

(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。

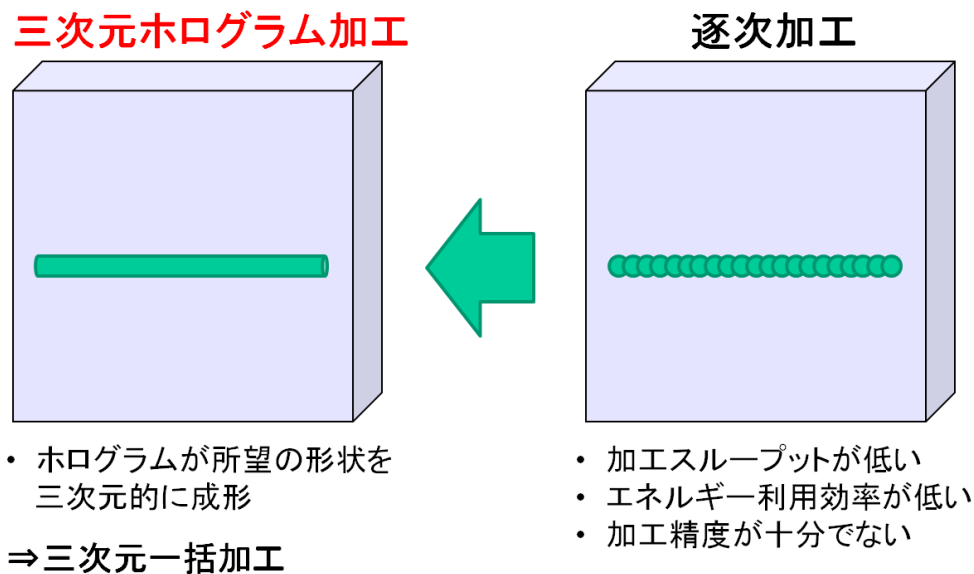


図3-2-1-f-1. 三次元ホログラム加工技術の利点

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/cm²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

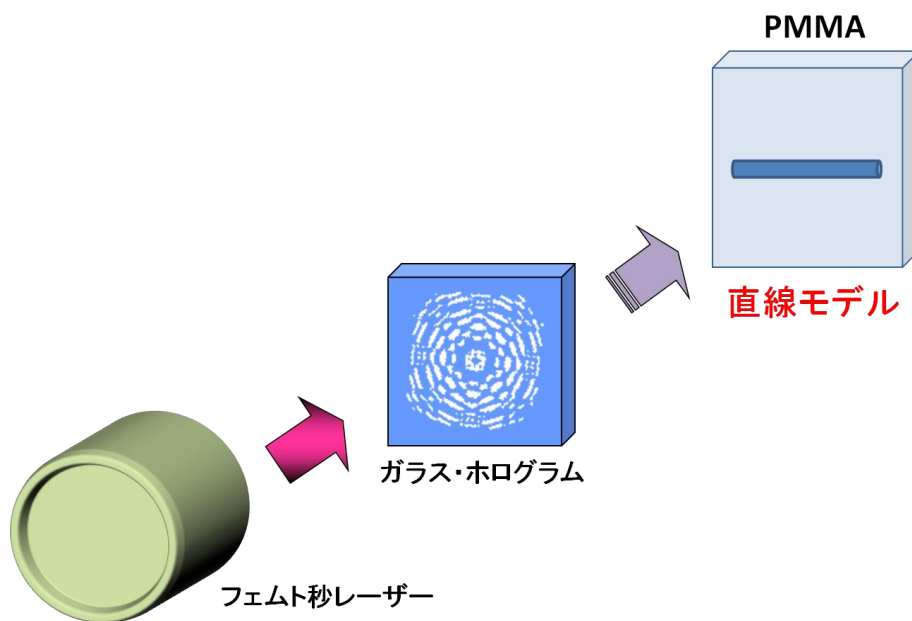


図3-2-1-f-2. 三次元ホログラムによる直線形状の加工モデル

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。

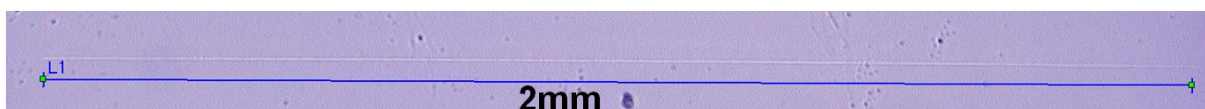


図3-2-1-f-3. 直線形状の加工結果

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 μ 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 μ 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。

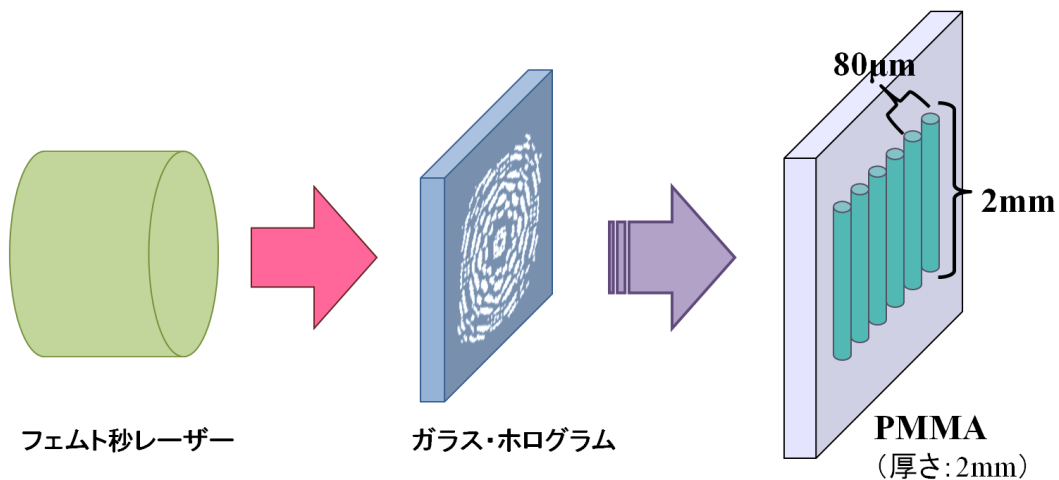


図3-2-1-f-4. 三次元ホログラムを用いた回折格子製作の概要

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 μ 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 μ 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。

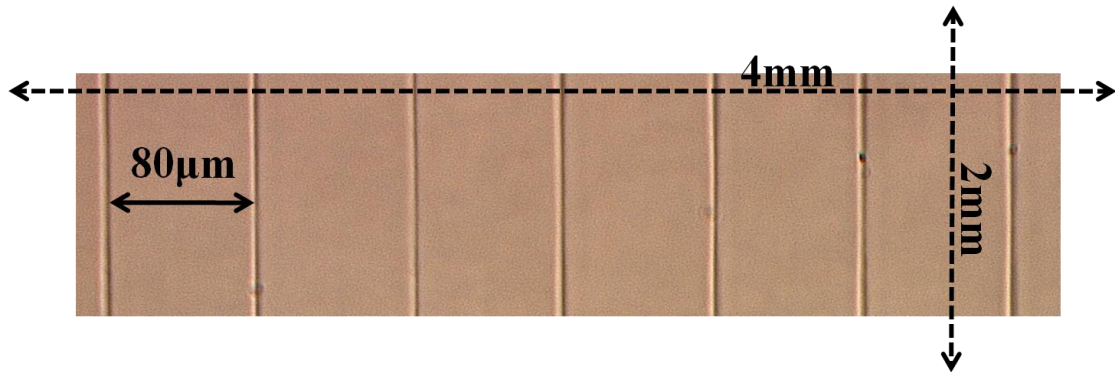


図3-2-1-f-5. 三次元ホログラムを用いて製作した回折格子の顕微鏡像

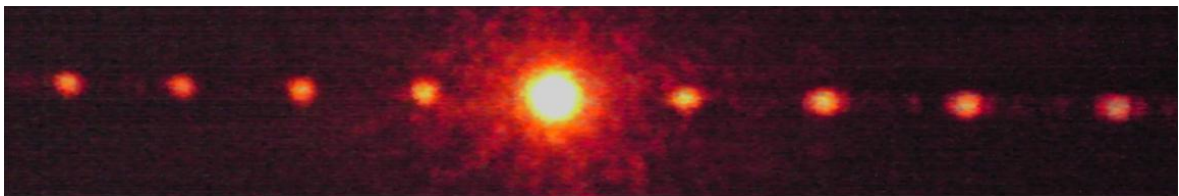


図3-2-1-f-6. 三次元ホログラムを用いて製作した回折格子の光線分離結果

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。

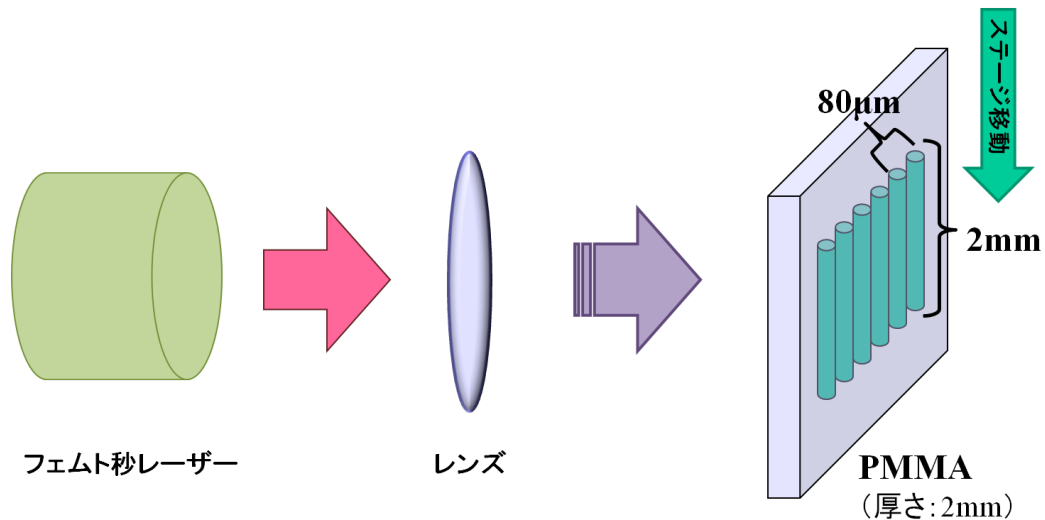


図3-2-1-f-7. レンズを用いた逐次加工による回折格子製作の概要

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。

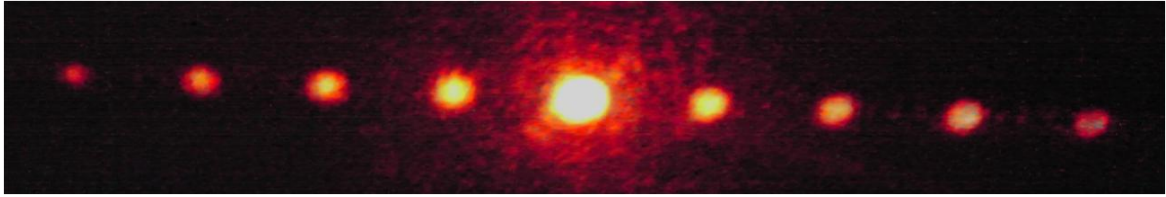


図3-2-1-f-9. レンズを用いた逐次加工による回折格子の光線分離結果

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。

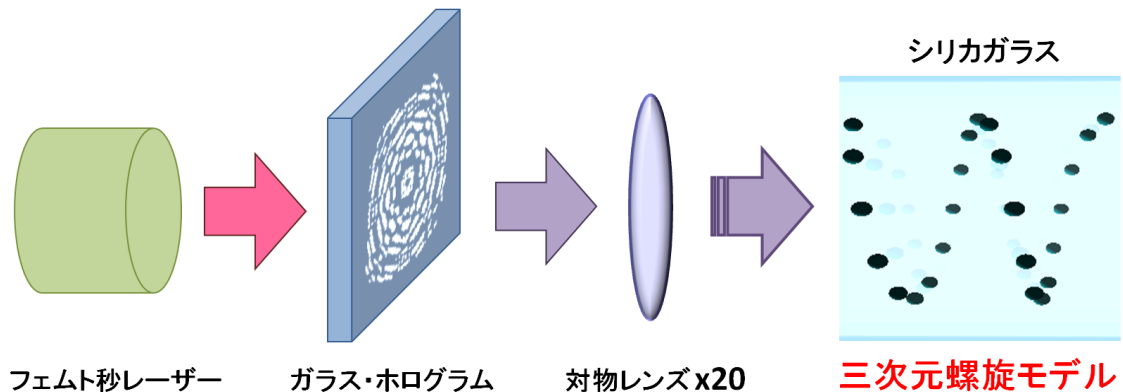


図3-2-1-f-10. 三次元ホログラムによる三次元螺旋形状の加工モデル

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。

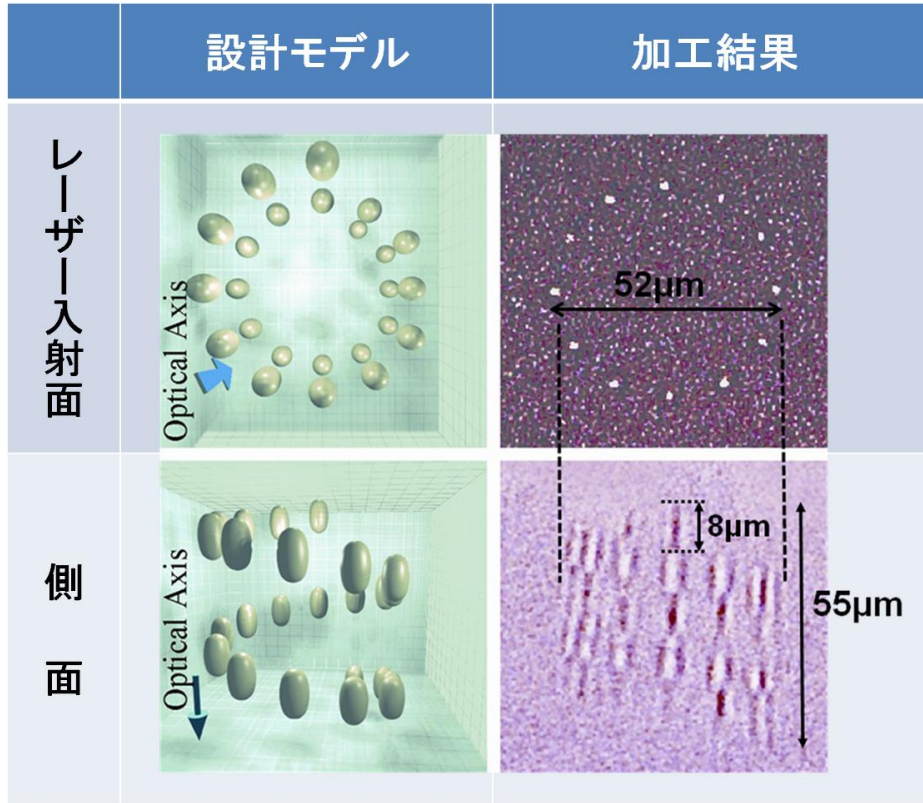


図3-2-1-f-11. 三次元螺旋形状の加工結果

iii) 三次元ドット面心立方体加工(異質相100個)

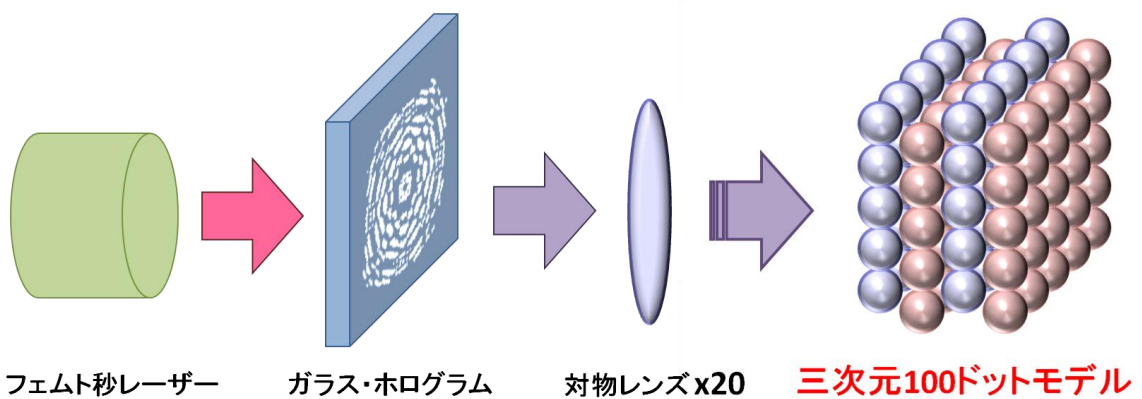


図3-2-1-f-12. 三次元ホログラムによる三次元ドット面心立方格子配列の加工モデル

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。

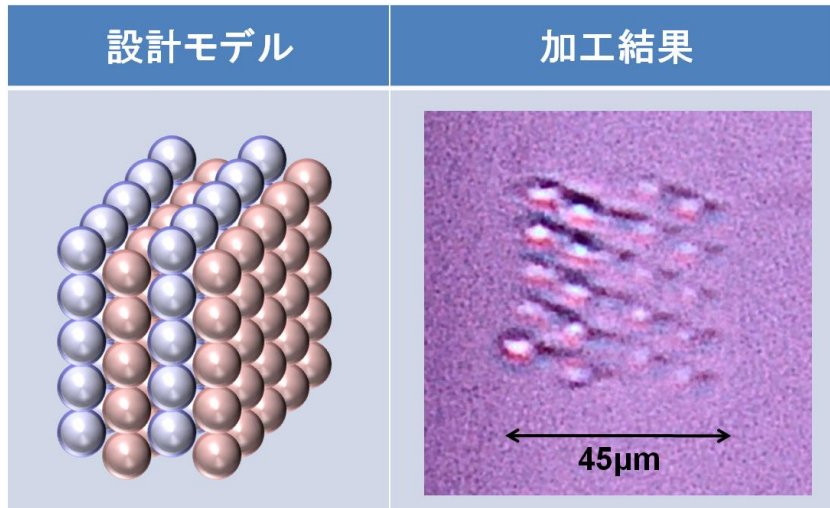


図3-2-1-f-13. 三次元ドット面心立方格子配列の加工結果

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。

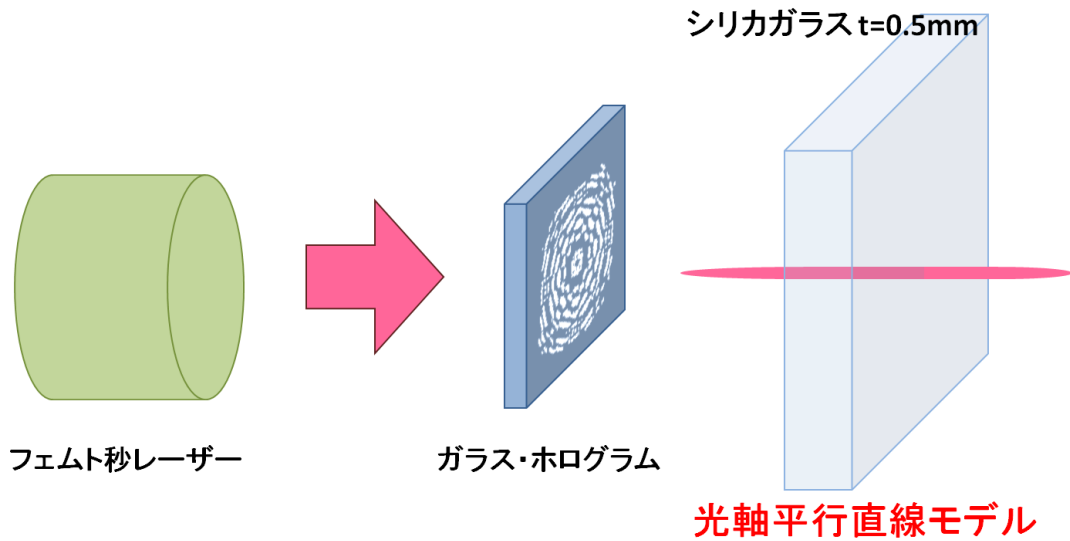


図3-2-1-f-14. 三次元ホログラムによる光軸平行直線形状の加工モデル

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。

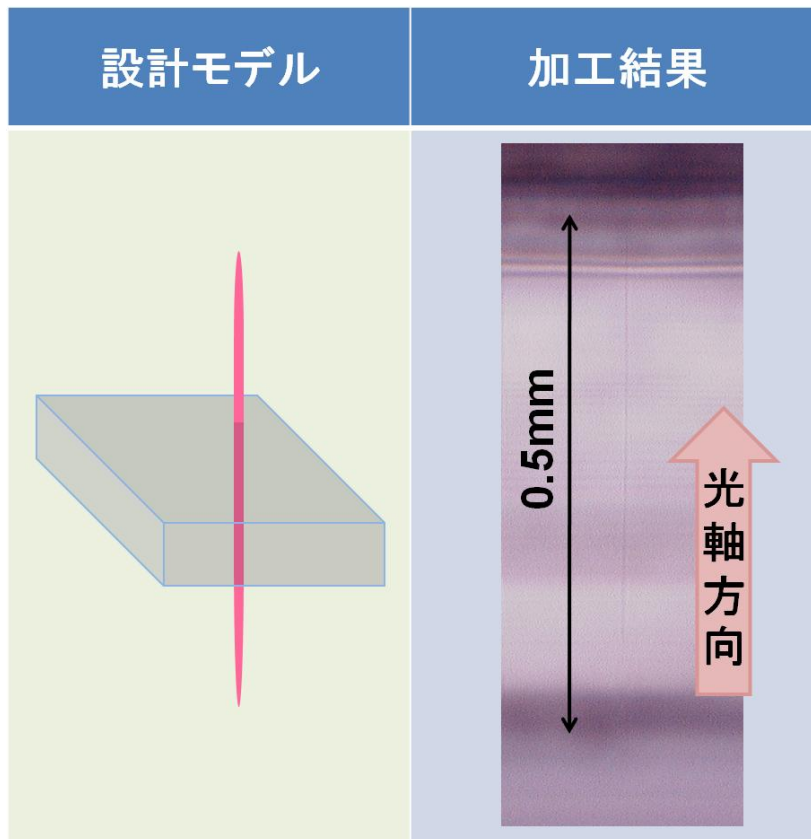


図3-2-1-f-15. 光軸平行直線形状の加工結果

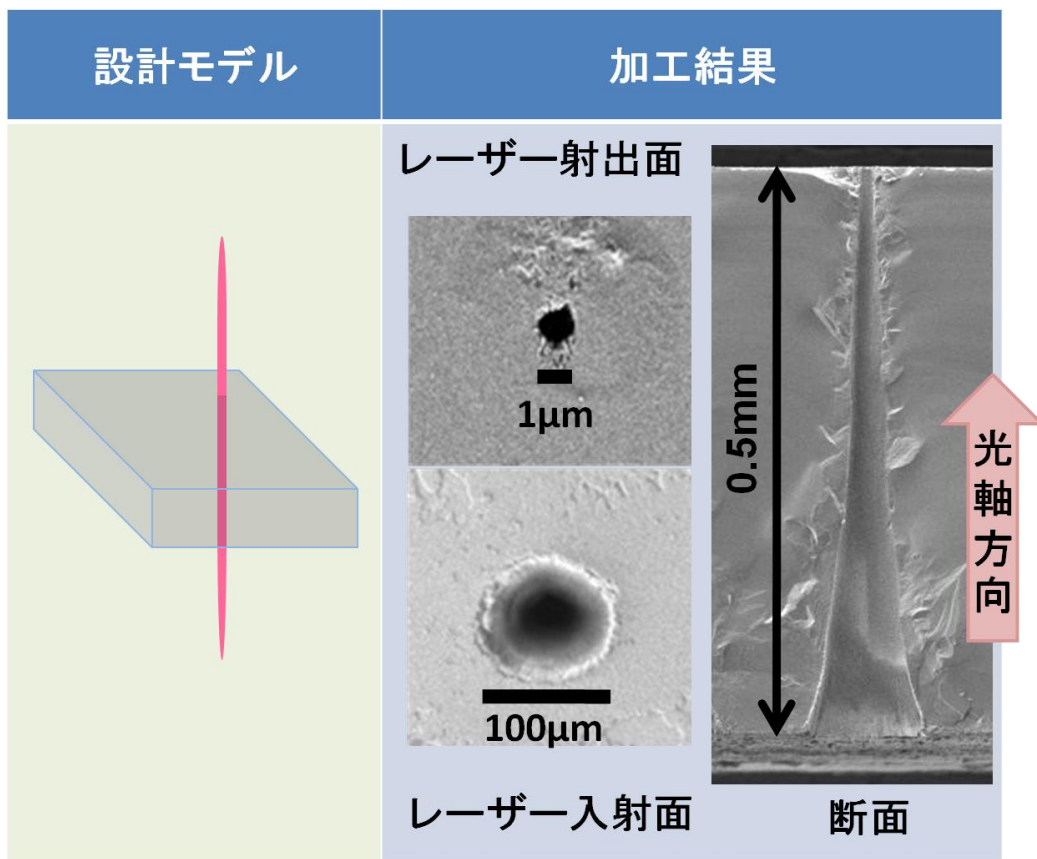


図3-2-1-f-16. 長焦点深度ホログラムを用いた微細貫通穴あけ加工の結果

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。

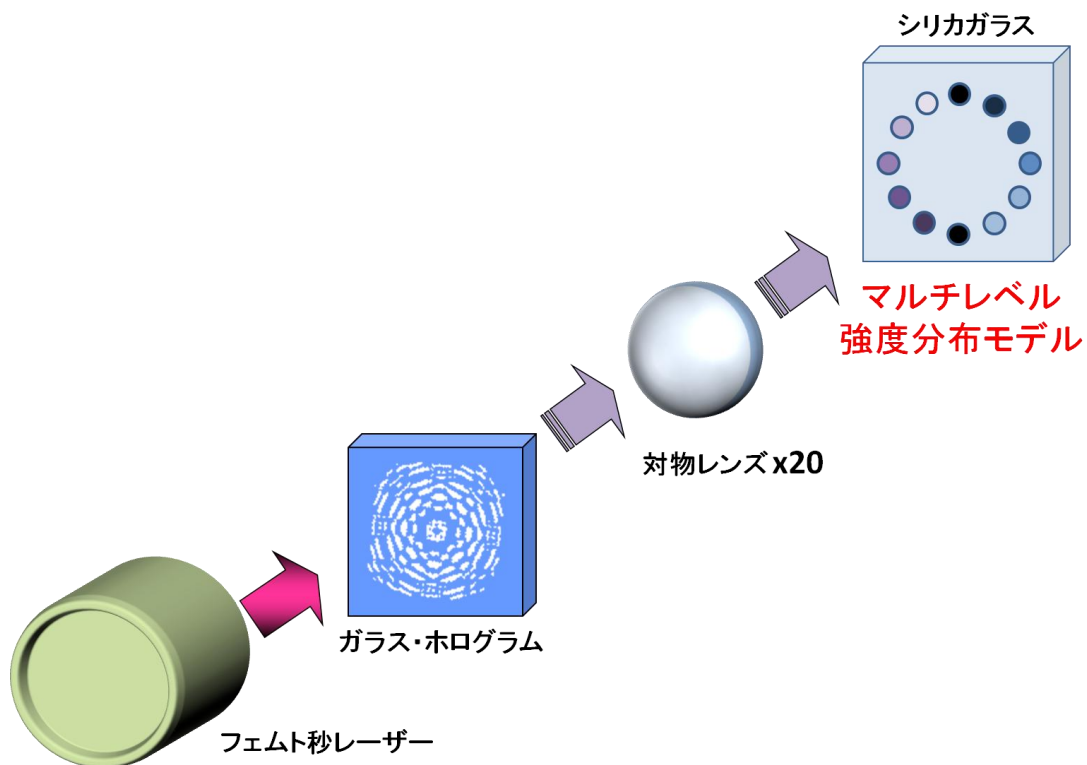


図3-2-1-f-17. 三次元ホログラムによるマルチレベル強度分布形状の加工モデル

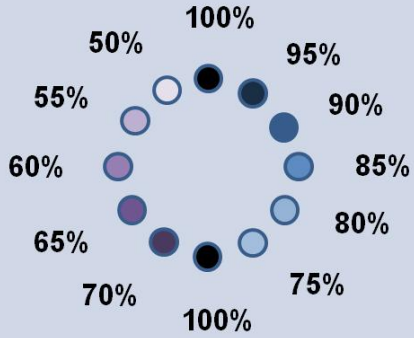
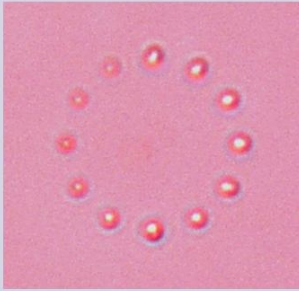
設計モデル	加工結果
	

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。

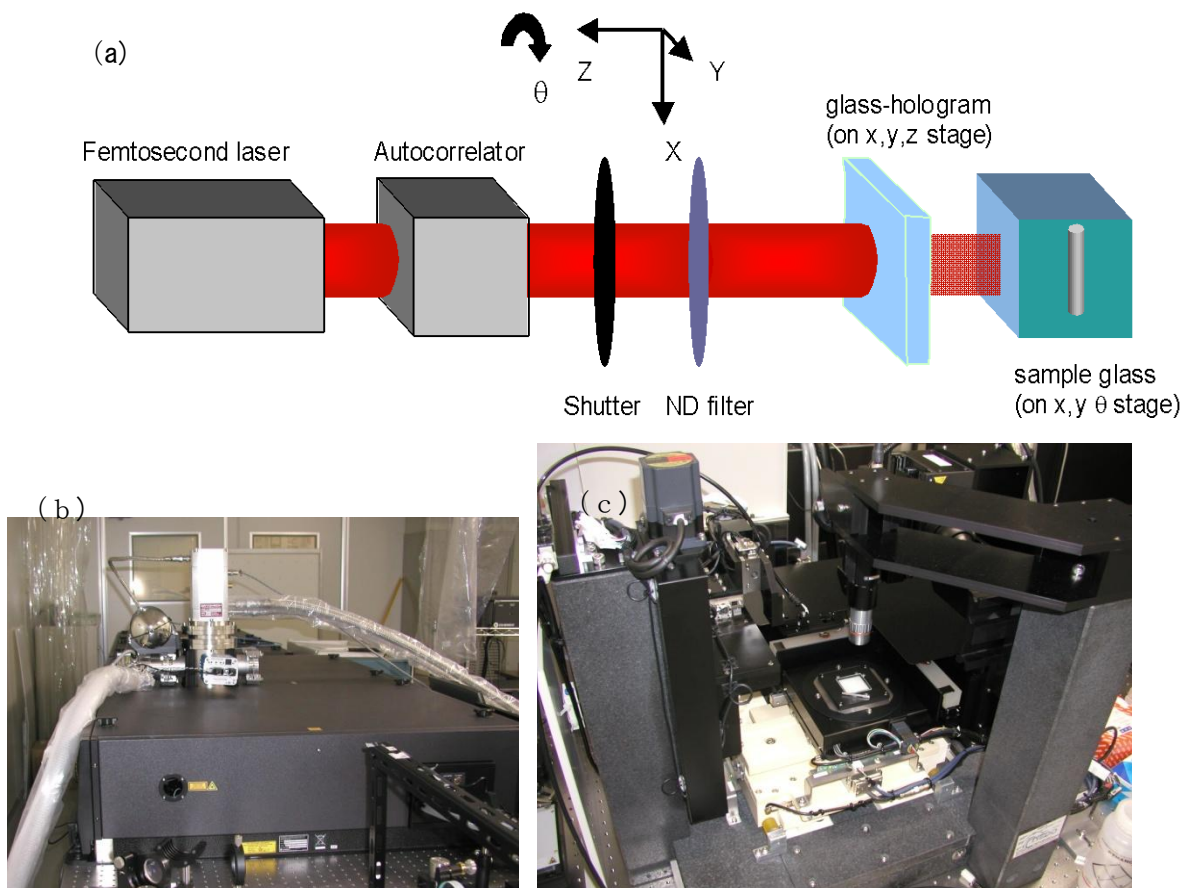
このような問題に対する1つの解決法がホログラムを使ったフェムト秒レーザー一括加工である。他にも回折格子[6]や多光束干渉[7、8]等を使った加工方法もある。これらは周期的形状の加工には有効だが、非周期形状の加工は適していない。このため、加工の自由度はホログラムを使った場合の方が高く、文献[9]では計算機ホログラフィ[10-12]を基にして設計したガラス・ホログラムを使って、非周期的に配置された多数のスポットが一括加工できることが示された。文献[13]では3次元のスポットが1つのホログラムで一括加工可能であることが示された。また、文献[14]では、LCOS-SLMを使って動的にホログラムを変えて、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_{00} 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。

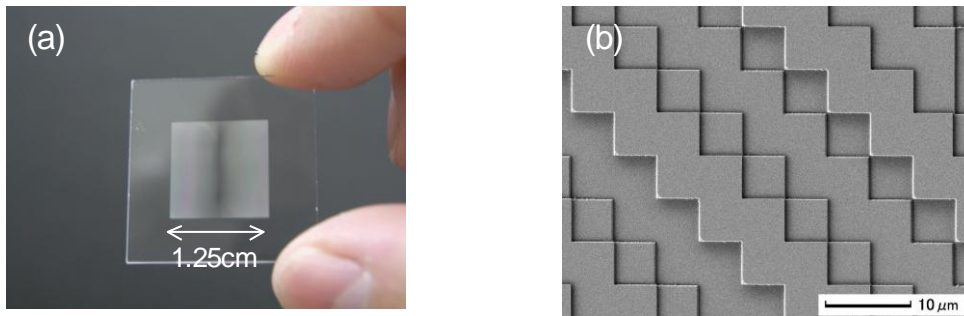
図(2)(g)－1には座標系が示されており、本章ではこの座標系を用いる。また、レーザー照射時間は、レーザーの繰り返し周波数によらない「積算照射時間」(＝フェムト秒レーザーパルス幅:30fs×パルス数)を用いる。

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。

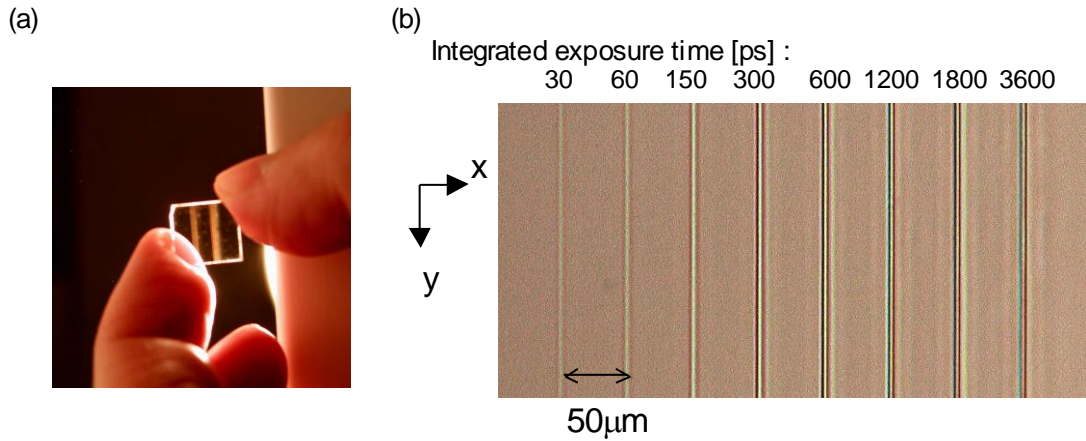
・直線導波路加工

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: $12.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ (2500×2500 ピクセル)、結像距離: 8cm 、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 1.1cm 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。



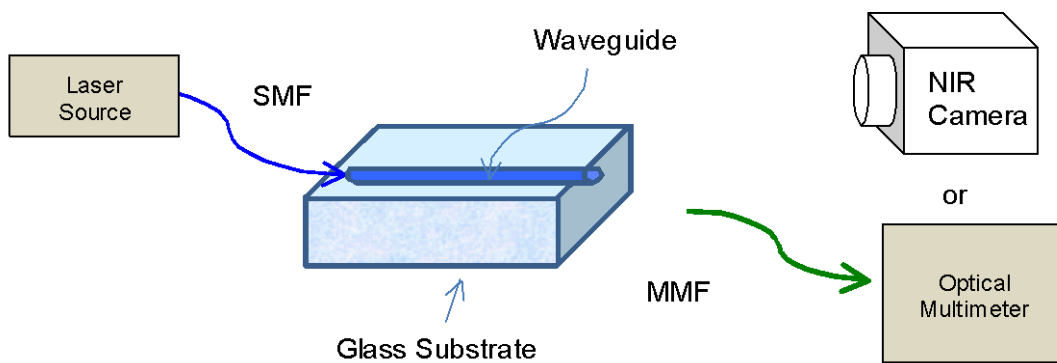
図(2)(g)-2 直線を生成するガラス・ホログラム a)全体像 b)SEMによるパターンの拡大図

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 1cm 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 30ps 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(Δn)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 Δn 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。

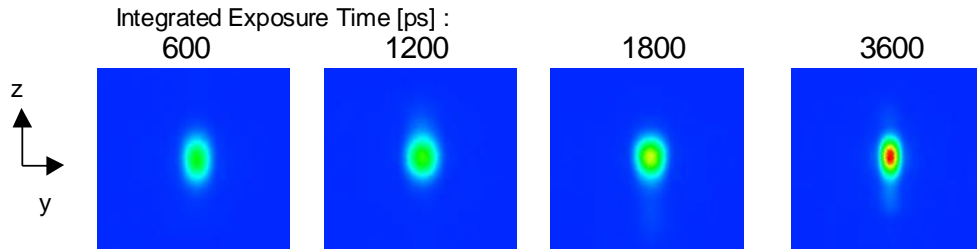


図(2)(g)－3 一括加工で作製した直線導波路(積算照射時間:30~3600ps) (a)1cm直線導波路全体図 (b)光学顕微鏡による拡大図

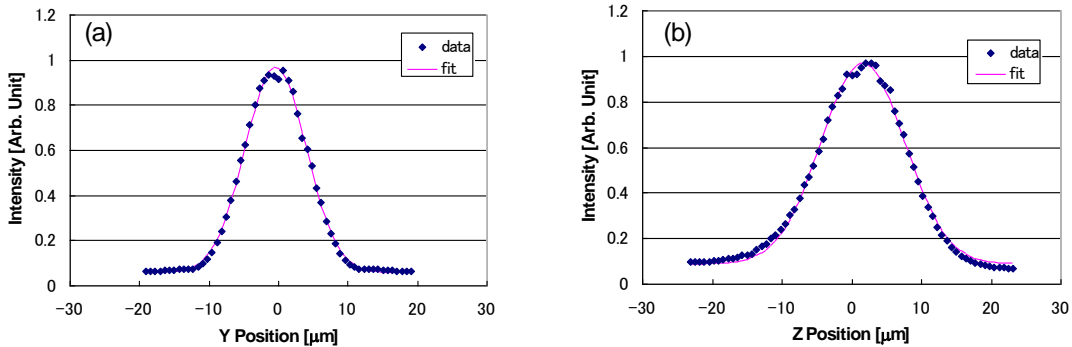
直線導波路の特性を調べるために、Near Field Pattern(NFP)を図(2)(g)－4に示す装置により観察した。直線導波路一方の端にシングルモードファイバー(Corning, SMF-28e)を突き合わせて結合し、ファイバーから波長1550nmのレーザー(THORLABS, S1FC1550)を入射し、近赤外カメラ(浜松ホトニクス, C5840-10)で直線導波路のもう一方の端で導波路を伝播した光のNFPを観察した。近赤外カメラにはx20対物レンズ(ミツトヨ, M Plan NIR)が取り付けられている。直線導波路と導波路との結合しているファイバー端は多軸ステージに固定され、光軸調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 σ 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 σ_y 、 σ_z とその比 σ_z/σ_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。



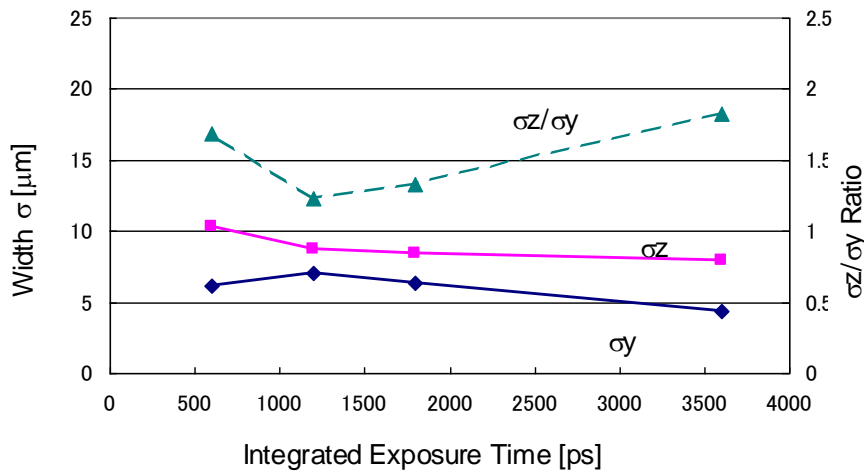
図(2)(g)－4 直線導波路評価用観察系概略図。NFP 観察は NIR カメラで導波路の端を観察する。挿入損失測定は、MMF を突き当て結合し、出力を測定する。



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

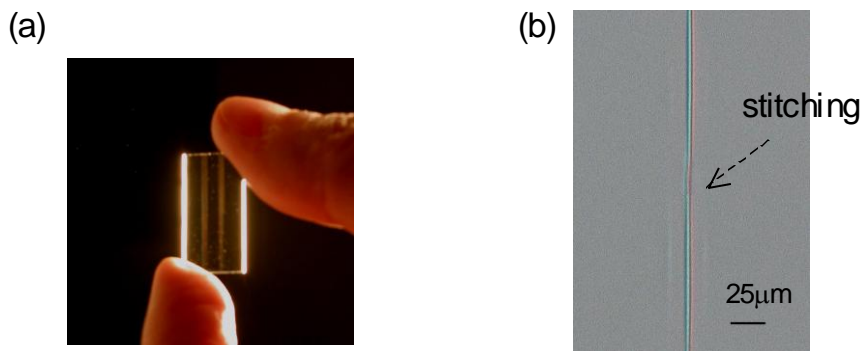


図(2)(g)－7 積算照射時間に対する σ_y 、 σ_z 、その比 σ_z/σ_y

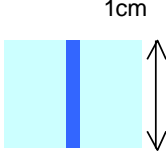
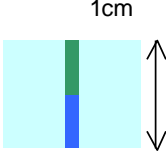
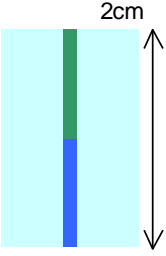
次に直線導波路の伝搬損失の評価を行った。直線導波路の伝搬損失はdB/cmの単位であり、測定には数cm程度のサンプル長が必要である。そこで、最初のショットで1cmの導波路を作製し、サンプルステージを移動し、次のショットでさらに1cmの導波路を作製し、全長2cmの直線導波路を作製した(図(2)(g)－8(a))。このように作製した2cm導波路には、導波路どうしの「つなぎ」が存在する。図(2)(g)－8(b)に導波路のつなぎ付近の光学顕微鏡像を示した。つなぎ付近でも導波路のコントラストの変化は小さいが、このつなぎによる損失も予想されるため、伝搬損失と同時につなぎ損失の評価も行う必要がある。そこで、図(2)(g)－9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 $50\mu\text{m}$)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

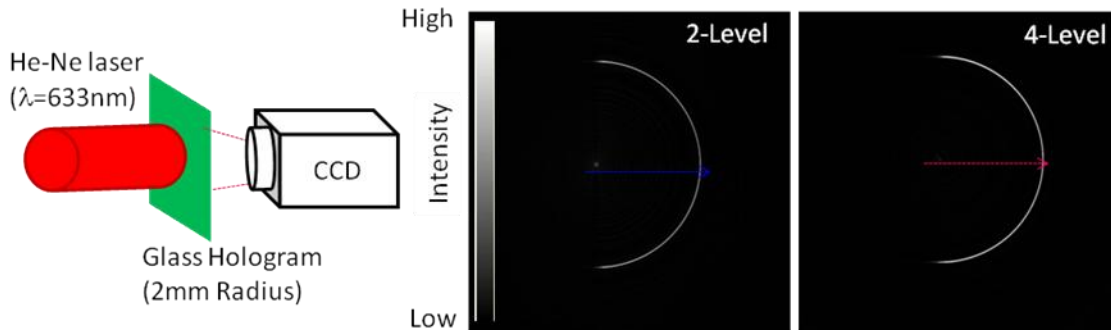
	(A)	(B)	(C)
Schematic description of samples			
# of Stitchings	0	1	1
Insertion Loss at 1550nm [dB]	2.6	2.2	2.0
Insertion Loss at 635nm [dB]	4.6	6.0	8.7

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

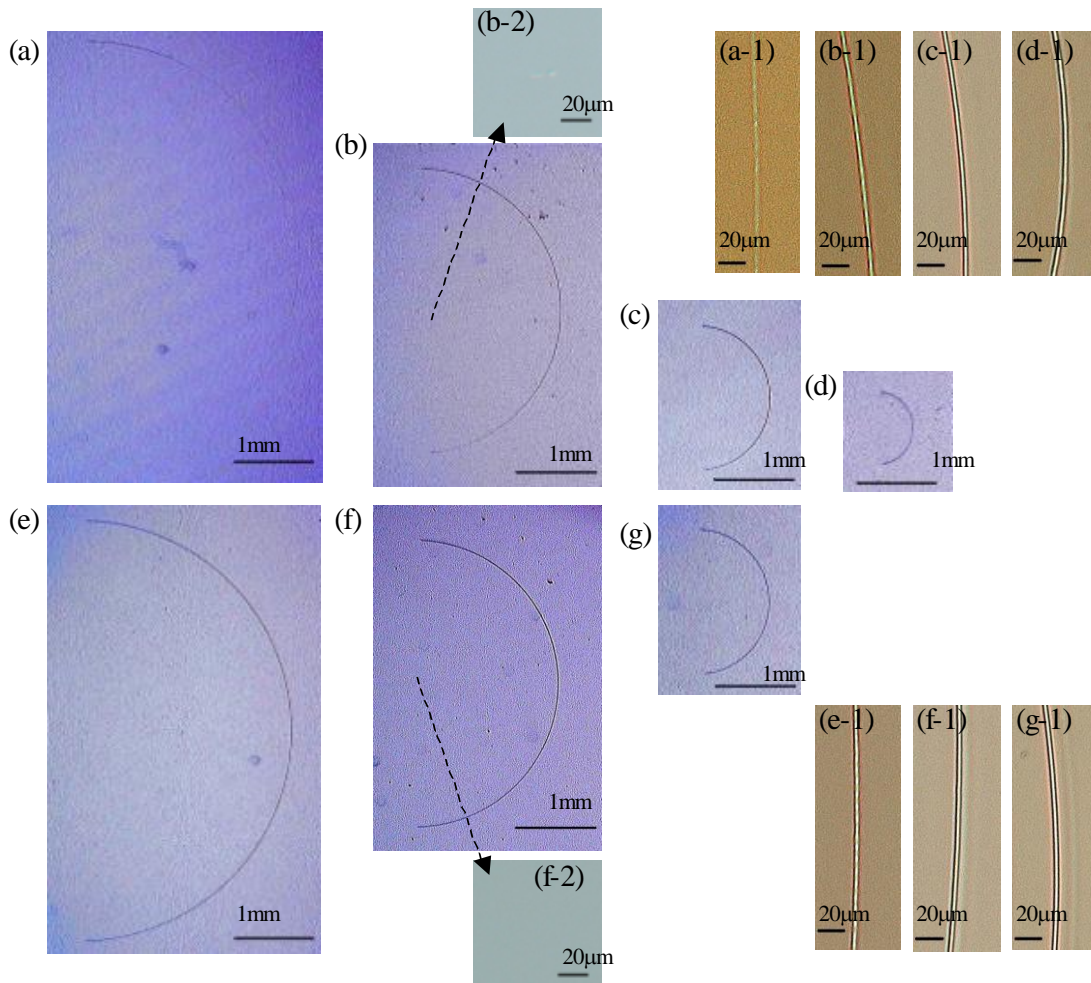
曲げ導波路は光デバイスを構成する際に欠くことのできない要素デバイスの一つである。曲げ導波路では、直線導波路の場合に問題であった伝搬損失に加えて、曲げ損失を考慮する必要がある。曲げ損失はコアとクラッドの屈折率差(Δn)に支配されるため、 $\Delta n \approx 0.01$ では数mmの半径が必要となる[5、20]。ここでは、曲線の一例として半円導波路を一括加工で作製する。半径3mm、2mm、1mm、0.5mmの半円を生成するホログラムを設計し、ガラス・ホログラムとして作製した。ホログラムのピクセルサイズは $5\mu\text{m}$ 、ホログラムサイズ $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ (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)。



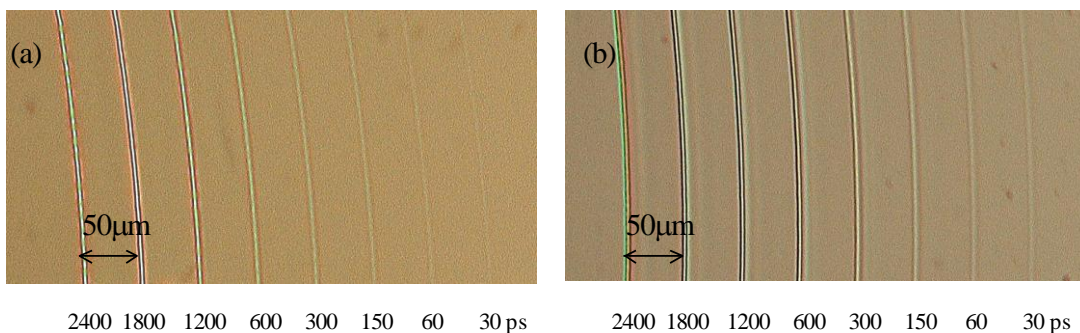
図(2)(g)－10 半径2mmの半円を再生するホログラムの He-Ne レーザーによる再生像 (a)観察装置概略図 (b)位相 2 段ホログラムでの再生像 (c)位相 4 段ホログラムでの再生像

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)円周上の拡大図 (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)

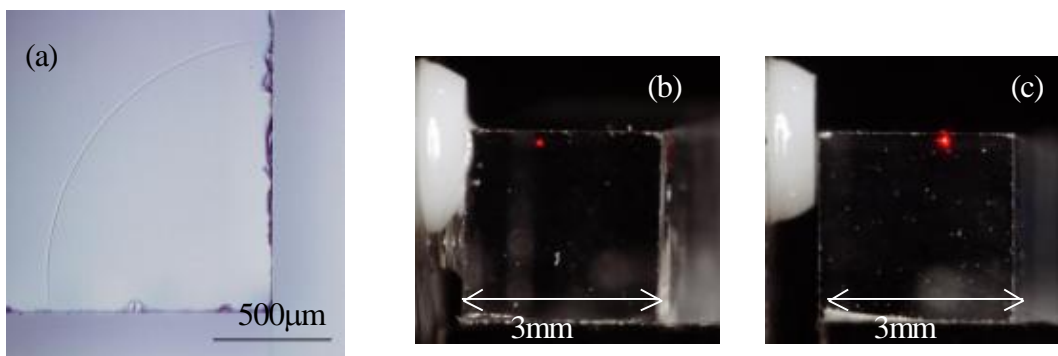
半径2mmの半円を生成する位相2段と位相4段ホログラムによる一括加工の照射時間依存性を調べた。図(2)(g)－12は光学顕微鏡での拡大図である。照射時間が長くなるに従って、照射部分のコントラストが高くなっている。また、位相2段ホログラムで一括加工した半円よりも、位相4段で加工した半円のコントラストが高くなっている。半径2mmの半円加工サンプルを定量位相顕微鏡[18]で観察し、 Δn を測定した[19]。結果は照射時間に依存して $\Delta n = +0.002 \sim +0.01$ (位相4段ホログラムでの加工の場合)であった[15]。直線導波路加工の結果と同様に、照射部分がコア、母材を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

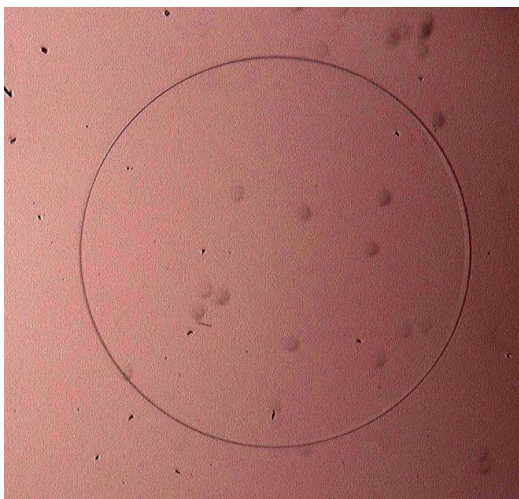
作製した半径0.5mm～3mmの半円導波路の導波特性を調べた。観察装置の制限から、180度導波した光を観察することはできないので、半円導波路を切断・研磨し、図(2)(g)－13(a)のように90度(1/4円)導波路を準備した。波長635nmのレーザー光を導波路の一方から入射し、90度伝搬した出射光を観察した。図(2)(g)－12(b)と(c)は半径1mmと半径2mmの場合の出射光で、これらは導波路として機能している。また、半径3mmの導波路でも出射光を確認できたが、半径0.5mmでは確認できなかった。曲線導波路では伝搬損失に加えて曲げ損失が存在し、半径が小さいほど曲げ損失が大きくなる[5、20]。作製した導波路の Δn 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。



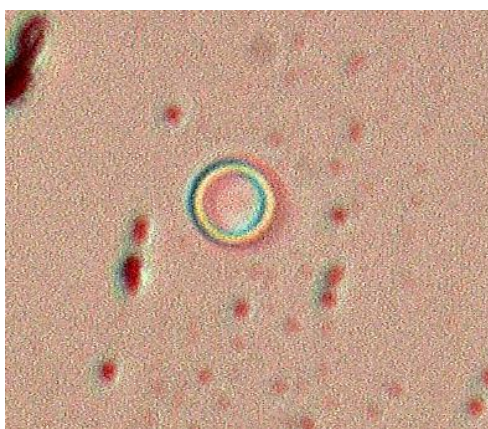
図(2)(g)－13 (a)導波光観察用半径1mmの1/4円導波路 (b)半径1mmの1/4円の635nmでの出射光 (c)半径2mmの1/4円の635nmでの出射光

・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



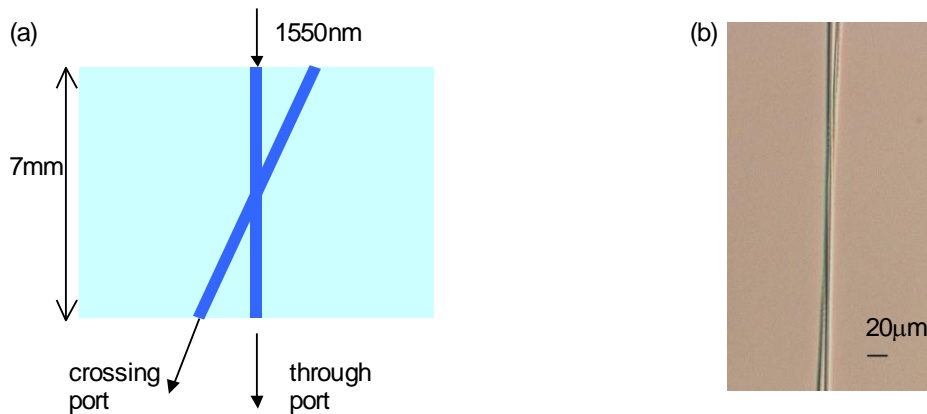
図(2)(g)-15 半径10 μ mの円の一括加工結果

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。

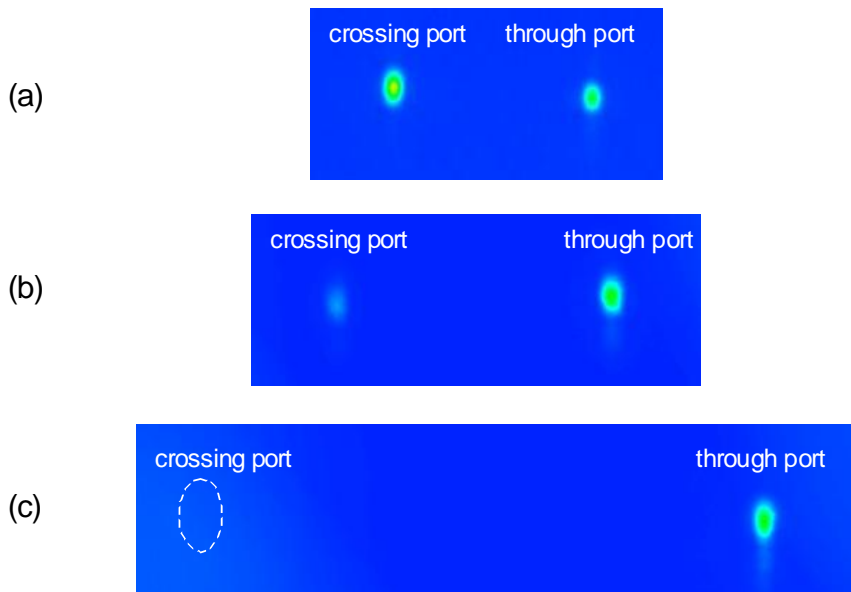
・X型結合器(2×2結合器)

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。

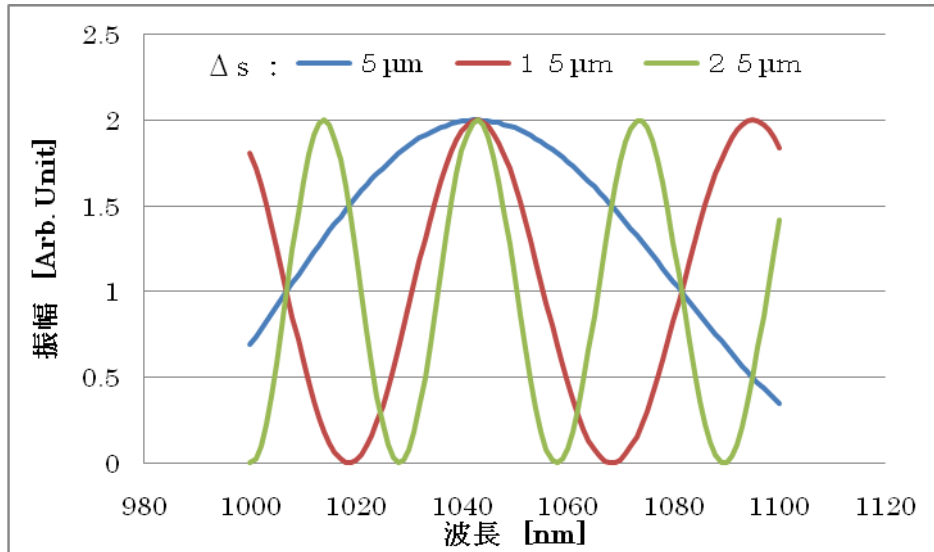


図(2)(g)-17 X 型結合器の波長1550nm での NFP (a)交差角度2度 (b)交差角度3.5度 (c)交差角度5度

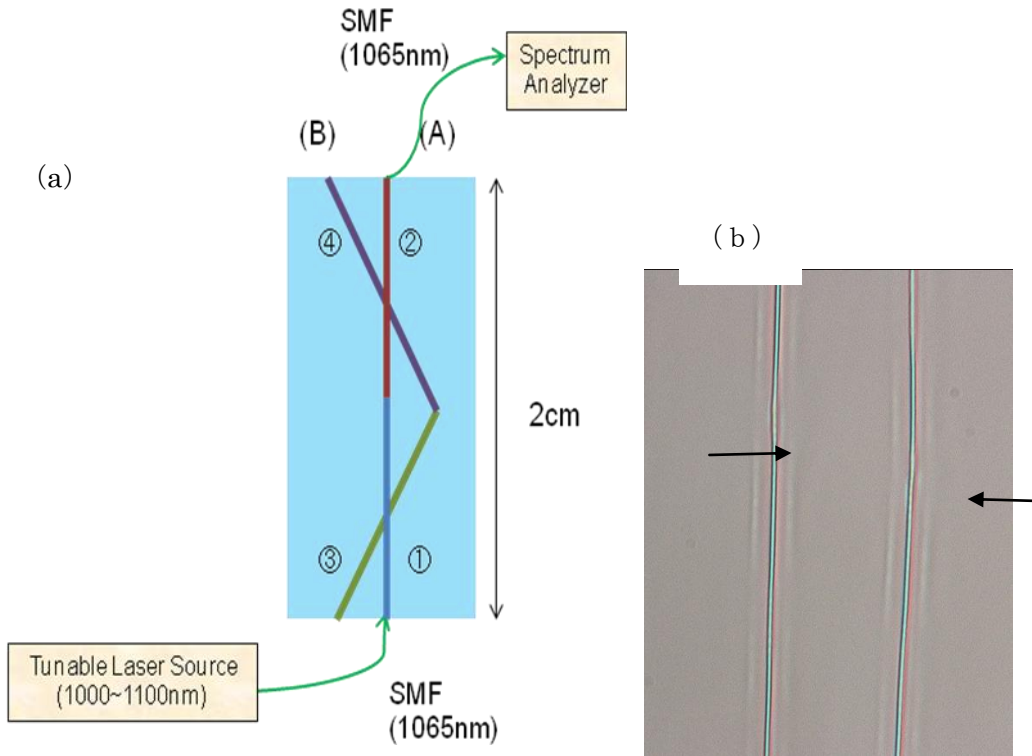
・Macha-Zehnder 型干渉計

非対称経路からなる Macha-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 Δs 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。



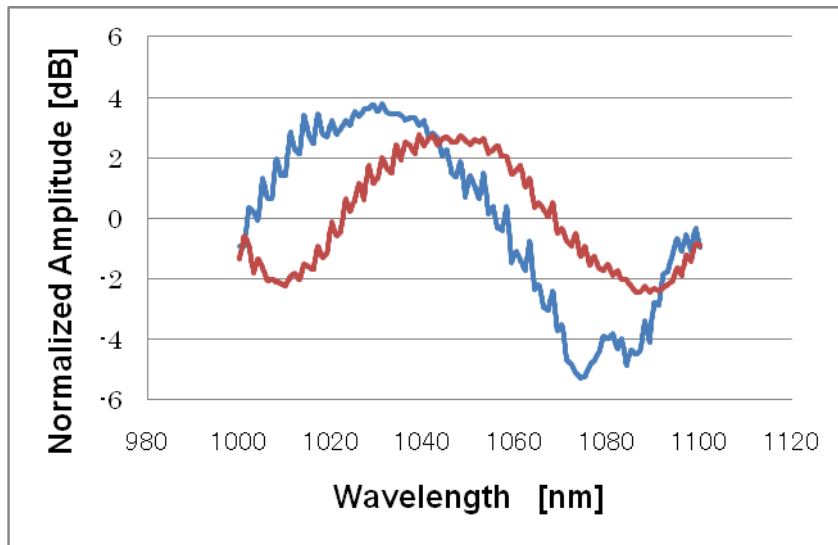
図(2)(g)－18 波長1000nm～1100nmに対する MZI の振幅、 $\Delta s=5\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ の場合。



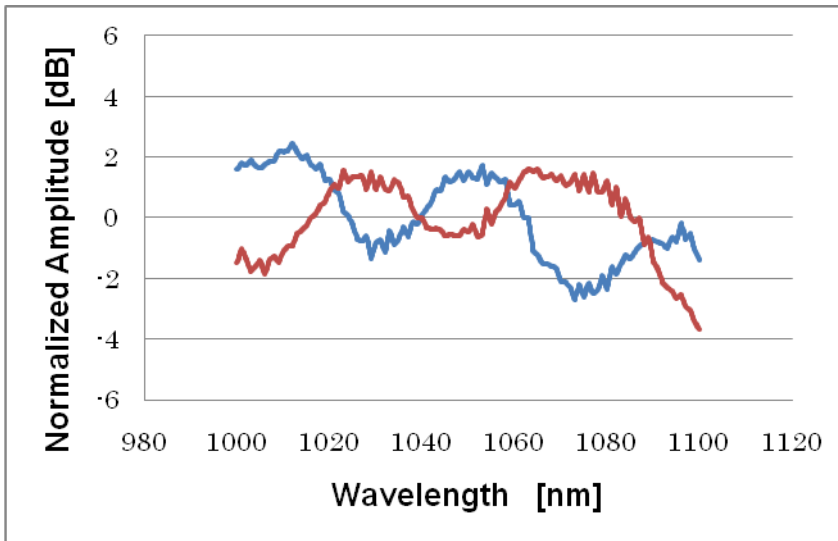
図(2)(g)－19 (a) MZI の概略図、波長依存性測定系 (b) 作製した MZI の導波路つなぎ付近の光学顕微鏡像(矢印がつなぎ部分)

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 Δs に依存して振動周期が変化しており、 Δs 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)

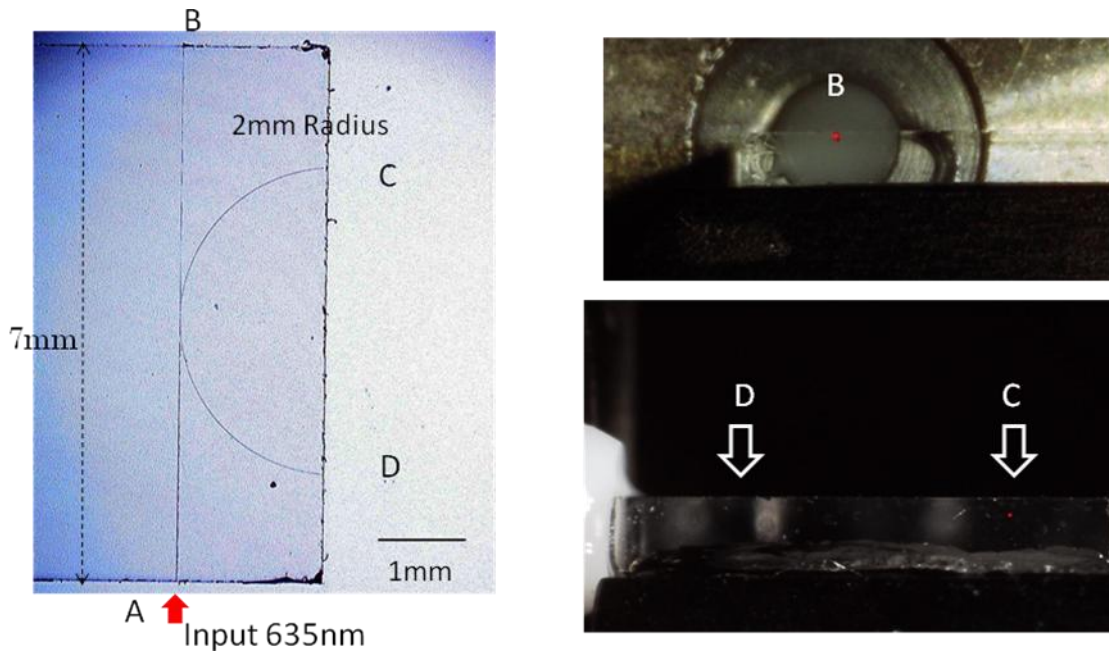


図(2)(g)-21 波長1100nm~1100nmに対する MZI の出力、 $\Delta s=16\mu\text{m}$ (周期:42nm)

・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。

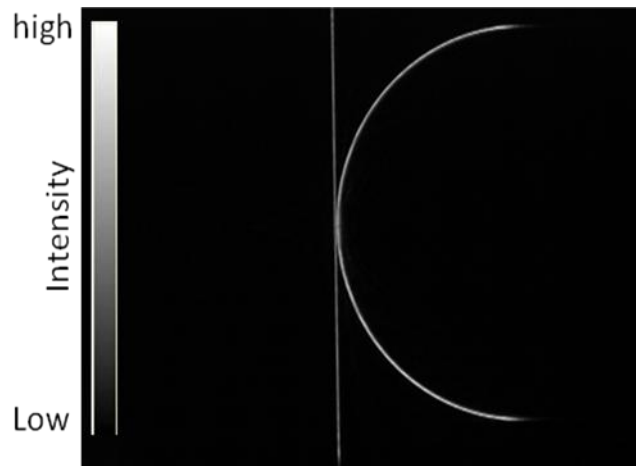
ここでは半径2mmの半円を生成するホログラムを使用し、合成石英内部にK型結合器を作製した。図(2)(g)-23(a)はK型結合器の全体像である。図(2)(g)-23(a)に示す直線導波路の一つの端(入射“A”)から波長635nmのレーザー光を入射した。結合器として機能する場合、直線導波路のもう一方の端“B”と半円導波路の端“C”でのみ導波光が観察され、半円導波路の端“D”では導波光は観察されないはずである。図(2)(g)-23(b)は直線導波路の“B”端を観察したもので、図(2)(g)-23(c)は半円導波路の端“C”と“D”を観察したものである。予想通り、直線導波路端“B”と半円導波路の端“C”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。



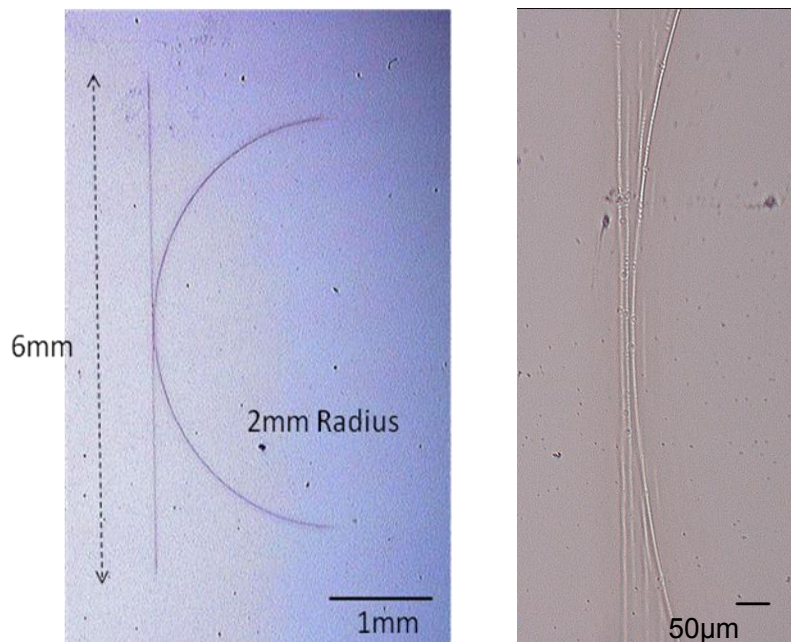
図(2)(g)-22 2ショット(直線ホログラムと半円ホログラム)での K 型結合器の試作例 (a)加工した K 型結合器の全体図 (b)635nm の出射光(直線側、図(a)の“B”から観察) (c)635nm の出射光(半円側、図(a)の“C”と“D”からの観察)

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 μ 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 Δn 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 Δn 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 ~ 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 Δn 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は、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 Δn 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 Δn 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 Δn 測定用において、できるだけ異なる部位の Δn 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 Δn 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(Δn)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 Δn 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 Δn 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 mm のラインは 0.25 秒かかる。一方で、上記の Δn 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($0.25\text{ 秒}/0.005\text{ 秒}=\text{)}$ 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 μ 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 μ m 程度であり、目標とする 300 μ 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 Δn を測定したところ、逐次照射加工と同様に Δn 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

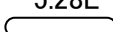
	250kHz加工(逐次加工)	ホログラム加工
波長	800 nm	800 nm
パルス幅(AC:オートコリレーター読み)	300 fs(AC)	300 fs(AC)
くり返し周波数	250 kHz	1 kHz
照射時間	3 sec	1000 sec
スポット直径(又はライン幅)	5 μ m	5 μ m
ライン長さ	-	2500 μ m
加工面積	19.6 μ m ²	12500 μ m ²
平均出力	0.48 W	0.66 W
パルスエネルギー	1.92E-06 J/パルス	6.60E-04 J/パルス
単位面積あたりのパルスエネルギー	9.78E-08 J/μ m ²	5.28E-08 J/μ m ²
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 ² 定点と見なし て	5.28E-02 J/μ m ² 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 (μm)	4	2	2	2
L19	dz (μm)	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 (μJ)	4	2500000	3000000	400000
L22	面積 μm^2	12.6	320	480	500
L23	$\mu J/\mu m^2$	0.16	0.78	0.63	0.80
L24	ピークパワー密度 TW/cm^2	53.05	260.42	208.33	140.35
L25	$\mu J/\mu m^2$	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 $\mu J/\mu m^2$ ⑧	0.10	0.09	0.14	0.18
L30	④の補正 ピークパワー密度 TW/cm^2	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

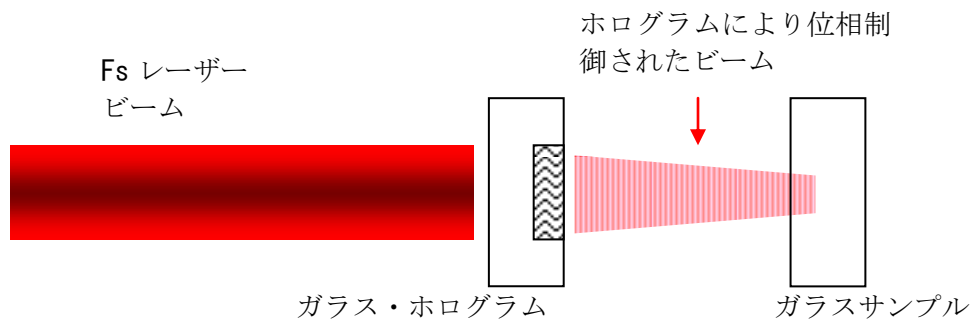


図 KF1 ガラス・ホログラムを用いてレンズを併用する加工の配置の模式図。

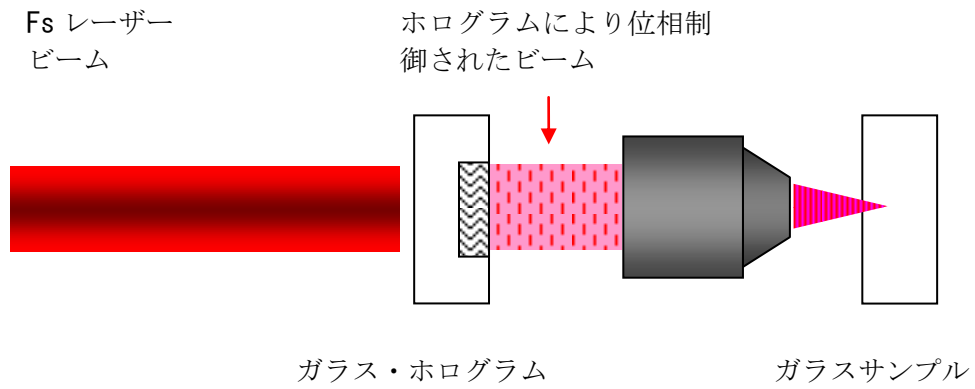


図 KF2 ガラス・ホログラムを用いてレンズを併用する加工の配置の模式図。

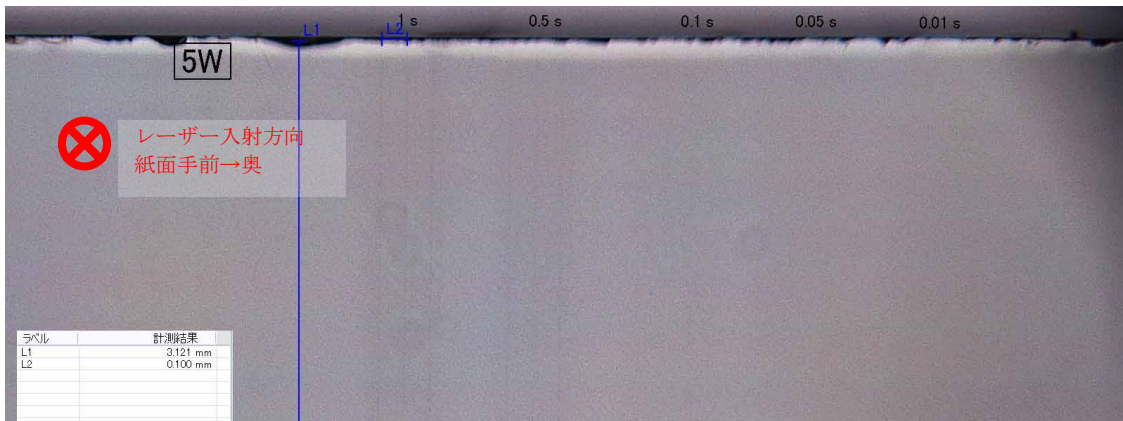


図 KF3 パワー5W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（入射面側から観察）

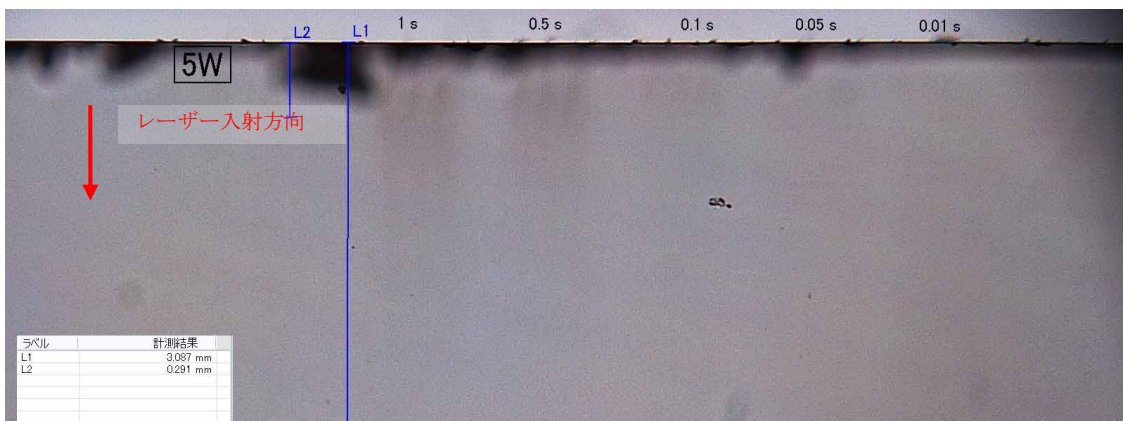


図 KF4 パワー5W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（断面側から観察）

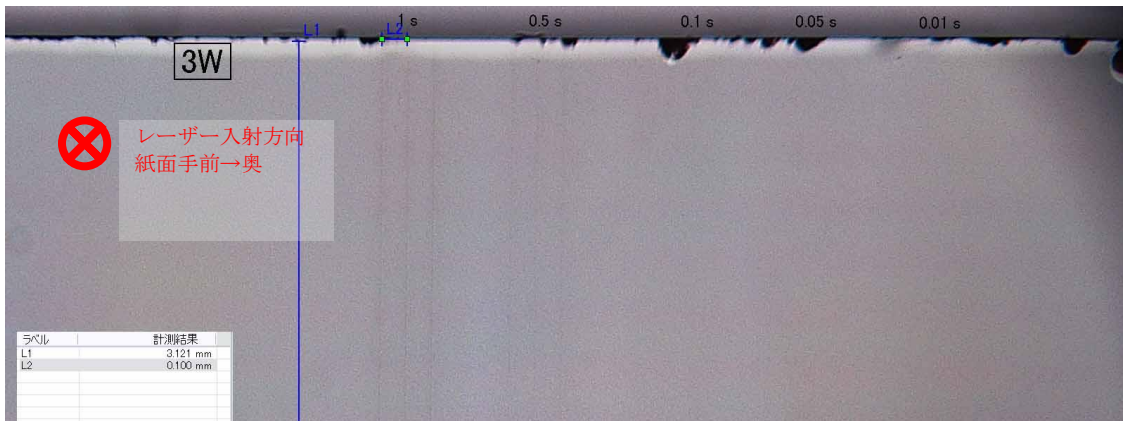


図 KF5 パワー3W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（入射面側から観察）

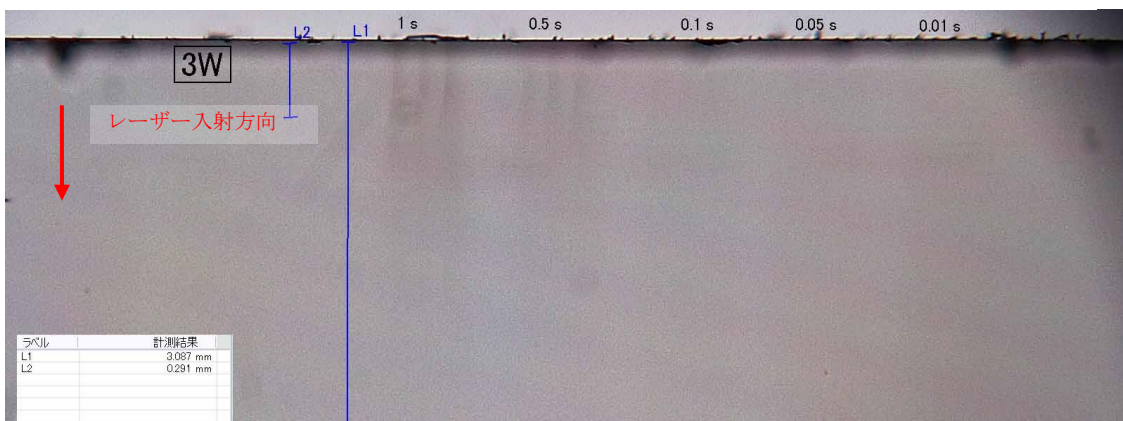


図 KF6 パワー3W（固定）の加工結果の光学顕微鏡像（段面側から観察）

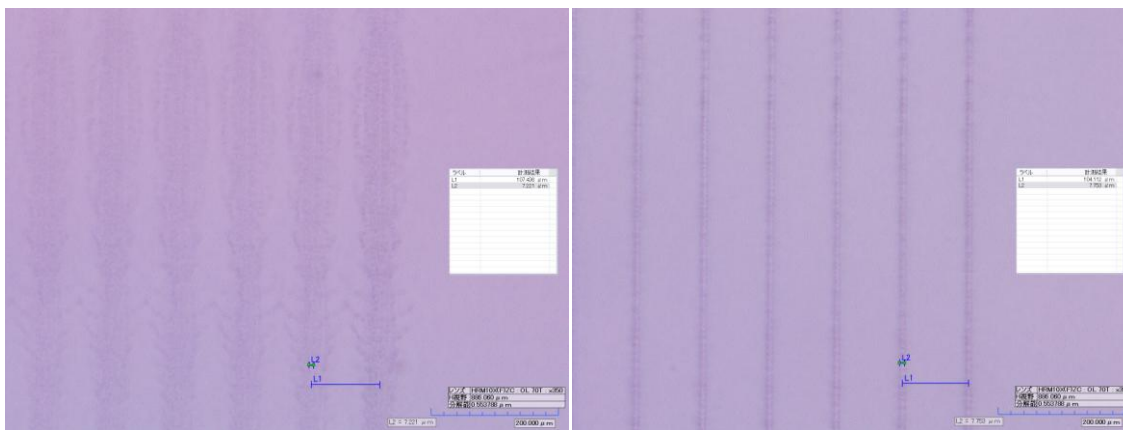


図 KF7 照射時間 10 秒の加工結果の光学顕微鏡像。（入射面側から観察。左 1.5W、右 0.6W）

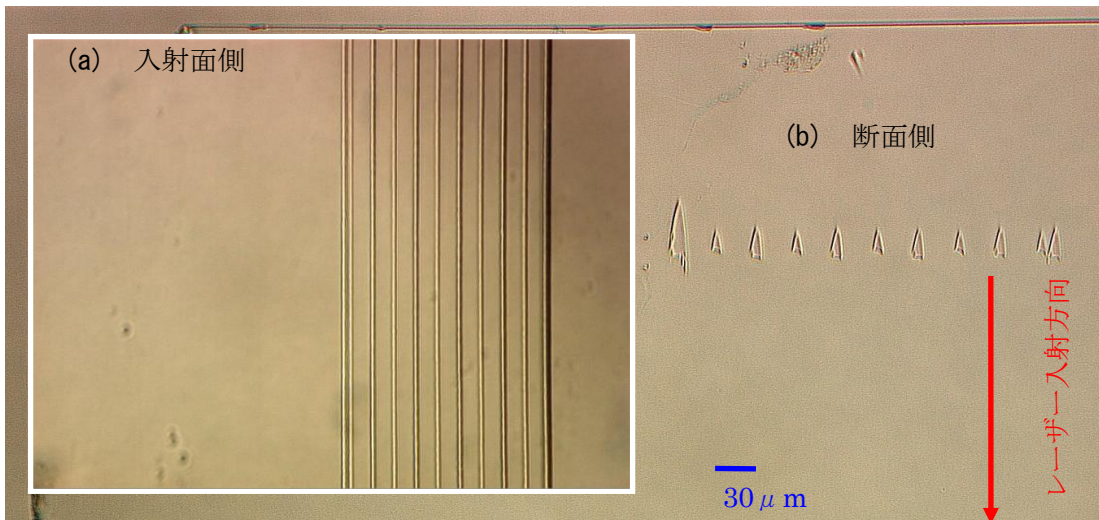


図 KF8 光学顕微鏡像。(250kHz で逐次照射加工)

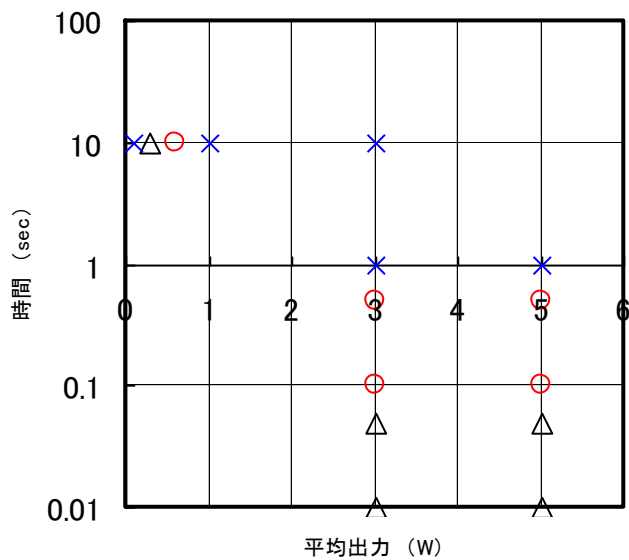


図 KF9 形成された異質相の外観評価結果

○：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

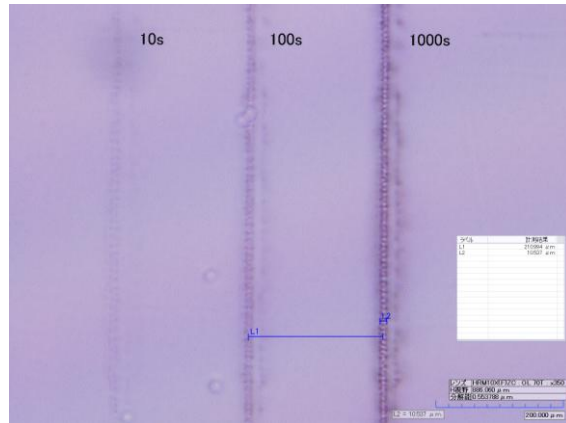


図 KF10 0.6W で照射時間を変えたときの光学顕微鏡像。(入射面から)

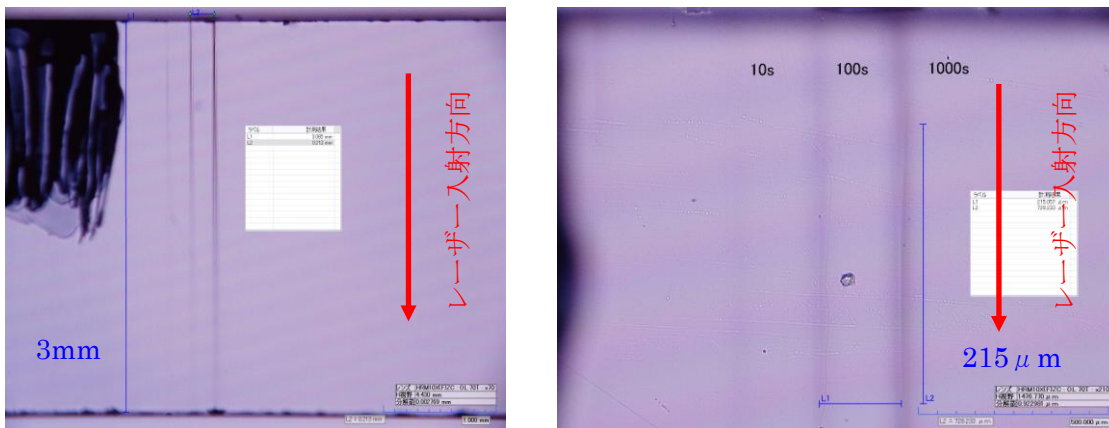


図 KF11 0.6W で照射時間を変えたときの光学顕微鏡像。(断面観察)(左)表面近傍の拡大像。

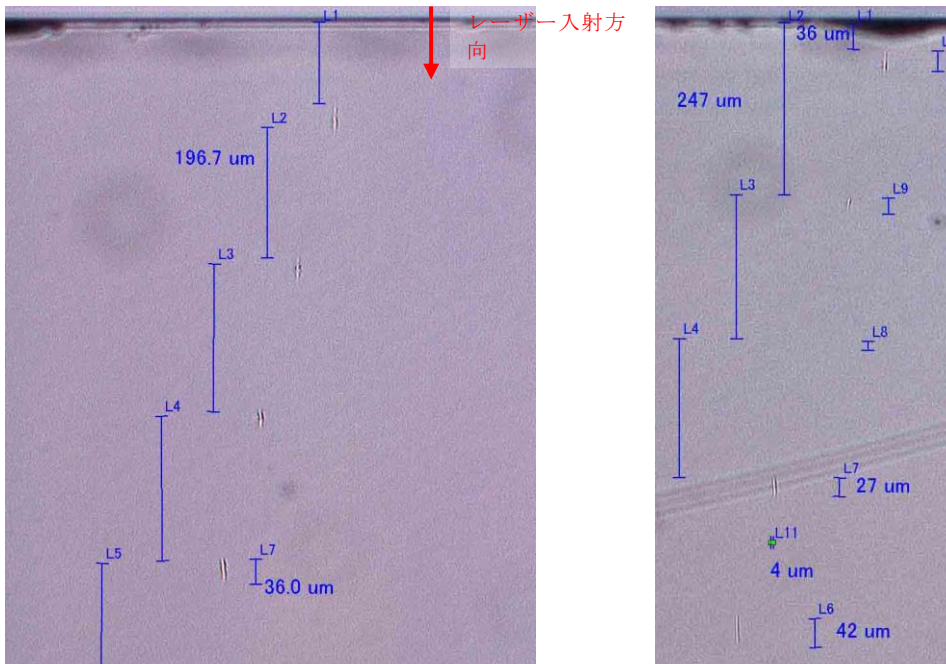


図 KF12 40x(0.55) レンズのみで加工した異質相ドットの断面からの光学顕微鏡像。
 パルス幅：300fs(AC)、平均出力：2mW、照射時間：10sec(左)、0.002sec(右)

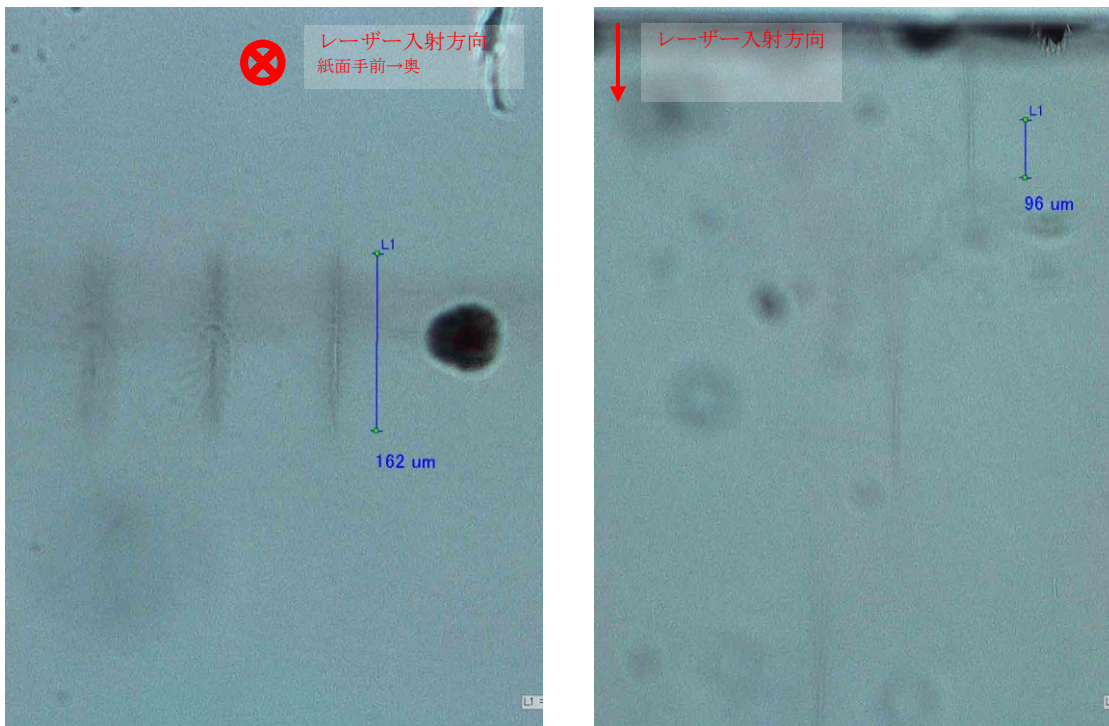


図 KF13 40x(0.55) レンズを併用したホログラム(2段型)加工による異質相の光学顕微鏡
 画像。パルス幅：300fs(AC)、平均出力：250mW、照射時間：10sec

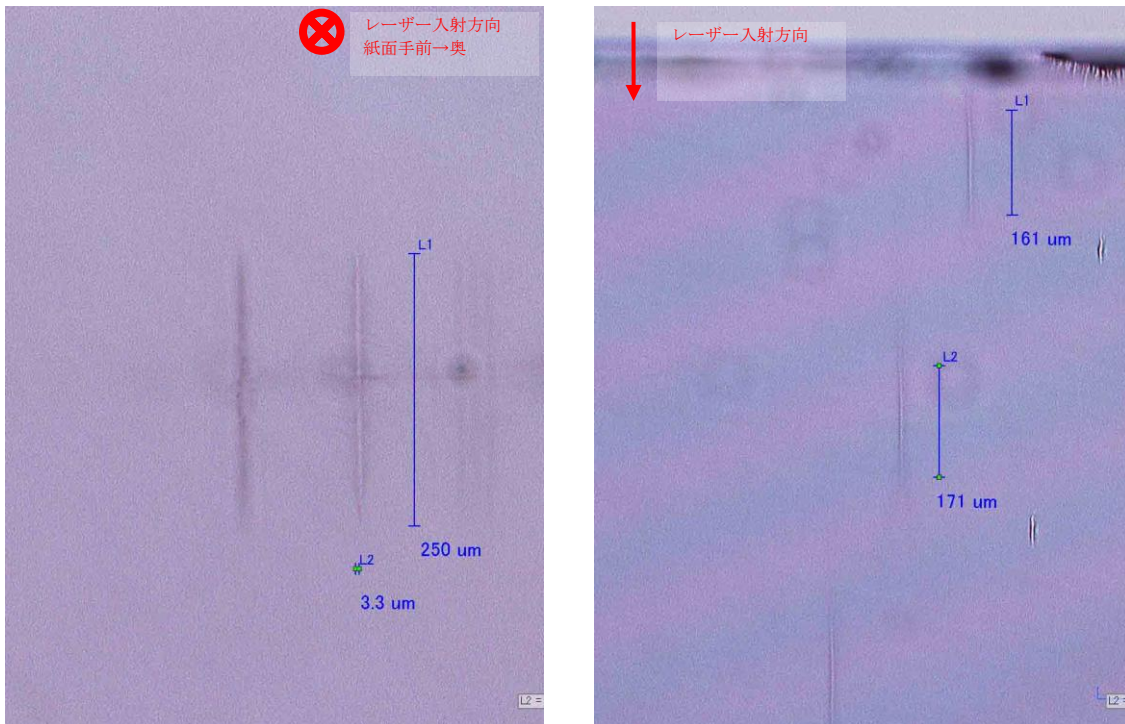


図 KF14 40x(0.55) レンズを併用したホログラム(4 段型)加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅 : 300fs (AC)、平均出力 : 300mW、照射時間 : 10sec

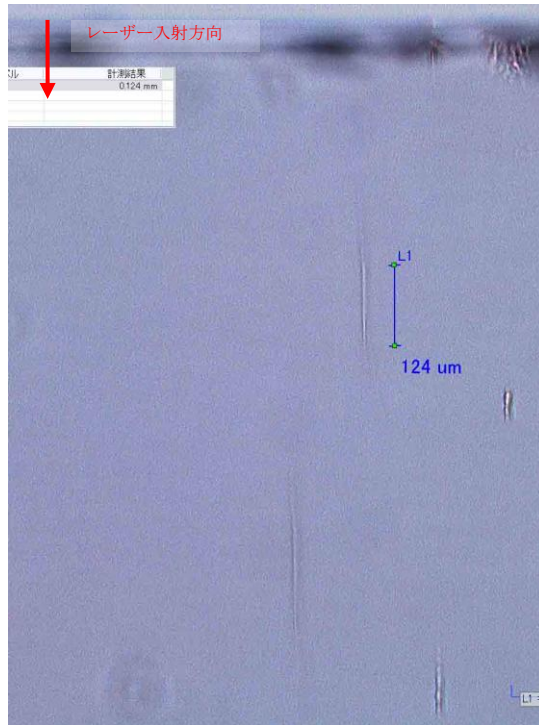


図 KF15 40x (0.55) レンズを併用したホログラム (4 段型) 加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅 : 570fs (AC)、平均出力 : 300mW、照射時間 : 10sec

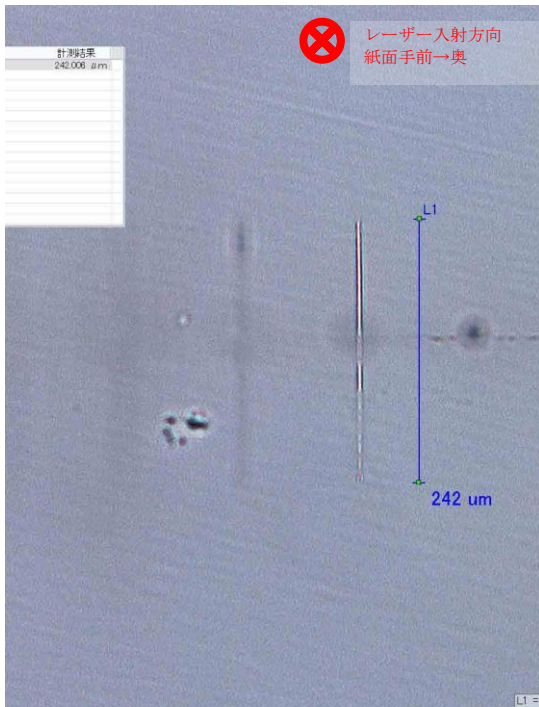


図 KF16 40x (0.55) レンズを併用したホログラム (4 段型) 加工による異質相の光学顕微鏡画像。パルス幅 : 570fs (AC)、平均出力 : 400mW、照射時間 : 10sec

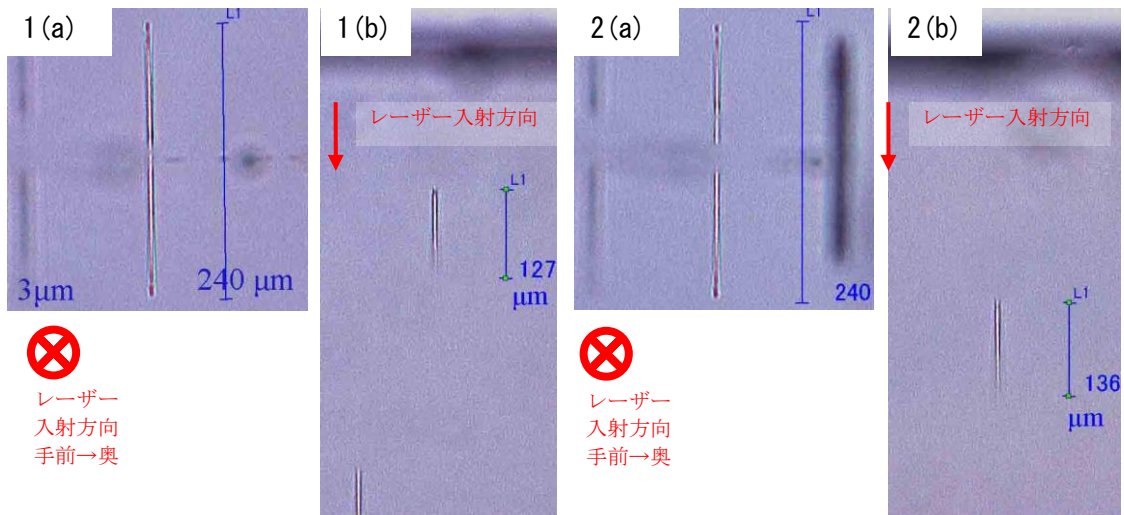
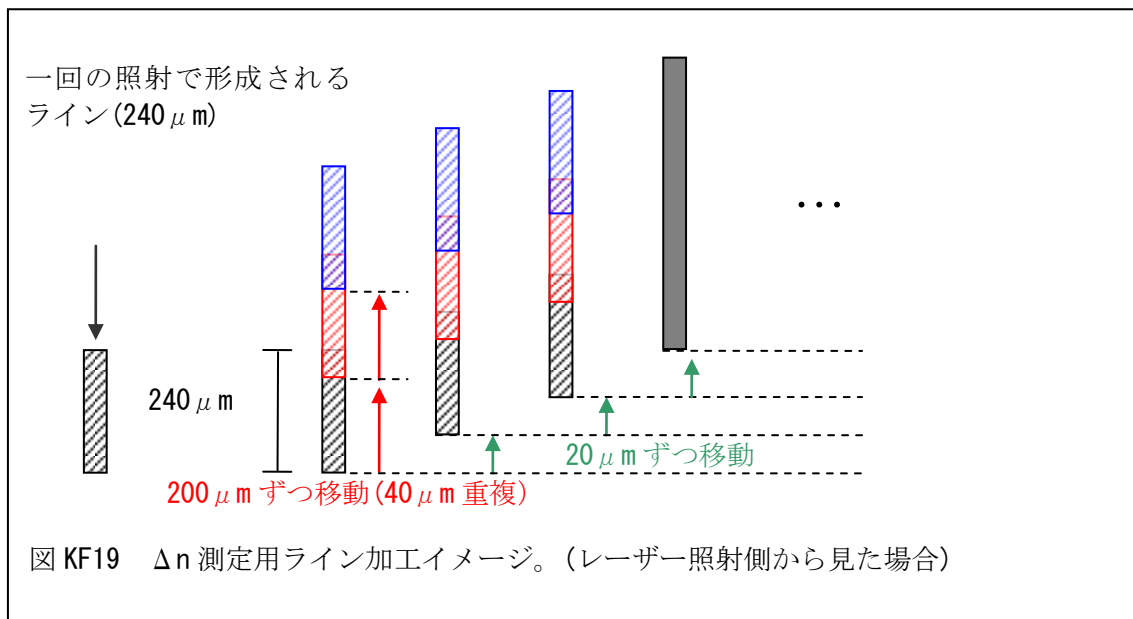


図 KF17 照射時間 0.005 秒のときの異質相光学顕微鏡像。
(a) レーザー入射面から、(b) ライン断面方向から観察

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



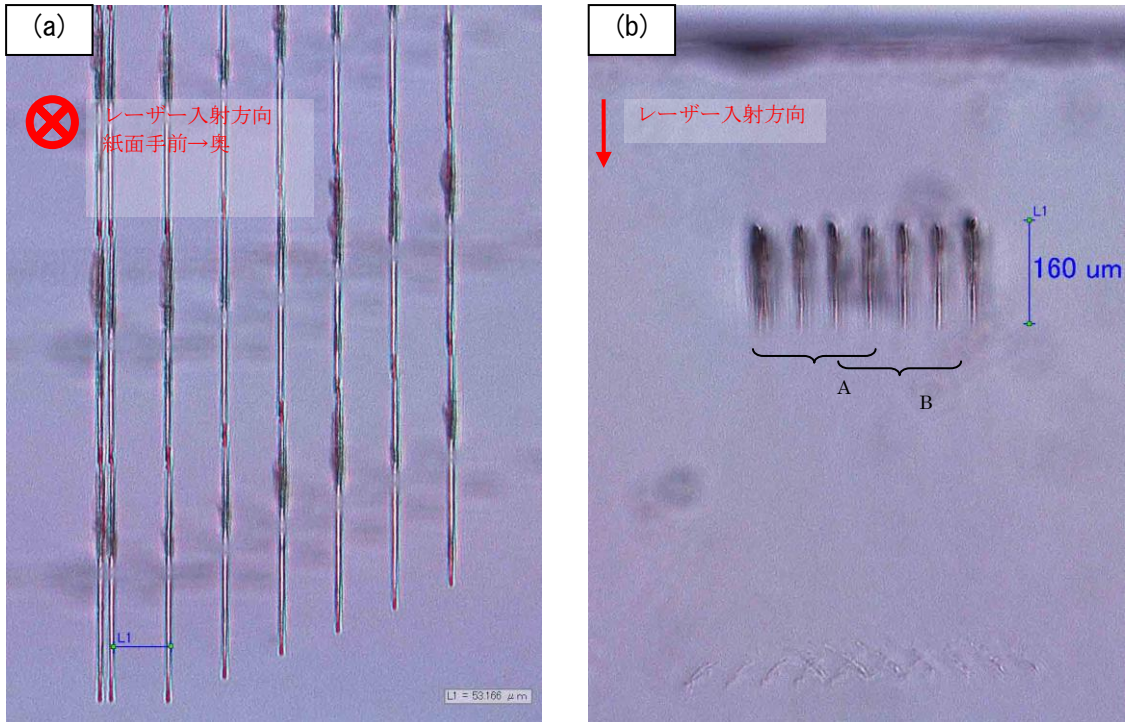


図 4 KF20 Δn 測定用ライン加工の光学顕微鏡像。(a) レーザー入射面から、(b) ライン断面方向から観察

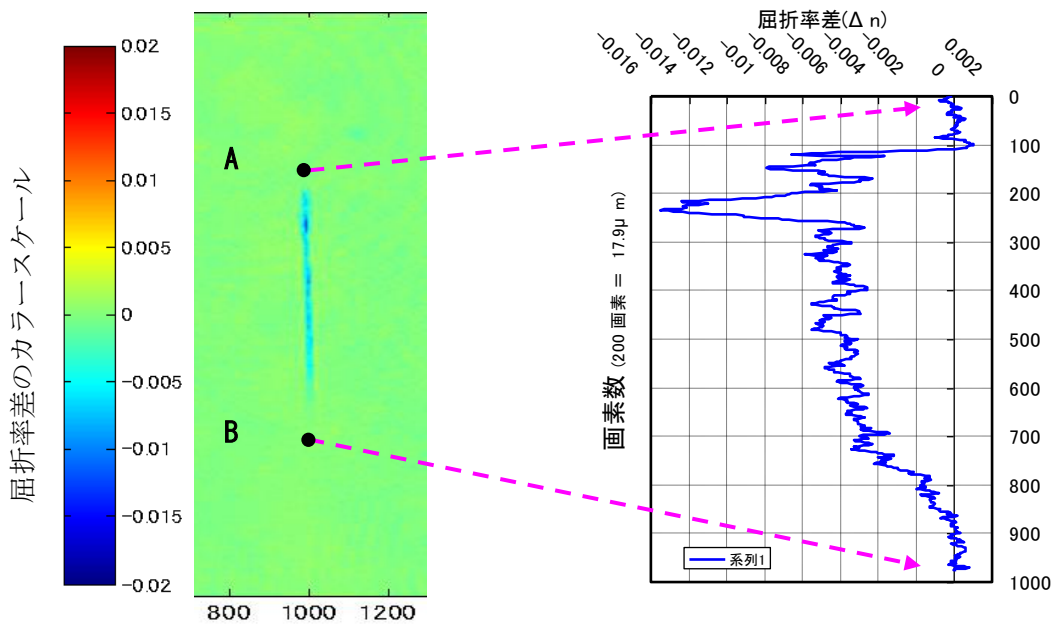


図 KF21 ライン断面方向からの屈折率差測定結果。

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

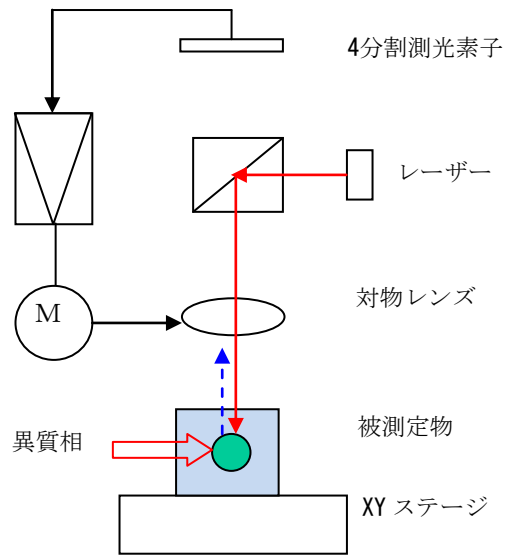
今回用いた三次元測定器は、表面の反射光を捉えて表面形状を測定する市販の測定器である。しかし、透明ガラスの内部形状を測定評価するためには、従来の方法では母材との屈折率の違いが少ないため非常に難しかった。今回、Z軸分解能が非常に高い三次元測定器に改良を行い、光路長の変化により形状を測定することが可能となった。

② 装置及び測定

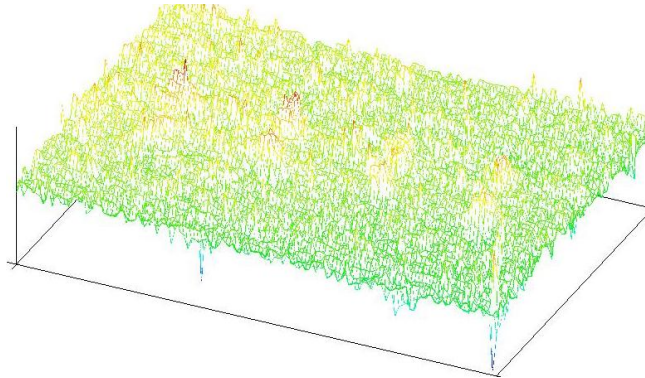
この装置のオートフォーカスはレーザー光の最高反射強度位置をフォーカス面とする方式で、対物レンズの移動により反射結像点を分割測光素子の中央へ移動する構造となっている¹⁾。ピント調整は対物レンズをピエゾ素子で駆動させる方式で、分解能は $0.001\mu\text{m}$ (10nm) である。対物レンズは50倍(20倍・100倍のレンズも持つ)で、この時の測定用レーザービームスポットは $1.5\mu\text{m}$ である。この三次元測定器は物体表面の反射を利用して物体表面の形状を測定するために開発されている。ガラスの屈折率を 1.5、異質相の屈折率差を 0.01 とすると異質相での反射率は 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。

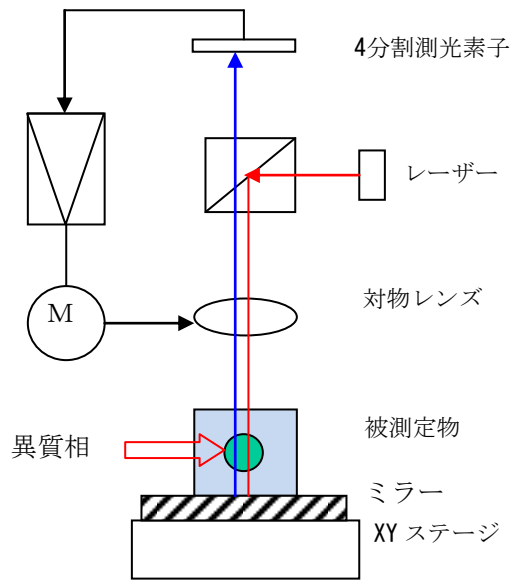
図(i)a-5はフェムト秒レーザーを照射してガラス内部に作製した異質相の光学顕微鏡画像で、図(i)a-6はこれを三次元測定器で測定した結果である。図(i)a-8は逐次描画法で作製したガラス内部の三次元構造体の光学顕微鏡画像で、図(i)a-9はこれを三次元測定器で測定した結果である。図(i)a-11は一括描画法で作製したガラス内部に異質相を円周状に配置した構造体の光学顕微鏡画像である。図(i)a-12はこれを三次元測定器により測定した俯瞰画像である。



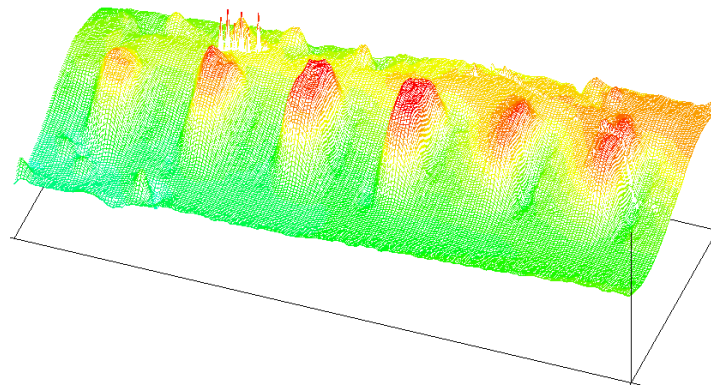
図(i)a)-1 改良前の構造図



図(i)a)-2 改良前の測定結果



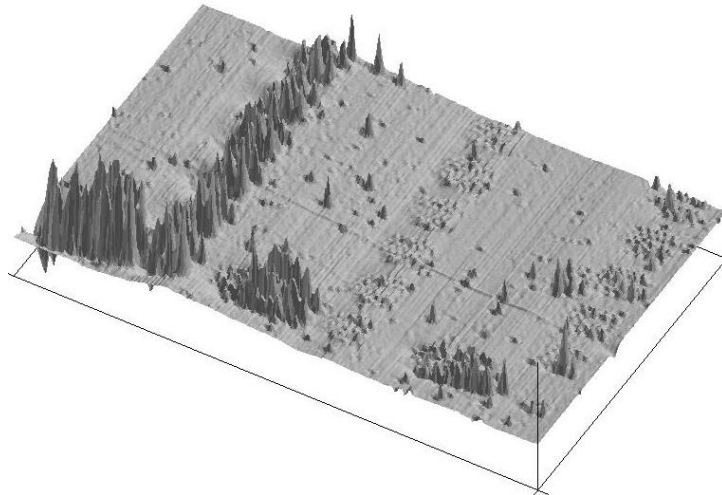
図(i)a)-3 改良後の構造図



図(i)a)-4 改良後の測定結果



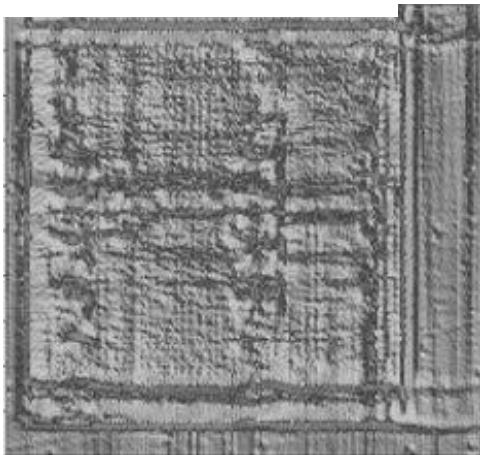
图(i)a)-6 三次元測定結果



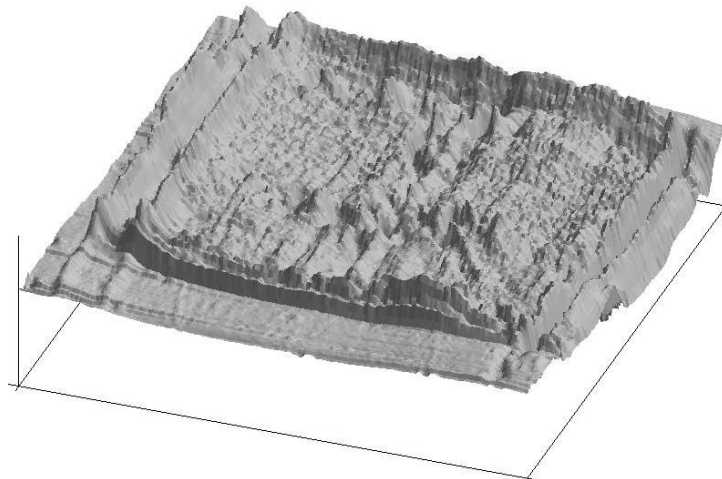
图(i)a)-7 三次元測定俯瞰像



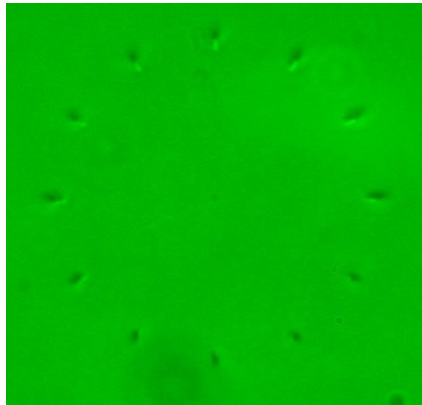
图(i)a)-8 光学顕微鏡像



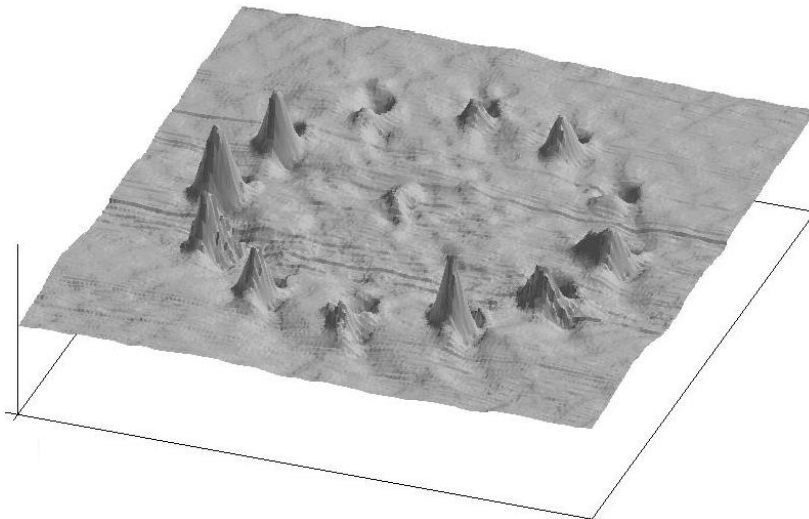
图(i)a)-9 三次元測定結果



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²⁾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

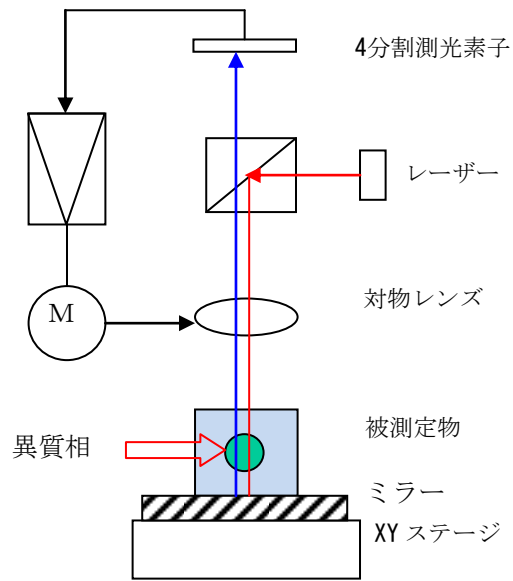
q_i : 面(i-1)と面(i)の通過点間の幾何学距離

今回の計算では初期値 \mathbf{Q}_1 を $X_0=1, Y_0=0$ とした。

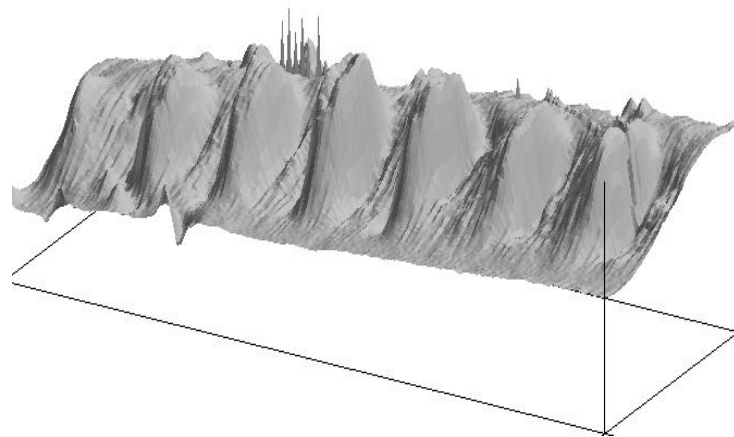
異質相構造モデルを図(i)b-6のように同心円構造とし、光軸に平行に入射させる光線の高さを変えてスキューレイ追跡により各面の光線通過点間の幾何学距離(q)を求め、これに屈折率を掛けて光路長を求めた。異質相の無い部分とある部分との光路長差を求め、三次元測定器による測定値の形状や寸法と一致するように屈折率や円半径等を変えて最適化し、屈折率を求めた。

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

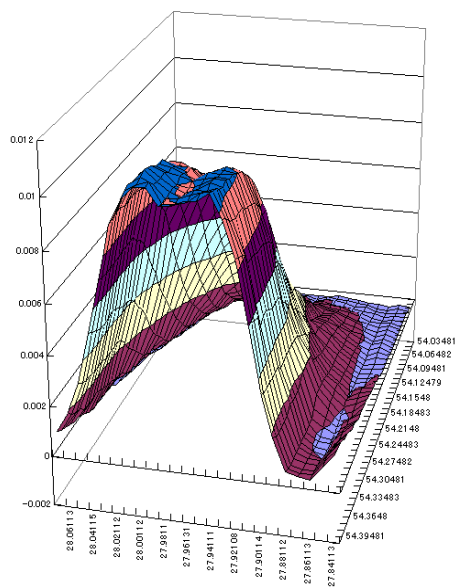
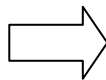
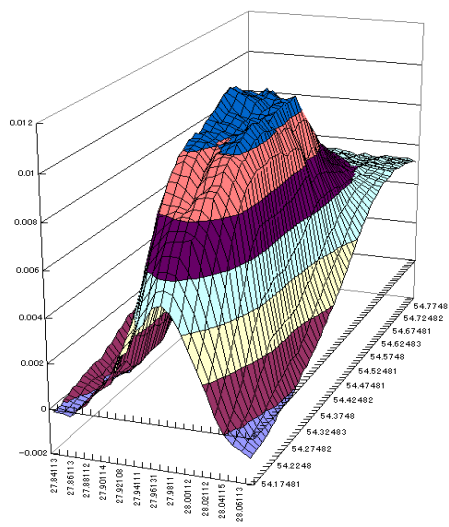
寸法となるように屈折率と球面半径等を変化させスキューレイ追跡計算をした結果が図(i)b-8である。屈折率は外側より $n_1=1.46$, $n_2=1.47$, $n_3=1.49$, $n_4=1.52$ のときであり、屈折率差は 0.06 となり、屈折率分布は図(i)b-9のようになった。



図(i)b)-1 三次元測定機構造

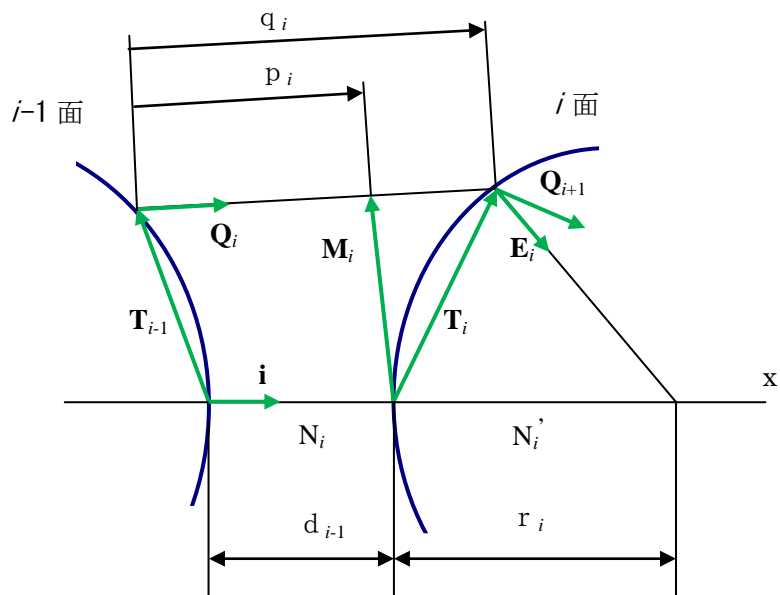


図(i)b)-2 三次元測定器測定結果

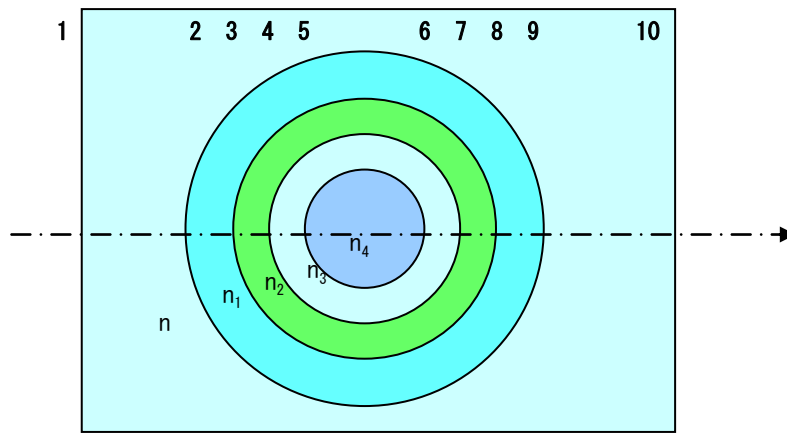


図(i)b)-3 一部切出し

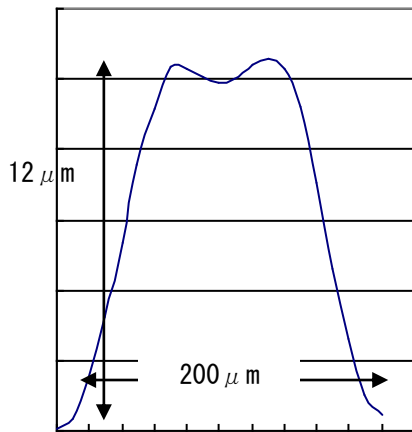
図(i)b)-4 切断面



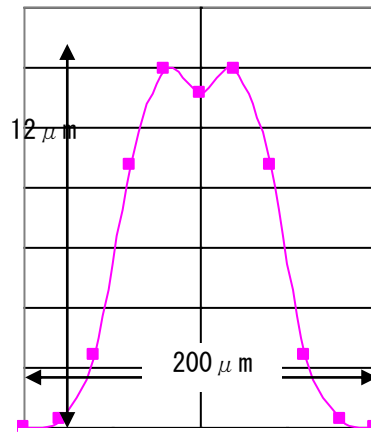
図(i)b)-5 スキューレイの追跡



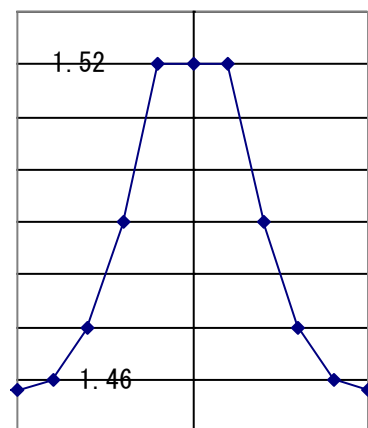
図(i)b)-6 異質相構造モデル



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³⁾⁴⁾⁵⁾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。

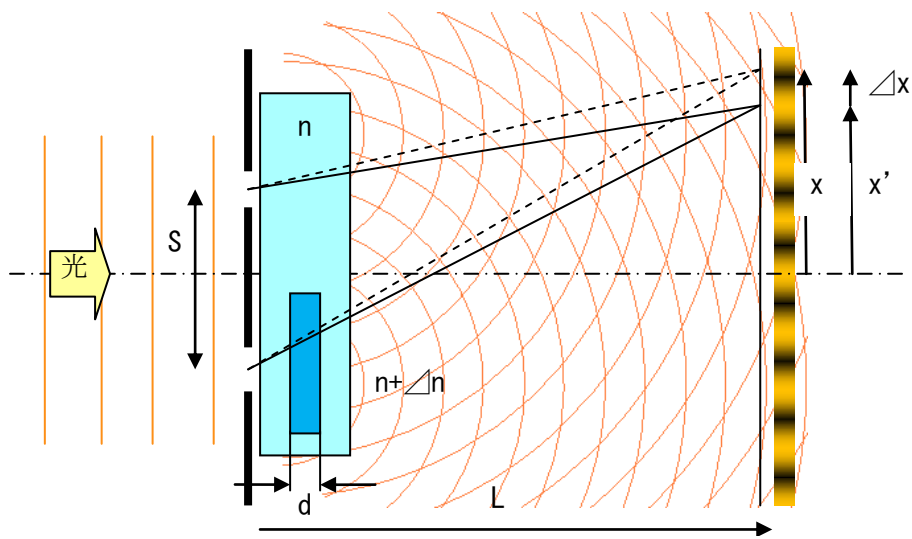
スリット間隔 S 、層状厚み d 、評価面までの距離 L 、母材屈折率 n 、屈折率差 Δn として、スリットから出る波面の光路差を求める。

$$A \text{ 部での光路差} : \Delta L = S \cdot x / L - (n + \Delta n) d + nd = m \lambda$$

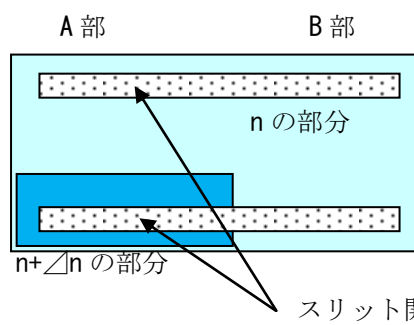
$$B \text{ 部での光路差} : \Delta L' = S \cdot x' / L - nd + nd = m \lambda$$

$$\text{よって} \quad \Delta n = \Delta x \cdot S / L d$$

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 $\lambda=535\text{nm}$, 633nm , 670nm , 784nm 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。



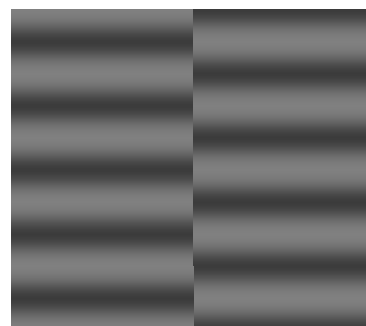
図(i)b)-10 ダブルスリット測定配置図



図(i)b)-11 スリット開口部への試料配置図

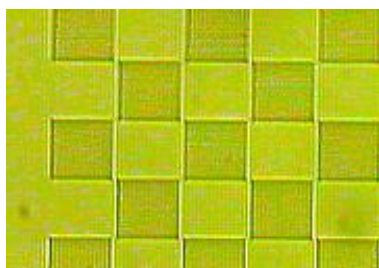


屈折率差がない時



屈折率差がある時

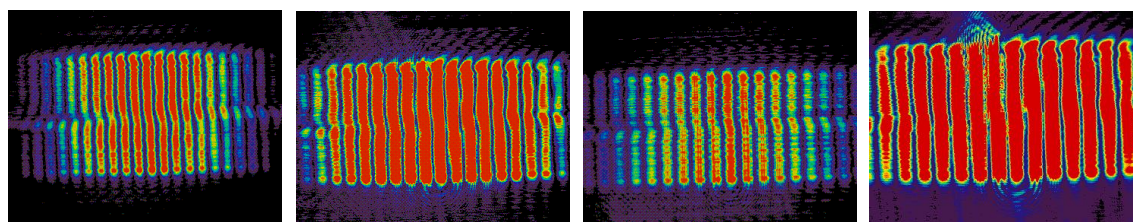
図(i)b)-12 干渉縞の変位



図(i)b)-13 OLPF 顕微鏡像

表(i)b)-1 測定結果

λ (nm)	535	633	670	784
Δx (mm)	0.3661	0.3994	0.4326	0.4742
Δn	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⁶⁾。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⁷⁾⁸⁾。

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⁹⁾。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⁴⁾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とを試みてみた。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⁶⁾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

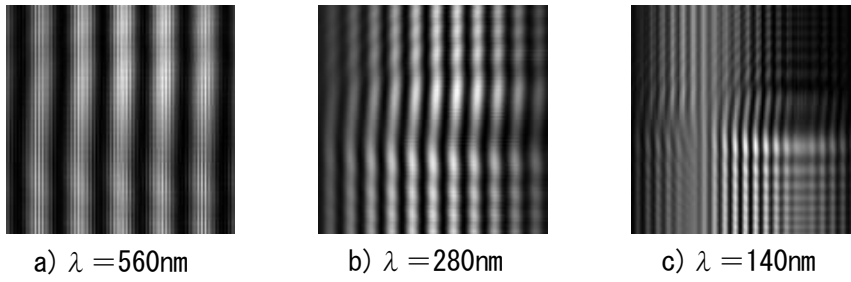
縞を生じる。このため、この干渉計は透過型干渉計でありながら反射型干渉計と同じ半波長毎の干渉縞を生じる。

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。

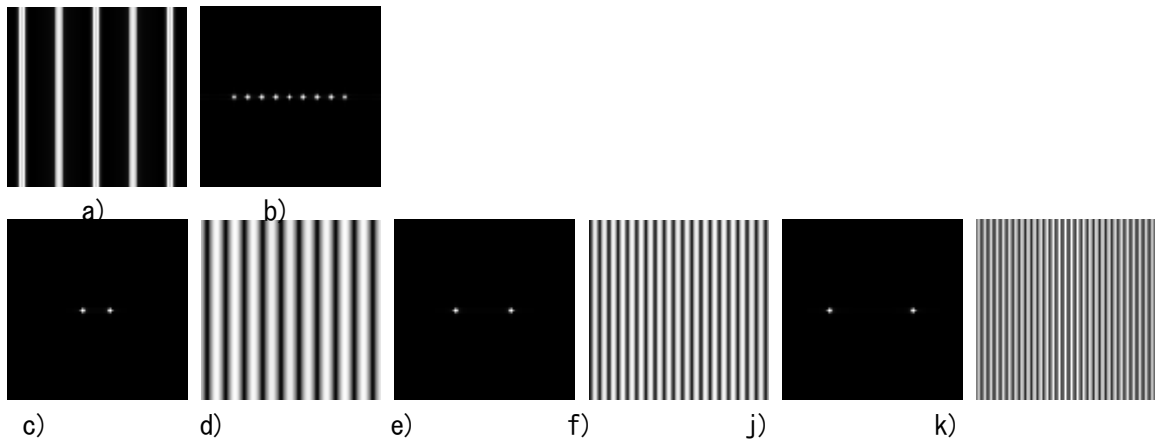
⑤.2 微小位相差測定

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。

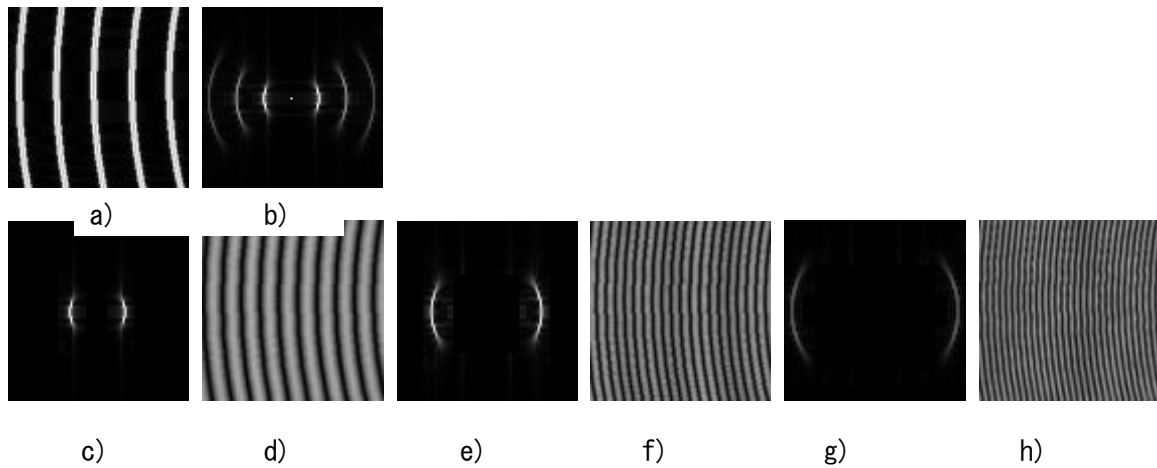
これまでフーリエ変換し $\pm N$ 次スペクトルを取出して逆フーリエ変換を行うことにより位相差増幅ができることを、また超解像処理によりデフォーカスした像を細線化することを、更に超解像により線の間隔が変動しないことを示した。これらの方法を干渉縞に適用してみた。図(i)b-27 で示した測定干渉縞に位相差増幅と超解像の処理を行った。図(i)b-28 a), d)は図(i)b-27 で示した測定干渉縞の中央部を切り出した画像である。図(i)b-28 の a)は異質相のない部分の干渉縞で b)はフーリエ変換スペクトルの二次スペクトルを抽出し、これを逆フーリエ変換した干渉縞である。c)はこれに超解像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°

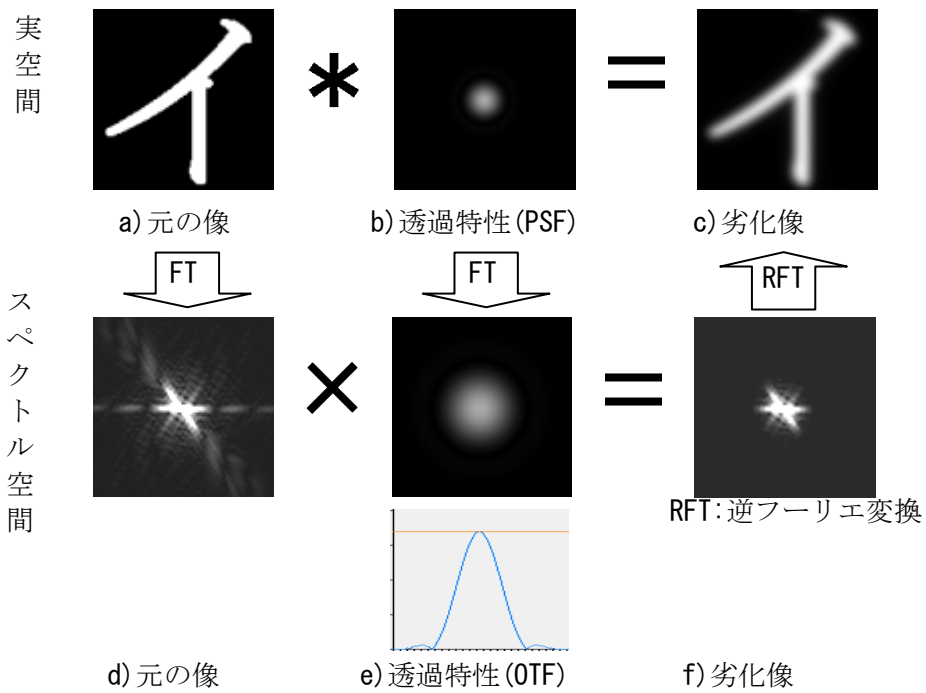


図(i)b)-16 直線縞に対する位相差増幅
a) 直線縞 b) フーリエスペクトル
c) 一次スペクトル d) c)を用いた逆フーリエ像 e) 二次スペクトル
f) e)を用いた逆フーリエ像 g) 三次スペクトル h) g)を用いた逆フーリエ像



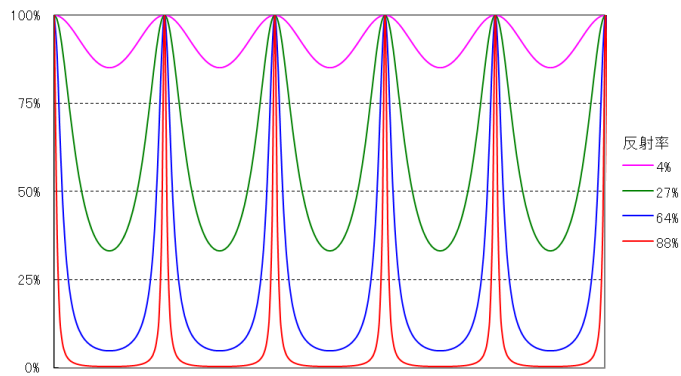
図(i)b)-17 円周状縞に対する位相差増幅

- 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

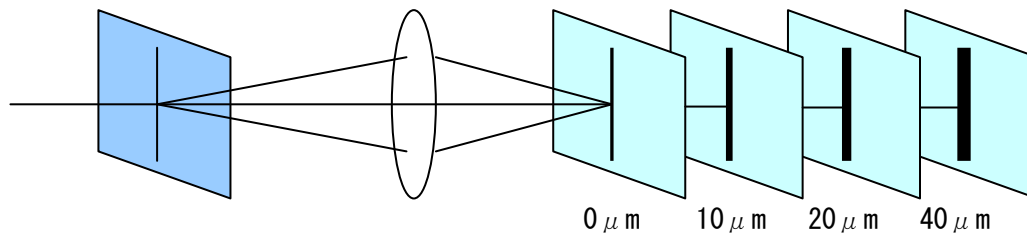


図(i)b)-18 実空間とスペクトル空間での結像方程式

FT: フーリエ変換

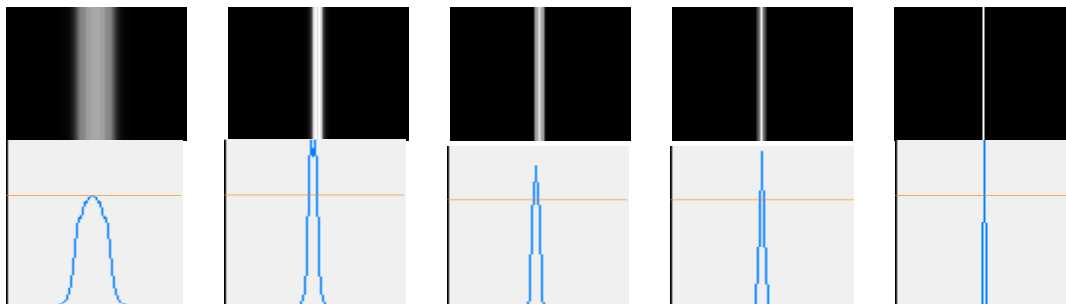


図(i)b)-19 繰返し反射干渉による透過光強度



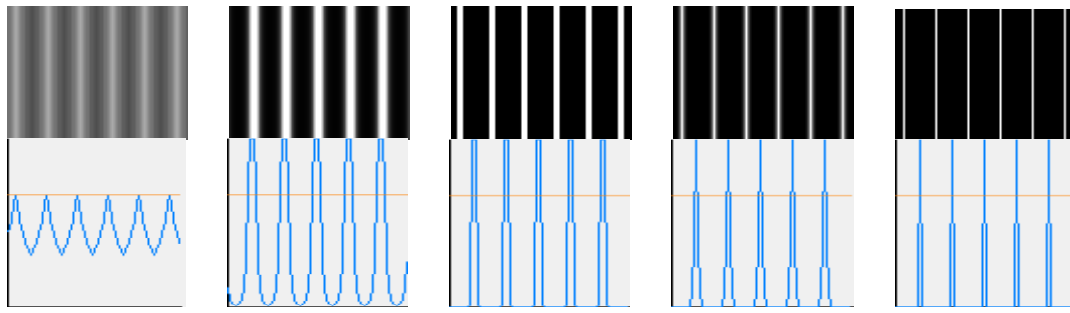
a) defocus 0 μ m b) defocus 10 μ m c) defocus 20 μ m d) defocus 40 μ m

図(i)b)-20 線像のデフォーカス結像



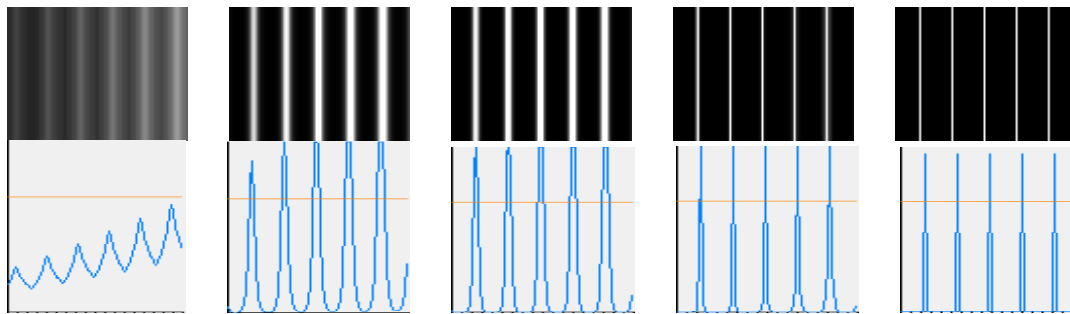
a) original b) 100 回 c) 200 回 d) 300 回 e) 359 回

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

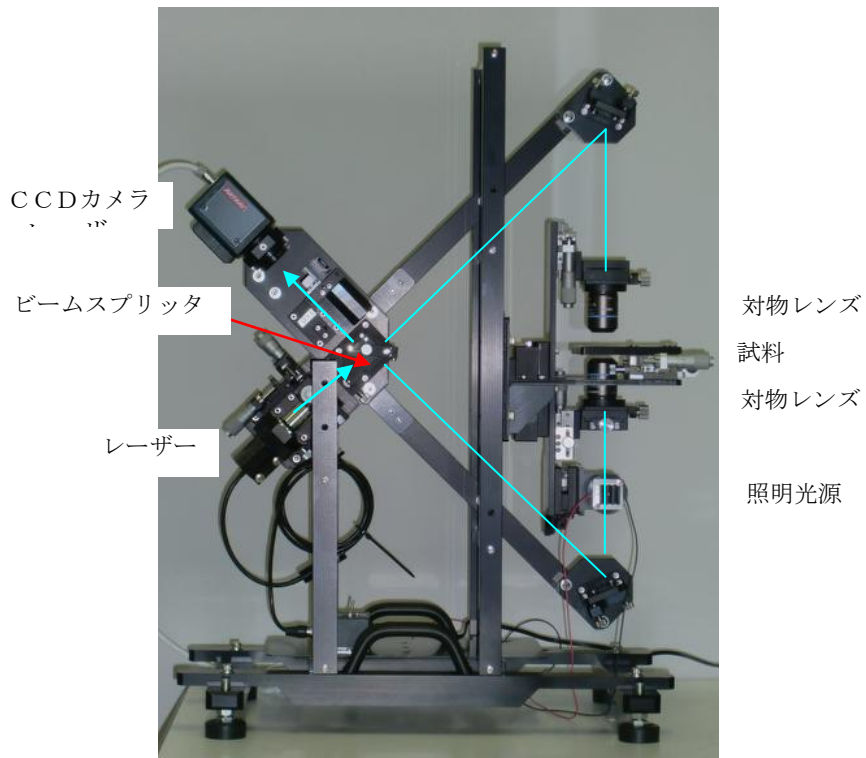
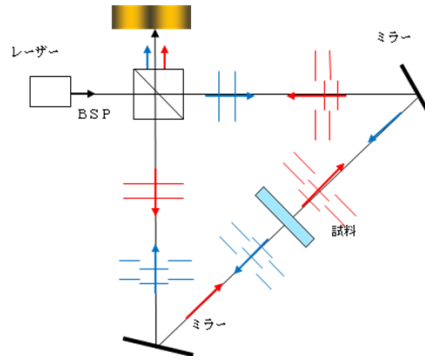


a) 等しい強度を持つ線

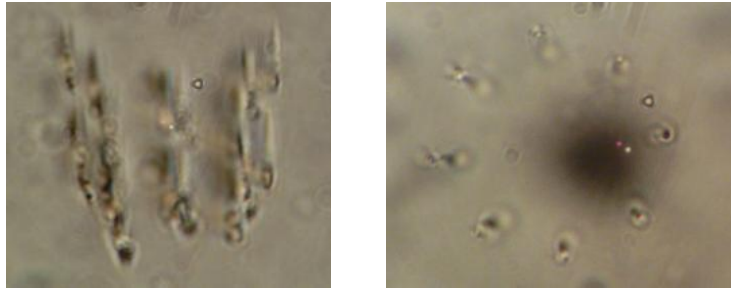


b) 強度差を持つ線

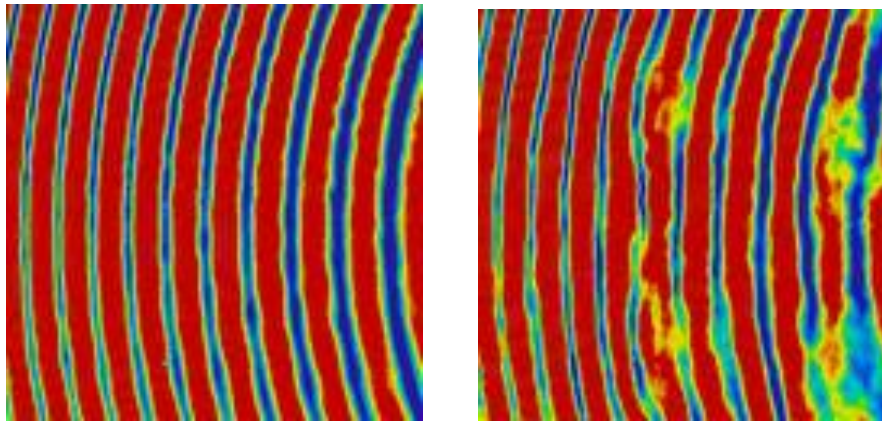
図(i)b)-24 超解像処理像とデフォーカス前の像の位置間隔
各図の上半分はデフォーカス前の線 下半分は超解像処理をした線



図(i)b)-25 三角光路干渉計原理図と作製干渉計



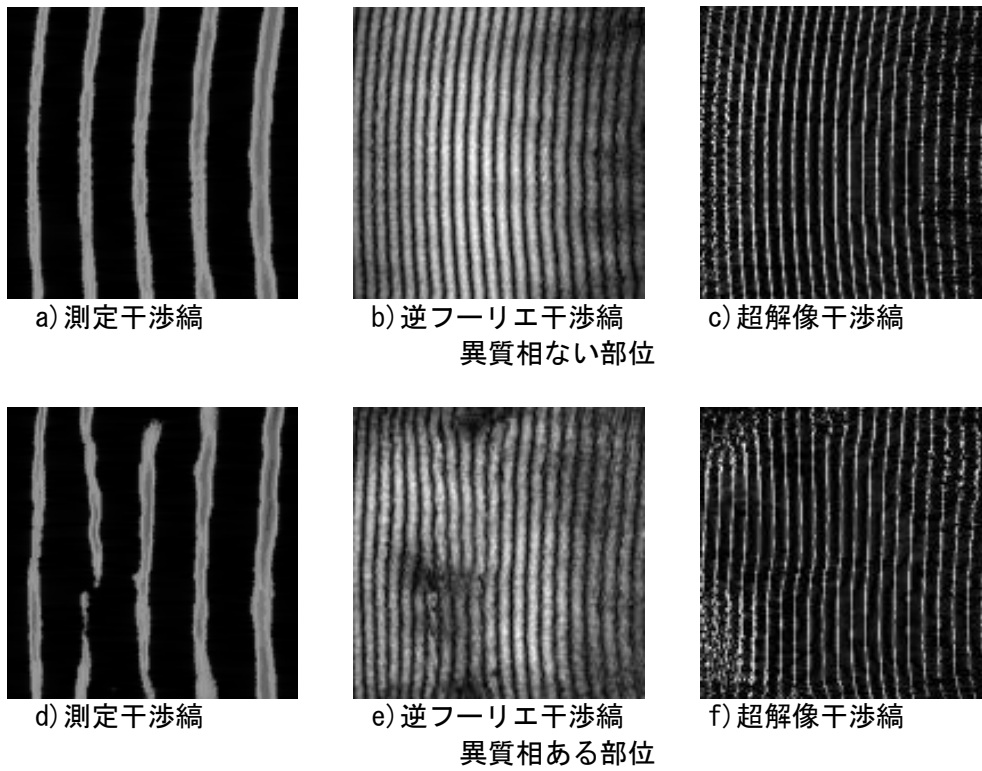
図(i)b)-26 異質相部像(左：側面より 右：上面より)



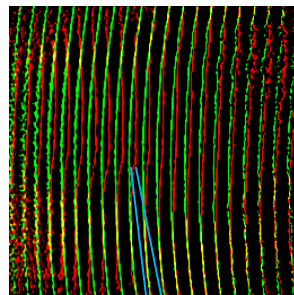
異質相なし

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。

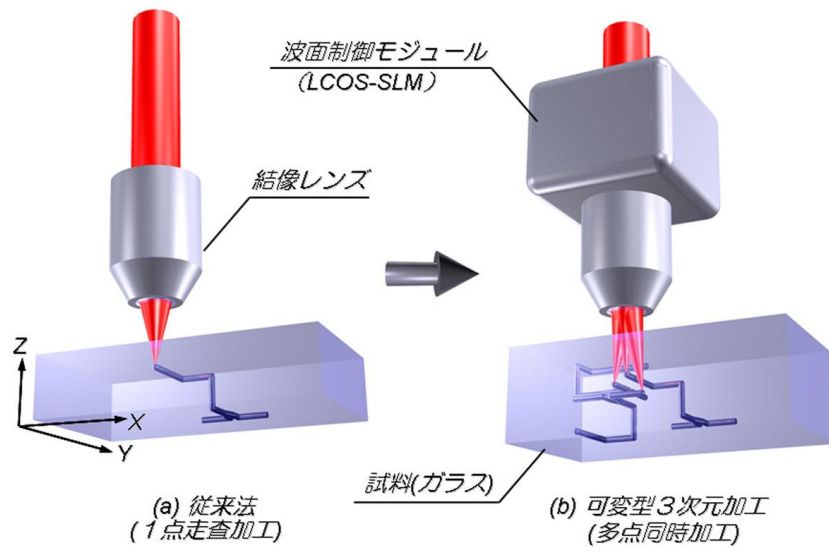


図1 可変型三次元加工システムの概念図

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 2π ラジアン以上を実現すると同時に0から 2π 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/cm² (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。

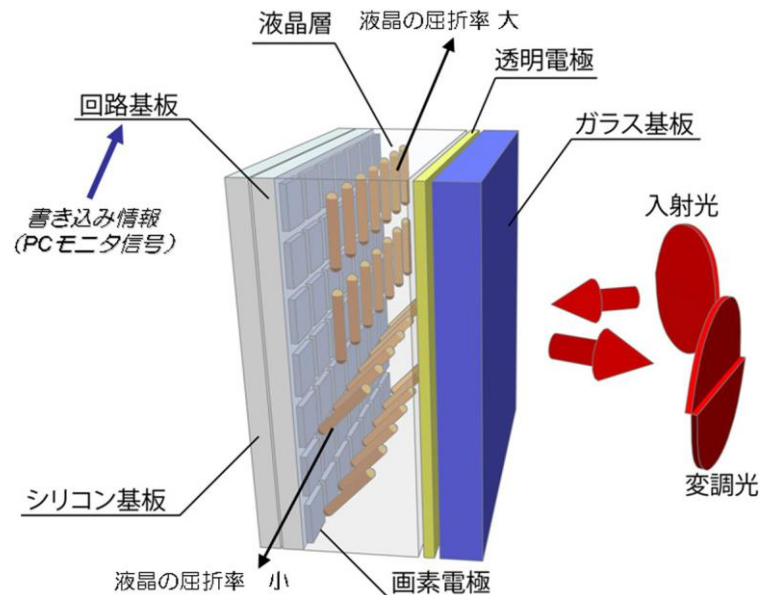


図2 LCOS-SLMの構造と原理

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。

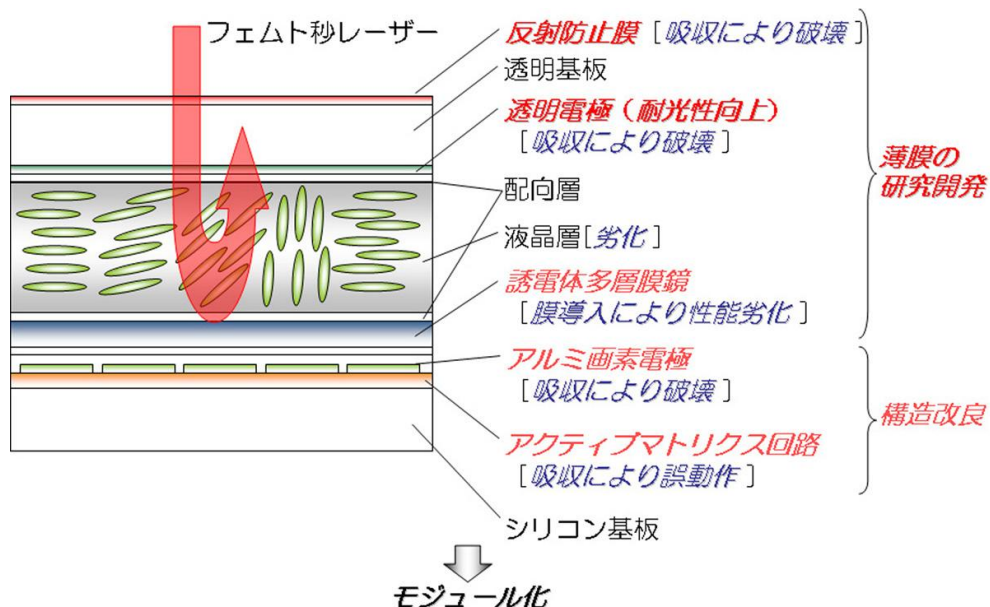


図3 LCOS-SLMの構造(断面図)と検討項目

(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。

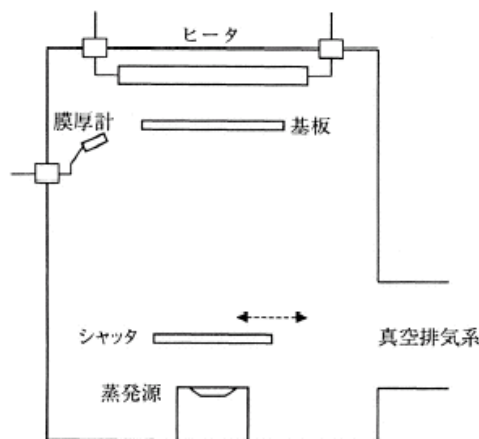


図 4 真空蒸着装置の概念図

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。

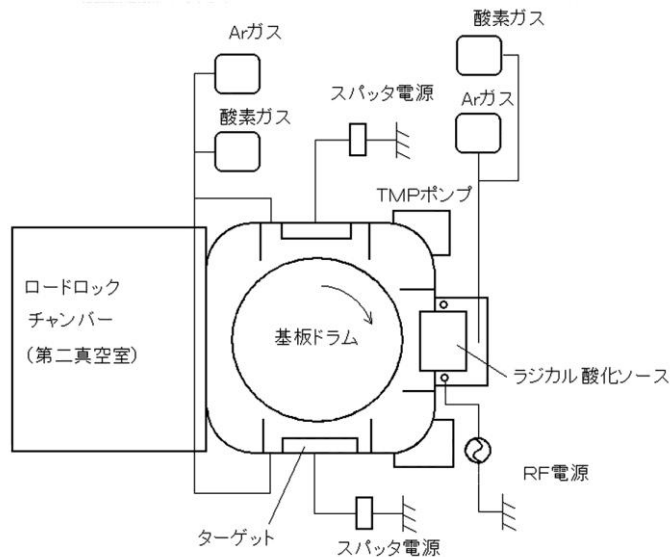


図5 本プロジェクトで導入した薄膜蒸着装置（スパッタ装置）

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 ₂	2.25	2.48	SiO ₂	1.46	1.48
Nb ₂ O ₅	2.08	2.35			
Ta ₂ O ₅	2.03	2.18			

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、Ta₂O₅（nd= 200 nm）およびSiO₂（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/cm²程度であり、膜自体は全く問題ないことが分かった。

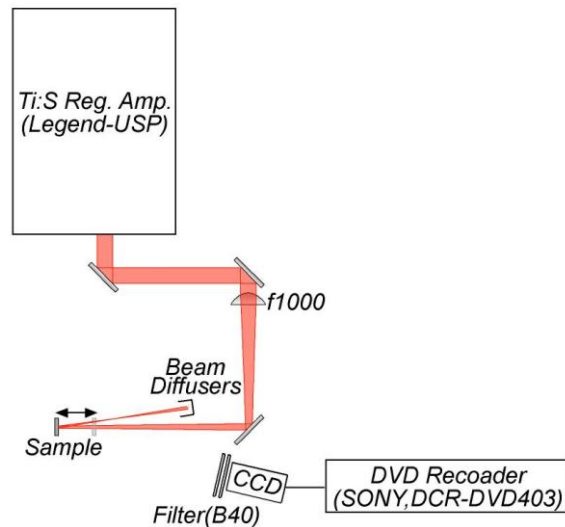


図6 耐光性実験光学系

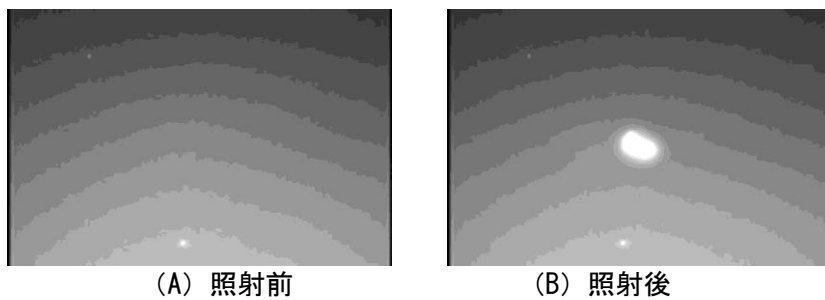


図7 誘電体ミラーが損傷を受けた際に生じる散乱光の様子

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/cm²) を達成することができた。

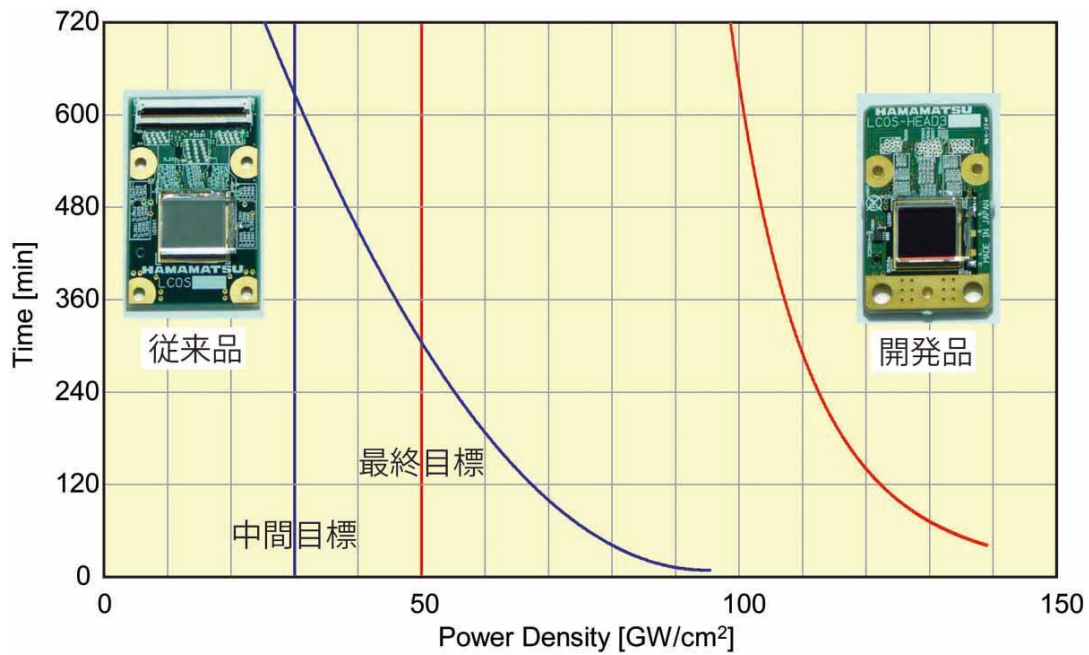


図8 耐光性実験結果

(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 2π 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。

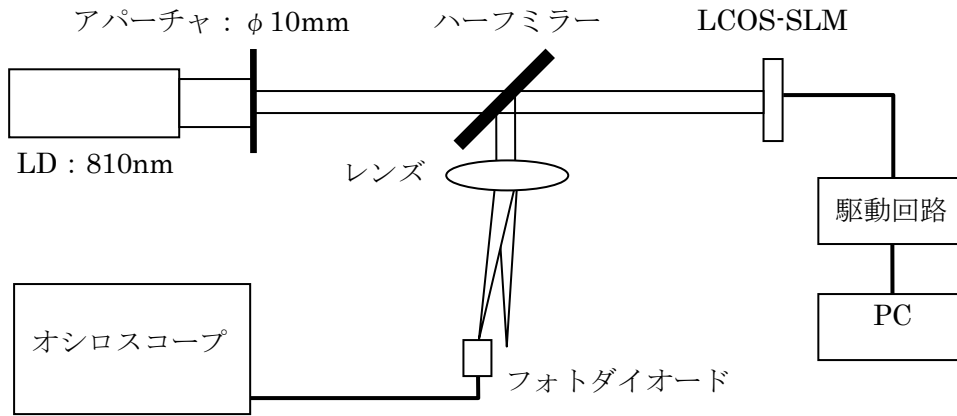


図9 測定光学系

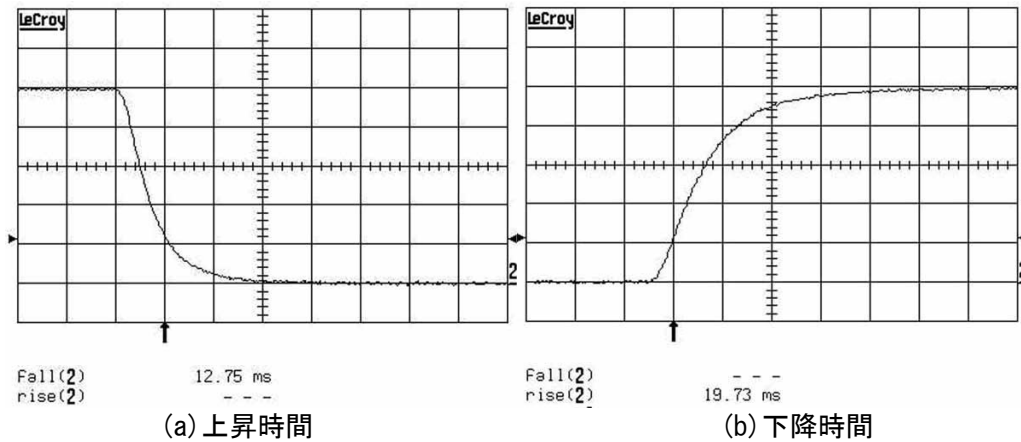


図10 測定結果

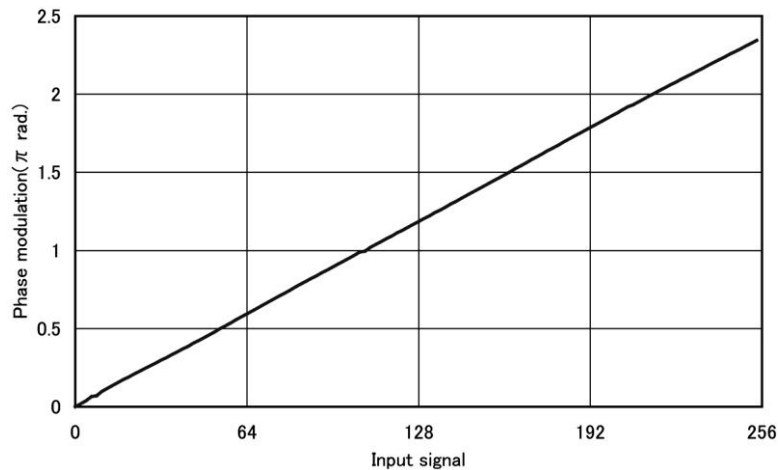


図11 位相変調特性

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。

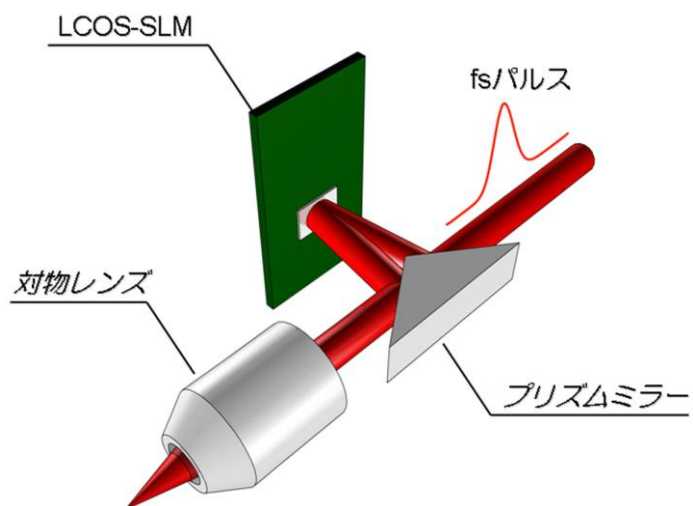


図 1 2 光波面制御モジュール概念図



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)

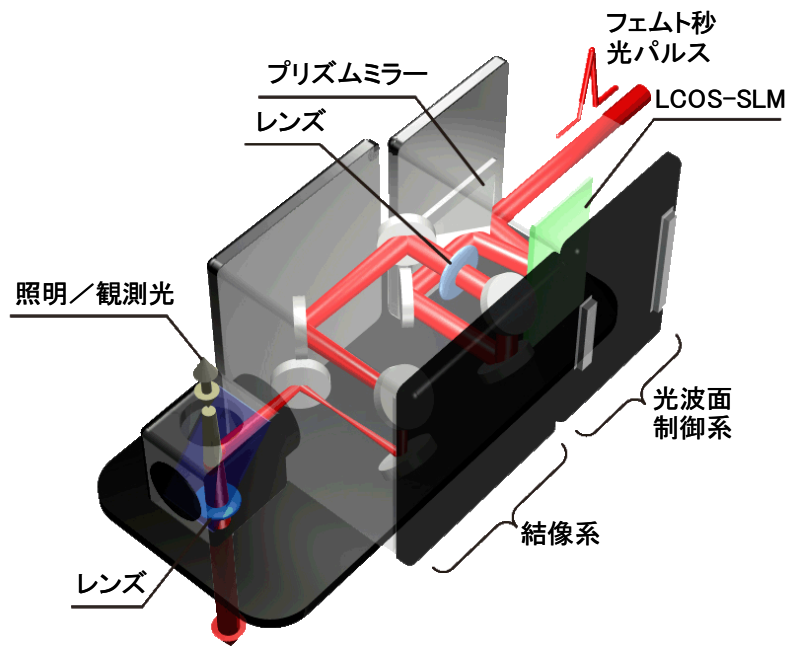


図 1 4 光波面制御モジュールの構造（結像モジュールと合体した様子）

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。

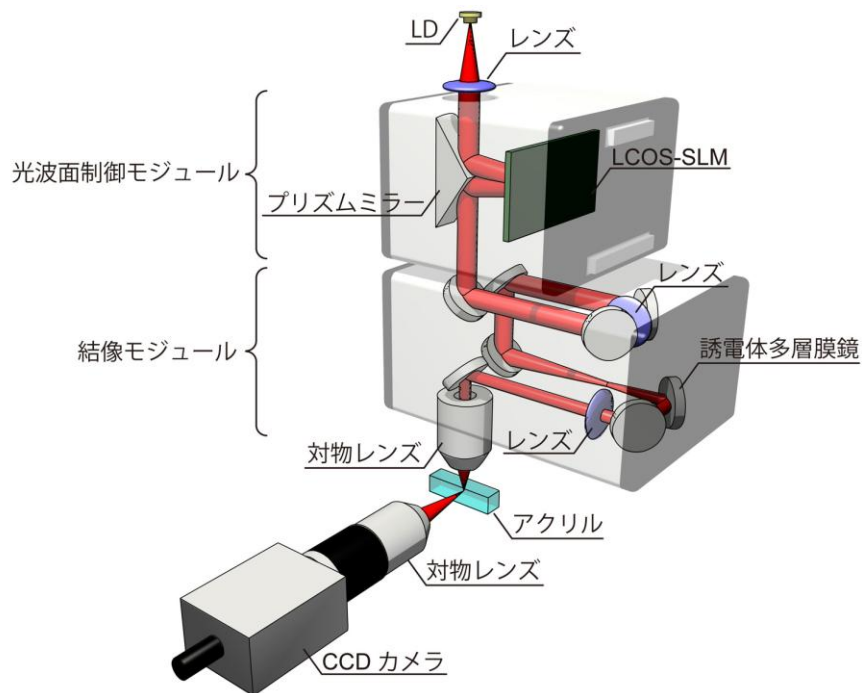


図 1 5 波面制御実験システム

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。

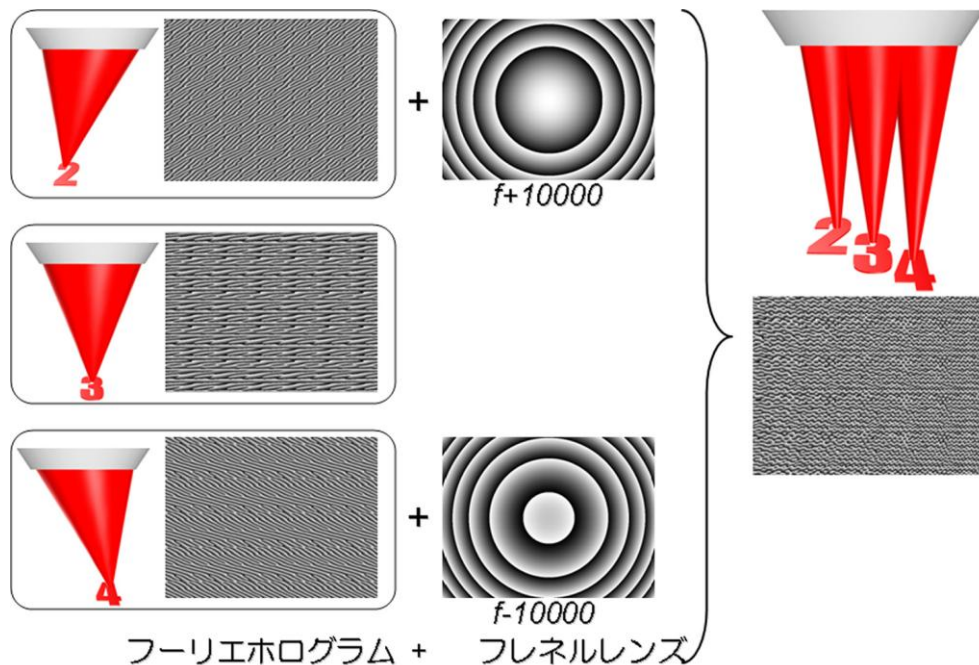


図 16 三次元加工のための計算機合成ホログラム (CGH) パターン

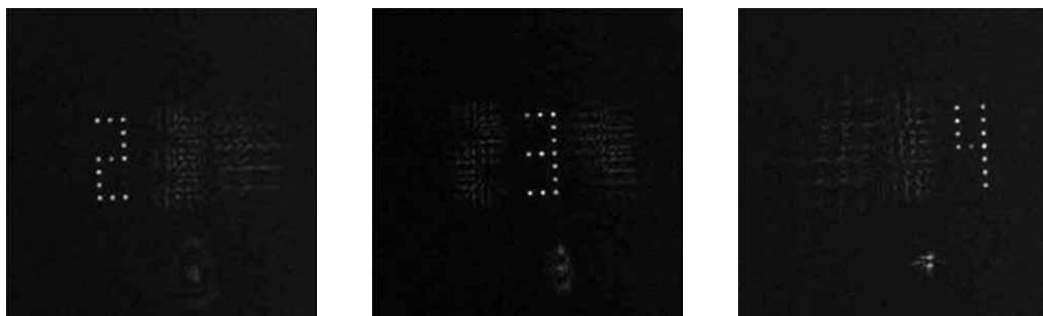


図 17 ホログラム再生像

(「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)

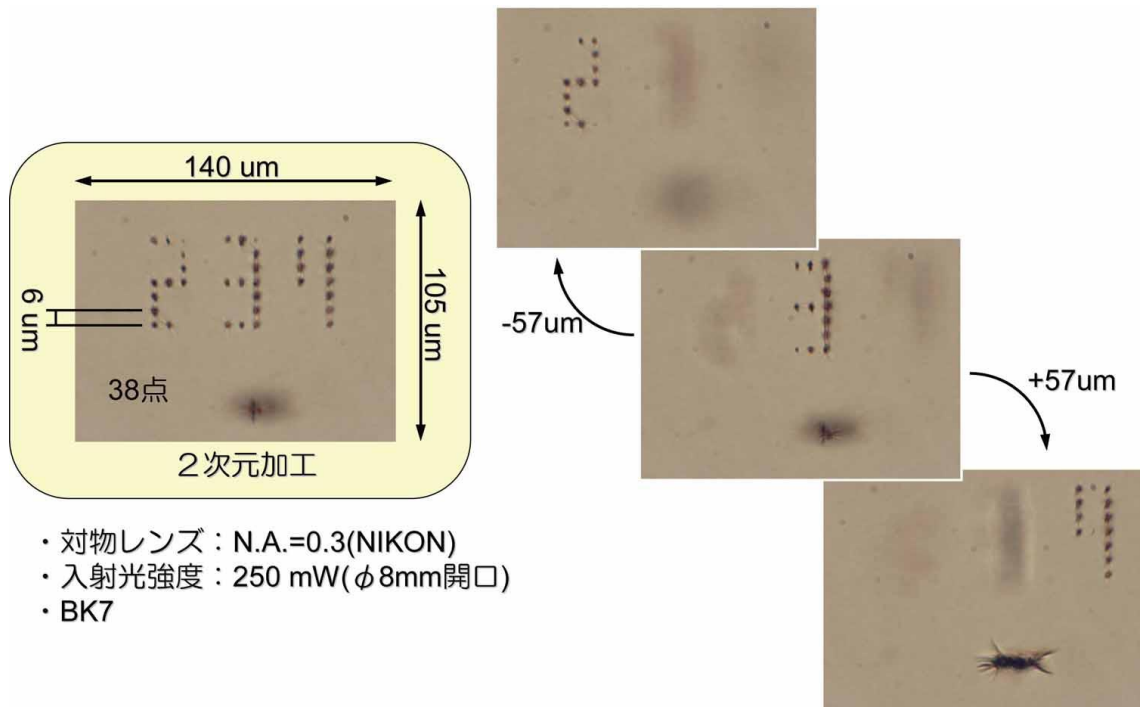


図 18 CGH を LCOS-SLM に書き込みフェムト秒レーザーでガラス内部を加工した結果

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。

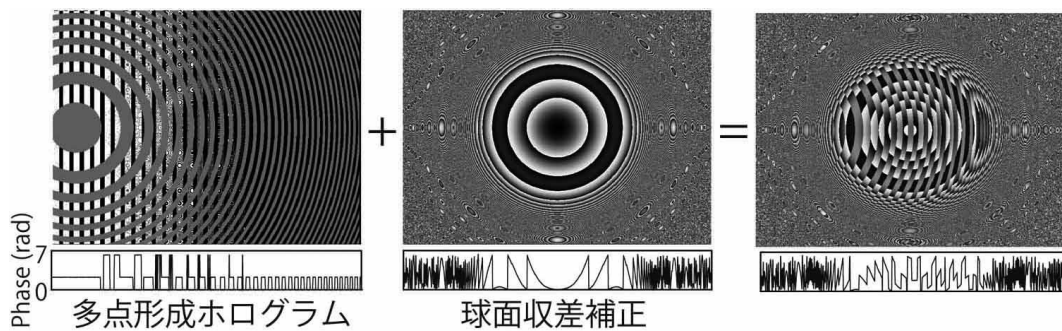
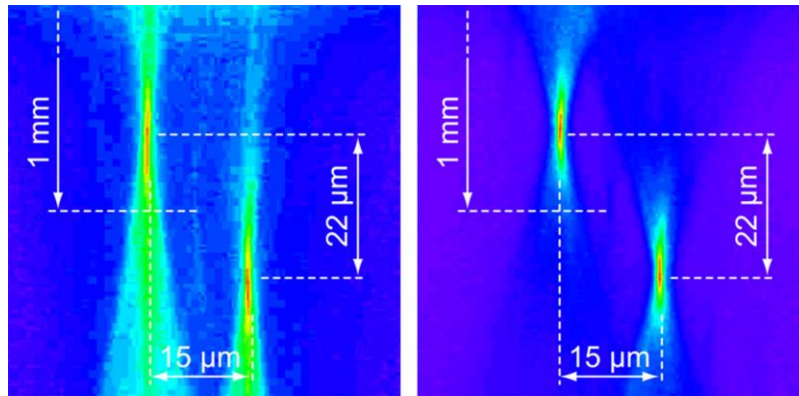


図 19 多ビーム形成と収差補正を同時に行うための CGH パターン



(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。

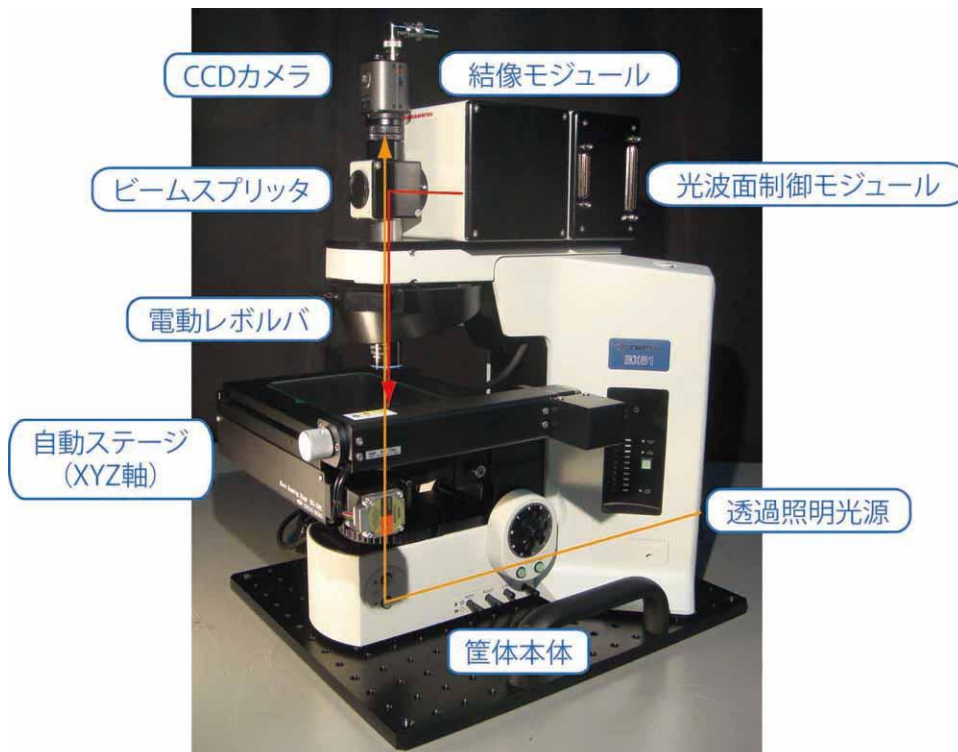


図 21 光波面制御モジュール試作機の外観

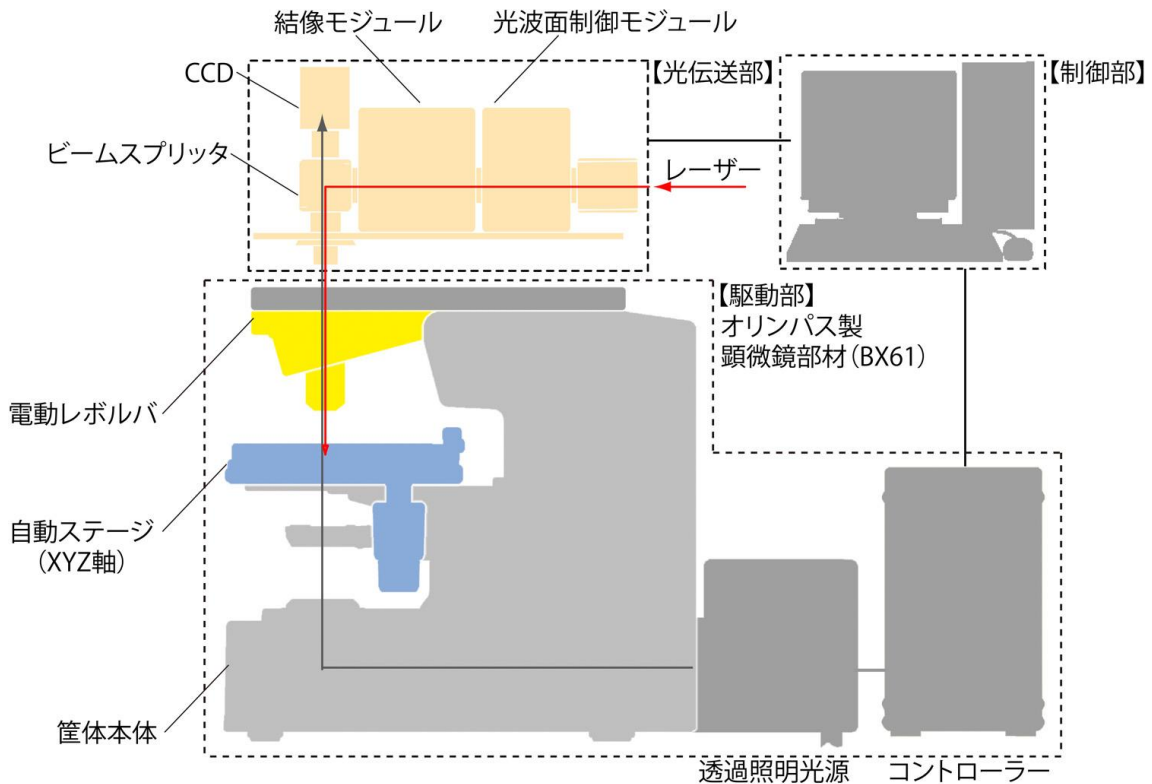


図 2 2 光波面制御モジュール試作機概念図

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 μm 移動させ（集光部の深さは 570 μm ）、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 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 mW、2点加工の場合は 45 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。

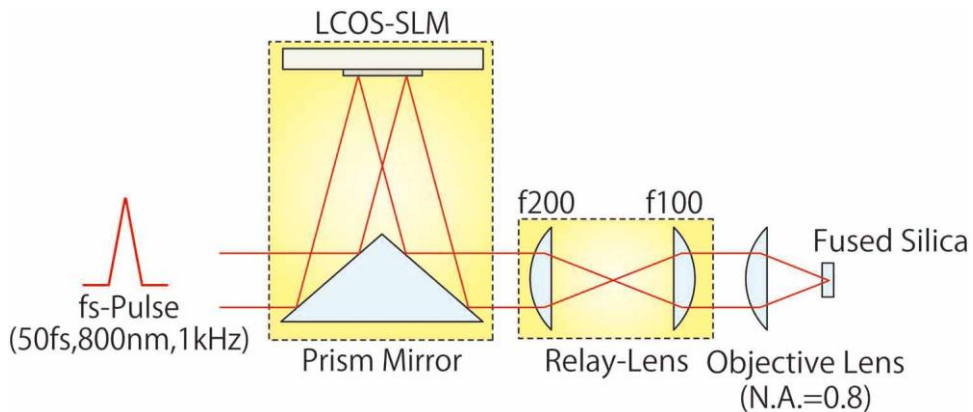
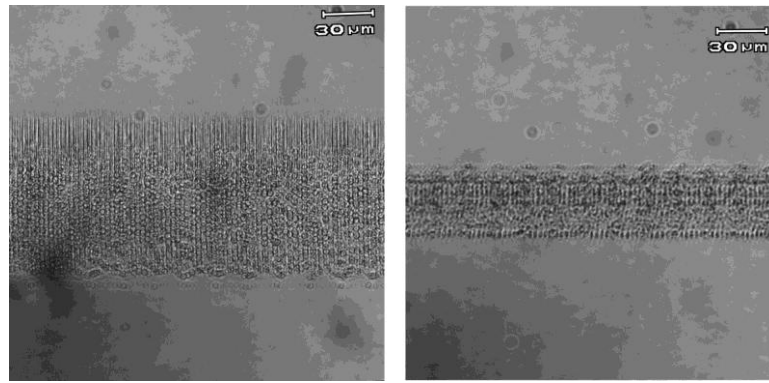


図 2 3 ガラス加工実験系



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。

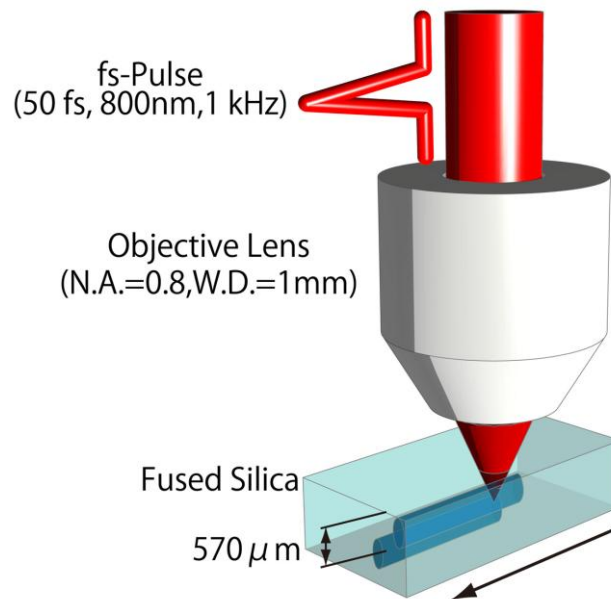


図 2 5 ガラス内部加工実験の模式図

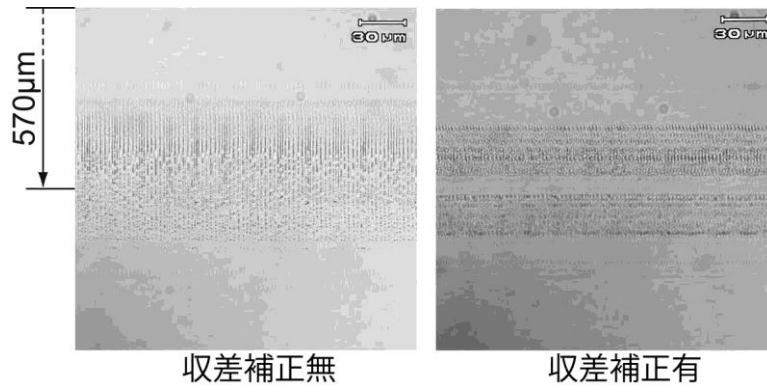


図 2 6 球面収差補正を導入したフェムト秒レーザーによる加工結果