作りこむことができれば、デジタルカメラ光学系の薄型化、低コスト化に大きく寄与できると考えた。イメージセンサカバーガラス用ガラスは、イメージセンサの受光素子を破壊するα線を発生する放射線同位元素を内部に極力含まないことを特長としている。

今回、具体的には、光学ローパスフィルタを形成するガラス基板として、旭硝子株式会社のFP-1を用いた。以下にFP-1の特性を記す。

組成系 硼珪酸カリ  
屈折率(nd) 1.490  
密度 2.26 g/cm<sup>3</sup>  
熱膨張係数 52×10<sup>-7</sup>/°C  
転移点(Tg) 490°C  
屈伏点(T) 600°C  
α線量(カウント/cm・h) 0.005以下

次に、実際に試作したガラス光学ローパスフィルタの写真を、図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ①と図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ②に示す。異質相回折格子の1ブロックは、格子の水平ピッチ方向に2μm間隔、光軸方向に表面より100μmの深さを基準に25μm間隔で12本並べられた多数の異質相から構成されている。回折格子の形成範囲は3mm×4mmである。なお、入手しやすい0.5mm厚のガラス基板を用いたが、光学ローパスフィルタとしての正味の厚みは0.3mmである。

加工条件は、繰り返し周波数250kHz・パルス幅320fs・平均出力325mWのfsレーザー光を倍率10倍(NA0.3)の対物レンズで集光、走査速度5mm/sとした。

## b) 評価方法と装置、評価結果

### i) 評価方法と装置

図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) i) に評価方法の概略と装置の写真をしめす。全体の構成はチャートとデジタルカメラ、モニター（キャプチャー回路含む）、オシロスコープとパソコンとからなる。チャートはサーキュラーゾーンチャート、あるいは、ラインチャートである。デジタルカメラの内部には、CCDカバーガラスに密着して、ガラスローパスフィルタを貼り付けてある。

デジタルカメラからは NTSC ビデオ信号が出力される。このビデオ信号を分岐し、一方はビデオキャプチャーを介してモニターへ、もう一方は、オシロスコープへ入力している。オシロスコープでは、NTSC ビデオ信号の任意のラインのデジタルデータをテキストとしてファイルに取り出すことができる。必要に応じ、このデジタルデータをパソコンで分析する。

#### ii) 試作したガラス光学ローパスフィルタのモアレ除去機能の確認

試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラによりサーキュラーゾーンチャートを撮影した画像を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) ii)①に示す。サーキュラーゾーンチャートとは、中心から離れるにつれてそのピッチが小さくなっていく、白と黒の同心円からなるテストチャートである。多くの空間周波数成分を含んでいるため、カメラなどの結像性能の効率的な評価に伝統的に用いられている。図③(1)-12において、画面上半分にのみ回折格子が形成されており、画面下半分は素通しのガラスのままである。図③(1)-12において、画面下半分で発生しているモアレが画面上半分では低減されている。よって、試作したガラス回折格子が光学ローパスフィルタとして機能していることが確認できた。

#### iii) 試作したガラス光学ローパスフィルタの方向無依存性の確認

試作したガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減効果の方向無依存性を確認した写真を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①および図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)②に示す。ここで、モアレ低減効果の方向無依存性とは、同一の光学ローパスフィルタが水平方向のモアレも垂直方向のモアレも低減することを言う。

図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①②において太い黒線で囲われた右上 1/4 のみガラス光学ローパスフィルタが形成されており、太線の外側の残りの画面 3/4 に相当する部分は素通しのガラスとなっている。図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①②いずれでも、太線の外側の部分ではモアレが生じているが太線の内側の部分ではモアレが低減している。すなわち、試作したガラス光学ローパスフィルタについて、モアレ低減効果の方向無依存性が確認できた。

なお、図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①の水平方向ラインチャートのピッチは内側が 0.24mm で外側 1.0mm、図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)②の垂直方向ラインチャートのピッチは内側が 0.40mm で外側 1.0mm である。

#### iv) 試作したガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減効果のビデオ信号による確認

試作したガラス光学ローパスフィルタがモアレを低減していることをビデオ信号上で確認した結果を示す。

モアレを生じるチャートを垂直縞チャート(ピッチ 0.25mm)を撮影したときの、カメラからの画像を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)①に示し、このときのモアレ低減が確認できるラインでのビデオ信号のオシロスコープの観察画面を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②に示す。

図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②よりわかるように、素通しガラス部分からのビデオ信号では画像の明るさに対応する信号振幅に周期的な変化が見られるが、フィルタ形成部分からのビデオ信号では信号振幅の周期変化の振幅が小さい。これは、光学ローパスフィルタのモアレ低減効果を示している。

さらに、これらのビデオ信号をそれぞれ周波数分析した結果を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b)

iv) ③に示す。ビデオ信号中のモアレ成分が20%程度まで低減していることがわかる。

#### v) 試作したガラス光学ローパスフィルタと水晶光学ローパスフィルタとの特性比較

空間周波数の異なるラインチャートを複数用意し、ビデオ信号出力の振幅をオシロスコープにて測定する方法で、試作したガラス光学ローパスフィルタの特性を水晶光学ローパスフィルタの特性とあわせて測定した結果を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) v) ①に示す。試作したガラス光学ローパスフィルタでは、低空間周波数側からモアレが発生するナイキスト周波数までは水晶光学ローパスフィルタとほぼ同様の特性を示し、一方、ナイキスト周波数より少し高空間周波数では水晶光学ローパスフィルタよりむしろよい特性を示していることが確認された。

#### vi) ガラス光学ローパスフィルタへの一括加工法の適用の検討

以上、異質相により回折格子を形成することによって、ガラス光学ローパスフィルタが作製できることを確認した。また、回折格子を千鳥状にすれば、貼り合わせなく垂直水平両方向のモアレを低減できることも確認した。

ここでは、本PJの異質相の一括加工法の光学ローパスフィルタへの適用した結果を示す。図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ①に示すホログラムによる一括加工法にて形成した直線異質相からなる1次元回折格子を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ②に示す。

加工条件は、繰り返し周波数1kHz・パルス幅60fs・平均出力6.2W・中心波長800nm

のfsレーザー光を内製の直線異質相形成用ガラス・ホログラム（焦点距離75mm）で集光した。60s照射して直線異質相1本（長さ約2.5mm幅約0.002mm）を形成し、これを並べて2.5mm×4mmの回折格子とした。

ターゲットガラスは厚み0.26mmのシリカガラスである。

波長633nmのレーザー光に対する回折光量比（＝（1次光量）／（0次光量））は18%であり、逐次加工での1次元回折格子試作品の光量比25%より3割程度低いだけであった。従って、逐次加工の場合とほぼ同程度のモアレの低減性能が期待できる。

写真では茶色の着色が見られ、実用のためには加工時間の短縮が必要であるが、本PJで開発の新ガラスと新設計ホログラムを更に改善することにより、着色はほぼ無色透明に、加工時間は10m×10mmの光学ローパスフィルタに対し数秒以下まで、大幅に改善できる見込みである。

#### 参考文献

- [1] 岸川, ユーザーエンジニアのための光学入門, (1990), オプトロニクス社
- [2] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, Opt. Lett. 21, 1729 (1996)
- [3] K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura, M. Hirano, and H. Hosono, Appl. Phys. B 71, 119 (2000)
- [4] J. W. Chan, T. R. Huser, S. Risbun, D. M. Krol, Opt. Lett. 26, 1726 (2001)
- [5] J. W. Chan, T. R. Huser, S. Risbun, D. M. Krol, Appl. Phys. A 76, 367 (2003)
- [6] 市川 他, 最新 回折光学素子技術全集, (2004), 技術情報協会
- [7] 渋谷・大木, 回折と結像の光学, (2005), 朝倉書店
- [8] NEDO, ナノテクノロジープログラム—三次元光デバイス高効率製造技術パンフレット, (2010)
- [9] 政岡・田中, NEW GLASS, 26(1), (2011)

(d) 図表



図3. 1. 2 (3) 1) (a) a) ① モアレの例  
左：モアレを生じうる被写体の例。右：モアレが生じた画像。

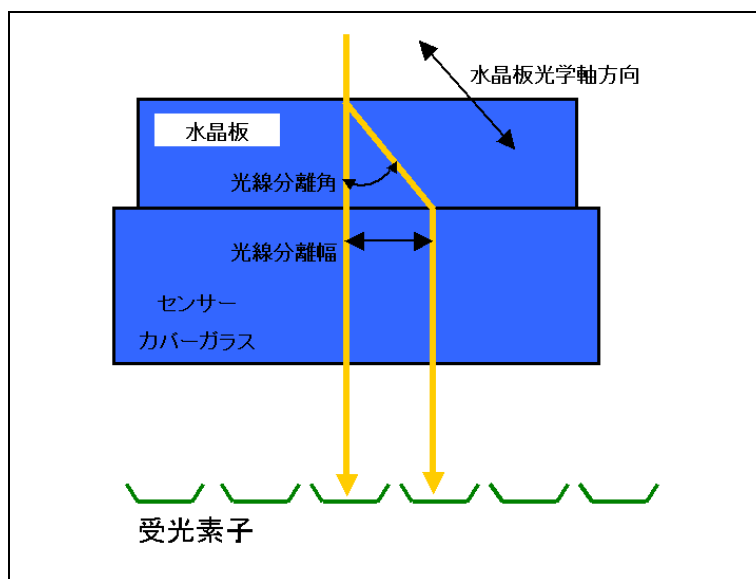


図3. 1. 2 (3) 1) (a) c) ① 水晶製光学ローパスフィルタの光線分離

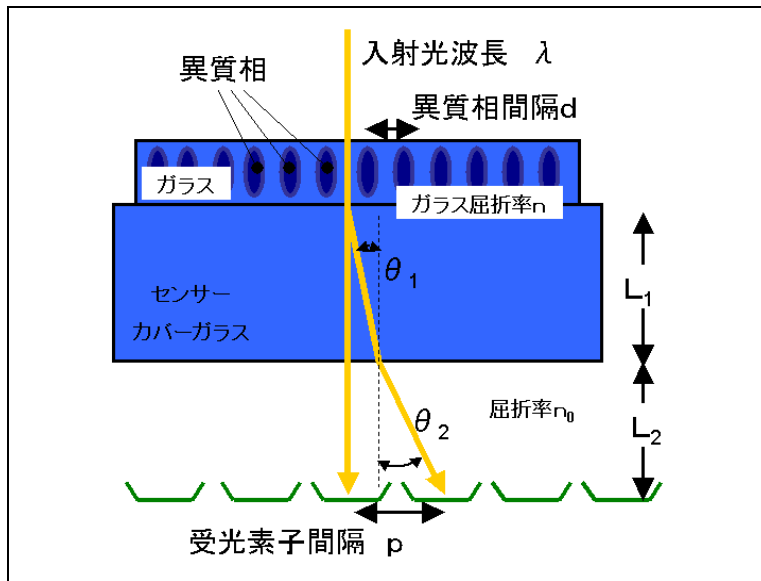


図3. 1. 2 (3) 1) (a) d) i) ①  
 ガラス光学ローパスフィルタのための回折格子間隔の設計

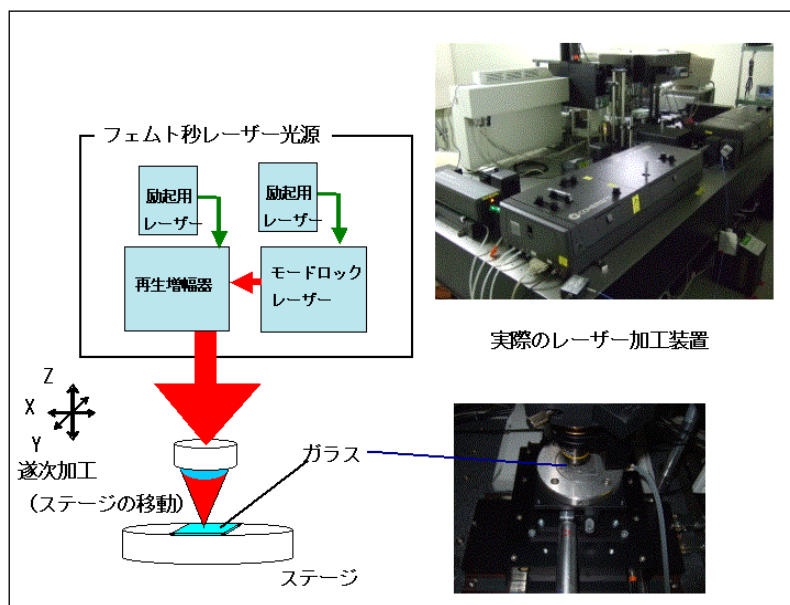


図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) 加工方法と加工装置



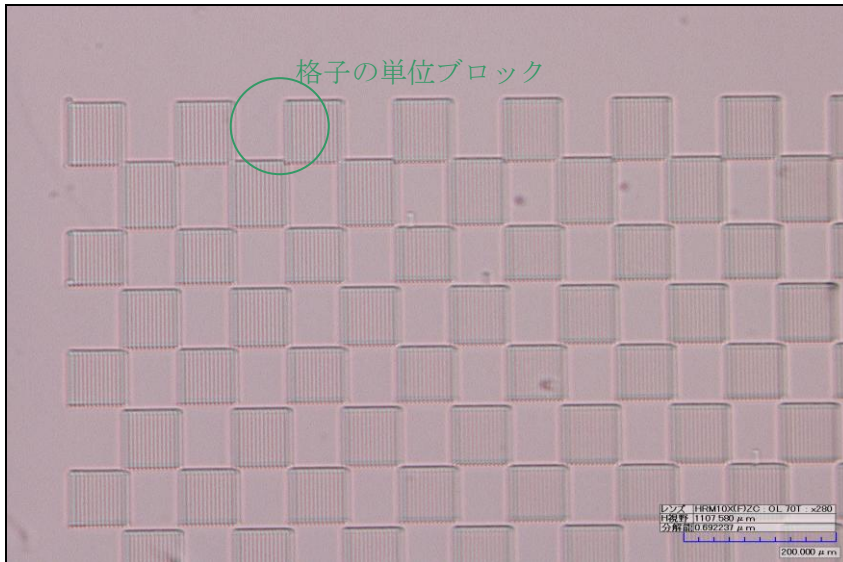


図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ①  
 ガラス光学ローパスフィルタの光軸方向からの写真

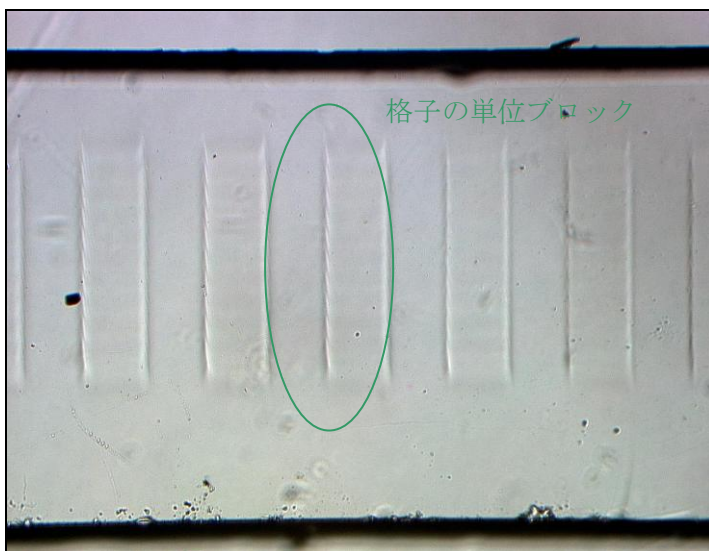


図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ②  
 ガラス光学ローパスフィルタの断面の写真

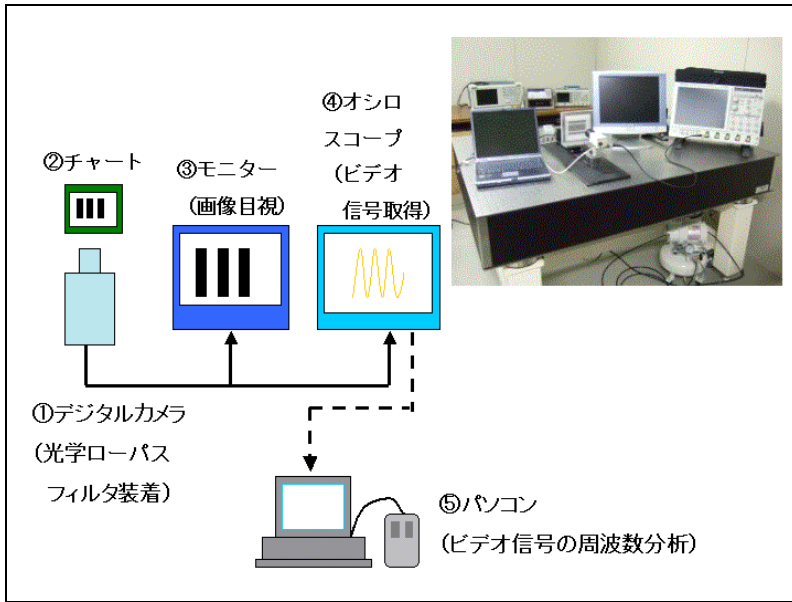


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) i) 評価方法と評価装置

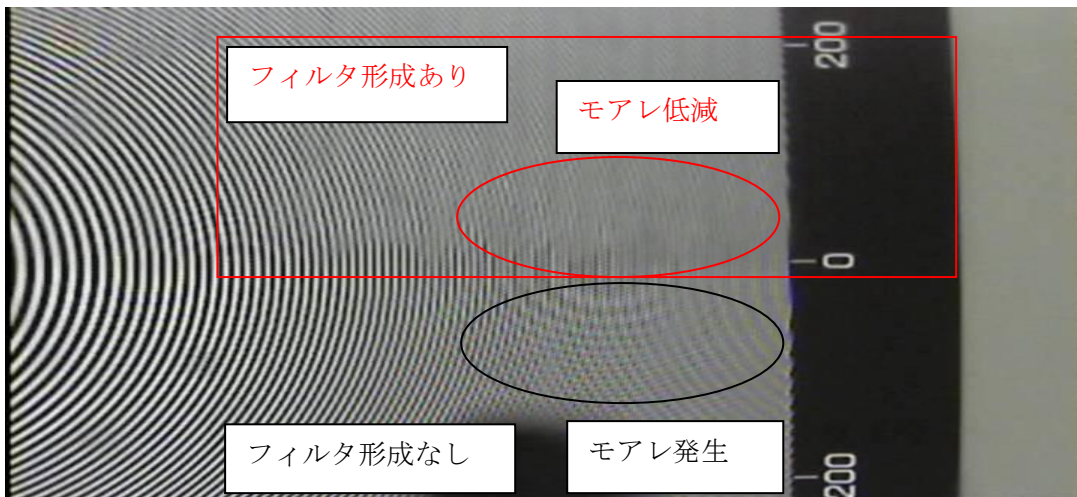


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) ii) ①  
試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの、  
サーキュラーゾーンチャートの画像

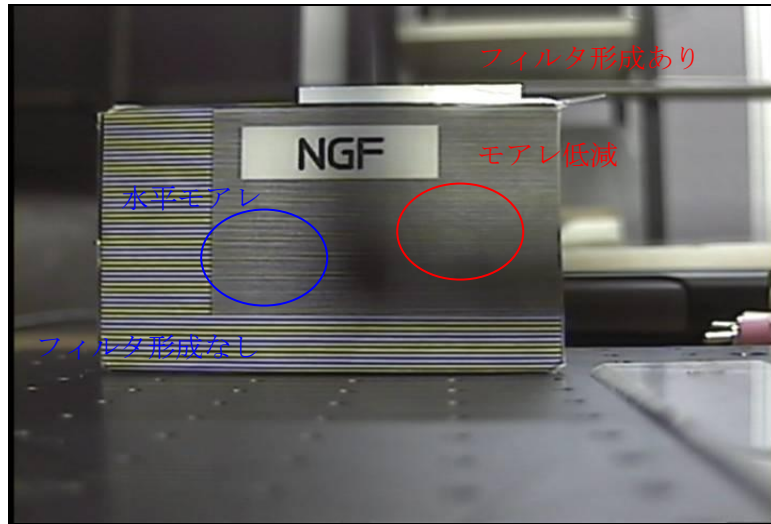


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①

試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの水平方向ラインチャートの画像

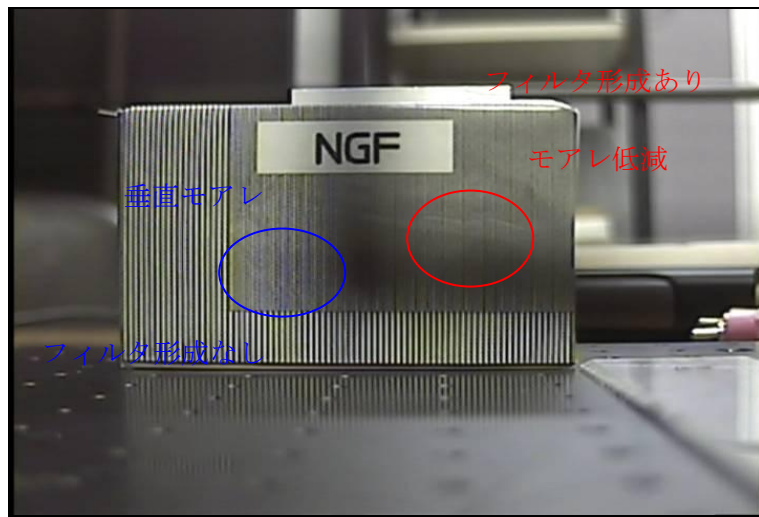


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)②

試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの垂直方向ラインチャートの画像

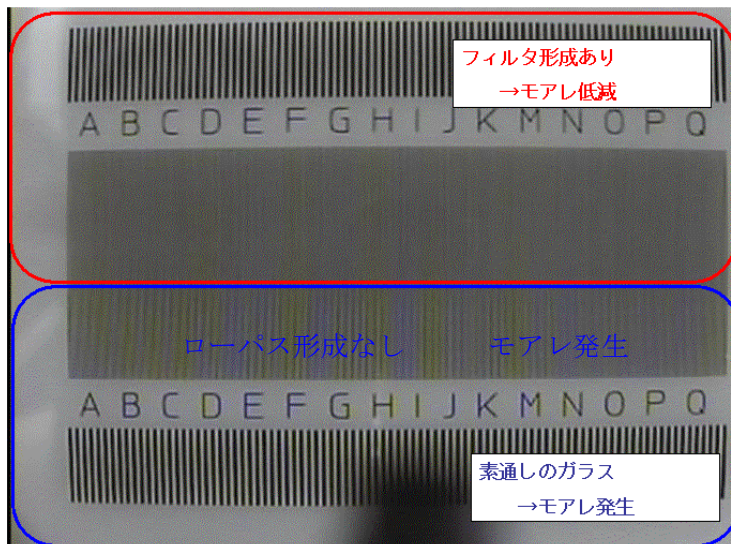


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)①  
 試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの  
 垂直方向ラインチャートの画像

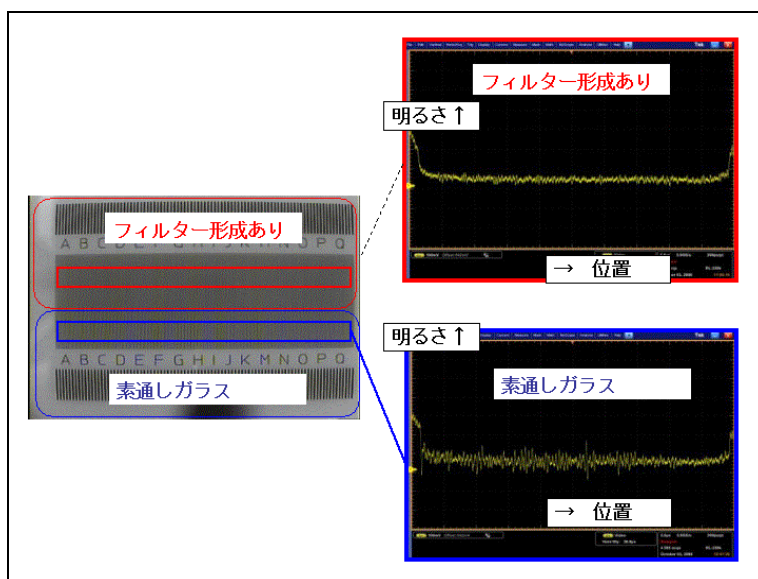


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②  
 モアレのビデオ信号およびモアレが低減されたビデオ信号。

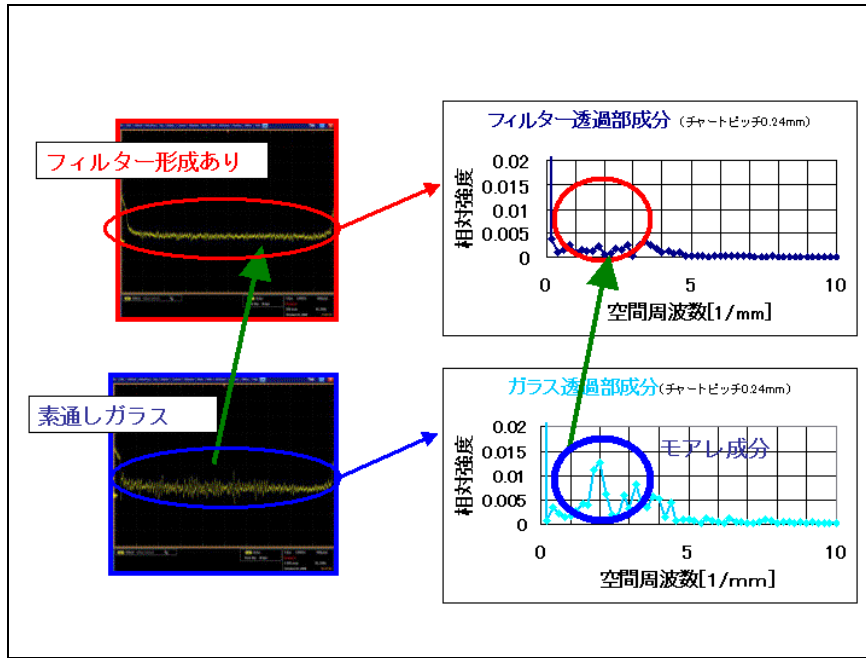


図 3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②  
モアレのビデオ信号およびモアレが低減されたビデオ信号の  
周波数成分分析。

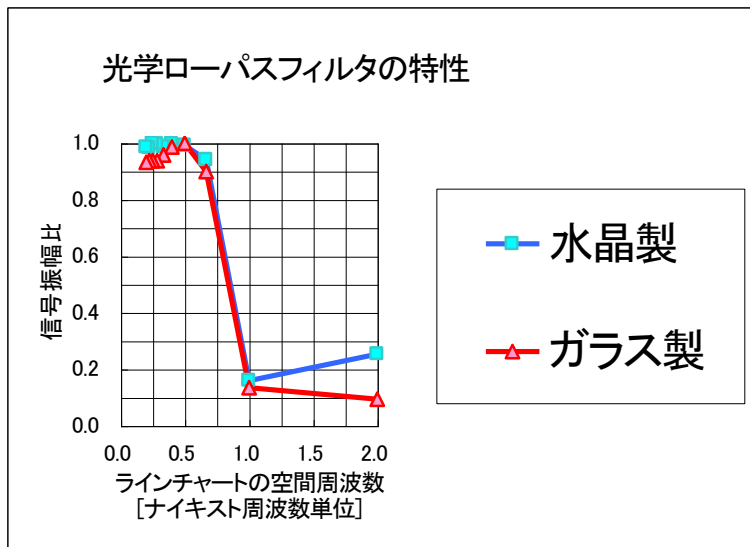


図 3. 1. 2 (3) 1) (b) b) v)①  
試作したガラス光学ローパスフィルタと水晶光学ローパスフィルタとの特性比較

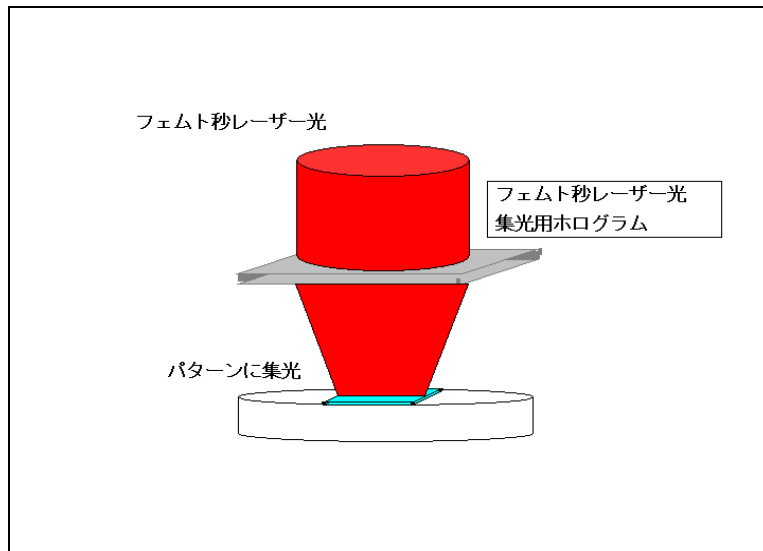


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ①  
ホログラムによる一括加工方法

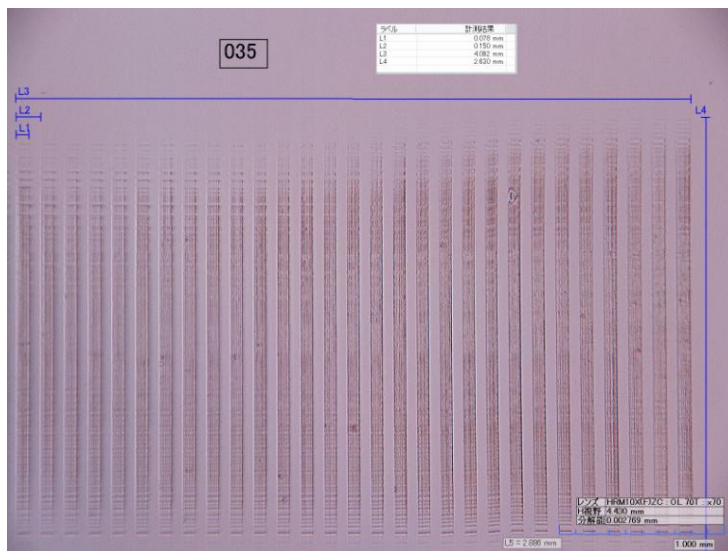
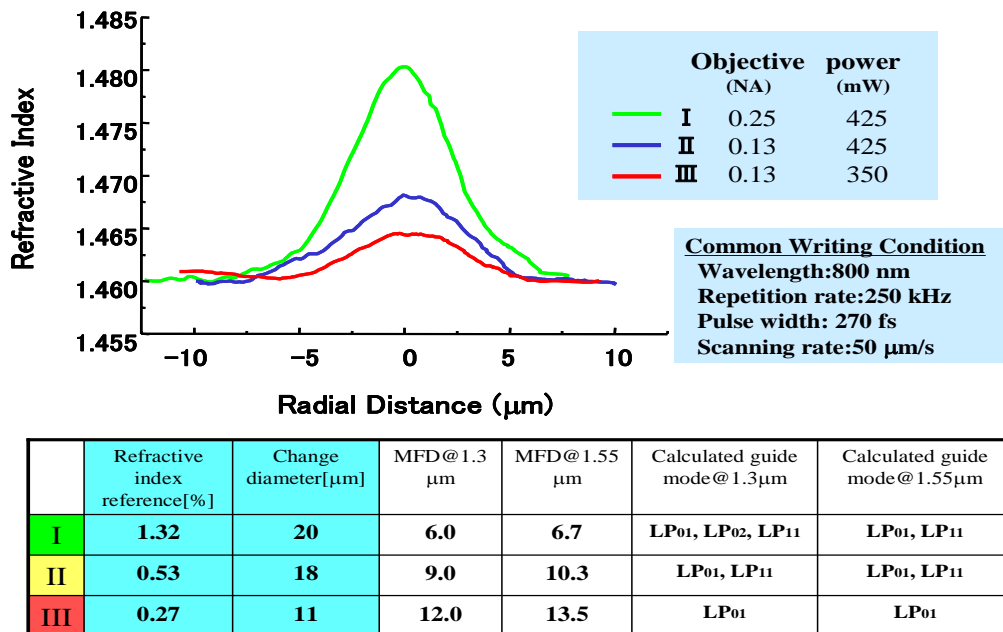


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ②  
ホログラムにて一括に形成した直線異質相からなる1次元回折格子

## 2) 三次元光回路導波路デバイス技術

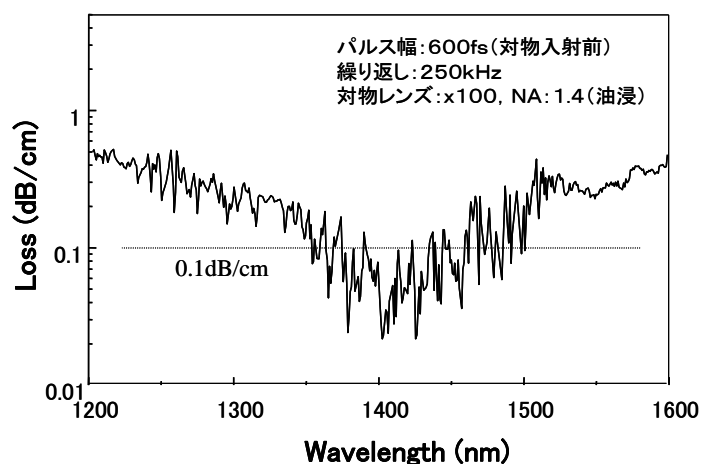
逐次描画による直線導波路形成において、描画対物レンズ、平均出力、パルス幅、繰り返し周波数や走査速度等のレーザー照射条件を変化させることで、コア径や比屈折率差を変化させることができた。図Ⅲ③(2)-1はレーザー照射条件を調整することで屈折率差および異質相形成サイズを変化させて得られた光導波路の屈折率分布より計算したモードフィールド径 (MFD) を示す。描画する対物レ



図Ⅲ③(2)-1 異なるレーザー照射条件下で得られた導波路の屈折率分布（実測値）および屈折率分布より計算した MFD と伝搬モード

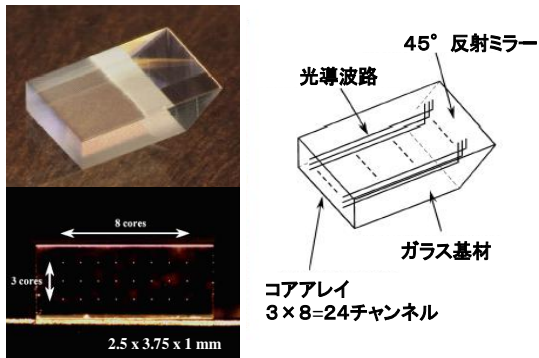
レンズの開口数や平均出力により、得られる導波路の比屈折率差やコア径が変化し、それに伴い伝搬モードも変化していることがわかる。図中Ⅲに示すように、通信帯域においてシングルモードの光導波路を描画することも可能である。

図Ⅲ③(2)-1 は、カットバック法により測定した長さ 5 cm の光導波路の損失スペクトルを示す。レーザー照射条件制御により、目標であるコア径 9 μm の直線導波路を描画し、±1 μm の加工精度で伝送損失 0.1 dB/cm の導波路を描画することができた。



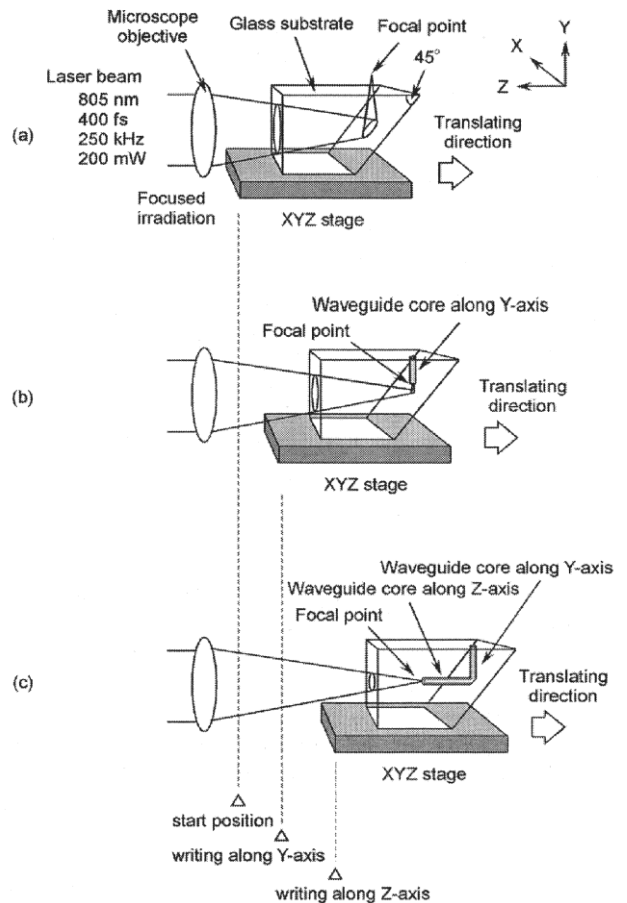
図Ⅲ③(2)-2 光導波路の損失スペクトル

また、光導波路を三次元的に配置させることも可能で、図Ⅲ③(2)-3 に示すような直角光路変換光導波路を作製することができた<sup>1,2)</sup>。この三次元導波路の作製は、図Ⅲ③(2)-4 に示すように、45° 反射面を利用することで、基盤ガラスを回転させることなく一軸方向にレーザーをスキャンさせるだけで、垂直および水平導波路を描画することができ、多点同時照射を利用することで、一度に複数本

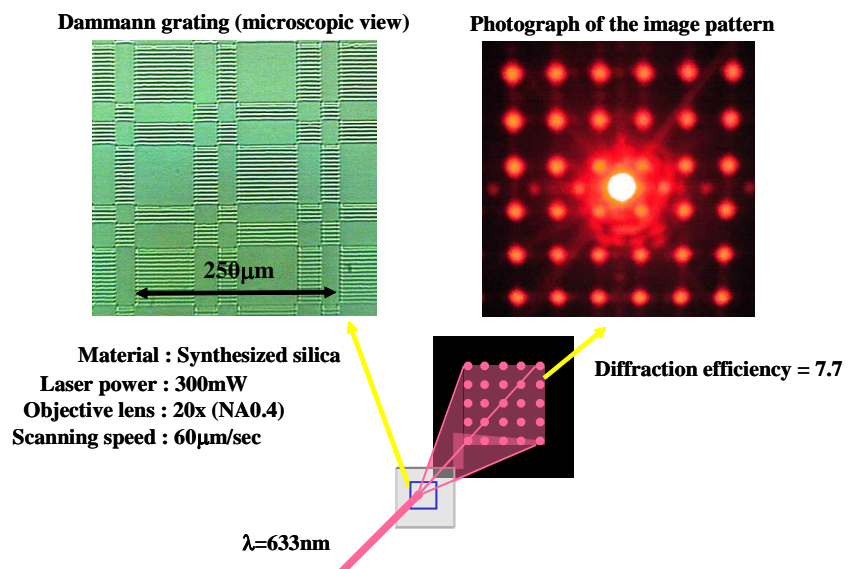


図Ⅲ③(2)-3 直角光路変換コネクタ

の直角導波路を描画できる可能性がある<sup>2)</sup>。この導波路は 250 μm 間隔で 24 本 (3 列×8 本) の導波路が、垂直及び水平方向に描画されており、45° 反射面を設けることで、複数の光路を低損失にて直角に変換することが可能である。このような光路変換光導波路は、光インターコネクションに利用できる可能性がある。

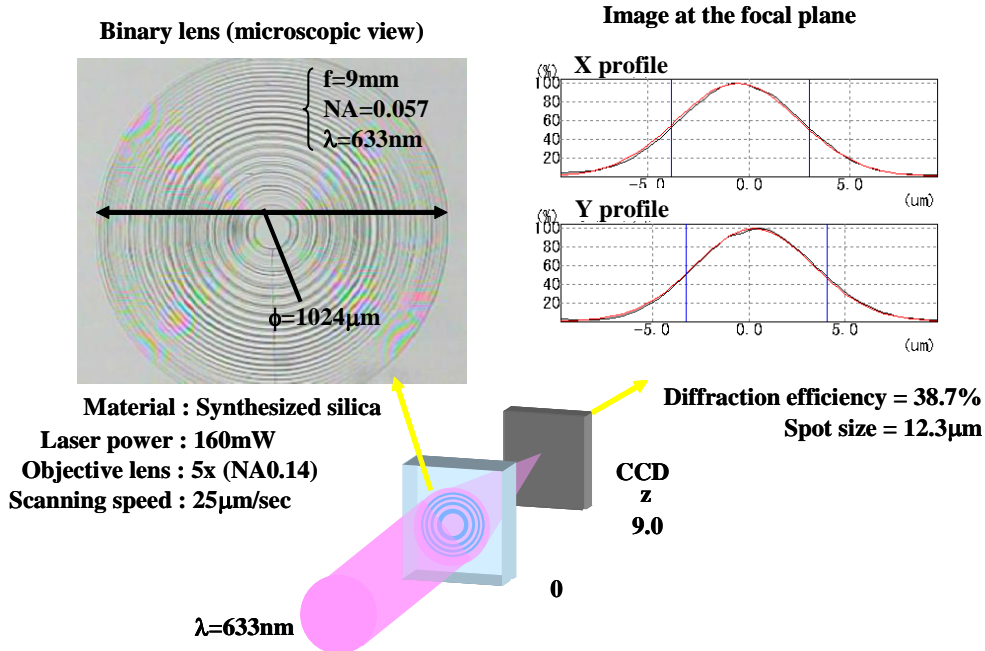


図Ⅲ③(2)-4 直角光路変換光導波路の作製法

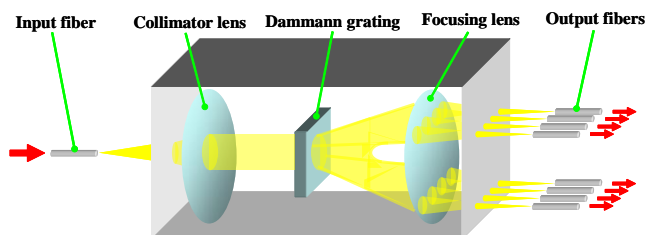


図Ⅲ③(2)-5 ダーマングレーティング (6x6)



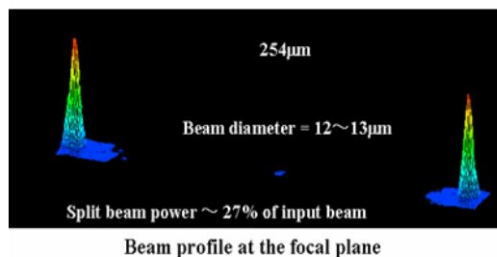
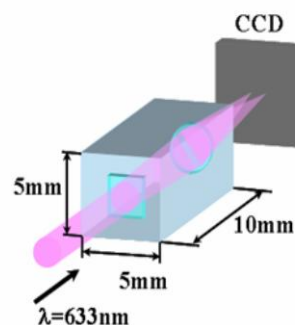
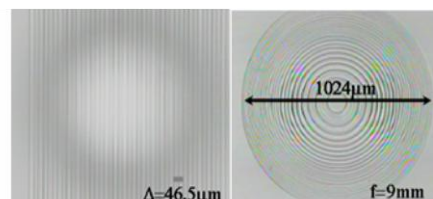


図Ⅲ③(2)-6 バイナリーレンズ



図Ⅲ③(2)-8 グレーティングとレンズを同一ガラス内に形成した分岐素子 (モデル)

さらに、光誘起屈折率変化を利用した、ガラス内部へのダーマングレーティング (図Ⅲ③(2)-5 参照) やバイナリーレンズ (図Ⅲ③(2)-6 参照) の描画も試みた。図Ⅲ③(2)-7 はグレーティングとバイナリーレンズとを同一ガラス内に描画することで作製した集積回折光学素子の 1 例で、ビームスプリッターとして機能する。これらの検討は一括描画での三次元光分岐素子の作製に活用する目的にて実施したものである。光導波路、グレーティングおよびバイナリーレンズを一括描画により同一ガラス内部に形成することで分岐素子として機能させられる可能性がある (図Ⅲ③(2)-8 参照)。このような素子や



図Ⅲ③(2)-7 グレーティングとレンズを同一ガラス内に形成したビームスプリッター

直角光路変換光導波路はその構造上、火炎加水分解法やイオン交換法等、既存の方法での作製は容易ではなく、局所領域のみを三次元的に高屈折率化することが可能なレーザー描画技術を有効活用した例と言える。

また、液晶空間光変調器 (LCOS-SLM) を利用した三次元一括レーザー加工システムも構築した。図 III ③ (2)-9 に光学系を模式的に示す。フェムト秒レーザーを SLM (HAMAMATSU; LCOS-SLM X10468) に入射し、反射ビームをリレーレンズ (L1、L2) で縮小した後、対物レンズに通して、試料 (石英ガラスなど) 内部に集光し、加工の様子は、L3 を用いて集光領域の像を CCD 面上に結像させることによって観察することができる。SLM に入力するホログラムは、形成したいビームドットパターンを表すビットマップファイルを用いて、フーリエ反復法による数値計算により得る。

この一括レーザー加工システムを用いることで、多数の光スポットを形成することができ、同時に複数の光導波路をガラス内部に形成することが可能になる。その概念図を図 III ③ (2)-10 に示す。SLM のフーリエ面に多数の光スポットを一行に形成するような空間位相分布 (位相ホログラム) をレーザー光に与えるような屈折率分布を SLM に与えて、ガラス内部

に集光した光スポット列に垂直な方向にガラスをスキャンすることによって複数の光導波路を同時に描画することができる。互いに平行な光導波路を描画する場合は、1つのホログラムのみしか SLM に入力しないが、描画する導波路の間隔を徐々に変えて曲げ導波路を作製したい場合、ビームスポットの位置を変えるためにホログラムを描画中に切り替える必要がある。ホログラムを切り替えること自体は非常に簡単であるが、ホログラムがコンピューターによって計算される Computer Generated Hologram (CGH) であるために、光スポット位置が離散的であるという問題を考慮しなければならない。それを示したのが、図 III ③ (2)-10 (b) である。CGH1 を用いて二つの集光スポットで2本の光導波路を同時に描画している途中で、CGH2 に切り替えて2つの光導波路の距離を短くすることができる。ここで、CGH を切り替えた時の集光スポットの変化の最小値  $\Delta X_{step}$  は、CGH の計算条件によって決定される。 $\Delta X_{step}$  をできるだけ小さくすることが滑らかな曲げ導波路を形成するために重要である。ここで

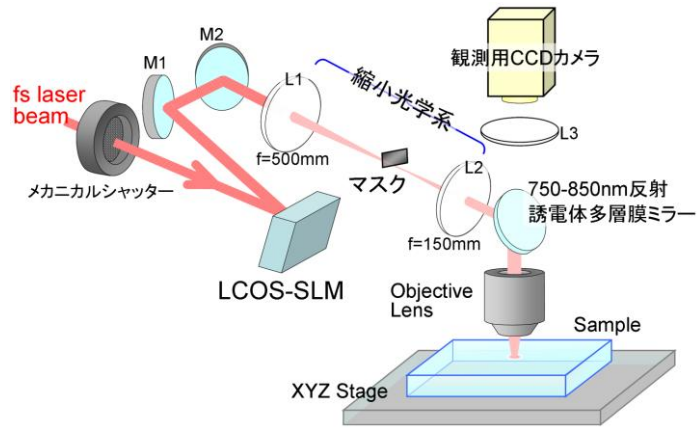


図 III ③ (2)-9 構築したホログラフィックフェムト秒レーザー加工光学系

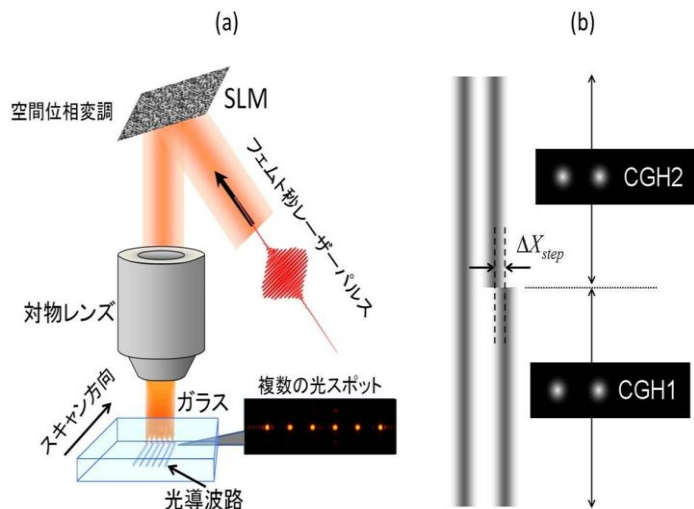


図 III ③ (2)-10 (a) SLM を用いた光導波路同時描画 (b) 位相ホログラム切り替えによる導波路の位置制御の問題

挙げる本プロジェクトの成果は、 $\Delta X_{step}$  をできるだけ小さくする単純な計算方法の提案と曲げ導波路作製の実現である。また、 $\Delta X_{step}$  の大きさと光導波路の損失について調べて、 $\Delta X_{step}$  を小さくすることと CGH の切り替え回数とのトレードオフを考慮する必要性も見出した。以下にその過程を詳しく述べる。まず、SLM を用いた一括レーザー加工システムでの CGH の計算について説明する。簡単のために、1次元で話を進める。一括レーザー加工システムで、SLM 直後の電場分布  $[F(x)]$  と集光スポットが形成される面(以下、「加工面」と呼ぶ)での電場分布  $[E(X)]$  はフーリエ変換によって関係付けられる。したがって、CGH の計算では次の離散フーリエ変換を利用して、所望の電界振幅分布  $|E(X_k)|$  が加工面に生じる位相分布  $\Delta\phi(x_n)$  を得る<sup>3)</sup>。

$$E(X_k) \propto \sum_n |F(x_n)| \exp[i\Delta\phi(x_n)] \exp[i2\pi \frac{x_n X_k}{\lambda f}] \quad (k, n=0, \dots, N-1) \quad (式 1)$$

ここで  $X_k, x_n$  はそれぞれ加工面と LSM 面での座標、 $M, N$  は整数、 $\lambda$  はレーザーの波長で、 $f$  は SLM から加工面までの光学系によって決まる値である。ここで得られる  $\Delta\phi(x_n)$  が CGH である。計算機では、位置情報  $X_k, x_n$  は離散的であり、SLM で等間隔に素子が並んでいることを考えると、素子間隔を  $\Delta x$  とし  $x_n = n\Delta x$  とするのがよい。離散フーリエ変換では、周波数範囲の関係から、 $\Delta x$  と  $\Delta X$  は次の関係によって制限される<sup>4)</sup>。

$$\Delta x \Delta X = \lambda f / N \quad (式 2)$$

この関係から、 $X_k = k\lambda f / [\Delta x N]$  であるため、加工面での集光スポットの間隔は限られた値しか取ることができないことになる。この式から、大きい  $N$  を用いれば、集光スポットの位置の微調整ができるということが分かる。曲げ導波路を描画する時に CGH を切り替える必要があることは冒頭で述べたが、十分に大きな  $N$  を用いないと、CGH の切り替え前後で導波路がつながらなくなる。例えば、 $N=512$ 、 $\Delta x=20 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=800 \text{nm}$ 、 $f=30 \text{mm}$  の場合、 $X=2.34 \mu\text{m}$  となり、光導波路の幅が  $2 \mu\text{m}$  であれば、CGH の切り替えによって導波路が完全に分離してしまうことになる。できるだけ  $N$  を大きくするためには、SLM 面での計算領域を SLM 面の外側にも広げるようにすればよい。すなわち、SLM 面での電場分布  $F(x)$  を

$$F(x_n) = \exp[i\Delta\phi(x_n)] \quad (-N_{SLMX}/2 \leq n \leq N_{SLMX}/2 - 1)$$

$$F(x_n) = 0.0 \quad (n \leq -N_{SLMX}/2 - 1, N_{SLMX}/2 \leq n) \quad (式 3)$$

と表すことによって、 $N$  の値を大きくし、 $\Delta X$  を小さくすることができる。CGH を計算する時には、式(3)の拘束条件をフーリエ反復法に入れて、SLM の範囲のみを実験で用いる CGH とする。式(3)の表現によって、 $\Delta X$  を小さくすることができるが、 $N$  が大きくなると CGH の計算に必要な時間も長くなる。CGH を計算する時に用いたフーリエ反復法では、離散フーリエ変換が律速過程になっており、その計算時間は 2次元フーリエ変換の場合、 $(N \log_2 N)^2$  に比例する。この計算時間を短くするために、「光導波路同時描画では単純な集光スポット分布しか使わない」ということを利用した。光導波路同時描画では、集光スポットを一行に並べればよいために、例えば図Ⅲ③(2)-11 のような単純な光強度分布になる。それを利用すると、二次元の光強度分布を次のように一次元の強度分布の積で表現することができる。

$$I(X, Y) = I_X(X) * I_Y(Y) \quad (式 4)$$

これにより、一次元の強度分布  $I_x(X)$  と  $I_y(Y)$  を独立して計算すればよいために、計算時間は  $2M \log_2 N$  に比例することになる。この計算では一次元の CGH が 2 つ [ $\Delta\phi(x)$  と  $\Delta\phi(y)$ ] 得られることになるが、

$$\begin{aligned}
 I(X_k, Y_l) &= I_x(X_k) * I_y(Y_l) \\
 &\propto \left| \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} |F_x(x_m)| \exp\left(i\Delta\phi(x_m) + i2\pi \frac{x_m X_k}{\lambda f}\right) \right| \left| \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |F_y(y_n)| \exp\left(i\Delta\phi(y_n) + i2\pi \frac{y_n Y_l}{\lambda f}\right) \right| \quad (\text{式 5}) \\
 &= \left| \sum_{m,n=-N/2}^{N/2-1} |F_x(x_m)| |F_y(y_n)| \exp i\{\Delta\phi(x_m) + \Delta\phi(y_n)\} \exp\left(i2\pi \frac{x_m X_k + y_n Y_l}{\lambda f}\right) \right|
 \end{aligned}$$

より、光導波路描画で用いる CGH は単純に両者の和である式 6 を使えばよいということになる。

$$\Delta\Phi(x, y) = \Delta\phi(x) + \Delta\phi(y) \quad (\text{式 6})$$

この手法を用い、波長  $\lambda = 800 \text{ nm}$ 、パルス幅  $100 \text{ fs}$ 、繰り返し周波数  $1 \text{ kHz}$  のフェムト秒レーザーパルスを LCOS-SLM によって位相変調し、0.3 倍の縮小光学系を通した後、焦点距離  $10 \text{ mm}$  の対物レンズによって石英ガラス内部に集光照射することで曲げ導波路の描画を試みた。石英ガラスを  $20 \mu\text{m/s}$  で動かすことによって、光導波路を描画した。CGH を計算する時には、 $N=16,384$  ( $2^{14}$ ) を用いたので、集光スポット位置の分解能は、計算機上では  $\Delta X_{\text{min}} = 0.08138 \mu\text{m}$  である。

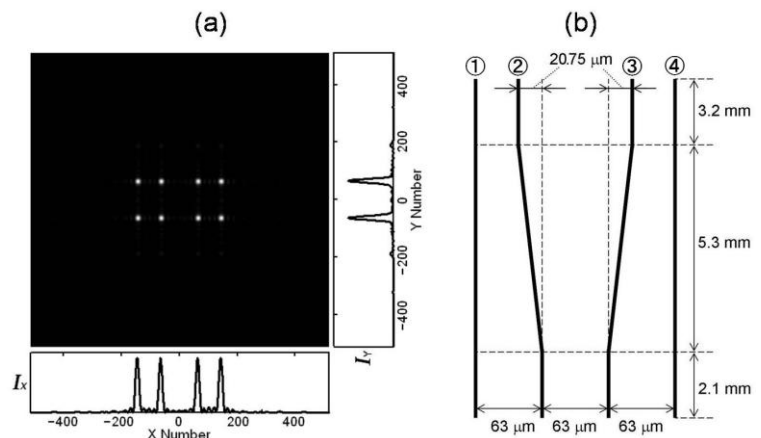
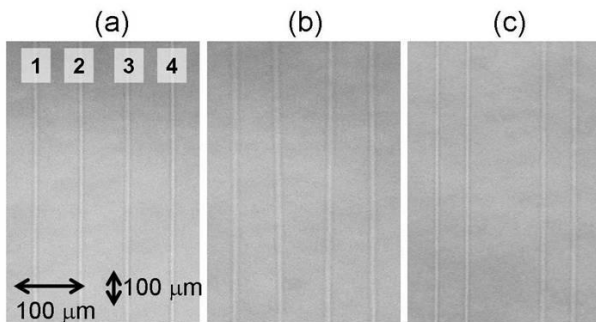


図 III ③ (2)-11 (a) 光導波路同時描画に用いる集光スポット分布の例 (b) 描画した曲げ導波路の構造

描画した曲げ導波路の構造を図 III ③ (2)-11 (b) に示した。描画を始める時の光導波路の間隔は均等であるが、途中で導波路 ② と ③ の距離が離れていき、最終的に導波路 ① と ②、③ と ④ の間隔が短くなる。描画した曲げ導波路の透過光学顕微鏡画像を図 III ③ (2)-12 (a)-(c) に示す。図 III ③ (2)-12 (a) は導波路の描画し始めであり、間隔が均等である。



III ③ (2)-12 (a) - (c) 描画した曲げ導波路の透過光波パターン結果

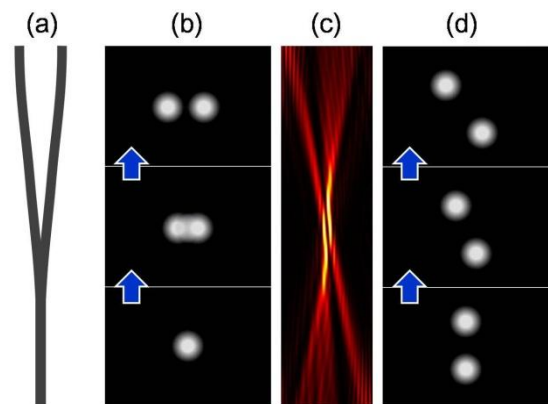
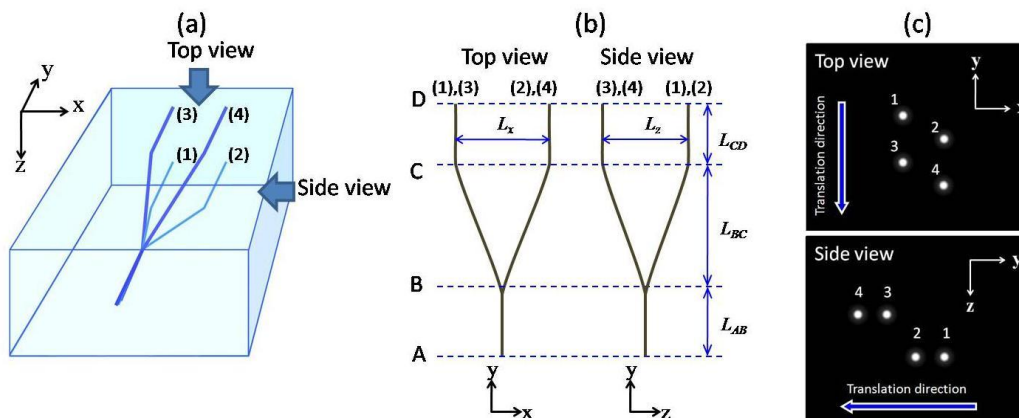


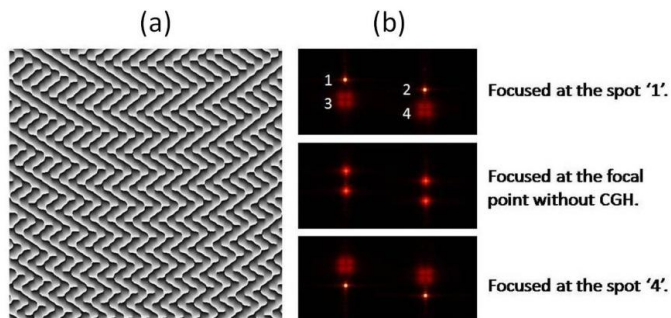
図 III ③ (2)-13 (a) Y 分岐導波路構造 (b) 直感的な Y 分岐導波路描画のための集光スポットの変化 (c) (b) の方法での 2 つの集光スポットを光軸に垂直な方向から見た光強度分布 (d) 光の干渉を受けずに Y 分岐導波路構造を描画する集光スポットの位置変化

図Ⅲ③(2)-12(b)が導波路の間隔を徐々に変えている領域であるが、光学顕微鏡で観察する限りでは、CGHの切り替えによる光導波路の途切れは見られなかった。図Ⅲ③(2)-12(c)は光導波路描画の最終段階の領域であるが、導波路①と②、③と④の間隔が短くなっている。この光導波路にHe-Neレーザーを図Ⅲ③(2)-11(b)の下方から入射して導波確認を行うと、図Ⅲ③(2)-12(b)の通りに導波することが確認された。導波の横方向の位置が異なるのは、導波路が曲がって、入射位置と出射位置が異なることに由来する。この場合、導波路①と④が直線で、②と③が曲がっているが、曲げたことによる導波光の光量は直線のものにくらべて84%程度であった。

さらに、三次元一括レーザー加工システムによる三次元分岐光導波路描画を実施した。描画方法の基本は、図Ⅲ③(2)-10に示すような複数本の光導波路を同時に描画する方法と同じである。図Ⅲ③(2)-13(a)のようなY分岐導波路を描画する場合、直感的に考えると、図Ⅲ③(2)-13(b)に示すように「1つの集光スポットを徐々に2つに分離していけばよい」となるが、実際は、集光スポット同士の干渉によって打ち消し合いが起こり、集光スポットを光軸に垂直な方向から見ると、歪んだ形に集光されてしまうことになる。このような光強度分布が形成されると、その領域で光導波路が形成されなくなる。そこで、ガラスのスキャン方向にずらした複数の集光点を横方向に動かすことによって分岐構造を作った。その方法を図Ⅲ③(2)-13(d)に示す。ガラスのスキャン中に二つの集光点が横方向に離れることによって分岐構造を作ることができる。この方法では、二つの集光点が干渉することがないために、導波路構造を確実に作製することができる。この方法により作製した分岐導波路の構造を図Ⅲ③(2)-13(a), (b)に示す。描画し始めは1本の光導波路であるが、図Ⅲ③(2)-13(b)のBからCにかけてx方向とz方向に分岐していく構造である。4つに分岐する構造を作るためには、4点の集光スポットが必要であり、その集光スポットの配置は図Ⅲ③(2)-13(c)のようになる。集光スポット#1と#3が-x方向に移動し、#2と#4が+x方向に移動する。一方、z方向では、集光スポット#3と#4が-z方向に、#1と#2が+z方向に移動する。このような集光スポット分布を形成するCGHの一例が図Ⅲ③(2)-14(a)で、シミュレーションした光強度分布が図Ⅲ③(2)-14(b)である。この場合、z方向にも光強度分布を制御する必要があるため、CGHの計算はフーリエ反復法ではなく、Optimal Rotation Angle法を用いて行った。

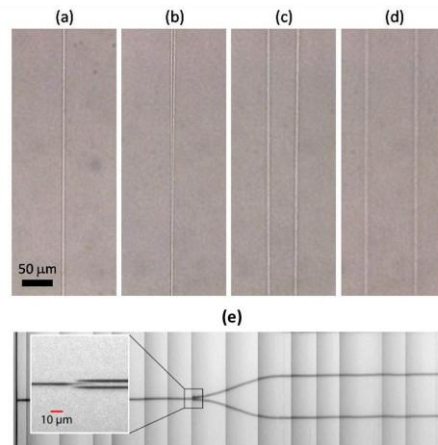


図Ⅲ③(2)-13 (a), (b)作製した1x4分岐導波路の構造 (c)1x4分岐導波路を描画する時の集光スポットの位置

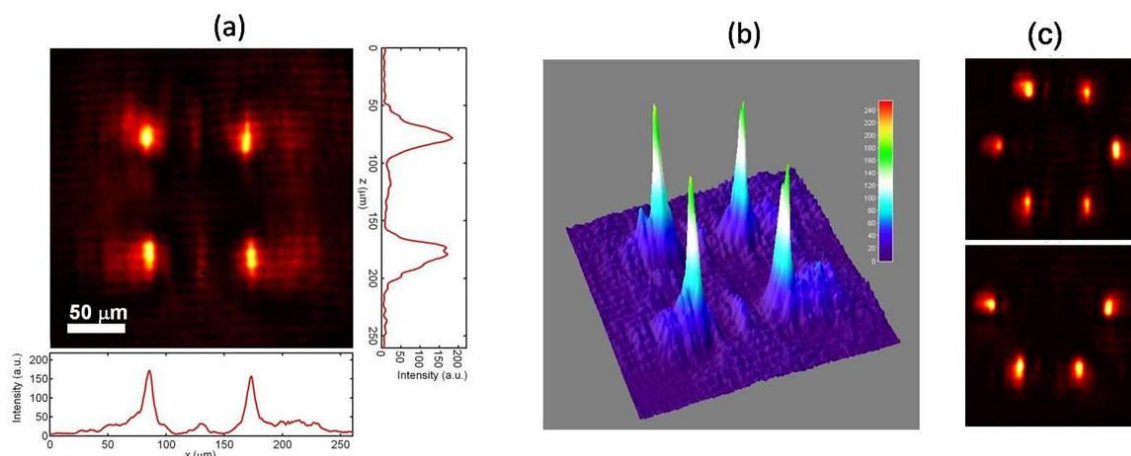


図Ⅲ③(2)-14 (a)使用したホログラムの一例, (b) (a)のホログラムのシミュレーション結果

作製した導波路の透過光学顕微鏡写真を図Ⅲ③(2)-15 に示す。全く途中でとぎれることなく分岐していることが分かる。比較として、Pospiech ら<sup>5)</sup>による SLM を用いて描画した Y 分岐導波路<sup>6)</sup>の顕微鏡画像を図Ⅲ③(2)-14 (e) に示すが、分岐の最初の領域で光導波路が途切れていることがわかる。彼らは、1つの集光スポットを2つに分離する方法を用いているが、その方法では滑らかにつながった分岐導波路を作製できないことが分かる。作製した光導波路への光伝播を図Ⅲ③(2)-16 (a), (b) に示した。はっきりと伝播した光が立体的に分岐していることがわかる。この光導波路描画方法を用いると、他の三次元分岐導波路も容易に作製することができ、例えば、図Ⅲ③(2)-16 (c) に示すような 1x6 分岐導波路や、分岐幅が高さによって異なる 1x4 分岐導波路を作製することも可能である<sup>7,8)</sup>。



図Ⅲ③(2)-15 1x4 分岐導波路の透過光学顕微鏡画像 (a) 直線領域 (b) 分岐領域 (c) 分離領域 (d) 4本の直線導波路の領域。 (e) Pospiech らによる Y 分岐導波路



図Ⅲ③(2)-16 (a) (b) 1x4 分岐導波路の光伝播。 (c) 様々な分岐導波路への光伝播

## 参考文献

- 1) S.Hiramatsu, T. Mikawa, Q. Ibaragi, K. Miura, and K. Hirao, IEEE Photonics Technol. Lett., **16**, No.9 (2004) 207
- 2) S.Hiramatsu, K.Miura, K.Hirao, Journal of Lightwave Technology, Vol.25, No.9(2007), pp.2776–2782
- 3) W. H. Press et al., 「C 言語による数値計算のレシピ」第 12 章, Cambridge University Press (1997).
- 4) Gerchberg and Saxton, Optik, 35, 237 (1972); J. R. Fienup, Appl. Opt. 21, 2758 (1982)
- 5) M. Pospiech, M. Emons, A. Steinmann, G. Palmer, R. Osellame, N. Belini, G. Cerullo, and U. Morgner, Opt. Express **17**, 3555–3563 (2009).
- 6) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma , K. Miura , K. Hirao , Jpn. J. Appl. Phys. (2009) 48, 126507.
- 7) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma , K. Miura , K. Hirao, *Opt. Express* (2010) 18, 12136–12143.
- 8) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma , K. Miura , K. Hirao, Photonic West 2011, SPIE Paper Number 7920–38.

## IV. 実用化の見通しについて

### 1. 実用化の見通しについて

#### (1) 三次元光学デバイス（光学ローパスフィルタ）

モアレの低減が確認できた。更に改善した一括加工化を進めると同時に、モアレ以外の光学特性をも含めて実用化の観点から問題点の抽出を継続研究で行い、問題が無ければ実用化の検討を行なっていく。

#### (2) 光インターコネクション

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光インターコネクション用として発展させ、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

#### (3) 光結合器

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光結合器などとして発展させて、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

#### (4) LCOS-SLM

開発してきた LCOS-SLM で適応できる分野での実用化を検討する。

#### (5) プロジェクトで開発してきた下記についても早期に市場に出るように努力したい。

- ・ホログラムシミュレータ・ホログラム加工プロセス
- ・三次元屈折率差測定機能付き形状測定器

具体的な、技術の問い合わせが来ている。

#### (6) ホログラムを使用した特殊材料の高速、微細加工の問い合わせがきており、新規分野が開拓できる可能性が高い。

#### (7) ホログラムとフェムト秒レーザーを使用した加工に興味を持ち、その市場開拓に協力を申し出られている企業が複数でてきている。

### 2. 波及効果

プロジェクトで得られた成果は、①三次元ホログラムの設計法、②ガラス・ホログラムを使用した高耐光・高速一括加工法、③光軸方向に伸展しないホログラム加工法、④レーザー加工の容易なガラス材料、⑤高速加工が可能な光学デバイス設計法、⑥低光エネルギー加工が可能な加工法などが挙げられる。これ等は汎用性があり、今後いろいろな分野での応用展開が期待できるものである。

その対象として、1. 実用化の見通しについてに記載した(1)から(5)は勿論のこと、(6)、(7)への適用が挙げられ、従来不可能と言われていた加工が低コストで可能となる。

更に、上述の得られた成果①から⑥の内、半数以上はホログラム加工とは独立に利用できるものであり、より汎用性の高い技術であり、様々な分野に波及するであろう。



## V. 成果資料

### 1. 論文リスト：査読付き

No	共著者	発表先	巻・号・ページ	論文題名
1	S. Kanehira, K. Miura, K. Fujita, K. Hirao	Proceedings. of SPIE	Vol.6413 (2006) 64130M-1-9	Nano-sized modification of transparent materials using femtosecond laser irradiation
2	K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, Hamabe and K. Hirao	Proceedings. of SPIE (Invited Paper)	Vol.6413 (2006) 64130K-1-13	Three-dimensional deposition of silicon from silicate glass with dispersed metallic aluminum by a femtosecond laser
3	Y. Shimotsuma, K. Hirao, J. Qiu, K. Miura	Journal of Non-crystalline Solids	Vol.352 (2006) pp.646-656	Nanofabrication in transparent materials with a femtosecond pulse laser
4	Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, J. Qiu, P. G Kazansky, K. Fujita	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	Vol.7 (2007) pp.94-104	Application of femtosecond-laser induced nanostructures in optical memory
5	M. Sakakura, M. Terashima, K. Miura, K. Hirao	The Leview of Laser Engineering	Vol.35, No.2 (2007) pp.109-115	Methods for observation of material deformations and energy dissipation processes during a femtosecond laser machining inside transparent materials
6	M. Sakakura M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Optics Express	Vol.15, No.9 (2007) pp.5674-5686	"Observation of pressure wave generated by focusing a femtosecond laser pulse inside a glass"
7	M. Sakakura M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Optics Express	Vol.15, No.25 (2007) pp.16800-16807	"Heating and rapid cooling of bulk glass after photoexcitation by a focused femtosecond laser pulse"
8	Y. Shimotsuma	Proc. of SPIE	Vol. 6458, 64580L-1-16 (2007)	Formation of silicon structures in silicate glass by femtosecond laser
9	S. Hiramatsu, K. Miura, K. Hirao	Journal of Lightwave Technology	Vol.25, No.9(2007), pp.2776-2782	Optical Backplane Connectors Using Three-Dimensional Waveguide Arrays
10	M. Hamabe, K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Nishi, K. Hirao	Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.	Vol.22(2007), pp.5-8	Three-dimensional Deposition of Silicon Structure from Silicate Glass with Dispersed Metallic Aluminum by Femtosecond Laser Irradiation
11	S. Kanehira, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics Letters	Vol.93,(2008), pp.023112-1-3	Ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation
12	M. Sakakura, M. Shimizu, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics Letters	Vol.93 (2008) pp.231112-231114	Temperature distribution and modification mechanism inside glass with heat accumulation during 250kHz irradiation of femtosecond laser pulses
13	K. Miura, K. Hirao, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira	Applied Physics A	Vol.93 (2008) pp.183-188	Formation of Si structure in glass with a femtosecond laser
14	M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka	Applied Physics Letters	Vol.93,(2008), pp.041116-1-3	Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram
15	S. Kanehira, K. Miura, K. Hirao, N. Shibata, Y. Ikuhara	Smart Processing Technology	Vol.2 (2008) pp.163-166	Writing of nano-micro structure using femtosecond laser irradiation
16	M. Sakakura, M. Terazima, K. Miura, Y. Shimotsuma, K. Hirao	Proceedings of SPIE	Vol.6985 (2008) 698509	Dynamics of bulk modification inside glass by femtosecond laser

17	Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Shimizu, K. Miura, P. G. Kazansky, K. Hirao	Proceedings of SPIE	Vol.6985 (2008) 698503	Three-dimensional nanomodification with ultrafast pulse laser
18	M. Shimizu, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, T. Yuasa, H. Honma, Y. Minowa, K. Tanaka, K. Miura, K. Hirao	Optics Express	Vol. 17 (2009) pp. 46-54	Periodic metallo-dielectric structure in diamond
19	H. Itoh, N. Matsumoto, T. Inoue	Optics Express	Vol.17, (2009), pp.14367-14373	Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller
20	K. Hirao, M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma, K. Miura, B. Hua, T. Nakaya	Proceedings of LAMP2009	pp.1-6	Three-dimensional nano- architecture in glasses using the combination of fs laser pulses and the new LCOS modulator/parallel drawing of bended optical waveguides
21	M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Japanese Journal of Applied Physics	Vol.48 (2009) p.126507	Parallel Drawing of Bent Optical Waveguides Using a Spatial Light Modulator
22	A. Stone, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, G. Stone, P. Gupta, K. Miura, K. Hirao, V. Dierolf, H. Jain	Optics Express	Vol.17, No.25 (2009) 23284-23289	Directionally controlled 3D ferroelectric single crystal growth in LaBGeO <sub>5</sub> glass by femtosecond laser irradiation
23	M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7358 (2009) 735816	Holographic 3D micro- fabrication by femtosecond pulse laser
24	M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka	Journal of Optoelectronics and Advanced Materials	to be published	Three dimensional holographic microfabrication by single femtosecond laser pulse
25	H. Kawashima, M. Yamaji, J. Suzuki, S. Tanaka	Proceedings of ICALEO2009	pp.1495-1499	Microfabrication of Gratings inside a Transparent Material Using Femtosecond Laser Processing with Computer Generated Hologram
26	川島勇人、山地正洋、鈴木潤 一、田中修平	日本光学会第 34 回光学シン ポジウム講演予 稿集	pp.57-58	計算機ホログラムに基づくフェムト秒 レーザー加工技術を用いた光学素 子の製作実験
27	J. Suzuki, M. Yamaji, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7201, 72011C (2009)	Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram
28	J. Suzuki, Y. Arima, M. Yamaji, H. Kawashima, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7589, 75890T (2010)	Curved-waveguide fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram
29	T. Hashimoto, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7920 (2011) pp.792018	Evaluation of a refractive index profile for a modification induced by focused femtosecond laser irradiation in the optical glasses
30	J. Suzuki, Y. Arima H. Kawashima, M. Yamaji, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7925 (2010) pp.79251D	Optical device fabrication using Femtosecond Laser processing with glass-hologram
31	H. Kawashima, M. Yamaji, J. Suzuki, Y. Arima, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7925 (2010) pp. 79251C	Invisible Two-dimensional Barcode Fabrication inside a Synthetic Fused Silica by Femtosecond Laser Processing Using a Computer-generated Hologram

32	M. Ohnishi, H. Shikata, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics A	Vol.98 (2010) pp.123-127	Micro-hole processing of polyimide film by ultra-short laser pulses and its applications
33	N. Wu, Y. Shimotsuma, M. Nishi, M. Sakakura, K. Miura, K. Hirao	Journal of the Ceramic Society of Japan	Vol.118, No.2 (2010)pp.147-151	Photo-initiation of ZnO nanorod formation by femtosecond laser irradiation
34	M. Kumatoriya, T. Fujii, M. Nakabayashi, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, H. Murata, Y. Okamura	Report on the 397th Topical Meeting of the Laser Society of Japan	No. RYM-10-11, pp.27-31	Fabrication and propagation properties of waveguides in LiTaO3 by using femtosecond laser pulses
35	T. Matsuoka, M. Nishi, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Journal of the Ceramic Society of Japan	Vol.118, No.7 (2010)pp.575-578	Selective growth of gold nanoparticles on FIB-induced amorphous phase of Si substrate
36	M. Shimizu, K. Miura, M. Sakakura, M. Nishi, Y. Shimotsuma, S. Kanehira, T. Nakaya, K. Hirao	Applied Physics A	Vol.100 (2010) pp.1001-1005	Space-selective phase separation inside a glass by controlling compositional distribution with femtosecond laser irradiation
37	Y. Shimotsuma, M. Sakakura, P. G. Kazansky, M. Beresna, J. Qiu, K. Miura, K. Hirao	Advanced Materials	Vol.108, No.7(2010) pp.073533 1-10	Ultrafast Manipulation of Self- Assembled Form Birefringence in Glass
38	S. Zhou, N. Jiang, K. Miura, S. Tanabe, M. Shimizu, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, M. Nishi, J.g Qiu, K. Hirao	Journal of American Ceramics Society	Vol.132 (2010) pp.17945-73952	Simultaneous Tailoring of Phase Evolution and Dopant Distribution in the Glassy Phase for Controllable Luminescence
39	M. Shimizu, M. Sakakura, M. Ohnishi, Y. Shimotsuma, T. Nakaya, K. Miura, K. Hirao	Journal of Applied Physics	Vol.108 (2010) p.073533	Mechanism of heatmodification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses
40	M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Laser C hemistry	(2010) pp.128268-1-15	Elastic and thermal dynamics in femtosecond laser-induced structural change inside glasses studied by the transient lens method
41	S. Kanehira, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, M. Eida, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics A	Vol.101 (2010) pp.81-85	Phase control on iron silicieds using femtosecond laser irradiation
42	S. Koyama, Y. Miyamoto, A. Fujiwara, H. Kobayashi, K. Ajisawa, H. Komori, Y. Takei, H. Nanto, T. Kurobori, H. Kakimoto, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, T. Yamamoto	Sensors and Materials	Vol.22, No.7 (2010)pp.377-385	Environmental radiation monitoring utilizing solid state dosimeters
43	Y. Miyamoto, K. Kinoshita, H. Kobayashi, A. Fujiwara, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, T. Yamamoto, T. Kurobori, T. Yanagida, A. Yoshikawa, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Sensors and Materials	Vol.22, No.5 (2010)pp.235-245	Ionizing radiation sensor utilizing Radiophotoluminescence in Ag+-activated phosphate glass and its application to environmental radiation monitoring
44	Y. Miyamoto, K. Kinoshita, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, T. Yamamoto, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Nuclear Instruments & Methods in Physics Research	Vol.619 (2010) pp.71-74	Emission and excitation mechanism of radiophoto- luminescence in Ag+-activated phosphate glass

		Section A		
45	Y. Miyamoto, T. Yamamoto, K. Kinoshita, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, K. Hirao	Radiation Measurements	Vol.45 (2010) pp.546-549	Emission mechanism of radiophotoluminescence in Ag-doped phosphate glass
46	C. Moon, S. Kanehira, K. Miura, E. Tochigi, N. Shibata, Y. Ikuhara, K. Hirao	Journal of Applied Physics	Vol.109 (2011) p.013517	Morphology change from nanocrack into periodic pore array formed by femtosecond laser pulses
47	M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Journal of Applied Physics	Vol.109 (2011) p.023503	Thermal and shock induced modification inside a silica glass by focused femtosecond laser pulse
48	M. Kumatoriya, M. Nakabayashi, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, T. Fujii, K. Hirao	Optical Review	Vol.18, No.1 (2011) pp.166-170	Optical properties of a waveguide written inside a LiTaO3 crystal by irradiation with focused femtosecond laser pulses
49	A. Stone, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, G. Stone, P. Gupta, K. Miura, K. Hirao, V. Dierolf, and H. Jain	Journal of Non- Crystalline Solids	Vol. 356 (2010) pp. 3059-3065	Formation of ferroelectric single crystal architectures in LaBGeO5 Glass by Femtosecond vs. continuous-wave lasers
50	M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma, K. Miura, and K. Hirao	Optics Express	Vol.18, No.12 (2010) pp.12136-12143	Fabrication of threedimensional 1 × 4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam

## 2. 講演・口頭発表リスト

No	発表者	発表先	発表年月日	発表題名
1	田中修平	京都国際融合創造センター NEDO 光集積ラボラトリー (スタートアップセミナー)	2006/09/27	「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス 高効率製造技術」へ
2	田中修平	日本光学会(応用物理学会) 光学 設計研究グループ 第 37 回研究 会	2007/04/20	「ナノガラス技術」の光デバイスへの実 用化展開
3	兼平真悟	LAMP 2006	2006/5/16-19	Fabrication of periodic nano-void structure in glass via femtosecond laser irradiation
4	下間靖彦	セラ協関西支部第1回 学術講演会	2006/7/20	フェムト秒レーザーによる偏光依存ナノ 構造の形成
5	下間靖彦	8th International Otto Schott Colloquium	2006/7/23-27	Three-dimensional nanostructuring of glass by using ultrashort pulse laser
6	三浦清貴	8th International Otto Schott Colloquium	2006/7/23-27	Silicon deposition from silicate glass with dispersed metallic aluminum by femtosecond laser irradiation
7	下間靖彦	応用物理学会 第67回秋季 学術講演会	2006/8/29-9/1	フェムト秒レーザーによる金属ナノワイ ヤの形成
8	兼平真悟	応用物理学会 第67回秋季 学術講演会	2006/8/29-9/1	フェムト秒レーザーを利用した異方性 ナノ構造の形成
9	下間靖彦	京都大学化学系 COE 合同シンポジウム	2006/9/5	フェムト秒レーザーによる無機材料へ の機能性付与
10	兼平真悟	セラ協第19回秋季シンポ	2006/9/19-21	フェムト秒レーザーを利用した局所転

				位構造の形成
11	三浦清貴	多元技術融合光プロセス研究会	2006/11/29	フェムト秒レーザーによる誘起構造形成とナノ加工
12	兼平真悟	Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems 2006	2006/12/10-13	Nano-sized modification of transparent materials using femtosecond laser irradiation
13	三浦清貴	Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems 2006	2006/12/13	Formation of silicon structures in silicate glass by femtosecond laser
14	兼平真悟	レーザー学会 第27回 年次大会	2007/1/17-18	ファイラメント現象を利用した透明材料の微細加工
15	兼平真悟	the 17th Meeting on Glasses for Photonics	2007/1/29	Local ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation
16	兼平真悟	日本化学会第87 春季年会	2007/3/25-28	フェムト秒レーザーを用いたナノ構造作製
17	平尾 一之	国際セラミックス総合展 2007	2007/4/5	ナノガラスの研究の現状と展望
18	三浦 清貴	IMI Glass Workshop in Washington DC 招待講演	2007/4/15-17	Modification of Glass by FS Laser for Optical Memory Applications
19	平尾 一之	Primavera Italiana Workshop "From Misro to Nanotechnology"	2007/5/17	Micro and nano-optical technologies for glasses
20	平尾 一之	レーザ加工学会 第68回 講演会	2007/5/21	ガラス材料へのフェムト秒レーザー加工の展開
21	坂倉 政明	FLAMN2007	2007/6/25-28	Dynamics of bulk modification inside glass by femtosecond laser
22	下間 靖彦	FLAMN2007	2007/6/25-28	Three-dimensional nanomodification with ultrafast pulse laser
23	平尾 一之	ICG 2007 International Congress on Glass	2007/7/5	Recent development of nano-glass technology applied to glass products
24	三浦 清貴	COLA2007	2007/9/23-29	Formation of Si structure in the glass with a femtosecond laser
25	坂倉 政明	光化学討論会	2007/9/26	屈折率時空間観測法によって観察したフェムト秒レーザー加工における圧力波発生と高速冷却過程
26	兼平 真悟	平成 19 年度 第 2 回ガラス科学技術研究会	2007/10/16	超短パルスレーザーを用いた透明材料のナノ加工
27	三浦 清貴	ULTRAFAST Solution Seminar	2007/10/23・11/2	透明材料における fs レーザプロセッシングの特長と可能性
28	西 正之	Pac Rim 2007	2007/11/11-14	Synthesis and shape control of noble-metal nano/micro materials using thiol molecules
29	兼平 真悟	the 2nd International Symposium on Smart Processing Technology	2007/11/27-28	Writing nano-micro structure using femtosecond laser irradiation
30	三浦 清貴	第 48 回ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2007/11/30	fs レーザーによる材料内部プロセッシングの特徴と光デバイス応用
31	坂倉 政明	Gordon Research Conference "PHOTOACOUSTIC & PHOTOTHERMAL PHENOMENA"	2008/2/10-15	Acoustic and thermal dynamics in the structural change induced by a focused femtosecond
32	坂倉 政明	平成 19 年度 衝撃波シンポジウム	2008/3/18	ガラスの会部加工にもなうレーザー誘起圧力波の観測

33	坂倉 政明	第 55 回応用物理関係連合講演会	2008/3/29	ガラス内部のフェムト秒レーザー加工における圧力波のパルス幅依存
34	下間 靖彦	Progress In Electromagnetics Research Symposium 2008	2008/3/23-/28	Polarization-dependent memory of light via ultrashort pulse laser irradiation
35	伊藤 晴康、原 勉、井上 卓、福智 昇央、松本 直也	レーザー学会学術講演会第28回 年次大会	2008/1/30-2/1	高強度フェムトレーザー用波面制御モジュールの開発
36	福智 昇央、原 勉、向坂 直久、井上 卓、松本 直也	2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会	2008/03/27-30	LCOS-SLM による可変焦点レンズ検証実験
37	大村 誠	2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会	2008/03/27-30	フォトニック結晶レンズの光学設計
38	伊藤晴康、原勉、井上卓、福智昇央、松本直也	2008 年春季第 55 回応用物理学関係連合講演会	2008/3/27-30	LCOS-SLM による可変焦点レンズ検証実験
39	平尾一之	第4回国際ナノテク会議	2008/4/14	Nano-architecture with a femtosecond laser
40	平尾一之	Joint Conferences of The 2nd International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics(STAC) and The 1st International Conference on Science and Technology of Solid Surface and Interface (STSI)	2008/5/31-6/1	Nano-architecture for Glass Materials
41	三浦清貴	エクストリームフォトニクスセミナー	2008/6/12	フェムト秒レーザーパルスによる材料内部加工の特徴
42	伊藤晴康、原勉、井上卓、福智昇央、松本直也	2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会	2008/9/2-/5	空間光位相変調器を用いた球面収差補正の検討
43	三浦清貴	日本セラミックス協会 第21回秋季シンポジウム	2008/9/18	レーザーによるガラス内部への元素分布形成
44	三浦清貴	2nd International symposium on filamentation 2008, Paris, France	2008/9/23	Characteristics of femtosecond laser processing for glass materials
45	山地正洋	MOC 2008, Belgium, Brussels	2008/9/25-27	Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram
46	平尾一之	Materials Science & Technology 2008(MS&T08) Conference & Exhibition	2008/10/6	Nano-architecture in Glasses with a Femtosecond Laser
47	平尾一之	日本セラミックス協会関西支部 平成 20 年度支部セミナー	2008/11/21	レーザーによるセラミックスの精密加工の最前線 - 三次元光デバイス製造技術 -
48	鈴木潤一、山地正洋、田中修平	Photonic West 2009 San Jose, California, USA	2009/1/27	Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram
49	三浦清貴	第107回ニューガラス研究会	2009/1/28	フェムト秒レーザープロセッシングの特徴
50	山地正洋、川島 勇人、鈴木潤一、田中修平	2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会	2009/3/30-4/2	フェムト秒レーザーとホログラムを用いた三次元加工

51	平尾一之	国際セラミックス総合展2009	2009/4/8-10	光とガラスが切り開く新情報産業の創成
52	川島勇人、鈴木潤一、田中修平	SPIE Symposium on Optics and Optoelectronics 2009	2009/4/20-23	Holographic 3D Microfabrication by Femtosecond Pulse Laser
53	山地正洋、川島勇人、鈴木潤一、田中修平	E-MRS 2009	2009/6/11	Three dimensional holographic microfabrication by femtosecond laser pulse
54	平尾一之	the 3rd Science and Technology for Advanced Ceramics	2009/6/17	Three-dimensional Nanoarchitecture in Glasses using the Combination of fs laser pulses and the new LCOS modulator
55	平尾一之	the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing	2009/6/29	Three-dimensional Nano-architecture in Glasses using the Combination of fs laser pulses and the new LCOS modulator
56	山地正洋、川島勇人、鈴木潤一、田中修平	Nonlinear Optics	2009/7/16	Three dimensional microfabrication by single pulse femtosecond laser through binary phase hologram
57	兼平真悟、文致原、三浦清貴、柴田直哉、幾原雄一、平尾一之	第4回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会	2009/7/23	超短パルス光を用いた局所欠陥注入
58	清水雅弘、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	第4回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会	2009/7/23	フェムト秒レーザー照射による熱蓄積効果
59	保田直美、清水雅弘、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	第4回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会	2009/7/23	ガラス内部への元素分布を利用した光導波路形成
60	坂倉政明	先端フォトニック情報メモリアーチセンター 第15回トピカル懇話会	2009/8/31	超短パルスレーザーによる材料プロセスとホログラムを用いた三次元光デバイス高効率製造システム
61	下間靖彦、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之	2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会	2009/9/8-11	偏光依存酸素欠陥構造の超高速制御
62	坂倉政明、澤野勉、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会	2009/9/8-11	空間位相変調したフェムト秒レーザーによるガラス内部への曲げ導波路一括描画
63	坂倉政明、栄田壮亮、兼平真悟、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会	2009/9/8-11	単結晶内部でのフェムト秒レーザー誘起応力波と局所転位形成
64	兼平真悟、三浦清貴、平尾一之、柴田直哉、幾原雄一	日本セラミックス協会 第22回秋季シンポジウム	2009/9/16-18	レーザー誘起転位の光学的解析
65	兼平真悟	第19回三次元ナノ・マイクロ構造研究集会	2009/10/6	フェムト秒レーザーで描くナノ・マイクロの世界
66	坂倉政明	電気学会「極限レーザーマテリアル科学・レーザ加工とその応用調査専門委員会」	2009/10/16	ダイナミクスと温度解析から見える透明固体材料内部のフェムト秒レーザー加工の特徴

66	平尾一之	セラミックス総合研究会	2009/10/22	フェムト秒レーザーと新規開発空間変調器を用いたガラス内部の三次元ナノ構造形成
67	平尾一之	株式会社 KRI クライアントカンファレンス	2009/10/28	先進フォトニクス材料の展開と評価
68	三浦清貴	第 50 回ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2009/10/29-30	フェムト秒レーザー-ガラス材料プロセスの特徴と可能性
69	川島 勇人、山地正洋、鈴木潤一、田中修平	ICALEO 2009	2009/11/3-4	Microfabrication of Grating Inside a Transparent Material Using Femtosecond Laser Processing with Computer Generated Hologram
70	平尾一之	泉科学技術振興財団 財団創設20周年記念事業シンポジウム	2009/11/13	光機能ナノガラスが切り開くフォトニックネットワークの未来
71	平尾一之	固体・表面光化学討論会第28回 討論会	2009/11/22	フェムト秒レーザー光化学を利用した固体・表面の構造制御
72	三浦清貴	10th International Conference on Laser Ablation	2009/11/22-27	Formation of elemental distribution in glass with a femtosecond laser
73	兼平真悟、栄田壮亮、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	10th International Conference on Laser Ablation	2009/11/22-27	Phase Control of Iron Silicides using Femtosecond Laser Irradiation
74	伊藤晴康、松本直也、井上卓	日本光学会年次学術講演会	2009/11/24-26	屈折率ミスマッチ球面収差の空間光変調器を用いた高精度補正
75	伊藤晴康、松本直也、井上卓	レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会	2010/2/2-4	多点制御における空間光変調器を用いた球面収差の検証
76	鈴木 潤一、有馬靖智、山地 正洋、川島 勇人、田中 修平	Photonics West 2010 San Francisco, California, USA	2010/1/27	Curved-Waveguide fabrication using femtosecond laser pulse processing with glass hologram
77	坂倉政明、清水雅弘、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会	2010/2/2-4	フェムト秒レーザーによるガラスの内部加工での光吸収量の計測
78	清水雅弘、三浦清貴、坂倉政明、西正之、下間靖彦、兼平真悟、平尾一之	日本セラミックス協会 2010 年 年会	2010/3/22-24	元素分布制御によるガラス内部への局所的な相分離の誘起
79	橋本智弘、田中修平	E-MRS 2010(European Material Research Society) Strasbourg, France	2010/6/10	Large negative refractive index modification induced by irradiation of femtosecond laser inside optical glasses
80	川島 勇人、山地 正洋、鈴木潤一、田中 修平	ICALEO 2010 Anaheim, California, USA	2010/9/25-10/20	Microdrilling of Sheet Materials with Femtosecond Laser Pulse  Shaped by Computer Generated Hologram
81	山地 正洋	Frontiers in Optics NewYork, USA	2010/10/28	Homogeneous and Elongation-free 3D Microfabrication
82	川島 勇人、山地正洋、鈴木 潤一、田中 修平	第 74 回レーザー加工学会講演会 @東京大学 生産技術研究所	2010/12/6	計算機ホログラムを用いたフェムト秒レーザー照射による合成石英ガラス基板への微細貫通穴あけ



				加工の実現
83	田中修平	JPCフォーラム 1 月定例会 (NPO 日本フォトニクス協議 会)	2011/1/19	三次元光デバイスとニューガラス フォーラム
84	橋本智弘、田中 修平	Photonics West 2011 (SPIE ; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers )	2011/1/24	Evaluation of a refractive index profile for a modification induced by focused femtosecond laser irradiation in the optical glasses
85	鈴木潤一、有馬 靖智、川島勇人 、山地 正洋、田 中 修平	Photonics West 2011 (SPIE;The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers )	2011/1/24	Optical device fabrication using femtosecond Laser processing with glass-hologram
86	川島勇人、山地 正洋、鈴木 潤 一、有馬靖智、 田中 修平	Photonics West 2011 (SPIE ; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers )	2011/1/24	Invisible Two-dimensional Barcode Fabrication inside a Synthetic Fused Silica by Femtosecond Laser Processing Using a Computer-generated Hologram
87	熊取谷誠人、中 林 幹、三浦清 貴、藤井高志、 平尾一之	7th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication	2010/4/19	Formation of Induced Structures in LiTaO3 Using Femtosecond Laser Pulses
88	清水雅弘、三浦 清貴、坂倉政 明、西正之、下 間靖彦、兼平真 悟、平尾一之	FLAMN-10	2010/7/5	Localized phase separation inside glass by femtosecond laser- induced elemental migration
89	下間靖彦、坂倉 政明、P. G. Kazansky 三浦 清貴、平尾一之	CLEO/QELS: 2010	2010/5/18	Manipulation of form birefringence in isotropic material
90	坂倉政明、清水 雅弘、下間靖 彦、三浦清貴、 平尾一之	FLAMN-10	2010/7/5	Fundamental studies of heat modification inside glasses by repeated irradiation with ultrashort laser
91	三浦清貴、清水 雅弘、下間靖 彦、坂倉政明、 兼平真悟、平尾 一之	ISNOG 2010	2010/6/13	Formation Mechanism and applications of laser induced elemental distribution in glasses
92	兼平真悟、文致 原、柴田直哉、 栃木栄太、幾原 雄一、三浦清 貴、平尾一之	iib 2010	2010/6/27	Defect in oxide single crystals formed by femtosecond laser pulses
93	濱田裕也、西正 之、下間靖彦、 三浦清貴、平尾 一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Sol-Gel synthesis of Au-nanoparticle dispersed bicontinuous macroporous siloxane gel
94	西村、兼平真 悟、坂倉政明、 下間靖彦、三浦 清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Silicon precipitation in glass via photoinduced reaction using femtosecond laser
95	山本、下間靖 彦、坂倉政明、 西正之、三浦清 貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Preparation of Nd2Fe14B nanoparticles under femtosecond laser ablation in liquid

96	保田、清水雅弘、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Formation of elemental distribution in glasses by femtosecond laser irradiation
97	伊藤宗太郎、西正之、金森主祥、中西和樹、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	(3-Mercaptopropyl)trimethoxysilane-derived porous gel monolith via thioacetal reaction-assisted sol- gel route
98	山本、下間靖彦、坂倉政明、西正之、三浦清貴、平尾一之、佐川	日本セラミックス協会関西支部 第5回学術講演会	2010/7/16	液相レーザーアブレーション法による Na <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B ナノ粒子の作製
99	中林幹、熊取谷誠人、三浦清貴、坂倉政明、西正之、下間靖彦、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Light propagation through femtosecond laser induced waveguide inside lithium tantalate single crystal
100	石川雄一郎、下間靖彦、坂倉政明、兼平真悟、西正之、三浦清貴、平尾一之	2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会	2010/9/14	フェムト秒レーザー照射による ZnO 結晶内部への誘起構造形成
101	朽尾孝哉、坂倉政明、兼平真悟、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会	2010/9/14	MgO 結晶内部でのレーザー誘起構造変化における応力波干渉の効果
102	西村、兼平真悟、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2010 MRS Meeting	2010/11/29	Formation of silicon and silicon-based semiconductor materials via photoinduced reaction using femtosecond laser
103	坂倉政明、澤野、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会	2010/9/14	空間位相変調による光スポット形成と光導波路レーザー描画への影響
104	兼平真悟	Visual-JW2010	2010/11/11	Phase transformation at interface using femtosecond laser irradiation
105	清水雅弘、保田直美、坂倉政明、兼平真悟、西正之、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2010/12/16	レーザーによるガラス内部の元素移動制御
106	西村将和、兼平真悟、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2010/12/16	光誘起反応によるガラス/多層膜接合体への Fe-Si 結晶析出と制御
107	坂倉政明、澤野勉、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2010/12/16	液晶空間光変調器 LCOS-SLM と超短パルスレーザーを用いたガラス内部への高効率三次元加工
108	X.Wang、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Molecular Radical Orientation Arrangement by Femtosecond Laser Irradiation inside Sodium Germanate Glass
109	松岡智代、西正之、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Selective grows and SERS property of gold nanoparticles on amorphized silicon surface

110	松岡智代、西正之、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之、 D. Palima、 S. Tauro、 A. Banas、 J. Gluckstad	Photonic West 2011	2011/1/22	Manipulating functionalizes 2PP structures on the biophotonics workstation
111	松岡智代、西正之、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之、 D. Palima、 S. Tauro、 A. Banas、 J. Gluckstad	2nd Annual Workshop on Photonic Technologies for Access and Biophotonics	2011/1/31	Functionalization of 2PP structures for optical manipulation on the biophotonics workstation
112	栢尾孝哉、坂倉政明、兼平真悟、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2011 年春季 第 58 回 応用物理学学会学術講演会	2011/3/24	単結晶内部のレーザー誘起過渡応力イメージング
113	伊藤宗太郎、西正之、金森主祥、中西和樹、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	セラ協 2011 年会	2011/3/16	チオアセタール反応アシストゾルゲル法によるモノリス多孔体の合成
114	石川雄一朗、下間靖彦、坂倉政明、兼平真悟、西正之、三浦清貴、平尾一之	セラ協 2011 年会	2011/3/16	フェムト秒レーザー照射による ZnO 結晶内部への誘起構造形成
115	三浦清貴	関西ナノテクノロジー推進会議 総括シンポジウム	2010/4/12	先端光技術を用いた光デバイス三次元一括加工の現状と展望
116	平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/17	Photonic Materials
117	三浦清貴	(財)光産業技術振興協会・光材料・応用技術研究会	2010/11/19	超短パルスレーザーによる三次元光デバイス製作技術
118	三浦清貴	日本板硝子材料工学助成会・無機材料に関する最近の研究成果発表会	2011/1/24	ホログラフィックレーザー加工によるガラス材料への機能性付与
119	坂倉政明	第 17 回レーザー夏の学校	2010/8/28	過渡的温度分布・応力分布から見える透明固体内部のフェムト秒レーザー加工の特長
120	兼平真悟	第 17 回レーザー夏の学校	2010/8/28	レーザー光を用いた透明材料における欠陥構造制御

### 3. 雑誌投稿リスト

No	著者名	投稿先	巻・号・ページ等	発表題名
1	田中修平	月刊オプトロニクス 2007 年 2 月号特集 注目!! 光ナノテク最前線	No.2, pp.100-108 (2007)	「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス高効率製造技術」へ
2	田中修平	日経ナロビジネス	平成 18 年 12 月	「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス

			25 日号	ス高効率製造技術」へ
3	三浦 清貴、 平尾 一之	化学工業	Vol.58, No.1 (2007) pp.1-7	フェムト秒レーザー加工によるフォトニクス材料の創製
4	田中 修平	工業材料(日刊工業出版プロダクション発行)	Vol.56, No.1 (2008) pp.62-63	ワイド特集; 工業材料キーワード50 ナノガラス 「実用化に向けた高速加工」
5	三浦 清貴	オプトロニクス	Vol.26, No.12 (2007) pp.90-98	レーザーによるガラスの内部構造改質
6	三浦 清貴	光アライアンス	Vol.18, No.8 (2007) pp.54-59	フェムト秒レーザー材料プロセッシング
7	平尾 一之	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.42-43	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 『プロジェクト開始にあたって』
8	三浦 清貴	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.44	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 『京都大学での取り組み』
9	原 勉	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.45-46	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 (浜松ホトニクスでの取り組み)
10	田中 修平	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.47-49	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 (ニューガラスフォーラムでの取り組み)
11	三浦 清貴	NEW GLASS	Vol.23, No.2 (2008) pp.42-45	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線『京都大学における三次元光デバイス研究の現状』
12	三浦清貴、平尾一之、下間靖彦、坂倉政明	未来材料	2008 年 8 月号 pp.14-21	三次元光デバイス製造技術「フェムト秒レーザープロセッシング」
13	原 勉	NEW GLASS	Vol.23, No.3 (2008) pp.54-60	空間光変調器と三次元光デバイス高効率製造技術
14	田中修平	NEW GLASS	Vol.23, No.4 (2008) pp.69-71	34th European Conference and Exhibition on Optical Communication & 14th Microoptics Conference 参加雑記 (MOC で Best Paper Award を受賞)
15	田中修平	用途別ガラス部材の改善と要素技術の最前線 出版;(株)情報機構	2008 年 12 月号 第 14 章	フェムト秒レーザー技術
16	田中修平	”	2008 年 12 月号 ”	ホログラムによる三次元高速加工・高精度加工
17	田中修平、鈴木潤一、山地正洋、川島勇人	NEW GLASS	Vol.23, No.4 (2008) pp.39-41	ホログラムを通過した1パルスの超短パルスレーザー光で三次元造形をガラス内部に作製する方法
18	三浦清貴	シーエムシー出版 月刊「機能材料」	Vol.29(4), 2009 pp.18-27	フェムト秒レーザープロセッシングの特長と可能性

19	伊藤晴康、大林寧、田中博、原勉	月刊「オプトロニクス」	Vol.28(4),2009 pp.218-223	空間光変調器によるレーザー光波面制御とその応用
20	伊藤晴康、原勉、大林寧	シーエムシー出版 月刊「機能材料」	Vol.29(4),2009 pp.28-36	空間光変調器によるレーザー光波面制御
21	田中修平	シーエムシー出版 月刊「機能材料」	Vol.29(4),2009 pp.6-17	～機能材料を甦らせるフェムト秒レーザー三次元加工技術～ 三次元高速・高精度加工技術とは
22	田中修平、鈴木潤一、山地正洋、川島勇人	シーエムシー出版「先端ガラスの産業応用と新しい加工」	2009,8/28 発行 pp.100-118	第2編第3章 ガラスホログラムとフェムト秒レーザーによるガラス内部の高速・高精度三次元一括加工
23	岩井実 田中修平	NEW GLASS	Vol.24, No4(2009) pp.45-47	ガラス内部に形成した異質相の三次元形状測定と屈折率の非破壊測定
24	田中修平	NEW GLASS	Vol.24, No4(2009) pp.48-50	2009 OSA Optics & Photonics Congress 四方山話
25	下間靖彦	月刊「機能材料」	Vol.24, No4(2009) pp.37-45	フェムト秒レーザーを利用したナノマテリアル形成
26	兼平真悟	月刊「機能材料」	Vol.24, No4(2009) pp.46-53	レーザー加工の現状
27	坂倉政明	月刊「機能材料」	Vol.29, No.4 (2009) pp.54-64	超高速時間分解観測装置の開発とフェムト秒レーザー加工の観測
28	三浦清貴	NEW GLASS	Vol.24, No2 (2009) pp.56-65	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線『「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトにおける京都大学の研究』
29	下間靖彦	O plus E	Vol.31, No.7(2009) pp.717-718	一枚の写真「It's a small world?」
30	坂倉政明、平尾一之、三浦清貴	OPTRONICS	No.4 (2009) pp.190-196	レーザー誘起圧力波の観察から見るフェムト秒レーザー加工の特長
31	平尾一之、三浦清貴、坂倉政明、下間靖彦	GS Yuasa Technical Report	Vol.6, No.2 (2009) pp.1-6	フェムト秒レーザーと新規開発空間変調器を用いた三次元ナノ構造形成
32	三浦清貴、平尾一之、坂倉政明	マテリアルインテグレーション	2009年11月号 (Vol.22 No.12)	レーザー照射によるガラス内部からの半導体(Si)析出とその制御
33	三浦清貴	シーエムシー出版 先端ガラスの産業応用と新しい加工	2009,8/28 発行 pp.67-80	第2編 第1章 fsレーザーによる内部加工の特徴
34	坂倉政明	シーエムシー出版 先端ガラスの産業応用と新しい加工	2009,8/28 発行 pp.81-98	第2編 第2章 液晶空間光変調器とレーザーによるガラスの一括三次元加工
35	三浦清貴	シーエムシー出版 先端ガラスの産業応用と新しい加工	2009,8/28 発行 pp.180-195	第3編 第3章 光デバイス用ナノガラスアーキテクチャー
36	澤野勉、三浦清貴、坂倉政明、平尾一之	NEW GLASS	Vol.25, No1 (2010) pp.34-35	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線『「三次元光デバイス高効率製造技術」を活用した回折光学素子の作製』
37	原勉	NEW GLASS	Vol.25, No2 (2010) pp.31-33	空間光変調器と三次元光デバイス高効率製造技術
38	田中修平、山地正洋、川島勇人、鈴木潤一	NEW GLASS	Vol.25, No3 (2010) pp.36-39	ガラスホログラムにより 75 フェムト秒で作製した三次元微細加工構造

39	平尾一之	Nanofiber	Vol.1, No.1 (2010) pp.7-10	機能性フレキシブルガラス
40	平尾一之	光アライアンス	Vol.21, No.9(2010) pp.49-52	ナノガラス材料の変遷と最新の展開
41	三浦清貴、下間靖彦、坂倉政明、平尾一之	NTS 出版 セラミックス機能化ハンドブック	(2010) pp.120-130	ガラス材料内部へのフェムト秒レーザー照射

#### 4. 展示会、プレス発表等

No	発表者名	発表先	発表年月日	発表題名
1	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	化学工業日報	2006/9/12	低コストでガラス中に三次元構造
2	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	ガラス時報	2006/9/17・24 合併号	三次元光デバイス高効率製造技術 開発へ
3	平尾一之	日経産業新聞	2007/2/15	ナノガラス事業 技術伝承へ人材育成図る
4	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nano tech 2007 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議(東京ビッグサイト)	2007/2/21-23	NEDOプロジェクト 「三次元光デバイス高効率製造技術」
5	平尾一之	日本経済新聞	2007/10/19	ガラス内に光通信回路
6	田中修平	日経産業新聞	2008/2/6	光素子回路 ガラス内に瞬時に作製
7	田中修平	化学工業日報	2008/2/21	ガラス内部に三次元構造 0.1秒以下で作製
8	田中修平	つくばサイエンスニュース ( <a href="http://www.tsukuba-sci.com">http://www.tsukuba-sci.com</a> )	2008/2/4-2/10 (No.2008-7)	ガラス内部に三次元光導波路を一括形成する新技術を開発
9	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nanotech2008 (国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)	2008/2/13-15	【NEDOプロジェクト】三次元光デバイス高効率製造技術
10	平尾一之	産経新聞	2008/4/12	特殊レーザーで光回路形成 超高速化技術を開発
11	田中修平	NTRニュース(日本板硝子テクノロジーサーチ発行)	2008/4 36号	ホログラムでガラス内部に三次元デバイスを瞬時に作製
12	田中修平	日経産業新聞	2008/8/20	ガラス内部への「24層三次元スパイラル構造の一括形成に成功」
13	田中修平	日刊工業新聞	2008/8/20	ガラス内部への「25層三次元スパイラル構造の一括形成に成功」
14	橋本智弘、田中修平 共同発表;(株)オハラ	セミコン・ジャパン2008	2008/12/3-5	フェムト秒レーザー加工によるガラスの高機能化(パネルとサンプル展示)
15	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nanotech2009 (国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)	2009/2/18-20	【NEDOプロジェクト】三次元光デバイス高効率製造技術
16	田中修平	電気硝子工業会見学会	2009/9/11	三次元光デバイスの説明とつくば研究室の見学
17	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nanotech2010 (国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)	2010/2/17-19	【NEDOプロジェクト】三次元光デバイス高効率製造技術

## 5. 受賞実績

- ① 平成 19 年 2 月 21～23 日、東京ビッグサイトにて開催された nano tech 2 0 0 7 展示会（国際ナノテクノロジー総合展・技術会議）において、**NEDO 独創技術賞**を受賞した。
- ② 2008 年 9 月、14<sup>th</sup> MICROOPTICS CONFERENCE BRUSSELS-BELGIUM にて、**BEST PAPER AWARD** を受賞  
“Three dimensional holographic micropatterning inside silica glass by single pulse femtosecond laser”（ニューガラスフォーラム、つくば研究室）
- ③ 2008 年 10 月、Materials Science & Technology 2008、Conference & Exhibition、“Nano-architecture in glasses with a femtosecond laser” **海外最優秀講演賞**（京大・平尾研）

## 6. 特許リスト

No	出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人
1	2007/3/30	2007-94634	反射型光変調装置	大林寧
2	2007/11/14	2007-295931	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也、井上卓、福智昇央、伊藤晴康
3	2007/12/5	2007-315066	反射型空間光変調素子	伊藤晴康、大林寧、福智昇央
4	2008/2/8	2008-029185	光学部品用ガラス材料及びそれに用いるガラス組成物	橋本 智弘
5	2008/3/12	2008-062417	回折格子型光学ローパスフィルタ	大村 誠
6	2008/1/15	2008-006004	観察装置	松本直也、伊藤晴康、福智昇央、山内豊彦
7	2008/1/16	2008-007173	観察装置	松本直也、伊藤晴康、福智昇央、山内豊彦
8	2008/1/24	2008-014024	観察装置	松本直也、伊藤晴康、福智昇央、山内豊彦
9	2008/6/19	PCT/JP2008/061252	反射型光変調装置	大林寧
10	2008/8/26	2008-216742	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也、井上卓、福智昇央、伊藤晴康
11	2008/8/26	PCT/JP2008/065191	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也、井上卓、福智昇央、伊藤晴康、瀧口優
12	2008/9/1	2008-223582	収差補正方法及びこの収差補正方法を用いたレーザ加工方法	伊藤晴康、松本直也、井上卓
13	2008/9/1	2008-223975	レーザ光照射装置およびレーザ光照射方法	伊藤晴康、松本直也、井上卓
14	2008/9/16	2008-237010	組成分布を生じる光学部品用透明材料及びこれを利用する光学部品	平尾一之、三浦清貴、下間靖彦、富田礼子、田中修平、橋本智弘、山口勝彦
15	2008/10/2	2008-257408	光学部品用ガラス材料及びそれに用いるガラス組成物	橋本智弘
16	2008/11/28	2008-304748	光変調装置	伊藤晴康、井上卓、松本直也
17	2008/12/3	12/327259	反射型空間光変調素子	伊藤晴康、大林寧、福智昇央
18	2008/12/3	102008060281.7	反射型空間光変調素子	伊藤晴康、大林寧、福智昇央
19	2009/2/12	2009-029934	レーザ光照射装置及び照射方法	坂倉政明、平尾一之、三浦清貴、下間靖彦、福智昇央、伊藤晴康
20	2009/4/30	2009-110906	レーザ加工装置及びレーザ加	伊藤晴康、松本直也

			工方法	
21	2009/4/30	2009-110912	レーザ加工装置	伊藤晴康, 松本直也
22	2009/5/25	2009-125759	収差補正方法、この収差補正方法を用いたレーザ加工方法、この収差補正方法を用いたレーザ照射方法、収差補正装置、及び、収差補正プログラム	伊藤晴康, 松本直也, 井上卓
23	2009/8/24	PCT/JP2009/064725	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也, 井上卓, 福智昇央, 伊藤晴康
24	2009/8/27	PCT/JP2009/064939	収差補正方法、この収差補正方法を用いたレーザ加工方法、この収差補正方法を用いたレーザ照射方法、収差補正装置、及び、収差補正プログラム	伊藤晴康, 松本直也, 井上卓
25	2009/9/1	098129424	収差補正方法、この収差補正方法を用いたレーザ加工方法、この収差補正方法を用いたレーザ照射方法、収差補正装置、及び、収差補正プログラム	伊藤晴康, 松本直也, 井上卓
26	2009/9/30	2009-228250	光学部品用ガラス材料、光学部品の製造方法及び光学部品用ガラス組成物	橋本智弘
27	2009/11/26	PCT/JP2009/069946	光変調装置およびレーザ加工装置	伊藤晴康, 井上卓, 松本直也

## 7. 学会発表特記事項

米国のレーザー学会である **Laser Institute of America** のホームページに下記の二つのカテゴリーで、2010年9月に開催された学会での発表論文が取り上げられた。

- ① ‘Laser Microprocessing’ Category . . . 9件採択の一つ。
- ② ‘Laser Drilling’ . . . 4件採択の一つ。



VI. その他資料

1. イノベーションプログラム基本計画

研究開発プログラム(イノベーションプログラムに改編)の中で実施

イノベーションプログラムについて 第23回研究開発小委員会(平成20年5月16日)資料

- 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)
  - 経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。
  - 各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。
- 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)
  - 先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ2005/2006/2007/2008』)。
  - 研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。

<p><b>IT IPG</b></p> <p>①ITコア技術の革新 114億円 ②省エネ革新 67億円 ③情報爆発への対応 41億円 ④情報システムの安全性等 50億円</p> <p>小計 272億円</p>	<p><b>ナノテク・部材 IPG</b></p> <p>①ナノテク加速化領域 36億円 ②情報通信領域 31億円 ③ライフサイエンス領域 19億円 ④エネルギー・資源・環境領域 60億円 ⑤材料・部材領域 32億円 ⑥共通 6億円</p> <p>小計 184億円</p>	<p><b>ロボット・新機械 IPG</b></p> <p>①ロボット関連技術開発 24億円 ②MEMS・分析機器 22億円</p> <p>小計 46億円</p>	<p><b>健康安心 IPG</b></p> <p>①創薬・診断技術開発 96億円 ②診断・治療機器・再生医療等の技術開発 30億円</p> <p>小計 126億円</p>
<p><b>エネルギー IPG</b></p> <p>①総合エネルギー効率の向上 817億円 ②運輸部門の燃料多様化 358億円 ③新エネルギー等の開発・導入促進 488億円 ④原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保 258億円 ⑤化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用 554億円</p> <p>小計 1,447億円※2</p>	<p><b>環境安心 IPG</b></p> <p>①地球温暖化防止新技術 42億円 ②3R 13億円 ③環境調和産業/バイオ 56億円 ④化学物質総合評価 16億円</p> <p>小計 127億円</p>	<p><b>航空機・宇宙産業 IPG</b></p> <p>①航空機産業の基盤技術力の維持・向上 163億円 ②宇宙産業の国際競争力強化 69億円</p> <p>小計 232億円※3</p>	

※1:各イノベーションプログラムにおけるプロジェクトの重複を排除した額 ※2:各サブプログラムで重複があるため小計と一致しない ※3:一部、財投出資(50億円)、関連予算(8億円)を含む

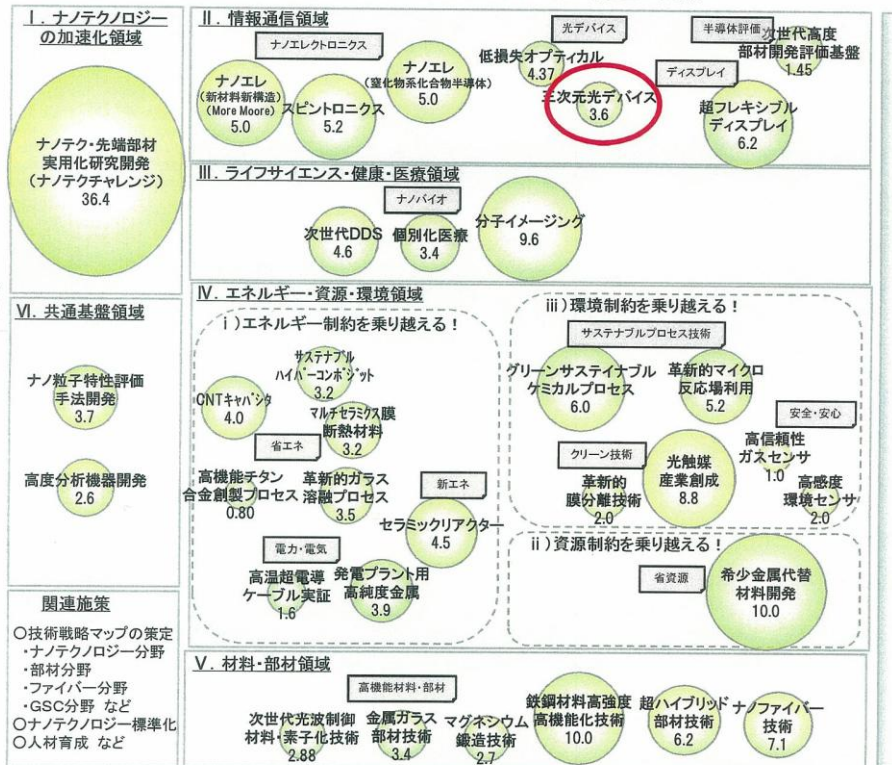
平成20年度まではナノテクノロジープログラムの位置付けで実施

ナノテク・部材イノベーションプログラム

【平成20年度予算額:184.5億円】

- あらゆる分野に対して高度化・不連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立！
- 我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服！

0-38



IPGの目標

世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する！

我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに、部材産業の付加価値の増大を図る！

ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る！

希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す！

ナノテクノロジー分野のロードマップ(02電子情報\_光デバイス)

技術領域	要素技術	機能	ナノテク技術課題	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020					
光導波路	家庭内、車内ネットワーク、光インターコネクション	低損失 低結合損失 (耐熱性)	目標仕様(三次元光デバイス)			三次元加工エクスチム 露光導波路・直径 9 $\mu$ m		90 $\mu$ m/シングルスロット 80 $\mu$ m加工精度<40nm			三次元分岐(1x16) 挿入損失<17dB													
			三次元一階屈折(パターンニング)に適したガラス材料開発				屈折率差>0.01		屈折率差>0.015															
			フェムト秒レーザーの一階屈折を利用した三次元光導波路デバイス作製				0.15dB/cm(1.5 $\mu$ m,SM)		0.14dB/cm(1.5 $\mu$ m,SM)															
			目標仕様			0.1dB/cm(1.25 $\mu$ m) 0.08dB/cm(0.25 $\mu$ m)		0.09dB/cm(1.5 $\mu$ m) 0.02dB/cm(0.25 $\mu$ m)																
			精密材料設計・精密量産(耐熱、透明材料、その他の耐環境性スペックを持つ材料の開発)																					
	幹線系ネットワーク	高速化、広帯域化	耐熱性	目標仕様			光MUX/DEMUX (430Gb/s, 1 $\times$ 2) (400Gb/s, 8Ch)		光MUX/DEMUX (160Gb/s), 光3波															
				精密材料設計(高品質半導体量子井戸の育成、量子シミュレーション、半導体スピントロニクス)																				
				ナノ加工(数十nm)																				
				広帯域ナノ材料埋め込み導波路																				
				目標仕様			動作電圧1V 変調周波数100GHz		動作電圧0.8V 変調周波数130GHz															
	家庭内ネットワーク	高帯域化、高効率化	耐熱性	目標仕様																				
				精密材料設計(2D/3D-主観者格の剛直化による分子配向性の向上)																				
				電極配置、進行波型構造最適化技術(含ソルゲル)																				
				材料の微細ナノ加工(接合、蒸着) (先実用器作製)																				
				目標仕様			動作電圧1V 変調周波数100GHz		動作電圧0.8V 変調周波数130GHz															

## 2. プロジェクト基本計画

P06029

(ナノテク・部材イノベーションプログラム・ITイノベーションプログラム)  
「三次元光デバイス高効率製造技術」基本計画

ナノテクノロジー・材料技術開発部

### 1. 研究開発の目的、内容及び目標

#### (1) 研究開発の目的

21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」及びITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする「ITイノベーションプログラム」の一環として、本プロジェクトを実施する。

ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化、省エネ化等のニーズに対応するためには、今後ますます高機能化が求められる。ガラスは結晶材料に比べ、組成の選択範囲が連続的で広く、かつ構造の自由度が大きい。このため組成と構造の多くの組み合わせが可能で、それに伴い種々の潜在的特性・機能があると考えられる。しかし従来技術は、組成の制御と熱処理等、マクロな構造制御に終始しており、ごく一部の特性や機能しか実現できていない。ガラスが本来有している潜在的な特性や機能を有効に引き出すためには、ガラス母材とはその物性の異なった異質相をガラス内部に作製し積極的に新たな機能をガラスに誘起する必要がある。このような基盤技術の開発は「ナノガラス技術」プロジェクトで実施されてきた。本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトで得られた基盤技術を実用的な加工技術へと発展させるものであり、フェムト秒レーザー等と波面制御技術等を組み合わせ、加工の高精度化によるデバイス特性の向上と加工の高速化による製造コストの大幅な低減を目指すものである。

また本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。

本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。

#### (2) 研究開発の目標

平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術等を確立する。

また、具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性を実証する。

### (3) 研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

- ① □デバイス化加工用ガラス材料技術
- ② □三次元加工システム技術
- ③ □三次元加工システム応用デバイス技術

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO技術開発機構が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体には研究開発責任者（プロジェクトリーダー）国立大学法人京都大学 大学院工学研究科 材料化学専攻 教授 平尾一之を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

## 3. 研究開発の実施期間

平成18年度から平成22年度までの5年間とする。

## 4. 評価に関する事項

NEDO技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成20年度、事後評価を平成23年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他の重要事項

### (1) 研究開発成果の取扱い

#### ① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO 技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

- a) 実現手法の確立、体系的整理
- b) 新たな特性データの取得・整備
- c) 試験・評価方法、ツールの提供
- d) 標準（デファクトスタンダードを含む）への提案、取得

#### ② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

#### ③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 26 条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

#### ④ 成果の供試・開示の報告

本研究によって得られたあらゆる知的財産、また本研究の過程または成果に基づき開発したプログラム、サンプルもしくは装置などの成果物について、本プロジェクト外（国内外）への供試・開示については、事前にプロジェクトリーダーと NEDO 技術開発機構に連絡する。その際に、NEDO 技術開発機構が申請書の提出を求めた場合は、これに応じ速やかに提出する。

### (2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

### (3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 項第 2 号に基づき実施する。

### (4) その他

「ナノテク・部材イノベーションプログラム」で実施される他のプロジェクトと連携を図りつつ実施することとする。

## 6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成 18 年 3 月 制定。
- (2) 平成 18 年 6 月、研究開発責任者（プロジェクトリーダー）の決定に伴い改訂。
- (3) 平成 20 年 7 月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

## (別紙) 研究開発計画

### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

#### 1. 研究開発の必要性

ガラスの原子・分子レベルの構造を制御すれば、従来のマクロな構造制御では実現できなかった、ガラス材料の光学的、電磁氣的、機械的及び化学的等の優れた特性や機能を、有効に引き出すことが期待できる。

そのために、従来のマクロな構造制御とは異なった新たな手法、つまり、外部場（光、イオン、電子、電界、熱及び圧力等）をガラス材料に作用させることによって、母材の組成変化を起こさずに、1～数百nmレベルの屈折率を変えた領域（以下において異質相と呼ぶ）の形状と配列を適正に制御することが可能となる。外部場の例としては、フェムト秒レーザーやイオンや電子ビーム等が挙げられる。従って、これらの外部場と相互作用を効率よく行えるガラス材料が必要となる。一方、このような材料で作製するデバイスに使用できることが必須の条件となる。例えば、光学デバイスにあっては、可視光での光に対して透明であることが必須である。また、光通信の光デバイスにあっては、波長が1.2から1.7 $\mu\text{m}$ の通信帯域で光情報を低伝播損失で伝送できることが重要である。

従って、このようなデバイスから要求されるガラス母材と上述の各種外部場で異質相が形成できる材料とが一致する必要がある。このようなデバイスに適したガラス材料を作製する必要がある。本研究では、世の中で広範囲に使用され適用範囲の広いと考えられる光学デバイスと光導波路の作製に適した材料を開発する。

#### 2. 具体的研究内容

研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」と連携をとりながら研究を進める。具体的には、光学デバイスの代表的な光学ローパスフィルタと光回路デバイスの代表的な光回路導波路デバイスを作製するために必要なガラス材料を開発する。

##### (1) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

- ・光学ローパスフィルタを目標として、この実現に必要な光学デバイス用ガラス材料を開発する。
- ・研究項目②～③に適した「高精度で高速加工」が可能なガラス材料を開発する。

##### (2) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

- ・三次元光回路導波路デバイスの基本回路である導波路とその三次元化応用デバイスである光カップラ（スプリッタ）導波路デバイスを目標として、この実現に必要な光回路デバイス用ガラス材料を開発する。

- ・研究項目②～③に適した「高精度で高速加工」が可能なガラス材料を開発する。

### 3. 達成目標

三次元光学デバイスの作製は、ガラス内部に三次元的に異質相を作製することにより形成される。異質相の三次元形状は、従来フェムト秒レーザーの照射スポットを三次元的に移動させながらガラス内部に作製された。本研究開発ではレーザーの照射スポットによる点描に代えて、ホログラム等を使用した一括照射で三次元造形を一度の照射で高速に行うものである。その結果として精度のよい三次元造形を低コストで実現できる技術を開発する。以下においては、この技術を試用するデバイス用ガラスの開発に関するものである。

#### (1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

#### (2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

##### (最終達成目標)

三次元光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400 nm～760 nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

##### (中間達成目標)

可視光領域（400 nm～760 nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

#### (3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

##### (最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つである光導波路を、ガラス内部に本プロジェクトで開発する三次元加工システムで、シングルモードでの光伝播損失として0.1 dB/cm以下（導波路サイズ：直径9 μm以下、波長：1.55 μm）を達成できるガラス材料を開発する。

##### (中間達成目標)

レーザー照射条件（パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等）の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失：0.1 dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。

## (別紙) 研究開発計画

### 研究項目②「三次元加工システム技術」

#### 1. 研究開発の必要性

ガラス中に、大きさが1～数百nmレベルの異質相の形状と配列を適正に制御して構造化（高次構造）することにより、高強度等の機械的特性、新しい概念の光学デバイス、低伝送損失等の光学的特性機能をガラスに付与することが可能となる。例えば、塑性変形により応力緩和しやすい異質相等をガラス中に形成すれば、透明性を損なうことなく高破壊靱性等優れた機械的特性を発現させられる。また、屈折率が母材と異なる異質相を光の波長の数倍から数十倍の大ききで形成すれば新規な光学デバイスを形成することが可能となる。更に、光の波長程度で周期的に配列すれば、光の回折効果等が発現する微小な人工的光結晶となる。

これらの高次構造制御されたガラス材料を作製するためには、ガラス表面及び内部に、光学的あるいは機械的特性の異なる相を高精度に周期的に形成する技術を開発する必要があり、これらはナノガラス技術で研究を進めてきた。異質相の作製はレーザーパルスの逐次照射で行なわれていたため、形成された異質相の形状精度が悪く、また形成に多大な時間が必要であり、生産技術としては使用できない状況であった。これらの問題を解決するために、本技術の開発が必要となった。

#### 2. 具体的研究内容

##### (1) 波面制御三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを、高精度で高速に作製するにはホログラムを使用して一括で異質相を形成する方法が有効である。これにより、従来の逐次形成法に比べて高精度で高速に三次元的に異質相を形成することが可能となる。このための高精度三次元加工システムに必要な光学系、波面制御素子設計用シミュレータ、形状計測技術、等を開発する。

##### (2) 空間光変調器三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを作成する場合、三次元造形を重ねて順次形状を変化させながら作製する必要が生じる。この場合に有効な造形パターンを順次変更できる可変型の三次元加工システムが必要となる。これに必要な光学系、位相変調型液晶空間光変調器、空間光変調器を用いた位相変調技術、等を開発する。

#### 3. 達成目標

##### (1) 三次元加工システム技術目標

###### (最終達成目標)

従来のフェムト秒レーザーによるガラス内部の三次元加工は、レーザー光を一点に集光させ、試料を置いたステージの三次元移動によって行っていた。本手法は、ステージの移動による三



次元加工ではなくホログラム等による波面制御により一括で三次元造形を行うもので、レーザーの照射エネルギーを有効に使用でき、従来比100倍以上の高速加工を実現する。

具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 $\mu\text{m}$ 以上の立方体の中に、直径が10 $\mu\text{m}$ 以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する。

(中間達成目標)

加工形状寸法として、直線導波路で直径9 $\mu\text{m}$ の加工を確認する。また、その加工精度として、0.9 $\mu\text{m}$ を確認する。

1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 $\mu\text{m}$ の立方体の中に、直径が10 $\mu\text{m}$ 以下の球状あるいは棒状の異質相を2層以上形成し、三次元基本加工機能を確認する。

## (2) 波面制御三次元加工システム技術

(最終達成目標)

加工精度として40nm以下を実現する。また、波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計ができる技術を開発する。なお、従来技術では64万画素での処理におよそ100時間が必要である。

(中間達成目標)

波面制御素子を従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発する。

## (3) 空間光変調器三次元加工システム技術

(最終達成目標)

空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10Hzの変調速度を50Hzに高める。光位相変調度として2 $\pi$ ラジアン以上を実現すると同時に0から2 $\pi$ までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで50 $\text{GW}/\text{cm}^2$  (100fs、1kHz)を達成する。

(中間達成目標)

変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として $\pi$ ラジアン以上を確認する。耐光性として、30 $\text{GW}/\text{cm}^2$  (100fs、1kHz)を達成する。

## (別紙) 研究開発計画

### 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

#### 1. 研究開発の必要性

本プロジェクトで開発する研究項目②「三次元加工システム技術」が実際のデバイスを作製する際に、その高精細度と高速加工性能が有効であるかを調べる必要がある。本研究項目ではこれらの点を実際に以下の二種のデバイスを作製し確認する。

#### 2. 具体的研究内容

##### (1) 三次元光学デバイス技術

屈折率が母材と異なる異質相を、フェムト秒レーザー照射等によって母材の表面に、並びに、母材の内部に、二次元あるいは三次元状に周期的に、微細、高精度で高速に形成する技術を開発する。これにより超薄型で、低コストで製作可能な光学ローパスフィルタを試作し、本三次元加工システムの有効性を確認する。

##### (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

ガラスの中に導波路やそれらの結合した三次元光回路導波路デバイスの一例として光カップラ(スプリッタ)導波路をフェムト秒レーザー照射で作製し、本三次元加工システムが光回路デバイスの作製に有効であることを確認する。

#### 3. 達成目標

##### (1) 三次元光学デバイス技術

###### (最終達成目標)

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmから10mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。

本研究開発では、一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。これにより、光学ローパスフィルタ機能を、従来の3枚から1枚に削減し、フィルタ厚0.3mm以下の光学ローパスフィルタを実現する。また、従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 $0.236^\circ$ であり、本フィルタではこれ以上の開き角度を実現する。また解像度を維持し、モアレを抑制することを確認する。

###### (中間達成目標)

光学シミュレーションにより、方向無依存機能を達成するための形状を検討する。また、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認し、

フィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認する。

## (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

### (最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つは、光導波路である。光導波路は、異質相をガラス内部に作製することにより実現できる。異質相の形状は適用デバイスにより異なり種々雑多であるが基本的なものは直線導波路である。そこで、基本的な直線導波路として、シングルモードで光伝播損失： $0.1 \text{ dB/cm}$  以下（導波路サイズ：直径  $9 \mu\text{m}$  以下、波長： $1.55 \mu\text{m}$ ）を開発する。また、本加工システムの加工機能・性能を確認するために分岐面が互いに直交した  $1 \times 16$  の三次元光カップラ（スプリッタ）導波路について、挿入損失： $1.7 \text{ dB}$  以下、反射減衰量： $45 \text{ dB}$  以上（波長： $1.50 \sim 1.60 \mu\text{m}$ ）が作製可能であることを確かめる。

### (中間達成目標)

開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失： $0.1 \text{ dB/cm}$  以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせる。

以上

### 3. 技術戦略マップ(分野別技術ロードマップ)

#### ナノテクノロジー分野の技術戦略マップ

##### I. 基本的な考え方

###### (1) 状況認識

ナノテクノロジー分野は、経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）における産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応するものである。また、第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）において、情報通信、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献し、産業の振興や人間の豊かな暮らし、安全・安心で快適な社会などを実現する重要な技術シーズであると位置づけられている。

###### (2) 研究開発の方向性と技術戦略マップ

経済産業省では、ナノテクノロジーを確立することによって国内産業の海外に対しての競争力強化につながることを期待しており、ナノテクノロジーの基盤研究の成果を実用化に結びつけるための研究開発を進めているところである。このナノテクノロジー施策の一つの指標として、2030年頃を見据え、出口（製品）を意識しながら、ナノテクノロジー分野の技術戦略マップを策定した。

なお、策定に当たっては、まずナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）との間で、彼らが策定している「ビジネス戦略ロードマップ」と技術戦略マップについての情報交換を行い、ビジネスからみたロードマップ立案と国の研究開発施策から見たロードマップ立案との関係を整理し、さらに今年度開催したナノテク分野の全てのWGにNBCIから委員として検討に加わって頂くことでビジネス戦略ロードマップ策定の過程で出た暗黙知を形式知化した。同様に、経済産業省で検討していた「繊維技術ロードマップ」策定委員についても、関係するWGに加わって頂いた。また、イノベーション創出につながる異分野融合領域への具体的取り組みとして、ナノバイオ領域の検討を行い、ロードマップを策定した。

##### II. 導入シナリオ

###### (1) 目標

2020年までに、世界最先端のものづくり国家を目指し、同時にナノテクノロジーによる新産業の創出を目標とする。

###### (2) 研究開発の取り組み

上記の目標を達成するために、経済産業省では、研究開発プログラム施策を実施し、ナノテクノロジーによる既存産業の高度化、ナノテクノロジーの標準化活動、川上・川下産業や産学の連携等の取り組みを一体的に推進している。

民間企業では、ナノテクノロジーによる高付加価値産業の立ち上げや、ナノテクノロジー

ーによる既存産業の高度化等を目指した取り組みを行っている。例えば、ナノテクノロジーによる新機能発現の材料開発、新デバイス製造技術確立のための研究開発を着実に実施している。

また、ナノテクノロジーの市場への導入・普及を促進するための取り組みとして設立された「ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)」では、新しい事業創出を目指した活動が進められている。具体的には、市場の要求(ニーズ)と技術(シーズ)のマッチングを図るため、ナノテクノロジーが資する製品や研究成果の展示、ビジネス化に向けた情報交換等のための国際展示会やセミナーの開催、ビジネスロードマップの作成などを行っている。

### (3) 関連施策の取り組み

標準化戦略として、2005年にISOにナノテクノロジーを扱うTC229が設けられ、用語、計測、環境の3つのWGにおいて、国際標準の策定がなされることとなった。さらに、2006年にはIECでもナノテクノロジーに関する電気電子技術を扱うTC113が設けられた。これに呼応し、国内でも研究開発プロジェクトの成果を基にISO、IECへの提案の策定を行う際の拠り所として技術戦略マップを活用している。

さらに連携施策群においてもナノバイオ及びナノテクの社会受容の両連携施策群を通じて関係各省庁との連携がなされており、経済産業省の研究開発の方向性を説明する際に技術戦略マップを活用している。

## Ⅲ. 技術マップ及びロードマップ

### (1) ナノテクノロジーの市場・社会ニーズと技術課題

新産業創造戦略を踏まえ、ナノテクノロジーの重要な出口分野として、環境・エネルギー、電子・情報、バイオ・医療の3分野を設定した。これら3分野に関して製品・製造技術、機能としてナノテクノロジーに求められる領域を抽出し、その領域に求められる技術を俯瞰するマップを策定した。さらに、そのような部材を製造するための共通基盤技術について、加工技術、計測技術、シミュレーション技術の3分野に分類して俯瞰する。

### (2) ロードマップの策定

本分野のロードマップでは、小項目毎に、まず「出口」、「出口に貢献するナノテクノロジー」、「技術の概要」、「技術開発課題」を示す。次いで、各重要技術の年次展開を、スペックと共に時間軸上に示す。

ナノテクノロジー分野の対象領域は極めて多岐にわたる。このため、特に施策展開から見ると重要度が高く、充実度が優先される領域から順次ロードマップを策定してきた経緯がある。2006年版までには、以下の領域について、ロードマップが策定されている。

- 電子・情報分野 (半導体、メモリ・ストレージ、光デバイス、ディスプレイ)
- ナノ計測分野
- ナノ加工分野

○ 環境・エネルギー分野（燃料電池）

○ ナノシミュレーション分野

このうち、2007年版ではナノ加工分野に於いて技術進歩の著しい「材料界面制御」、「精密ビーム加工」等の技術分野を追加検討する必要があり、併せてロードマップの充実を含めた見直しを行った。

これらに加えて、2007年版で新たに以下のロードマップの策定を行った。

○ バイオ・医療分野（再生医療）

異分野融合領域策定の理由は先に述べたとおりであるが、議論の対象とした領域については、産業化が見込まれる領域の一つと考えられる再生医療を選択した。

さらに、研究開発成果の普及、並びに、国際競争力強化の観点から、研究開発戦略と標準化戦略の一体化を図るため、技術ロードマップ策定の議論と並行して、2006年版で作成した標準化に関わるロードマップについて、ISOの動向の進展に伴い見直した。

なお、これら以外のナノテクノロジー分野が重要でないということは意味しない。2008年以降の技術戦略マップにおいても、ナノテクノロジー分野においてロードマップを策定する領域を順次拡大していく必要がある。

### (3) 重要技術の考え方とその表示

ナノ加工分野に於いては、「出口への貢献／ボトルネック性」、「ナノテクノロジーの寄与」、「技術的優位性」、「産学連携／異分野連携などの必要性」、「基盤性」、「市場・社会へのインパクト」の6つを共通な評価指標として重要技術を選定した。

バイオ・医療分野（再生医療）に於いては、「医療現場における必要性」、「医療への貢献度」、「ナノテクノロジーへの寄与度」、「技術的優位性」、「基盤性・汎用性」、「市場性・経済性」、「社会適合性」の7つを評価指標として重要技術を選定した。

また、他の分野については、委員会で行われた議論を基に事務局で総合判断を行い、重要技術を選定した。

○主として市場ニーズの充足を指向する技術

・ナノ加工分野

市場のみならず社会に対してもインパクトがあるかどうかを重要との観点からWGで個別に議論し、評点の高いものを重要技術として選定した。

こうして選定された重要技術は、技術マップ上で背景に黄色の斜線を入れることで表示した。

・電子・情報分野、環境・エネルギー分野（燃料電池）、ナノシミュレーション分野

委員会で行われた議論を基に事務局で総合判断を行い、重要技術を選定した。選定された重要技術は、同じく技術マップ上で背景に黄色の斜線を入れることで表示した。

○主として政策的及び技術的ニーズの充足を指向する技術

・バイオ・医療分野（再生医療）

医療現場の必要性、医療への貢献度といった、医療との結びつきがあるかどうかを重要

との観点からWGで個別に議論し、評点の高いものを重要技術として判断した。

こうして選定された重要技術は、技術マップ上で背景に水色の縦線を入れることで表示した。

・ナノ計測分野

委員会で行われた議論を基に事務局で総合判断を行い、重要技術を選定した。選定された重要技術は、同じく技術マップ上で背景に水色の縦線を入れることで表示した。

#### IV. 改訂のポイント

##### 1. 新規ロードマップ策定領域

###### ○バイオ・医療分野（再生医療）

イノベーション創出につながる異分野融合領域への具体的取り組みとして、ナノバイオ領域の検討を行い、再生医療にかかるロードマップを策定した。策定に当たり、客観的指標に基づく重要技術の絞り込みを行った。

##### 2. ロードマップ改訂領域

###### ○ナノ加工分野

ナノ加工分野に於いて技術進歩の著しい「材料界面制御」、「精密ビーム加工」等の技術分野を追加検討する必要がある、併せてロードマップの充実を含めた見直しを行った。策定に当たり、客観的指標に基づく重要技術の絞り込みを行った。

##### 3. 標準化ロードマップの見直し

研究開発成果の普及、並びに、国際競争力強化の観点から、研究開発戦略と標準化戦略の一体化を図るため、技術ロードマップ策定の議論と並行して、2006年版で作成した標準化に関わるロードマップについて、ISOの動向の進展に伴い見直した。

##### 4. 他技術マップとの連携

ビジネスからみたナノテクノロジーロードマップである「ビジネス戦略ロードマップ」(ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)策定)や、ナノテクノロジーとの関連が深い材料について経済産業省が策定している「繊維技術ロードマップ」との緊密な連携を図った。



4. 事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント募集の結果)

事前評価書

		作成日	平成18年2月10日
1. 事業名称 (コード番号)	三次元光デバイス高効率製造技術 (ナノテクノロジープログラム)		
2. 推進部署名	ナノテクノロジー・材料技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1) 概要</p> <p>波面制御素子あるいは空間光変調器を用いた空間光変調技術を確立し、フェムト秒レーザーを用いてガラス中に三次元造形を高精度・高速に形成できるプロセス技術を開発する。これらの技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。</p> <p>具体的な事業内容は次のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 波面制御素子の高速設計・製造技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。</li> <li>● 多品種・少量生産向けの製造技術として、空間光変調器を用いた光変調プログラマブル加工システムを開発する。</li> <li>● デバイス別ガラス組成の最適化検討をおこない、レーザー加工用ガラスを作製する。</li> <li>● 三次元光学デバイスおよび三次元光回路導波路デバイスに対し、「三次元光デバイス高効率製造技術」を適用し、同技術の有効性を実証する。</li> </ul> <p>(2) 事業規模：総事業費 20億円 (平成18年度事業費4億円)</p> <p>(3) 事業期間：平成18年度～22年度(5年間)</p>		

#### 4. 評価の検討状況

##### (1) 事業の位置付け・必要性

###### ①上位政策との関係からみた位置付け

21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とするナノテクノロジープログラムの一環として、本プロジェクトを実施する。

またナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野において「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」の有用性が指摘されており、さらに「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」が要求されている。また出口製品は新産業創造戦略重点7分野の中の「情報家電」に分類される。

###### ②事業自体の必要性

本技術の確立により、ガラスのみならず有機材料や半導体材料に対しても波面制御素子を利用した加工の実現など、将来、幅広い産業分野で利用される共通基盤技術の形成が見込まれる。また情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野に対応可能な光学デバイスの創造が期待される。

##### (2) 研究開発目標の妥当性

###### <目標>

平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術を確立する。

また、具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性を実証する。

###### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

###### (1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質層形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

###### (2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

###### (最終達成目標)

三次元光学デバイスは、光学ガラス内部に三次元的に屈折率を変えた異質相を作製することにより形成される。光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400nm～760nm）で光学ガラスと異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

###### (中間達成目標)

中間達成目標としては、光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400nm～7

60 nm) で光学ガラスと異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

### (3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

(最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つである光導波路を、ガラス内部に本プロジェクトで開発する三次元加工システムで、シングルモードでの光伝播損失として0.1 dB/cm以下(導波路サイズ: 直径9 μm以下、波長: 1.55 μm)を達成できるガラス材料を開発する。

(中間達成目標)

レーザー照射条件(パルスエネルギー, 繰り返し周波数, 波長等)の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失: 0.1 dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。

## 研究項目②「三次元加工システム技術」

### (1) 三次元加工システム技術目標

(最終達成目標)

従来のフェムト秒レーザーによるガラス内部の三次元加工は、レーザー光を一点に集光させ、試料を置いたステージの三次元移動によって行っていた。本手法は、ステージの移動による三次元加工ではなくホログラム等による波面制御により一括で三次元造形を行うもので、レーザーの照射エネルギーを有効に使用でき、従来比100倍以上の高速加工を実現する。

具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 μm以上の立方体の中に、直径が10 μm以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する。

(中間達成目標)

加工形状寸法として、直線導波路で直径9 μmの加工を確認する。また、その加工精度として、0.9 μmを確認する。

1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 μmの立方体の中に、直径が10 μm以下の球状あるいは棒状の異質相を2層以上形成し、三次元基本加工機能を確認する。

### (2) 波面制御三次元加工システム技術

(最終達成目標)

加工精度として40 nm以下を実現する。また、波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計ができる技術を開発する。なお、従来技術では64万画素での処理におよそ100時間が必要である。

(中間達成目標)

波面制御素子を従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発する。

### (3) 空間光変調器三次元加工システム技術

(最終達成目標)

空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に

対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10Hzの変調速度を50Hzに高める。光位相変調度として $2\pi$ ラジアン以上を実現すると同時に0から $2\pi$ までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで $50\text{GW}/\text{cm}^2$  (100fs、1kHz)を達成する。

(中間達成目標)

変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として $\pi$ ラジアン以上を確認する。耐光性として、 $30\text{GW}/\text{cm}^2$  (100fs、1kHz)を達成する。

### 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

#### (1) 三次元光学デバイス技術

(最終達成目標)

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmから10mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。

本研究開発では、一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。これにより、光学ローパスフィルタ機能を、従来の3枚から1枚に削減し、フィルタ厚0.3mm以下の光学ローパスフィルタを実現する。また、従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 $0.236^\circ$ であり、本フィルタではこれ以上の開き角度を実現する。また解像度を維持し、モアレを抑制することを確認する。

(中間達成目標)

光学シミュレーションにより、方向無依存機能を達成するための形状を検討する。また、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認し、フィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認する。

#### (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

(最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つは、光導波路である。光導波路は、異質相をガラス内部に作製することにより実現できる。異質相の形状は適用デバイスにより異なり種々雑多であるが基本的なものは直線導波路である。そこで、基本的な直線導波路として、シングルモードで光伝播損失： $0.1\text{dB}/\text{cm}$ 以下(導波路サイズ：直径 $9\mu\text{m}$ 以下、波長： $1.55\mu\text{m}$ )を開発する。また、本加工システムの加工機能・性能を確認するために分岐面が互いに直交した $1\times 16$ の三次元光カプラ(スプリッタ)導波路について、挿入損失： $17\text{dB}$ 以下、反射減衰量： $45\text{dB}$ 以上(波長： $1.50\sim 1.60\mu\text{m}$ )が作製可能であることを確かめる。

(中間達成目標)

開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失： $0.1\text{dB}/\text{cm}$ 以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。

同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせる。

<妥当性>

次世代情報通信システムにおいては、ナノレベルでの高度な基盤的技術開発が不可欠であり、本事業は技術的リスクが高く、民間企業単独では産業化までを実現することは困難であるため、産官学の参加を得て、研究開発を実施することが適切である。目標設定は有識者ヒアリングなどで意見を聴取し、妥当性について更なる検討を行う必要がある。

(3) 研究開発マネジメント

公募を行い最適な研究開発体制を構築する。基盤技術を確立し、ユーザーを垂直連携に参加させ、実用化までの加速を計る。

プロジェクト開始後3年目に中間評価を予定しており、その評価結果を踏まえ事業全体について見直しを行うことを想定している。

(4) 研究開発成果

高機能ナノガラス部材を高効率に製造できるプロセス技術を確立させ、産業化を推進することにより、ガラス部材が数多くのキーデバイスとして用いられているデジタル家電、光学機器、光通信関連の産業競争力が強化される。

(5) 実用化・事業化の見通し

本プロジェクトの成果による民間需要創出効果(2015年)はニューガラス市場(2005年6月社団法人ニューガラスフォーラム)をもとに算出すると約1千8百億円と見込まれ、本プロジェクトの事業規模を約20億円(平成18年度から平成22年度までの総予算額)としていることから、本プロジェクトは投資より大きな需要を創出するものと見込まれる。

(6) その他特記事項

5. 総合評価

NEDOの実施する事業として適切であると判断する。

## 2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

# 4.1 事業の位置付け・必要性 及び研究開発マネジメント

公開

ナノテク・部材イノベーションプログラム  
ITイノベーションプログラム

「新機能創出ガラスの加工技術開発／

## 三次元光デバイス高効率製造技術」(事後評価)

(2006年度～2010年度 5年間)

### プロジェクトの概要 (公開)

NEDO

電子・材料・ナノテクノロジー部

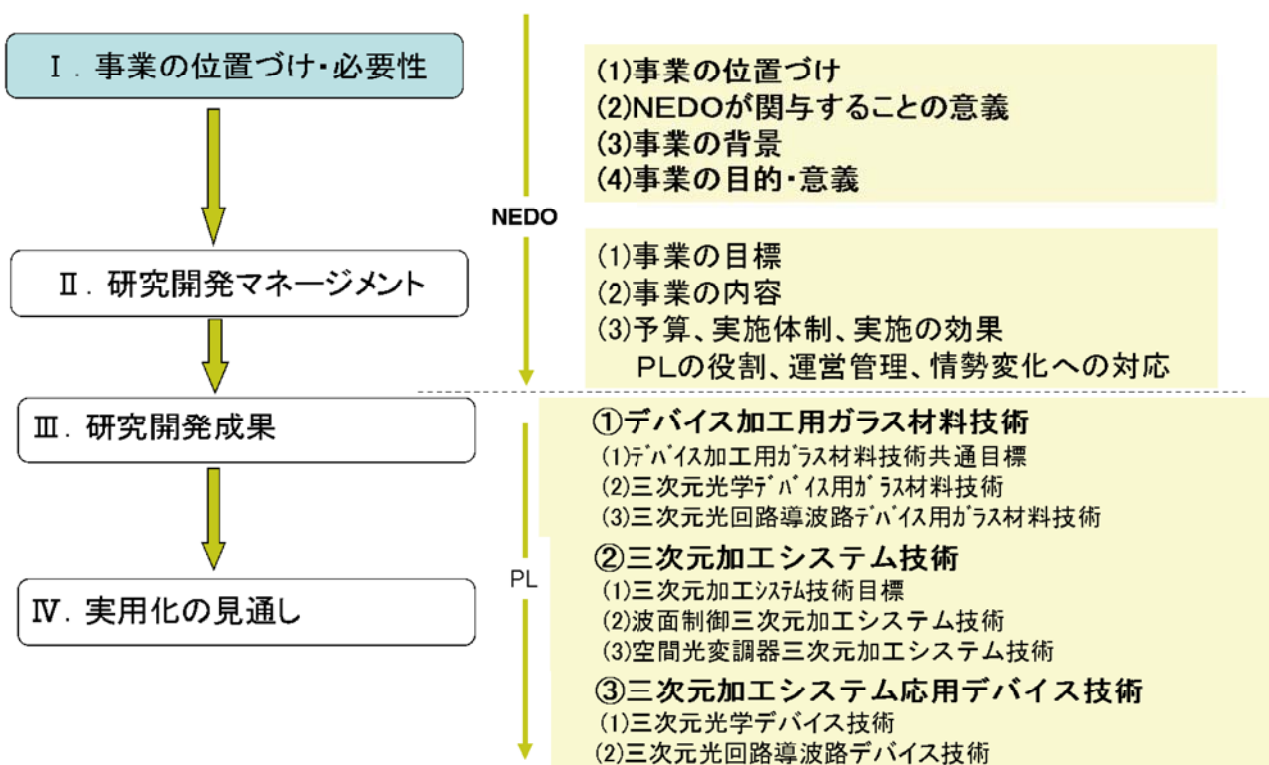
2011年 6月 23日

事業原簿 20-66、394-395、406-409頁

1/25

### 発表内容

公開



事業原簿 20-33頁

2/25

### 三次元光デバイス高効率製造技術・開発の背景

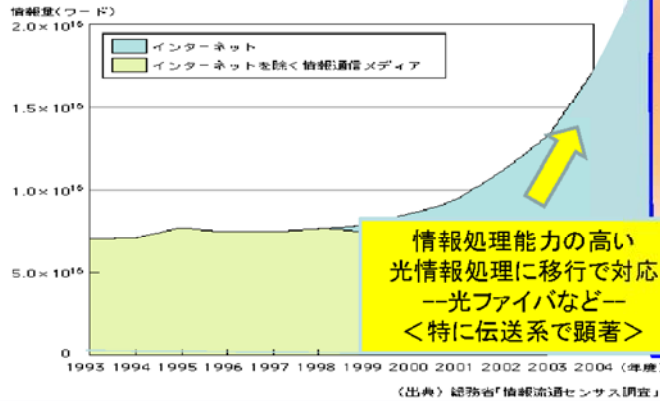
爆発的に増大する情報処理量に対応するオール光情報処理への位置づけ

消費電力 大

消費電力 小

電気配線の限界 ⇒ 光インターコネクション ⇒ オール光通信処理

インターネットの普及で情報量/消費電力が急激に増加



プロジェクト  
2006.7~2011.2

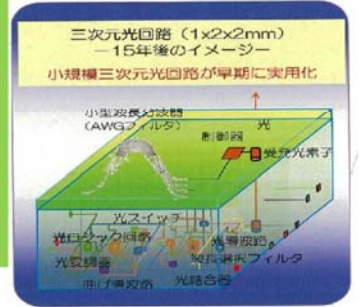
基本技術  
を新機能  
ガラスに  
試用

光インター  
コネクション  
への展開

集積化  
光回路  
デバイス  
への応用



集積化光回路デバイス



2015年

2020年

スイッチ、経路等を含めてネットワークのオール光化が必要

オール光通信処理技術の一部として「三次元光デバイス高効率製造技術」を登録

参考

3/25

### 電気配線の限界と光インターコネクションの導入

2020年

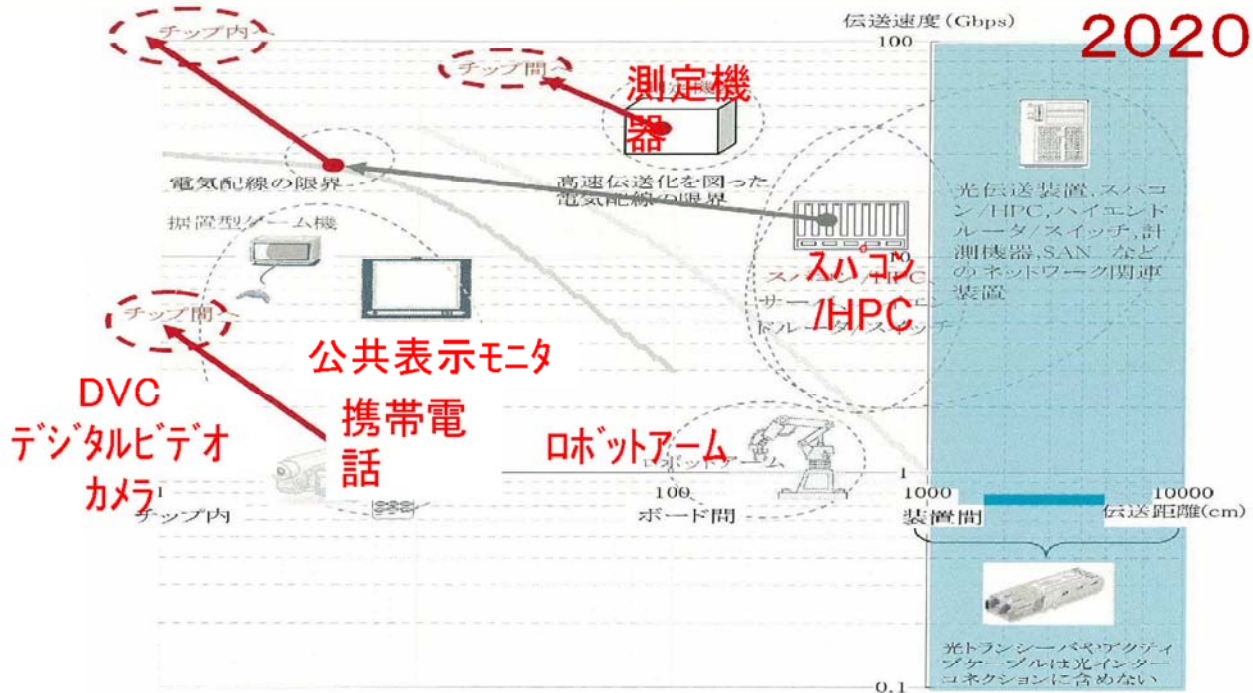


図 2020年頃での光インターコネクション技術の産業界での要求 (出典) 富士キメラ総研 (赤字機器と赤点枠内が導入対象)

参考

4/25



## 事業の位置付け

<国の政策における位置付け>

### ナノテクノロジープログラム

#### 総合科学技術会議

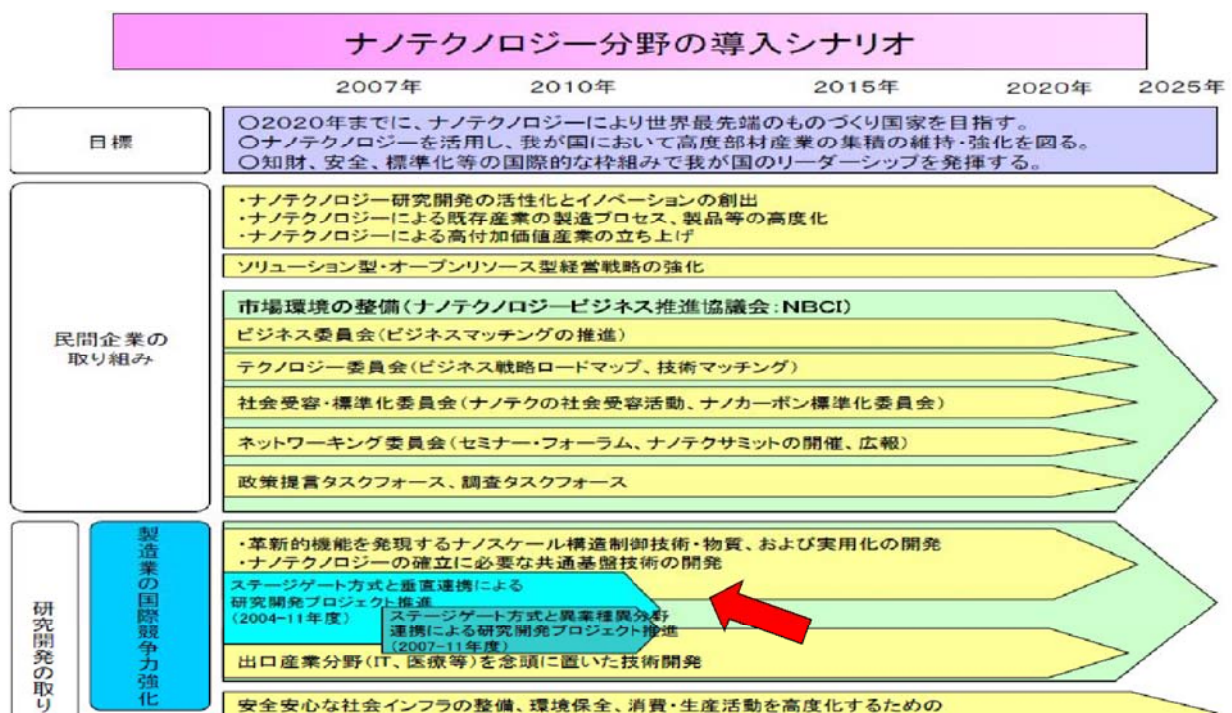
「革新的技術戦略」(オール光通信処理技術)の登録テーマ

#### ナノテクノロジー技術戦略マップ

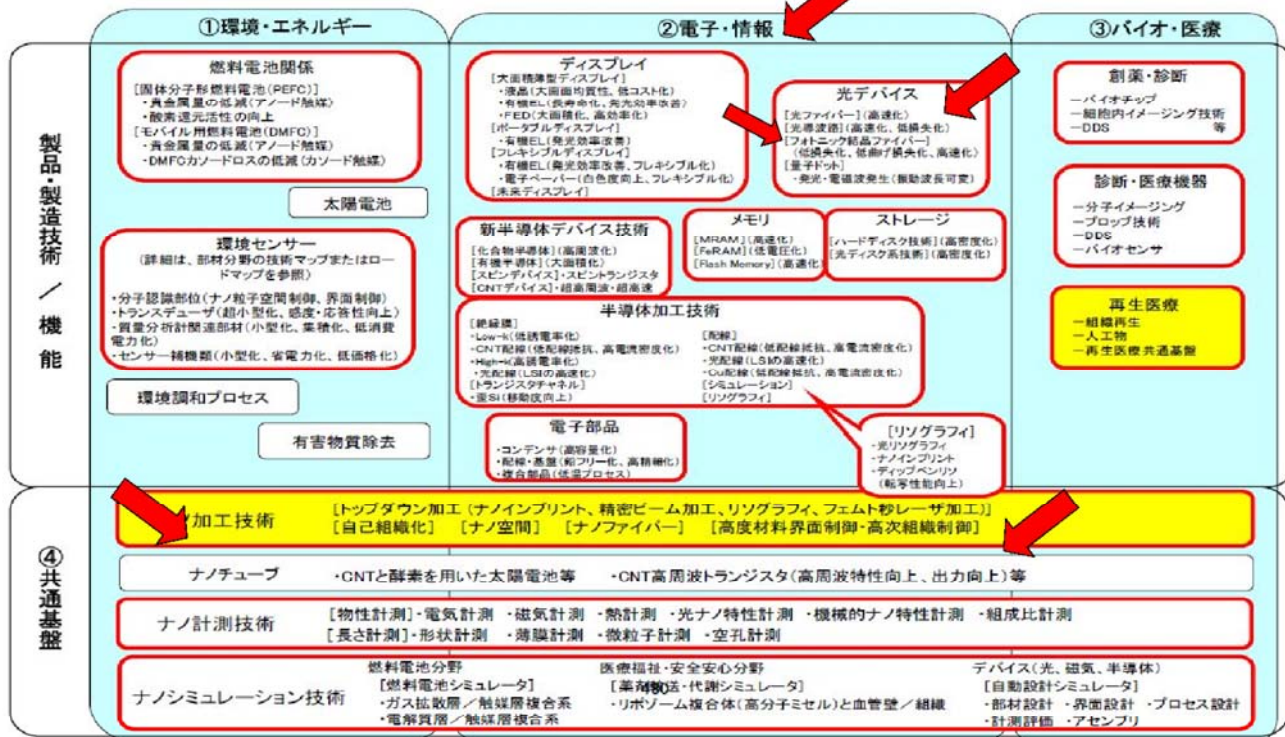
➤ 光デバイス分野

- 光情報通信／光伝送／光導波路／合分波
- フェムト秒レーザーによる直接導波路描画技術

## ナノテクノロジープログラムにおける本プロジェクトの位置付け



## ナノテクノロジー技術戦略マップにおける本プロジェクトの位置付け



## ナノテクノロジー技術戦略マップにおける本プロジェクトの位置付け

技術領域	要素技術	機能	ナノテック技術課題	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
光導波路	家庭内、車内ネットワーク、光インターコネクション	低損失 (耐熱性)	目標仕様(三次元光デバイス)			三次元加工システム 直線導波路: 直径 9μm		60μm <sup>2</sup> /シングルショット ±0.1μm加工精度40nm			三次元分注機 挿入損失<17dB					
			三次元一括描画(パターンニング)に適したガラス材料開発													
			フェムト秒レーザーの一掃照射を利用した三次元光導波路デバイス作製													
			目標仕様													
光変調	幹線系ネットワーク	高速化、広帯域化	精密材料設計・精密重合(耐熱、透明材料、その他の耐環境性スペックを持つ材料の開発)													
			簡易作製法・実装法による光導波路作製技術													
			目標仕様													
			精密材料設計(高品質半導体量子井戸の育成、量子シユタルク効果、半導体スピニエレクトロニクス)													
家庭内ネットワーク	高速化、高効率化	高効率化	ナノ加工(数十nm)													
			広帯域ナノ材料埋め込み導波路													
			目標仕様													
			精密材料設計(3Dペーパー主観骨格の剛直化による分子配向性の向上)													

# NEDOが関与することの意義

日本が世界をリードしている通信・情報家電の競争力向上に貢献

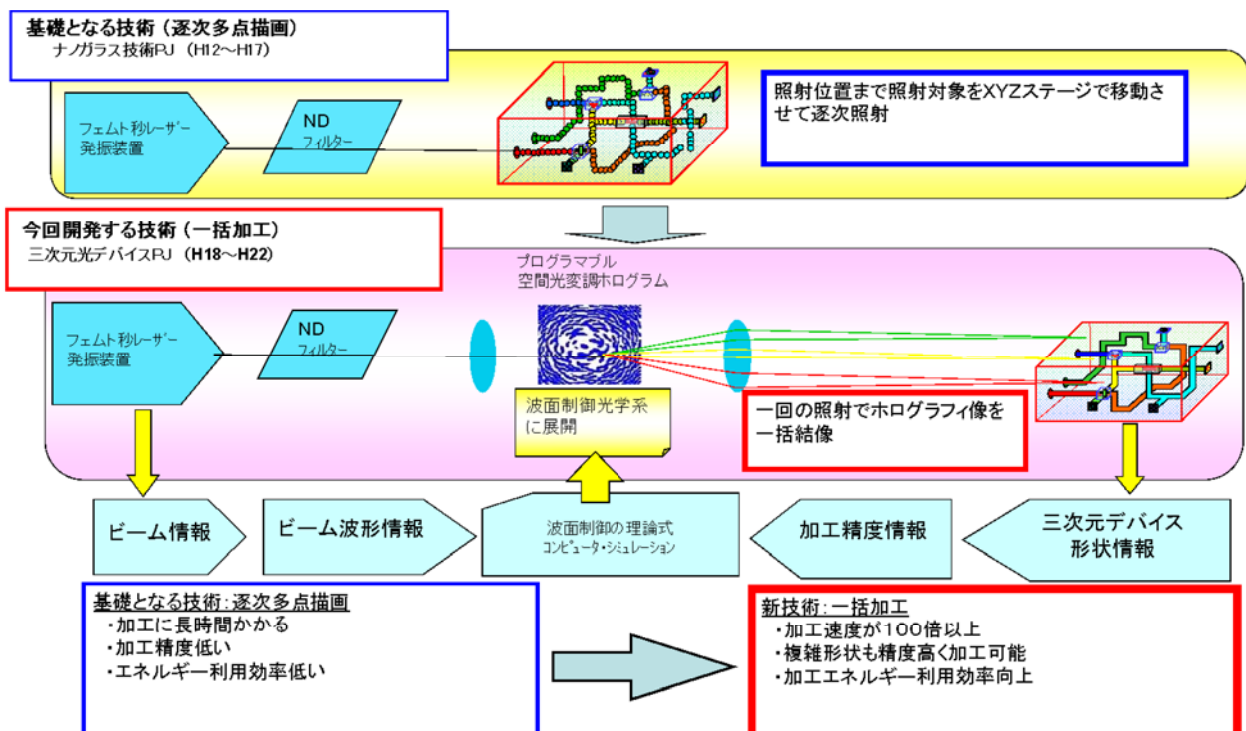
- 集積化光回路デバイスへのインパクト
  - 光インターコネクション
  - 3次元多重集積化(体積100分の1)

光情報処理の基本デバイス(光スイッチ・光増幅器・合分波)の開発を促進

**NEDOによる産・学・官連携体制による  
国家的・集中的実施が必要不可欠**

フェムト秒レーザーによる加工技術: 国立大学等の一部の研究機関がシーズ・設備を保有  
ホログラムによる空間光変調技術: 民間企業に高いシーズ技術  
(▼分散研では研究開発の遅延が避けられない)

# 事業の背景(技術的背景)



## 事業の目的および意義

日本が世界をリードしている通信・情報家電分野の部材の高機能化・低コスト化

- 光情報処理の基本デバイス(光スイッチ等)
- 新しい機能を持つ光学デバイス(デジカメのレンズ)
- 集積化光回路デバイスへのインパクト



ガラス中に三次元の光回路を高精度に一括形成できるプロセス技術の開発

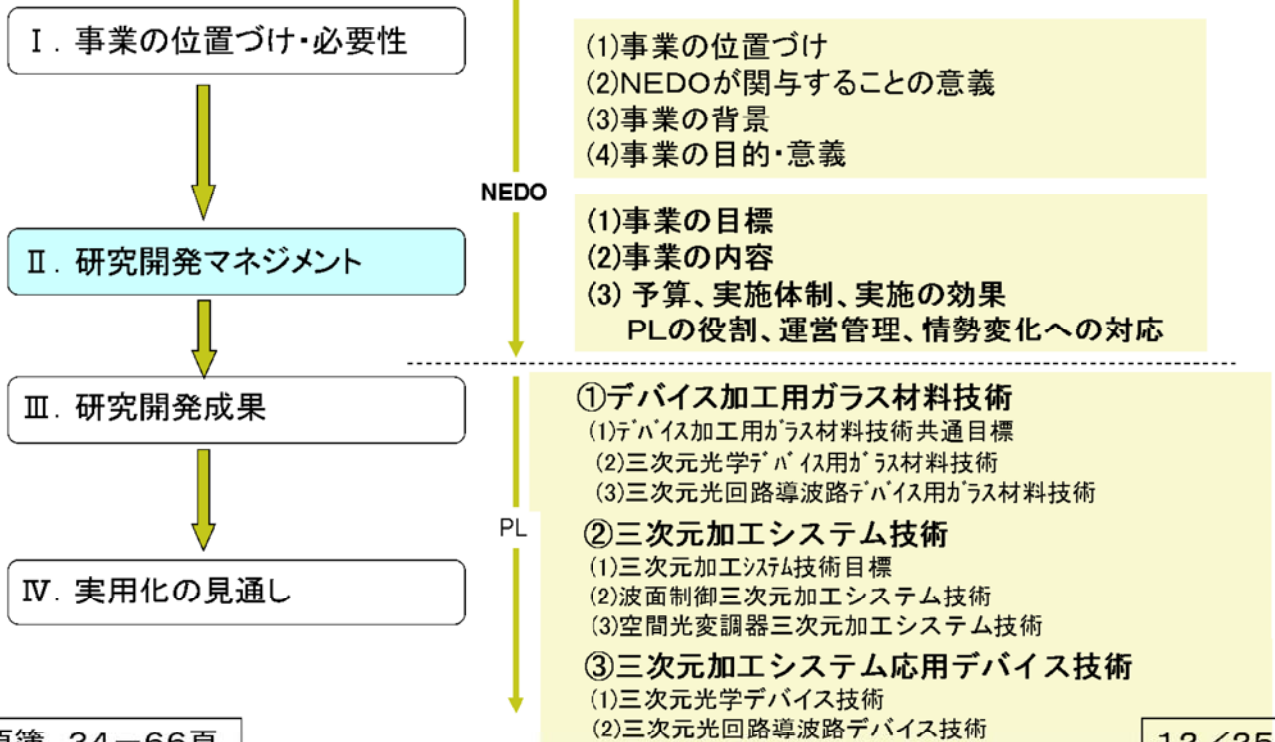


従来工法の問題点

フェムト秒レーザーを使用した従来の加工法はガラス材料をXYZステージで移動させながら1点ずつレーザ加工をする逐次多点描画法であり、加工時間が長い・精度が低い・エネルギー利用効率が低い。

三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト

### 概要説明 報告の流れ





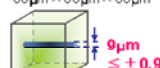
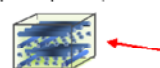







## 事業の目標

▶フェムト秒レーザーとホログラム等でガラス内部を加工し、光制御機能を付加する加工技術が開発され、これにより光情報処理の基本デバイス(光スイッチ、光増幅器、合分波)の開発を容易に行うことができることを目標とする。

1. 全体目標 (平成22年度)
  - a)三次元加工システムの一括加工に適した**ガラス材料の開発**
  - b)**波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術に関する基盤技術**を開発。
  - c)光学デバイス、光回路導波路デバイスの**一括加工による試作**。
2. 最終目標
  - 2.1 研究開発項目①「**デバイス化加工用ガラス材料技術の研究**」
    - a)データの体系化 (異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス依存性)
    - b)光学デバイス用ガラス材料 (屈折率差  $\Delta n$  が0.015以上)
    - c)光回路導波路デバイス用ガラス材料 (光伝搬損失0.1dB/cm以下、直線導波路 9 $\mu$ m)
  - 2.2 研究開発項目②「**三次元加工システム技術の研究**」
    - a)波面制御三次元加工 (60  $\mu$ mの立方体中に100個以上の異質相作製)
    - b)設計シミュレーションの高速化 (従来比10倍以上)
    - c)空間光変調器三次元加工システム (変調速度50HZ、耐光性50GW/cm<sup>2</sup>)
  - 2.3 研究開発項目③「**三次元加工システム応用デバイス技術の研究**」
    - a)光学ローパスフィルタ b)直線導波路(コア径9 $\mu$ m以下)とスプリッタ(1×16)の試作

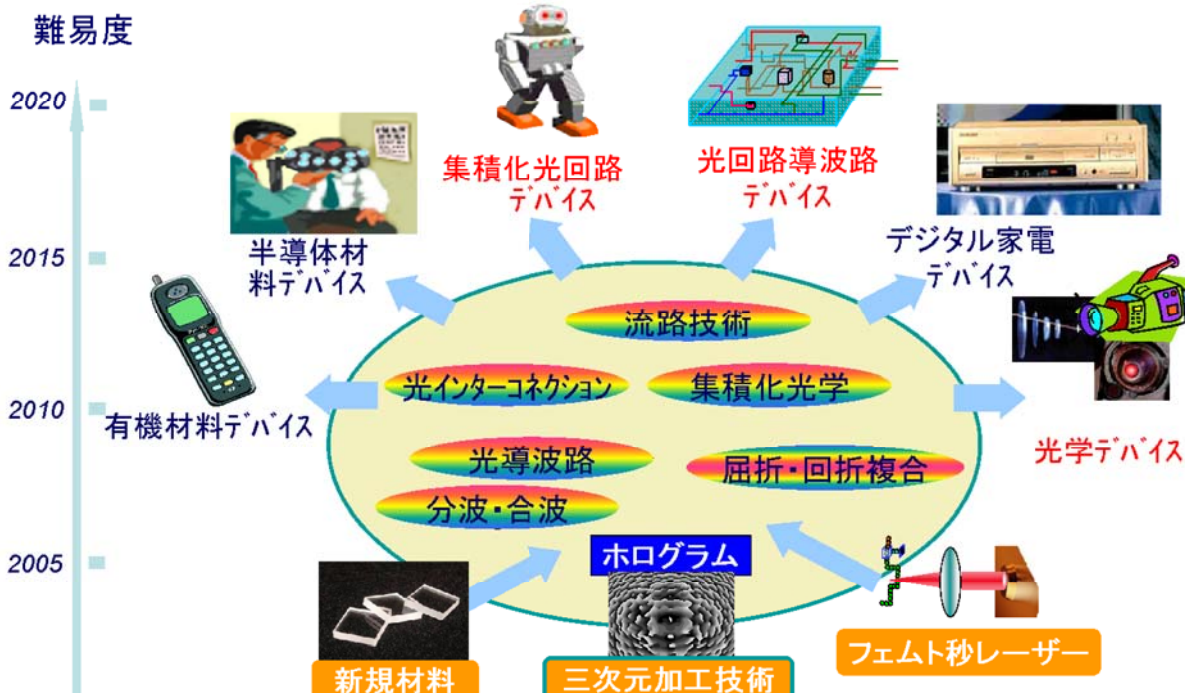
## 研究開発項目別目標値

研究開発項目	中間目標	最終目標
①デバイス化加工用ガラス材料技術	(1)デバイス加工用ガラス材料技術共通目標 自主目標: データの体系化(異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性)	
	(2)三次元光学デバイス用ガラス材料技術  異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.01$ 可視光領域 (400-760nm)	 異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.015$ 可視光領域 (400-760nm)
	(3)三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術  直線導波路(レーザー照射条件最適化): 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55 $\mu$ m @Single Mode	 直線導波路(三次元加工システムで作製) 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55 $\mu$ m @Single Mode
②三次元加工システム技術	(1)三次元加工システム技術目標 60 $\mu$ m × 60 $\mu$ m × 60 $\mu$ m  9 $\mu$ m $\pm 0.9\mu$ m 2層以上の球状異質相 or 棒状異質相 $\leq 10\mu$ m <b>三次元基本加工機能を確認</b>	60 $\mu$ m × 60 $\mu$ m × 60 $\mu$ m  $\leq 10\mu$ m 100個以上の球状異質相 or 棒状異質相 <b>100倍以上の高速加工を実現</b>
	(2)波面制御三次元加工システム技術  ホログラム設計速度 $\geq \times 3$ (従来比)	 ホログラム加工精度 $\leq \pm 40\text{nm}$ 設計速度 $\geq \times 10$ (従来比)
	(3)空間光変調器三次元加工システム技術 空間光変調器: 変調速度 30Hz 光位相変調度 $\geq \text{mrad}$ 耐光性 $\geq 30\text{GW/cm}^2$ (100fs, 1kHz)	空間光変調器: 変調速度 50Hz 光位相変調度 $\geq 2\text{mrad}$ (0~2 $\pi$ で制御可) 耐光性 $\geq 50\text{GW/cm}^2$ (100fs, 1kHz)
③三次元加工システム応用デバイス技術	(1)三次元光学デバイス技術 光学LPFの一次設計 ・光学LPFの試作(多点描画) ・方向無依存性の確認(シミュレーション & 試作確認)	 光学LPF(3×1枚) $\geq \square 2.5\text{mm}$ $\leq 0.3\text{mm}$ <b>一括描画で確認</b> 2光軸開き角 $> 0.236^\circ$ モアレ抑制の確認
	(2)三次元光回路導波路デバイス技術 波面制御法(ホログラム)で直線導波路  光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55 $\mu$ m @Single Mode	直線導波路  9 $\mu$ m 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55 $\mu$ m @Single Mode 3次元光カプラ: 1×16 挿入損失 $\leq 17\text{dB/cm}$ 反射減衰量 $\geq 45\text{dB}$ 波長1.50~1.60 $\mu$ m

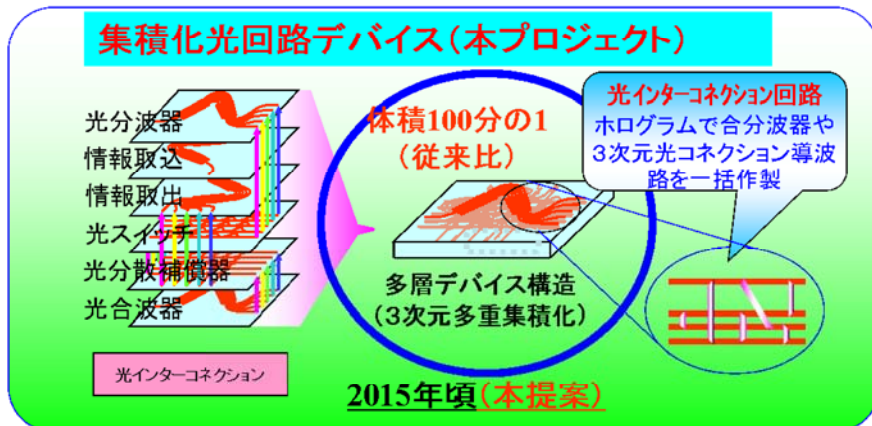
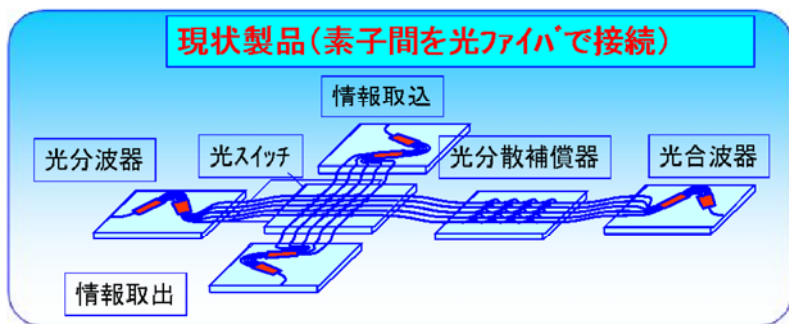
## 最終目標の設定理由

テーマ名	目標	設定理由
①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標	異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。	開発する一括加工技術をより広く適用できる分野を広げるために本共通目標を置き、より優れたガラス材料のデータを系統的に調べる。
①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術	可視光領域(400nm~760nm)でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。	ガラスの屈折率差が0.015あれば厚みが数10μmの光学ローパスフィルタを製作できる。尚、光学ガラス以外のガラスで得られている屈折率変化は0.01程度である。
①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	光伝搬損失:0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。	フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。一括描画による実用レベルの導波路形成を確認することは三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発において十分な目標と思われる。
②-(1) 三次元加工システム技術	ホログラム等による波面制御技術を開発し、三次元造形を従来比で100倍以上の高速加工を実現する。 具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺60μmの立方体中、直径10μm以下の球状或いは棒状の異質相を100個以上形成する。	最終目標では、中間目標の成果を適用して、更なる微細化と更なる高速化を目的として、微細で高精度な三次元デバイスを作製するために必要な技術開発を設定している。この目標達成により、より高精度なデバイスをより高速で作製することが可能となる。また、この目標で得られた技術と最終目標で開発する材料技術との組み合わせにより、より高精度で、より高速でデバイスを作製できる技術が確立できる。他のテーマで得られた技術を組み合わせると、従来比で10,000倍の高速加工が実現できると考えられる。
②-(2) 波面制御三次元加工システム技術	波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計できる技術を開発する。精度40nm以下の波面制御素子を作製する。	64万画素のホログラム設計に現状では100時間掛かる。これを最終目標として1/10にし、少なくとも1日で計算できるようにする。波面制御素子の高精度化は中間評価時に既に達成している。これにより更なる高精度ホログラムを作製する。
②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術	変調速度を50Hzに高め、光位相変調度として2πラジアン以上を確認する。耐光性として、50GW/cm <sup>2</sup> (100fs,1kHz)を達成する。	変調速度はビデオレート以上でパターンが書き換えできるように決めた。光位相変調度は波面制御のためのホログラムを表現するために必要な特性を目標とした。耐光性では、ガラスに100点以上の異質部を一度に形成するのに十分な値として設定した。
③-(1) 三次元光学デバイス技術	一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。フィルタ厚みを0.3mm以下で実現する。	従来の水晶式と性能的に同等以上に、形状的には対抗できるように決めた。厚みは従来に比べて桁違いに薄く、使用枚数は1/3に、厚みは1/10以下に決めた。尚、従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmの厚さを持つ。
③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術	波面制御法で直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失:0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証し、これを使用して1×16のスイッチを試作する。挿入損失で17dB以下、反射減衰量45dB以下を目標とする。	フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。このような光導波路を使用して最終目標のスプリッタを実現する。

## 事業の内容 フェムト秒レーザー・一括加工による製品イメージ



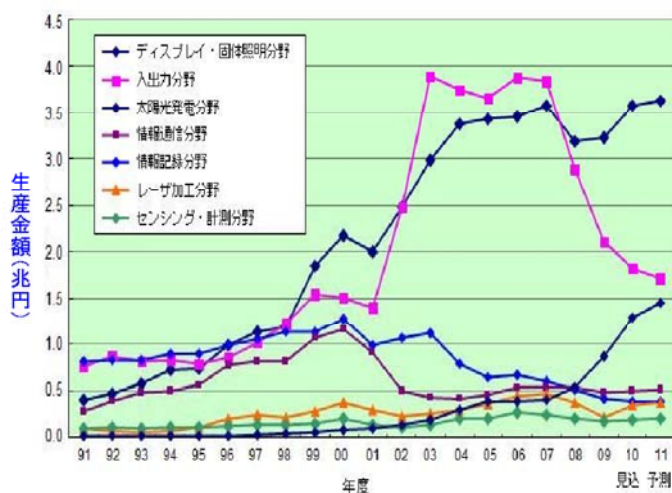
## 事業の内容（集積化光デバイスのイメージ）



事業原簿 20頁

17/25

## 本事業が関係する市場規模の統計



I-4 光産業国内生産額の推移<sup>3)</sup>  
2011年度予測は東日本大震災前の調査による。  
出典：光産業技術振興協会

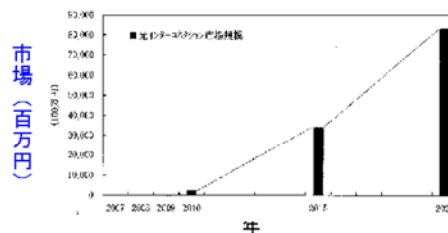


図 I-5 光インターコネクション市場規模<sup>4)</sup>  
(出典：富士カメラ総研)

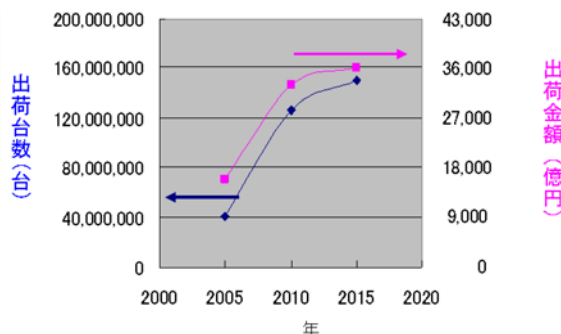


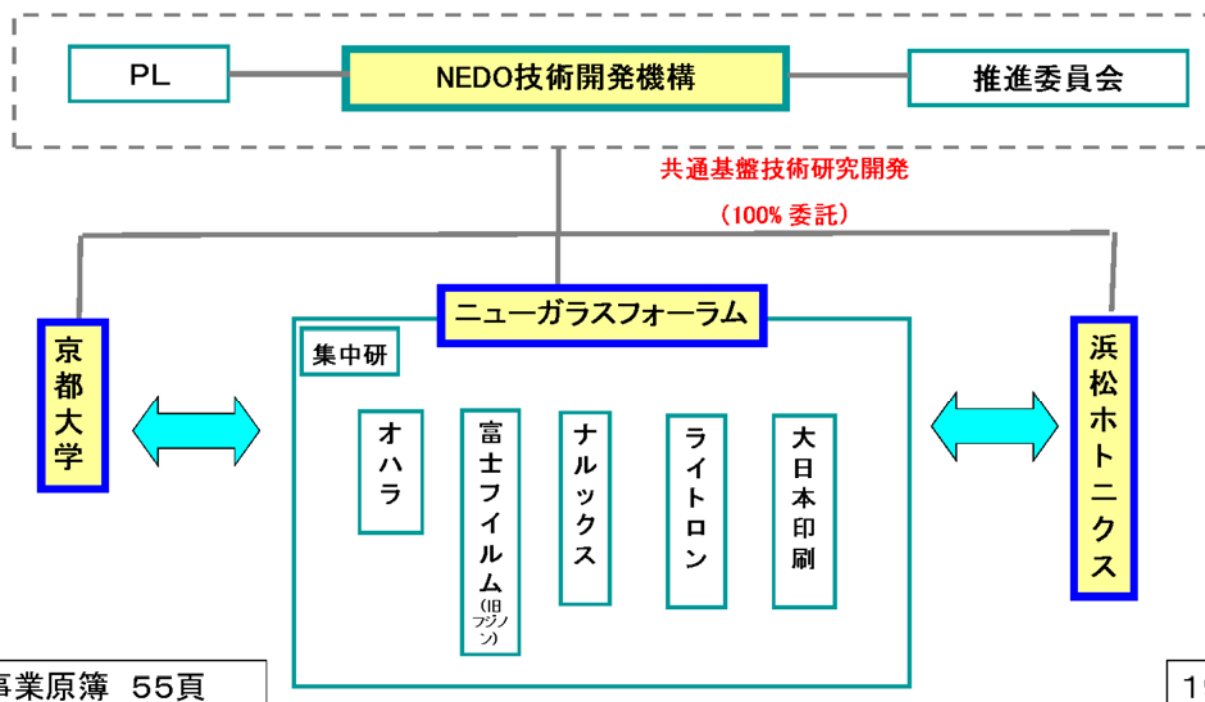
図 I-7 デジタルカメラの出荷台数・金額推移<sup>4)</sup>  
出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA)、  
有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA)、  
懶矢野経済研究所

事業原簿 23-26頁

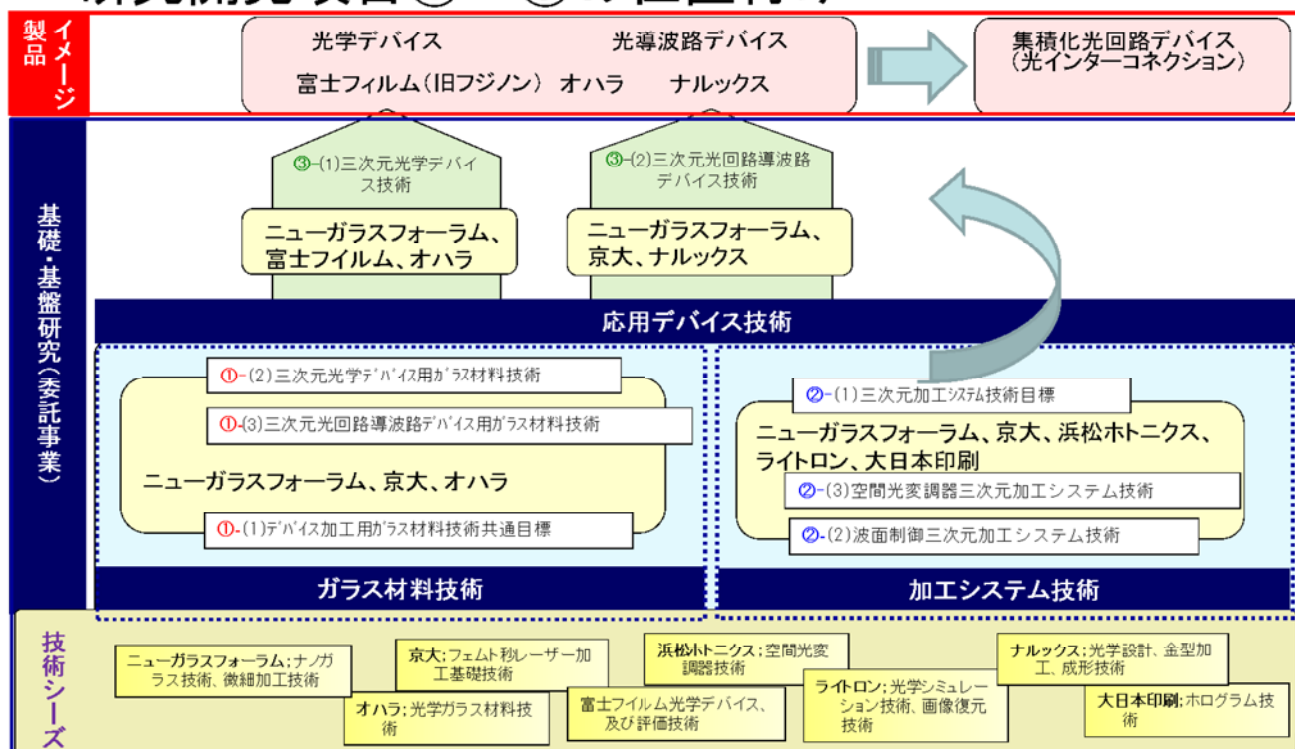
18/25

## 開発予算と研究開発体制

▶プロジェクト期間:平成18年度～平成22年度  
▶予算規模:16.6 億円



## 研究開発項目①～③の位置付け





## 研究計画と予算

	H18	H19	H20	H21	H22
①デバイス化加工用ガラス材料技術	(89) ●各種ガラスのレーザー加工性、データベース化 ●デバイス別ガラス組成最適化	(90)	(62)	(57)	(40) ●デバイス試作、動作確認
②三次元加工システム技術	(247) ●加工システム構築、加工基本情報の取得 ●ホログラム設計・作製 ●空間光変調器と波面制御モジュールの試作、および改良	(226)	(173)	(166) ●加工システムの改良 ●ホログラムの設計技術、および作製プロセス高精度化	(115) および作製プロセス
③三次元加工システム応用デバイス技術	(56) ●光学ローパスフィルタ設計・試作、動作確認 ●光導波路の基本性能の確認	(59)	(105)	(90) ●一括加工によるデバイス作製	(80)
予算(百万円)	392	375	340	313	235

## 実施の効果(費用対効果)

## &lt;開発費用&gt;

5年間で約16.6億円(平成18年度～平成22年度)

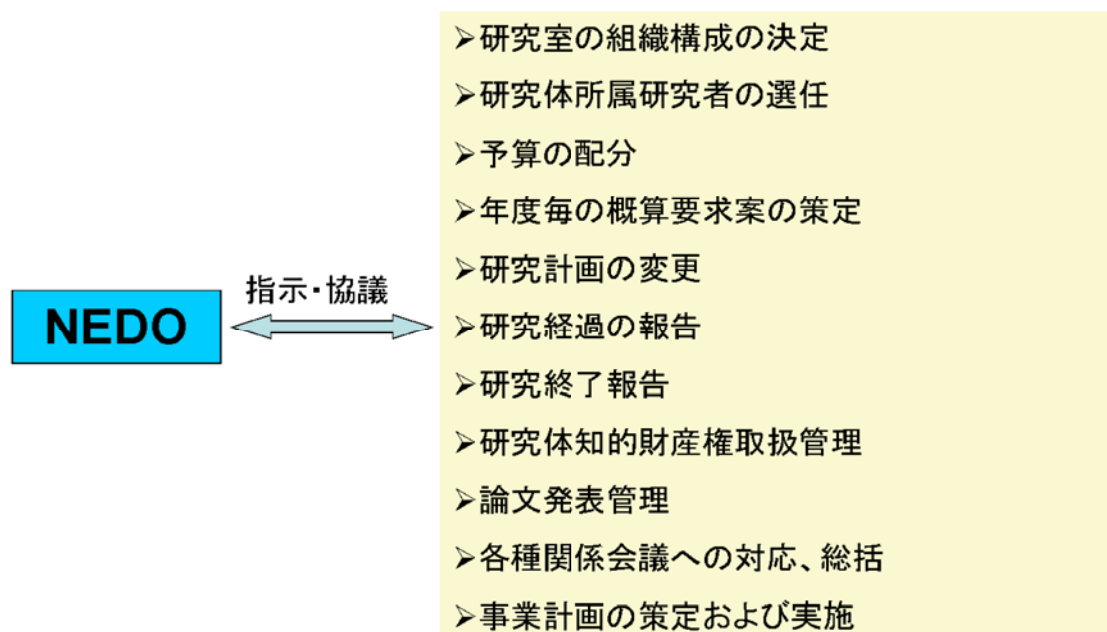
## &lt;効果&gt;

## [市場創出効果]

2015年度時点 約1,300 億円

\* 効果の根拠については事業原簿 P I -1 参照下さい。

## PLの役割



## 運営管理

### NEDO、METI、PL、SL及び参画機関の代表者で下記の管理を実施

- 共同実施契約(京大、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラムで締結)
  - ・ 知財の取扱・管理
  - ・ 研究成果の公表→成果発表届(運営規則)
- 研究推進・業務委員会 2回/年
  - ・ 研究体運営管理に係る情報交換、研究開発状況、外部発表実績などを協議
- R&D会議 3回/年
  - ・ 研究成果報告、討論、進捗状況のチェック、方向付け
- 外部への成果発表を管理(論文、特許など)
  - ・ 発表内容、発表先、発表時期などのチェック
- 各社に研究リーダーを配置し、議論の場を持つ 1回/2~3カ月
  - ・ 早期に実用化する契機を造ることを目標

## 情勢変化への対応

京大: フェムト秒レーザーシステム高出力化

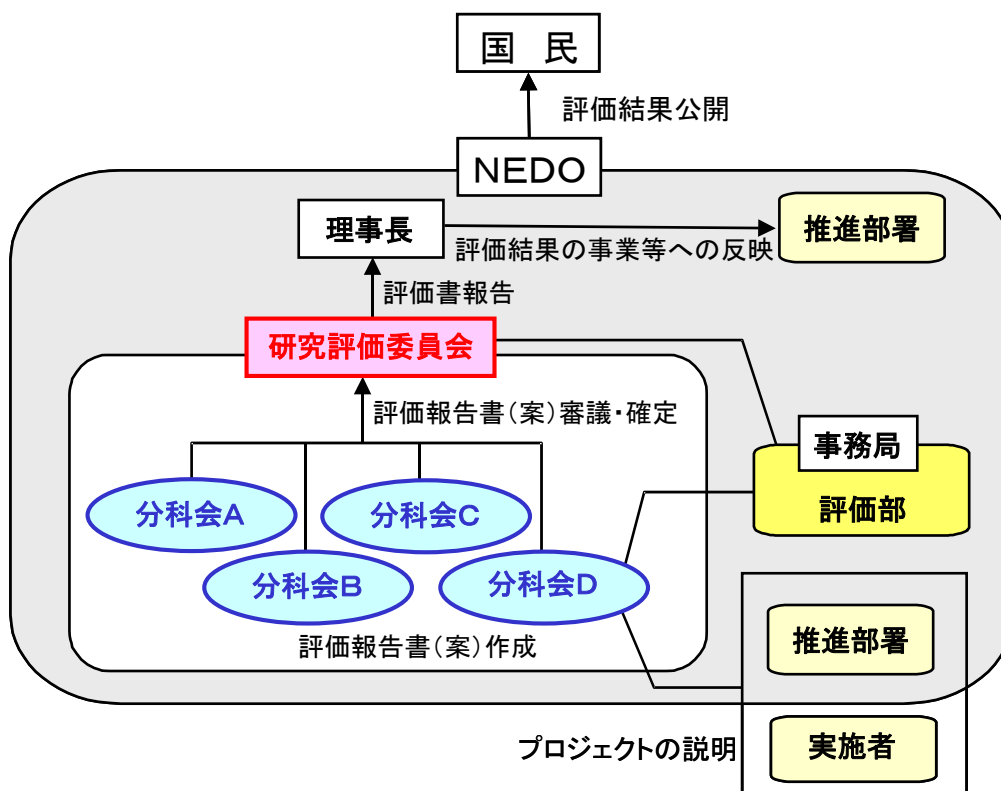
	H18	H19	H20	H21	H22
① デバイス化加工用ガラス材料技術	(89) ●各種ガラスのレーザー加工性、データベース化 ●デバイス別ガラス組成最適化	(90) <b>加速</b>	(62)	(57)	(40) ●デバイス試作、動作確認
② 三次元加工システム技術	(247) ●加工システム構築、加工基本情報の取得 ●ホログラム設計・作製 ●空間光変調器と波面制御モジュールの試作、および改良	(226)	(173)	(166) ●加工システムの改良 ●ホログラムの設計技術、および作製プロセス高精度化	(115) および作製プロセス
③ 三次元加工システム応用デバイス技術	(56) ●光学ローパスフィルタ設計・試作、動作確認 ●光導波路の基本性能の確認	(59)	(105)	(90) ●一括加工によるデバイス作製	(80)
予算(百万円)	392	375	340	313	235

## 参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



## 1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、  
経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を  
促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

## 2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者
- ジャーナリスト

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

## 3. 評価対象

平成18年度に開始された「新機能創出ガラスの加工技術開発プロジェクト／三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プ

プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

#### 4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

#### 5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料1-7頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

## 評価項目・評価基準

### 1. 事業の位置付け・必要性について

#### (1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 「ナノテク・部材イノベーションプログラム」及び「ITイノベーションプログラム」の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

#### (2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

### 2. 研究開発マネジメントについて

#### (1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

#### (2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

#### (3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環



境が整備されているか。

- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

#### (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

#### (5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

#### (2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

#### (3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に

沿って国内外に適切に行われているか。

#### (4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

### 4. 実用化の見通しについて

#### (1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。

#### (2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

## 標準的評価項目・評価基準（事後評価）

2010. 3. 26

### 【事後評価 標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】

標準的評価項目・評価基準は、第25回研究評価委員会（平成22年3月26日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による1…、2…、3…、4…が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)…、(2)…が標準的評価基準、それぞれの基準中の…が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの事後評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

#### 1. 事業の位置付け・必要性について

##### (1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

##### (2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

#### 2. 研究開発マネジメントについて

##### (1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

## (2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

## (3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法をを経由する場合、研究管理法が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

## (4) 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

## (5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

## 3. 研究開発成果について

### (1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）

（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）

- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

## (2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

## (3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

## (4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

## 4. 実用化、事業化の見通しについて

### (1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

### (2)事業化までのシナリオ

- ・ N E D O 後継プロジェクト、N E D O 実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

### (3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

\*基礎的・基盤的研究開発の場合

## 2. 研究開発マネジメントについて

### (1)研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

### (2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

### (3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

### (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

#### (5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

### 3. 研究開発成果について

#### (1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）  
（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

#### (2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

#### (3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

#### (4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。



#### 4. 実用化の見通しについて

##### (1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

##### (2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

\* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

#### 2. 研究開発マネジメントについて

##### (1)研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

##### (2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

##### (3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担ってい

るか。

- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

#### (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

#### (5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）  
（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

#### (2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は公開性が確保されているか。

### (3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

### (4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

## 4. 実用化の見通しについて

### (1)成果の実用化可能性

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

### (2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

## 参考資料 2 評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成23年10月

NEDO 評価部

部長 竹下 満

主幹 三上 強

担当 梶田 保之

\* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

([http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu\\_index.html](http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html))

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミュージア川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162