

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
プロジェクト

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 I o T推進部
-----	---

—目次—

概 要	i-1
プロジェクト用語集	i-6
I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-4
2.1 NEDO が関与することの意義	I-4
2.2 実施の効果（費用対効果）	I-5
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-3
2.1 研究開発の内容	II-3
2.2 研究開発の実施体制	II-4
2.3 研究開発の運営管理	II-6
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	II-9
3. 情勢変化への対応	II-10
4. 評価に関する事項	II-11
III. 研究開発成果について	III-13
1. 事業全体の成果	III-13
2. 研究開発項目毎の成果	III-15
IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	IV-245
1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	IV-245
2. 研究開発項目毎の実用化の見通しについて	IV-246

（添付資料）

・特許論文等リスト

概要

		最終更新日	2021年11月15日
プロジェクト名	高輝度・高効率次世代レーザー技術開発	プロジェクト番号	P16001
担当推進部 / PMまたは担当者	IoT推進部 加藤 友彦 (2016年4月～2016年8月) IoT推進部 須永 吉彦 (2016年4月～2019年5月) IoT推進部 服部 一成 (2016年4月～2020年2月) IoT推進部 熊谷 正伸 (2019年4月～2021年12月現在) IoT推進部 柿沼 遼 (2019年5月～2021年12月現在) IoT推進部 矢田 勝啓 (2020年3月～2021年12月現在) IoT推進部 岩崎 光治 (2021年7月～2021年12月現在)		
0. 事業の概要	<p>将来のものづくり現場では、あらゆるモノがインターネットでつながる IoT (Internet of Things) や人工知能のさらなる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携と、人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。レーザー加工は、こうした将来のものづくりにおける最重要ツールの一つとして期待されているが、現行のレーザー加工技術は、消費電力や加工処理能力、加工精度や品位の観点において課題を有している。</p> <p>日本のものづくり競争力を将来にわたって維持していくため、これまでにない高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー技術、及びそれを用いたレーザー加工技術を開発し、社会実装を進めることで、消費エネルギーの削減と、わが国ものづくり産業の競争力強化を図る。</p> <p>本事業では、各項目間の連携にも配慮しながら、以下の研究開発項目について実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ①：高品位レーザー加工技術の開発 ②：高出力レーザーによる加工技術の開発 ③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発 ④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発 ⑤：短波長レーザーによる加工技術の開発 		
1. 事業の位置付け・必要性について	<p>天然資源の乏しい日本にとって、ものづくり産業は生命線である。しかしながら、将来的に人口減少が進むと予想されており、社会構造の変革に対応した技術革新を取り入れることで従来のものづくり産業構造から脱却し、新産業革命を推進していくことが求められている。</p> <p>近年の技術革新を鑑みるに、将来のものづくり産業では、あらゆる「もの」がインターネットでつながる IoT (Internet of Things) や人工知能の更なる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携や人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。</p> <p>その中で、照射強度や照射時間などをデジタル制御し易いレーザー加工は、将来のものづくり産業における最重要ツールの一つとして期待されている。</p> <p>我が国の政策としては、科学技術イノベーション総合戦略 2017 (2017年6月閣議決定) では、「新たな産業や技術基盤の創出の核となる先端レーザー等の量子ビーム利用技術の高度化」を「Society 5.0」(超スマート社会)の実現に向けて重きを置くべき取組の一つとして位置付けている。また、第5期科学技術基本計画 (2016年1月22日閣議決定) では、「超スマート社会」の実現に向けた新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つとして、「革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「光・量子技術」」の強化を図るとしている。</p> <p>世界に目を向ければ、レーザー技術先進国である米国と、国主導のプロジェクトを通じて絶え間なくレーザー関連分野の研究開発に投資をしてきたドイツが世界をリードしているという現状がある。また、世界の工場として急速に成長した中国もレーザー関連分野において先進国を追い上げている。日本のものづくり産業が将来にわたって競争力を維持していくためには、高付加価値製品の製造に適した高精度・高品位加工に対応する次世代レーザー加工システムを世界に先立って開発し、早期実用化を進め、ものづくり業界へ広く普及させることが必要となる。</p>		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>○アウトプット目標 (2020年)</p> <p>本事業では、レーザー加工の高品位化・高スループット化および省エネルギー化を進めるため、従来にはない高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー装置、およびそれらを用いた実用的なレーザー加工技術を開発する。レーザーとしては、市場ニーズが顕在化しているにも関わらず実用化できていない青～深紫外域の短波長レーザーや超短パルスレーザー、高</p>		

パルスエネルギーレーザーを開発する。また、高機能化・低コスト化に対する市場からの継続的な要求に応えるため、革新的な次々世代レーザー基盤技術を開発する。
 具体的な目標としては、事業終了時において研究開発計画の研究開発項目①～⑤の最終目標を達成することとする。

- ①：平均光パワー50W以上の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発
- ②：500J級固体パルスレーザー装置を想定した250J級高出力レーザー装置の開発
- ③：出力 or エネルギー効率等が既存技術（2018年度）と比較し10倍以上、あるいは従来の光源にはない性能を有することを示す。実現可能性を示す。実用化に向けて残された課題を明確にする。
- ④：最適加工パラメータの探索が可能なレーザー加工プラットフォーム構築
加工条件と加工結果とを対応付けるデータベース構築
- ⑤：出力 or エネルギー効率等が既存技術（2018年度）と比較し10倍以上、あるいは従来の光源にはない性能を有することを示す。実現可能性を示す。実用化に向けて残された課題を明確にする。

○アウトカム目標（2030年）

本事業により開発されたレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、およびこれらを活用して加工された製品などの普及により、CO2削減および加工市場のシェア確保をアウトカム目標とする。本事業がもたらす省エネ効果は、CO2換算で2030年に655万t/年の削減を見込んでいる。見積りに当たっては、本研究結果（機器、応用製品）が既存技術を置き換える形で順次社会実装され、波及効果が起きるものと仮定している。市場に関しては、2030年のレーザー加工システムの予想約200億ドルのシェア35%を目指す。

事業の計画内容	主な実施事項	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy
①高品位レーザー加工技術の開発	設計／要素技術 試作・動作実証				加工応用実証		
②高出力レーザーによる加工技術の開発	設計／要素技術 試作・動作実証				加工応用実証		
③次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	設計／要素技術 試作・動作実証				高度化		
④次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	レーザー加工機システム開発 プラットフォーム構築				プラットフォーム運用 データベース構築		
⑤短波長レーザーによる加工技術の開発					加工応用実証		

事業費推移 (会計・勘定別 に NEDO が負担 した実績額 (評価 実施年度につ いては予算額) を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	総額
一般会計		0	0	0	0	0	0	0
特別会計 (電源・需給の別)		2,000	2,000	2,550	2,250	2,000	0	10,800
開発成果促進財源		0	0	0	0	0	0	0
総 NEDO 負担額		2,000	2,000	2,550	2,250	2,000	0	10,800
(委託)								

開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課
------	---------	---------------

	プロジェクトリーダー	<p>プロジェクトリーダー</p> <p>国立大学法人東京大学 物性研究所 教授 小林洋平</p> <p>サブプロジェクトリーダー</p> <p>国立大学法人東京大学大学院 理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 特任准教授 田丸博晴</p> <p>国立研究開発法人産業技術総合研究所 先端オペランド計測技術OIL/分析計測標準研究部門 ラボチーム長 黒田隆之助</p>
	プロジェクトマネージャー	IoT 推進部 柿沼遼
	委託先 (助成事業の場合「助成先」とするなど適宜変更) (組合が委託先に含まれる場合は、その参加企業数及び参加企業名も記載)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 東京大学、再委託：東北大学、(株)QDレーザ ・ (国研) 産業技術総合研究所、再委託 早稲田大学 ・ 大阪大学、共同実施：ヤマザキマザック(株) ・ 三菱電機(株) ・ スペクトロニクス(株) ・ 浜松ホトニクス(株) ・ ギガフォトン(株) ・ (株)島津製作所 ・ 京都大学 ・ スタンレー電気(株) ・ (国研) 理化学研究所 ・ 山口大学 ・ パナソニック(株) ・ パナソニック スマートファクトリーソリューションズ(株) ・ 東京工業大学 ・ 富士フイルムビジネスイノベーション(株) ・ 千葉工業大学 ・ (株)金門光波 ・ (公財) レーザー技術総合研究所 ・ (大共) 高エネルギー加速器研究機構 再委託先 東京理科大学
情勢変化への対応	<p>高出力の青色半導体レーザー光源開発では、海外メーカーとの開発競争が激化しており、早期の市場参入による顧客獲得のため、技術の切り出しにより製品化を推進する方針とした。このため担当する島津製作所を大阪大学の共同実施先から直接の委託先へと変更した。</p> <p>レーザー加工の可能性を広げるとともに、レーザー技術の産業応用(社会実装)への取り組みを強化するため、2018年度に公募を実施。研究開発項目③次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発に2つの研究開発テーマ(東京大学、産業技術総合研究所・高エネルギー加速器研究機構・浜松ホトニクス)を追加した。</p>	
中間評価結果への対応	<p>最終目標の達成が難しいテーマは目標の見直し、テーマの改廃を検討し、開発の最終目標出力について、一部テーマは中間評価までの達成状況を鑑みた最終目標値に再設定を実施した。また、達成が難しいと思われる出力目標について、予算の有効活用の観点からプロジェクト期間内に達成見込みのある開発内容に絞り込みを実施した。</p> <p>また、位置づけが明確でないテーマは再編成を検討。開発体制の見直しを行い、項目③及び項目④のうち、実用化へ向けた開発を進めるテーマについて、項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」を新設し移動した。</p>	
評価に関する事項	事前評価	-
	中間評価	2018年度 中間評価実施
	事後評価	2021年度 事後評価実施

3. 研究開発成果について	項目①：高品位レーザー加工技術の開発	
	最終目標	光パワー50W以上の深紫外ピコ秒パルスレーザー装置を搭載したレーザー加工機を開発する。
	達成状況	目標達成の上、加工プラットフォームに提供するとともに、実用化・事業化済み。
	項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	
	最終目標	500J級固体パルスレーザー装置を想定した250J級高出力レーザー装置を開発する。
	達成状況	250J達成により、キロジュール級の基本設計技術の確立したうえ、加工プラットフォームでの実用化済み。
	項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	
	最終目標	・出力 or エネルギー効率等が既存技術（2018年度）と比較し10倍以上、あるいは従来の光源にはない性能を有することを示す。 ・実現可能性を示す。実用化に向けて残された課題を明確にする。
	達成状況	6つのテーマのうち2つのテーマ（項目3-1「フォトリソ結晶レーザーの短パルス化、短波長化、項目3-5「高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発」）で引き上げた目標を達成。
	項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	
	最終目標	最適加工条件の探索が可能なレーザー加工プラットフォームとデータベースを構築する。
	達成状況	項目1（高品位レーザー加工技術の開発）、2（高出力レーザーによる加工技術の開発）、4、5（短波長レーザーによる加工技術の開発）、の成果を集約した加工プラットフォームの開設とユーザー利用による実用化済み。また、データベース運用開始。（実用化）
	項目⑤：短波長レーザーによる加工技術の開発	
	最終目標	・出力 or エネルギー効率等が既存技術（2018年度）と比較し10倍以上、あるいは従来の光源にはない性能を有することを示す。 ・実現可能性を示す。実用化に向けて残された課題を明確にする。
	達成状況	全テーマで目標を達成したうえ、加工プラットフォームにて実用化済み。光源および加工機の事業化済み。
投稿論文	その他：103件	
特許	出願済：254件	
その他の外部発表（プレス発表等）	ニュースリリース：21件 展示会への出展：25件 成果報告会：1件	
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	高出力青色半導体レーザー光源の技術開発（100W級光源技術、高輝度青色半導体レーザー搭載複合加工機）や高品位レーザー加工技術の開発（266nm, 8W深紫外ピコ秒パルスレーザー発振機）を研究開発が完了した技術をもとに早期に製品化を実施した。 実用化、事業化の詳細は各実施者の報告による。	
5. 基本計画に関する事項	作成時期	2016年4月 作成
	変更履歴	2017年2月 改訂（非連続ナショナルプロジェクトに認定されたため） 2017年8月 改訂（基盤技術の確立と成果の普及に向けて設立するコンソーシアムの位置づけを明確化するため）

		2019年2月 改訂（中間評価結果を踏まえ、各研究開発項目の位置づけと重点的に取り組む内容を明確にするため） 2020年2月 改訂（プロジェクトマネージャー変更のため） 2021年3月 改訂（新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、研究開発実施期間を延長するため）
--	--	---

プロジェクト用語集

用語	意味
1次元・2次元結合係数	フォトリソグラフィによる光の回折の強さを表す指標。1次元結合係数は、180°方向（逆方向）に伝搬する光への回折の強さを、2次元結合係数は、90°方向（逆方向）に伝搬する光への回折の強さを表す。
ABS	A（アクリロニトリル）・B（ブタジエン）・S（スチレン）の3種類の成分を組み合わせた共重合合成樹脂の総称。主に家電や電気電子製品の各種外装・筐体・機構部品類、自動車パネルなど内装部品、文具・雑貨類、事務用家具部材、玩具製品や模型の可動部部品など、様々な用途で使用される。
AlGaIn	深紫外で発光し、深紫外LED（Light emitting diode 発光ダイオード）やLD（Laser diode レーザーダイオード）などの発光素子の発光層、活性層として用いられる窒化物混晶半導体材料。アルミニウム（Al）組成を変化させることによって、バンドギャップは3.4eV（GaIn）から6.2eV（AlN）まで変化させることができ、波長210～360nmで発光が得られる直接遷移半導体である。発光波長は、UVA（400-315nm）、UVB（315-280nm）、UVC（280-200nm）をするため、AlGaInを用いて実現される深紫外発光素子は、殺菌、浄水、空気浄化、皮膚治療、加工用レーザー、樹脂硬化用光源、など様々な用途への応用が期待されている。
AlN	窒化物半導体のうちで最もバンドギャップが大きい材料。バンドギャップは6.2eVであり現在利用できる半導体の中で最もバンドギャップが大きい。210nm程度の深紫外で発光する直接遷移半導体で、半導体の中で最も高いエネルギーで発光する半導体材料である。深紫外LEDやLD（レーザーダイオード）の基板材料として重要である他、高耐圧、高出力電子デバイス用基板としても注目されている。
ASE	増幅自然放出光
BPP	Beam Parameter Product の略。広がり半角とスポット半径の積。小さいほど、ビーム品質が高い。
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics の略。炭素繊維強化プラスチック。樹脂を炭素繊維で強化したもの。
CLBO	深紫外光波長変換に用いられるホウ酸系非線形光学結晶 CsLiB ₆ O ₁₀ 。
DFB レーザー	Distributed feed-back レーザーの略。半導体レーザーの活性領域に回折格子を形成し、スペクトル線幅の狭いレーザー発振を実現したレーザー
COD	Catastrophic Optical Damage レーザー光出射端面の損傷。
DUV	Deep Ultra-Violet（深紫外）の略。波長300nm以下の短波長紫外線。
EV	Electric Vehicle 電気でモータを駆動し走行する車
Fast 軸、Slow 軸	半導体レーザーを基準にした場合、エピタキシャル層の積層方向に平行方向をFast軸、垂直方向をSlow軸と呼ぶ。
FOPLP	Fan Out Panel Level Packaging の略。パネルサイズレベルで一括製造する次世代パッケージ工法
FOWLP	Fan Out Wafer Level Packaging の略、ウェハサイズレベルで一括製造する次世代パッケージ工法
GaAs 系	砒化ガリウム（Gallium Arsenide）を主とする半導体の総称。GaIn の他、AlGaAs などが含まれる。禁制帯が小さく、長波長（近赤外）の発光が可能。
GaN 系	窒化ガリウム（Gallium Nitride）を主とする半導体の総称。GaIn の他、InGaIn、AlGaIn などが含まれる。禁制帯が大きく、短波長（紫外～緑）の発光が可能。
g 線	縮小投影露光装置、いわゆるステツパが1980年代に登場した当時は、超高压水銀ランプのスペクトルのうち、可視光域のg線（波長436nm）が用いられた。これにより、ウェハ上には0.8μm幅程度のパターンの形成が可能になり、4M-DRAMの生産に適用された。

Hänsch-Couillaud (HC) 法	HC 法は共振器内の偏光により実質的な共振器長にわずかな差がでる。これを利用し、共振器のレーザー反射光を PBS により偏光ごとに分け、その差分を取ることで誤差信号を得ることが出来る。この誤差信号を共振器ミラーの PZT に返すことにより共振器長をロックし、出力安定化を行うことが出来る。
HAZ	Heat Affected Zone (熱影響領域) : レーザー加工において熱影響の度合いを評価するための指標で、一般的に熱影響層の大きさを言う。
i 線	1990 年代初頭には、同じ光源である超高圧水銀ランプのスペクトルのうち紫外域の i 線 (波長 365nm) が用いられた。紫外光に対応できる透過率の高い投影レンズの硝材開発と合わせて実用化された。短波長化により最小解像線幅は 0.5 μm を下回り、16M-DRAM の生産に用いられた。
LD、LD バー、LD スタック	Laser diode 半導体レーザーの略。一般に LD チップが 1cm に並べられた素子を LD バーと呼び、LD バーを積層したデバイスを LD スタックと呼ぶ。
LMD (Laser Metal Deposition)	金属粉末の供給とレーザー照射を同時に行い、金属粉末を熔融凝固して皮膜並びに 3D 造形する手法。
MOCVD	半導体の結晶成長を行う手法の一つ。有機金属気相成長法 (Metal Organic Chemical Vapor Epitaxy) の略語。窒化物半導体、その他の半導体材料の生産用結晶成長に幅広く用いられており、窒化物・青色、紫外 LED の生産に用いられる。
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier の略。主発振器から得られるレーザー光を増幅することで高出力を得る増幅方式。
PC	Polycarbonate の略。熱可塑性プラスチックの一種。化合物名字訳基準に則った呼称はポリカルボナート。様々な製品の材料として利用されている。
PHV	Plug-in Hybrid Vehicle 外部から充電できるハイブリッド車
PTFE	Polytetrafluoroethylene の略。テトラフルオロエチレンの重合体で、フッ素原子と炭素原子のみからなるフッ素樹脂 (フッ化炭素樹脂) である。化学的に安定で耐熱性、耐薬品性に優れる。テフロン (Teflon) の商品名で知られる。
Pr ドープフッ化物ファイバ	フッ化物であるプラセオジウムをファイバにドープしたファイバ。青色レーザーで励起することで赤、オレンジ、緑、青のスペクトルを発光する。
SLM (Selective Laser Melting)	金属粉末を敷き均してレーザーを照射し、粉末と熔融・凝固して 1 層の 2D 形状を造形する。これを繰り返し行って 3D 形状を造形する手法。
SOA	Semiconductor Optical Amplifier : 半導体光増幅器
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser 垂直共振器面発光レーザー
アッテネータ	レーザー出力の減衰装置。レーザー装置では装置内部に搭載され、適切な加工が行なえるようレーザー出力を調整するために用いられる
位相整合条件	CLBO を含む非線形光学結晶において波長変換が実現される条件。この条件から外れると変換効率が低下する。
ウォールプラグ効率	入力電力に対するレーザー出力の比率。
エッチピット	結晶表面の転位欠陥部が他よりも早く溶けることを利用し、転位が観察できるように化学処理により表出した窪み (ピット)。
ガルバノスキャナ	モータを用いて反射ミラーの角度を変化させてビーム照射位置をスキャンする装置
クーロン爆発	クーロン反発による多価分子イオンや多価クラスターイオンの解離過程。強いレーザー場により分子やクラスターから複数の電子がはぎとられ生成した多価分子イオンや多価クラスターイオンは、分子やクラスター内の強いクーロン反発力によって速やかに解離し、大きな運動エネルギーをもつフラグメントイオンを生成する。
コンバイニング技術	空間的な光の集約、もしくは偏光や波長の特性を利用してレーザー光を高輝度化、高出力化する技術
スローライト	群速度の遅い光の波
ダブルクラッドファイバ	クラッドが二重構造になっており、励起光のレーザー光が第一クラッドの内側を伝搬するで励起効率を高くできる。ファイバレーザーのファイバに採用されている。

チャープパルス増幅 (CPA)	パルスレーザーにおいて、パルス幅を上げたチャープパルスの状態にして増幅し、出力を再び圧縮する方式。高い瞬時強度による素子損傷や光パルスの性質劣化を防ぎつつ、高尖頭の出力を得ることができる。
フェムト秒	1fs (フェムト秒) = 10^{-15} 秒
フォトニックバンド構造	フォトニック結晶中における光の波数と周波数の関係を示したものの。バンドの傾きがゼロとなる点では、光の群速度が零となるため、大面積コヒーレント共振作用が得られる。フォトニック結晶レーザーは、この共振モードをレーザー共振器として利用した半導体レーザーである。
フォトニック結晶	光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光材料。様々な光制御が可能な新しい材料として注目されている。
フラグメントイオン	イオン化によって生成したイオンのうち、解離過程を経て生成したイオンのこと。
プラズマ	気体を構成する原子や分子が電離し、陽イオンと電子に分かれて運動している状態。
フラックス	結晶を融点以下で溶解させるために加える溶剤、CLBO の場合は化学式の比率から成分を変えると余剰成分が溶剤として働く (セルフフラックス)。
マルチビーム加工ヘッド	複数のレーザービームを一枚の集光レンズを用いて加工点で重畳する加工ヘッド。溶接やLMD 用での使用が可能である。
モスアイ構造	蛾の眼と同じ構造を人工的に作る。モスアイ構造では光の屈折及び反射が原理的になくなるため、テラヘルツミラー等の無反射コーティングの代替として期待されている。
ラマン分光	試料にレーザーを照射し放出されるラマン光を分光することによって分子の結合状態などを調べる手法。
レーザークリーニング	レーザーを対象部へ照射することで、汚れやサビなどの不要物をアブレーションにより除去するレーザー加工法の一つ。
レーザーピーニング	レーザー照射によって発生した衝撃波が材料内部を伝搬することで、材料表層付近に圧縮の残留応力を付与するレーザー加工法の一つ。
青色半導体レーザー	GaN 系半導体を使った波長 400nm~460nm の範囲で発振する半導体レーザー
外部共振	半導体レーザー素子において、共振用鏡面が素子端面ではなく素子外部に形成された場合の共振状態。素子外部に出た共振光路に回折格子等を設置することで発振波長を制御できる。
外部量子効率	外部量子効率 (External Quantum Efficiency : EQE) は、発光領域への投入電力 (波長で換算される電圧×電流) に対する外部に放射される光出力で定義され、LED 効率の一つの指標として用いられる。外部量子効率は、内部量子効率 (IQE : internal quantum efficiency)、電子注入効率 (EIE : electron injection efficiency)、光取り出し効率 (LEE : light extraction efficiency) の積で決定される。内部量子効率は、発光領域に注入される電子数のうち発光に寄与する電子数の割合で定義され、発光層の純粋な発光効率である。電子注入効率は、全注入電子に対する発光層に注入される電子の割合で定義される。また、光取り出し効率は、発光領域から放射された光のうち外部に取り出せる光の割合である。
貫通転移密度	結晶格子間隔の異なる基板上に半導体を結晶成長する際に生じる、原子の位置のずれ。特に、結晶成長とともに消えることなく表面まで達するものを貫通転位と呼ぶ。貫通転位の周辺では、発光強度が著しく減少するため、光デバイス作製において貫通転位密度を下げる必要がある。
残留応力	材料に外部から加えられた力を除去した後も材料に残る内部応力。
紫外レーザー損傷	結晶内部に誘電破壊が生じるバルク損傷と、局所的な屈折率変化を誘起してビームパターン変形や変換効率低下を生じさせるものがある。
時間依存密度汎関数理論	電子の多体効果を密度汎関数理論で扱い、さらに電子の実時間ダイナミクスを扱うことで近似的に励起状態を扱える理論、摂動理論では表現できない強い光による励起が引き起こす、非平衡な電子運動を近似的に扱うことができる。
自己加熱	CLBO が発生した紫外光の一部を、結晶が吸収して発熱する問題。光学素子内に温度不均一性を与え、波長変換に必要な位相整合が高温部で満たされなくなり、変換効率の低下や、出力不安定性を与える。

自由電子レーザー (FEL)	自由電子レーザーは電子ビームをアンジュレータと呼ばれる多数の磁石列により蛇行運動させた際に接線方向に放出される放射光を、繰り返し蛇行する電子ビームと相互させることで増幅して得られるコヒーレントな光パルスである。増幅媒質を有さず、アンジュレータ中での電子と光の相互作用が増幅媒質の代わりとなり、増幅媒質に付随する熱損失が存在しないため、高出力な光の発生が可能となる。また自由電子レーザーの波長は電子ビームのエネルギーとアンジュレータの磁場周期、磁場強度のみの関数となる。そのため、単一波長で、かつ波長可変なレーザー光を生成することが可能である。原理的にはミリ波領域からX線領域までの広い波長範囲でレーザー発振が可能であり、高出力かつ様々な波長に可変なレーザー光を実現する。
深紫外 LD	深紫外波長 (200-350nm) で動作する半導体レーザー。
深紫外線	概ね 300nm 以下の波長の紫外線。Deep Ultraviolet (DUV)。
多重量子障壁	LED や LD (レーザーダイオード) 素子において、電子注入効率を向上させるために用いられる電子ブロック層として用いられる。深紫外発光素子では、p 型層のホール濃度が低いため、p 側層への電子リークが大きくなり、電子注入効率が低下することが大きな問題である。そのため、通常の深紫外 LED では、バンドギャップの大きい材料で電子ブロック層を挿入し、注入効率を向上させている。電子ブロック層を、通常用いられるシングルブロック層から、多重量子障壁 (MQB: Multi-Quantum Barrier) とすることで、実効的な電子ブロック高さを向上させることができ、深紫外 LED や LD の電子注入効率の向上で極めて有効である。
導波モード	光が全反射しながら伝搬するモード
内部量子効率	内部量子効率 (IQE: internal quantum efficiency) は、LED や LD (レーザーダイオード) などの半導体発光素子において、発光領域に注入される電子数と放射された光子の数の比で定義される。発光に寄与する電子数の割合であり、発光層の純粋な発光効率である。
熱レンズ (効果)	光学素子がレーザー光を吸収して生じる温度分布に起因する光学歪。代表的には温度分布が 2 次分布に近いため、レンズ作用となる。
波長ビーム結合	回折格子などの波長分散素子を用いて、各々波長の異なる複数のビームを単一の光軸に重畳する技術。波長合成とも言う。
分子線エピタキシー	分子線エピタキシーは、超高真空環境下で単結晶の薄膜成長する方法である。高品質の半導体結晶を 1 原子層オーダーの高い膜厚制御性で作製できるため、量子ドットを含んだナノ構造を形成するための基本的なツールとして位置づけられている。
無アルカリガラス	ナトリウム等を含まないガラス。電子部品、半導体産業において多く用いられる。
横モード	導波路方向に垂直な面における光分布。
量子カスケードレーザー (QCL)	量子カスケードレーザーは半導体量子井戸構造中に形成されるサブバンド間の電子遷移を利用した中赤外からテラヘルツ帯まで設計可能な半導体レーザーである。活性層を多段に結合することで低閾値、高出力動作が期待できる。
量子ドット	量子ドットは直径数十ナノメートルオーダーの半導体立体ナノ構造である。電子や正孔の 3 次元量子閉じ込めにより、高効率の発光などが期待でき、次世代の発光材料として注目されている。特に、レーザーへの応用が期待されている。
量子ドットレーザー	量子ドットレーザーは量子ドット構造を利得媒質として利用するレーザーである。量子ドットに閉じ込められた電子や正孔の特徴的な振る舞いにより、既存の半導体レーザーに比べ高効率動作、低閾値動作、高温動作、温度安定動作などが期待できる。
励起	レーザー媒質内の活性イオンが、光を吸収し励起状態となること。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

天然資源の乏しい日本にとって、ものづくり産業は生命線である。しかしながら、将来的に人口減少が進むと予想されており、社会構造の変革に対応した技術革新を取り入れることで従来のものづくり産業構造から脱却し、新産業革命の流れの中で、省エネ化と産業競争力の強化を推進していくことが求められている。

近年の技術革新を鑑みるに、将来のものづくり産業では、あらゆる「もの」がインターネットでつながるIoT（Internet of Things）や人工知能の更なる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携や人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。その中で、照射強度や照射時間などをデジタル制御し易いレーザー加工は、将来のものづくり産業における最重要ツールの一つとして期待されている。

世界に目を向ければ、レーザー技術先進国である米国と、国主導のプロジェクトを通じて絶え間なくレーザー関連分野の研究開発に投資をしてきたドイツが世界をリードしているという現状がある。また、世界の工場として急速に成長した中国もレーザー関連分野において先進国を追い上げている。日本のものづくり産業が将来にわたって競争力を維持していくためには、高付加価値製品の製造に適した高精度・高品位加工に対応する効率的な次世代レーザー加工システム（エコシステム）を世界に先立って開発し、早期実用化を進め、ものづくり業界へ広く普及させることが必要となる。

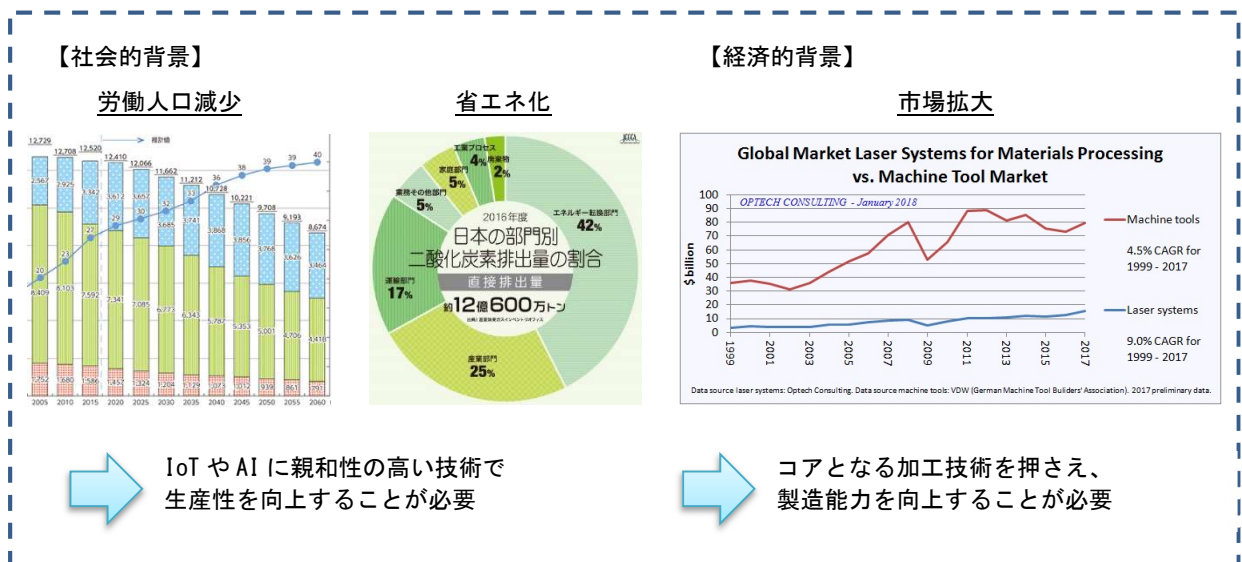


図 I 1-1-1 プロジェクトの背景

NEDO は、近年レーザー技術に関するプロジェクトを行ってきているが、欧米での国家プロジェクトの支援は継続しており、レーザー技術の先端技術開発は競争が激化していると言える。

わが国のユーザー企業がレーザー装置を海外から調達をしなければならぬ事情は、装置のメンテナンス遅延やノウハウのブラックボックス化の面で懸念を有しており、国内におけるレーザー技術を向上し実用化、事業化を支援する事業を実施することへの期待は高いと言える。

NEDO は、2015 年 11 月にパワーレーザー分野の技術戦略策定に向けたパワーレーザー技術の置かれた状況と技術課題についての分析を発表しており（技術戦略センターレポート TSC Foresight「パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて」）、わが国は固体レーザーのレーザー媒質や、通信用レーザーで培ったLD技術など、レーザーの個々の構成部品の技術力は高く、競争力がある。一方、海外ではパワーレーザーを今後の生産技術革新の重要な要素に据え、国家プロジェクトで開発を進めているなど、現状のままでは我が国の製造業の弱体化を招きかねない状況となっており、新たな取組が急務と考えられ、これまでのレーザーユニットで実現されていなかった波長、パルス幅、出力などを達成するための技術開発によって、加工技術の高度化を図ることが必要であるとしている。

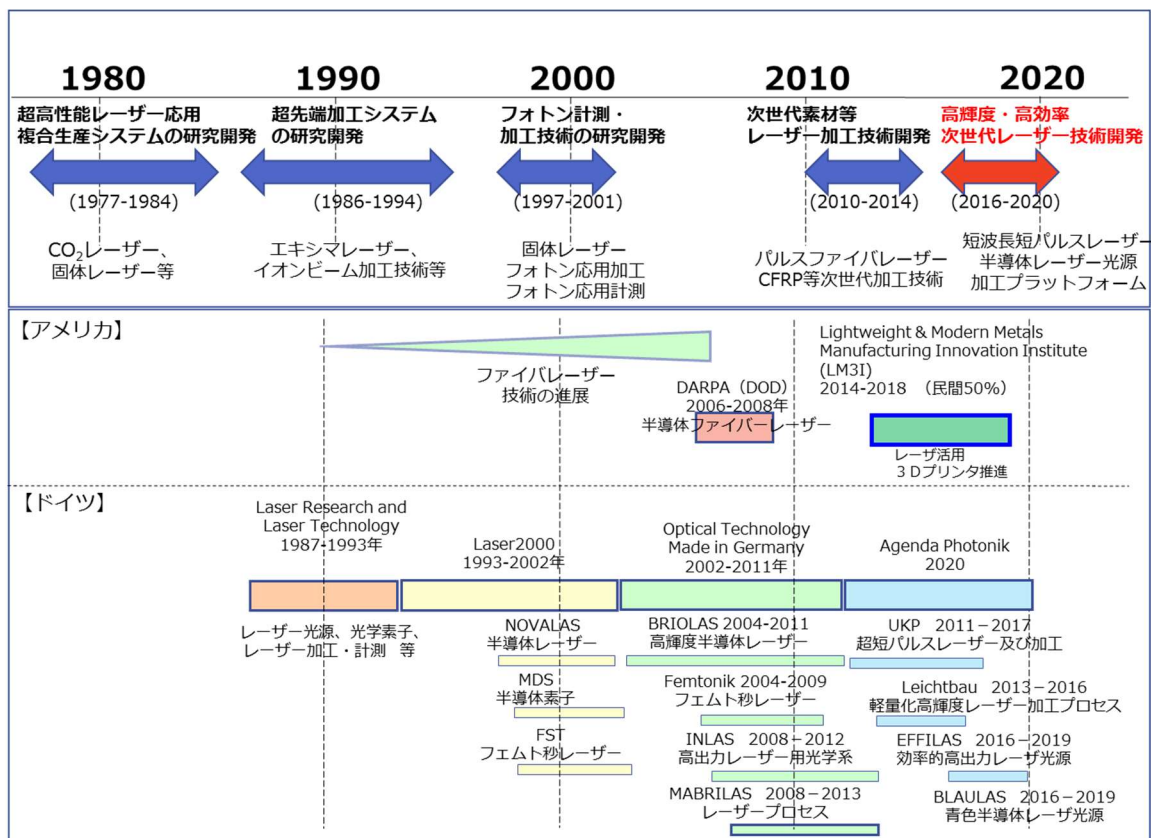
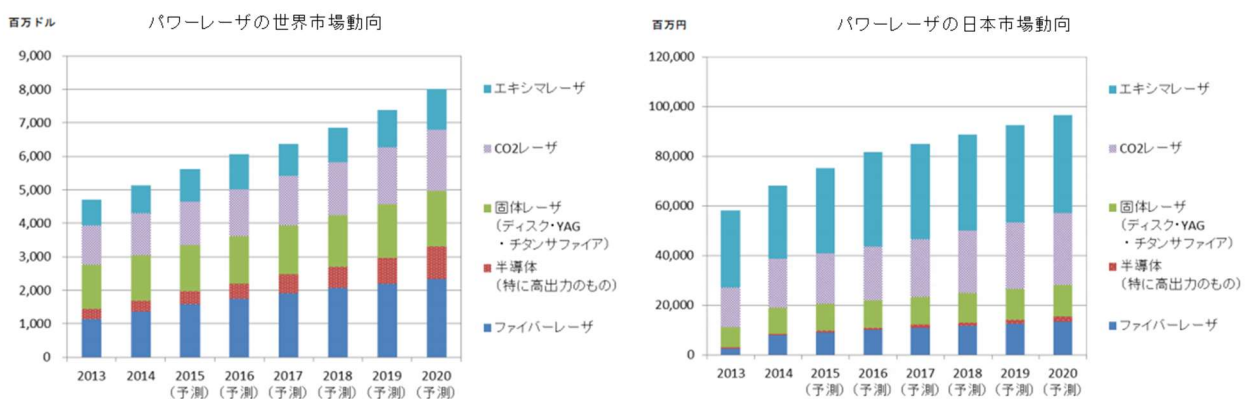


図 I 1-1-2 レーザー開発の状況

現状は、近赤外域の高出力連続波による加工（いわゆる切断や溶接等のマクロ加工）がショートヘッド市場といわれ、ファイバレーザ技術の進展で出力増に伴い、炭酸ガスレーザからの置き換わりが進んでいるが、この領域では海外メーカーが極めて優位となっている。一方で、ロングテール市場といわれる種々の加工品質を求める加工については、高品位・高効率加工へのニーズが高まる中、難加工材の扱いや加工効率に関して、海外勢も対応には課題を抱えていると言える。

日本はレーザ加工に関する優れた技術を有しており、レーザ加工市場を再び獲得していくポテンシャルを持っていると考えられるため、当プロジェクトにより技術開発を促進することで、再び市場の獲得を目指す。



特許庁 平成27年度特許出願技術動向調査報告書(概要) パワーレーザ

図 I 1-1-3 パワーレーザの市場

今後を見据えると、高品位・高効率加工技術を磨くことが鍵となると考えられ、本プロジェクトでは、以下の3点を軸に加工技術を磨くことを打ち出している。

- ・短波長域での高いエネルギー吸収率を利用する加工
- ・短パルス波による熱影響の少ない加工
- ・高エネルギー効率な光源を用いた加工

これによって、これまでになく高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザ技術、及びそれを用いたレーザ加工技術を開発し、社会実装を進めることで、わが国の消費エネルギーの削減と、ものづくり産業の競争力強化を図るものであり、技術戦略的にも合致する内容となっている。

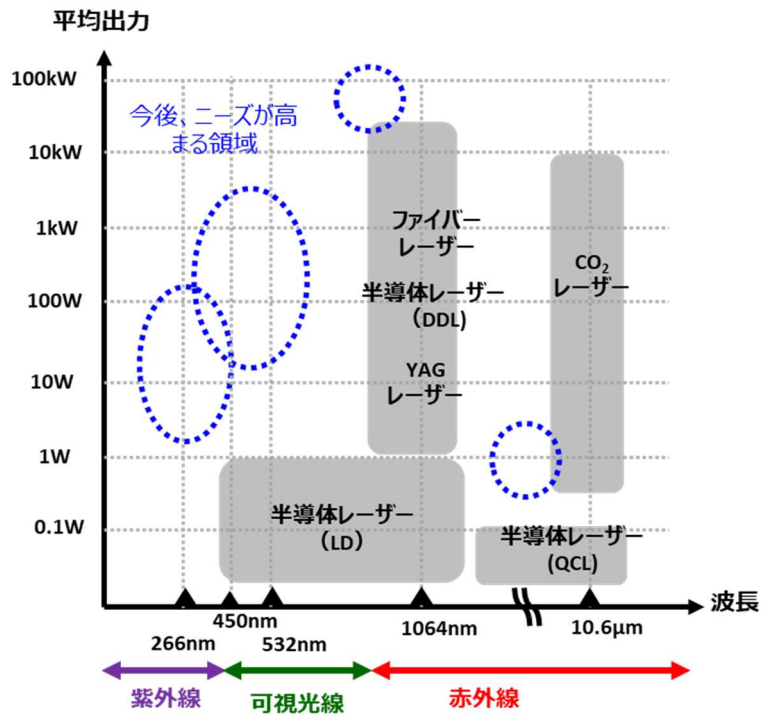


図 I 1-1-4 レーザー出力と波長にみる技術的方向性

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

わが国では、先進国でいち早く高齢化社会を迎えるため、将来の労働人口の減少に伴い生産力の低下が危惧される。このため、省人化・無人化する将来のものづくり現場でも生き残る技術の開発が必要であるとされる。レーザー加工技術は、将来のものづくりツールとして有用であるものの、拡大するレーザー加工機市場でシェアを獲得できないと、製造業全体の競争力を失う恐れがある。よって、わが国のものづくり産業の競争力強化を図るためには、産学官の英知を集結し、高輝度で高効率な実用性の高いレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、これらを活用するレーザー加工技術の開発を行い、早期に社会実装を進めることが必要である。これを推進する為、産学官が一体となって協調しハイリスクな研究開発を完遂すること、早々に共通基盤を確立し、その先の競争フェーズに入ることが必要である。

表 I 2-1-1 NEDO 関与の必要性

観点	適切性
社会的必要性	労働人口の減少に伴い省人化・無人化する将来のものづくり現場でも生き残る技術の開発が必要。
経済的必要性	拡大するレーザー加工機市場でシェアを獲得できないと、製造業全体の競争力を失う恐れがあり、早期に社会実装を進めることが必要。
国のプロジェクトとして実施する必要性	現状では、個社毎に技術やノウハウが蓄積しており、重複する研究は不効率である。業界全体の底上げには、産学官が協調して早々に共通基盤を確立し、その先の競争フェーズに入

	<p>ることが必要。 また、民間単独ではハイリスクである研究開発を完遂することが必要。</p>
--	---

また、わが国の政策面においては、科学技術イノベーション総合戦略2016（2016年5月閣議決定）では、「新たな産業や技術基盤の創出の核となる先端レーザー等の量子ビーム利用技術の高度化」を「Society5.0」（超スマート社会）の実現に向けて重きを置くべき取組の一つとして位置づけ、これは科学技術イノベーション総合戦略2017（2017年6月閣議決定）に引き継がれている。また、第5期科学技術基本計画（2016年1月閣議決定）では、「超スマート社会」の実現に向けた新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つとして、「革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「光・量子技術」」の強化を図るとしている。

本プロジェクトは、わが国の施策達成に不可欠な技術開発を担っているものである。

2.2 実施の効果（費用対効果）

高出力レーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の製品普及が見込まれ、効果として2030年に1,000億円の市場売上が期待できる。また、高効率な半導体レーザーをベースとした光源に順次置き換わることから、本事業がもたらす省エネルギー効果は、2030年にCO₂換算で約655万トン/年が期待される。省エネルギー効果の算出にあたっては、炭酸ガスレーザー等の既存レーザーが次世代型の直接加工半導体レーザーや半導体励起の固体レーザー等に置き換わることで、2030年に50%のレーザーが高効率型に置き換わるとしている。レーザーシステム、冷却システムをあわせた消費エネルギーの削減効果、及び加工時間の削減等の効果を加味している。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

●アウトプット目標（2020年）

本事業では、レーザー加工の高品位化・高スループット化および省エネルギー化を進めるため、従来にない高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー装置、およびそれらを用いた実用的なレーザー加工技術を開発する。レーザーとしては、市場ニーズが顕在化しているにも関わらず実用化できていない青～深紫外域の短波長レーザーや超短パルスレーザー、高パルスエネルギーレーザーを開発する。また、高機能化・低コスト化に対する市場からの継続的な要求に応えるため、革新的な次々世代レーザー基盤技術を開発する。

項目③については、革新的なレーザー光源に関する先導的研究開発として採択された6つのテーマにおいて、高輝度化・高出力化・省電力化・短波長化・小型化等に資する独創的な新規レーザー光源の構造に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにするものとし、2018年度にステージゲートを行った。

各項目における最終目標と、設定根拠は下表に記載する。

表 II 1-2 目標と設定根拠

研究開発項目	最終目標	設定根拠
項目①：高品位レーザー加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 平均光出力 50W の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発 50W 深紫外ピコ秒パルスレーザーを搭載したレーザー加工機システム開発 	電子機器部品や自動車用電池部品の実製造ラインに必要な性能
項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 500J 級固体パルスレーザー装置を想定した 250 J 級高出力レーザー装置の開発 	他国の同様装置の数年後の到達点を上回る性能 (+非連続的な産業応用も期待)
項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 出力 or エネルギー効率等が既存技術(2018年度)と比較し10倍以上、あるいは従来の光源にはない性能を有することを示す 実現可能性を示す。実用化に向けて残された課題を明確にする 	非連続的な成果創出を促すことを考慮
項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 最適加工パラメータの探索が可能なレーザー加工プラットフォームの構築と運用 加工条件と結果とを対応付けるデータベース構築 	共通基盤として確実に産業界へフィードバックされるアウトプット
項目⑤：短波長レーザーによる加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 出力 or エネルギー効率等が既存技術(2018年度)と比較し10倍以上、ある 	非連続的な成果創出を促すことを考慮

	<p>いは従来の光源にはない性能を有することを示す</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実現可能性を示す。実用化に向けて残された課題を明確にする 	
--	---	--

●アウトカム目標（2030年）

本事業により開発されたレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、およびこれらを活用して加工された製品などの普及により、CO₂削減および加工市場のシェア確保をアウトカム目標とする。市場に関しては、関連した製品の売上によって、2025年時点で約100億円、2030年に約1000億円を想定する。更に波及効果として2030年のレーザー加工システムの予想約200億ドルのシェア35%（約7000億円）を目指すとしている。

本事業がもたらす省エネ効果は、CO₂換算で2030年に655万t/年の削減を見込んでいる。見積りに当たっては、本研究成果（機器、応用製品）が既存技術を置き換える形で順次社会実装され、波及効果が起きるものと仮定している。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

将来のものづくり現場では、あらゆるモノがインターネットでつながる IoT (Internet of Things) や人工知能のさらなる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携と、人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。

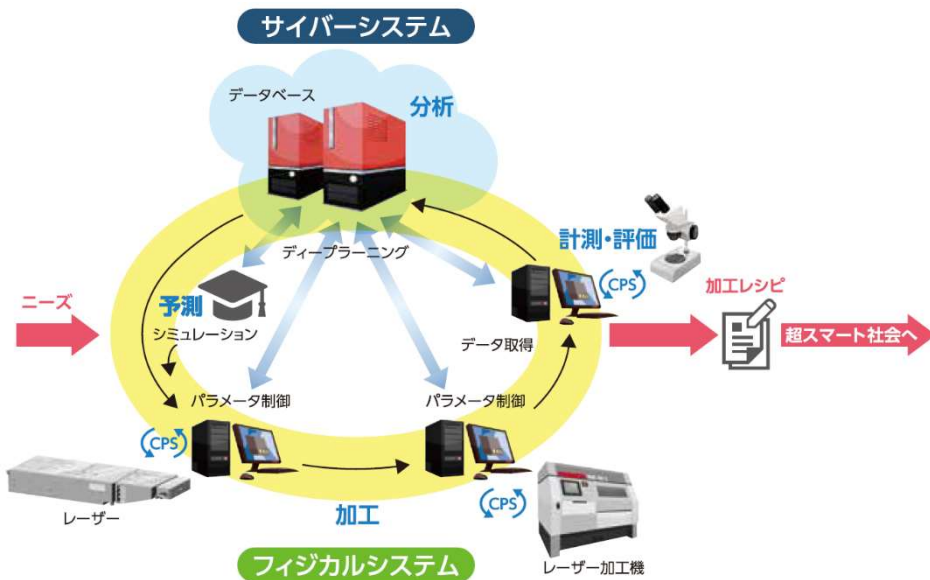


図 II 2-1-1 プロジェクト概要図

レーザー加工は、こうした将来のものづくりにおける最重要ツールの一つとして期待されているが、現行のレーザー加工技術は、消費電力や加工処理能力、加工精度や品位の観点において課題を有している。

本事業では、短波長／短パルス／高エネルギー効率を軸に加工技術を磨くことを目指す方針として、各項目間の連携にも配慮しながら、以下の研究開発項目について実施する。

- 項目①：高品位レーザー加工技術の開発
- 項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発
- 項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発
- 項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発
- 項目⑤：短波長レーザーによる加工技術の開発

●研究開発の計画

スケジュールと費用を下表に示す。

表Ⅱ2-1-1 研究開発スケジュール、費用

研究開発 項目	2016年度	2017年度	2018年度 中間評価	2019年度	2020年度	2021年度 事後評価
項目①：高 品位レー ザー加工技 術の開発	設計／要素技術 試作・動作実証		加工応用実証			
	2.3億円	4.6億円	3.5億円	2.9億円	2.7億円	
項目②：高出 力レーザーに よる加工技術 の開発	設計／要素技術 試作・動作実証		加工応用実証			
	5.4億円	4.0億円	5.0億円	4.7億円	3.5億円	
項目③：次々 世代加工に向 けた新規光 源・要素技術 開発	要素技術開発 試作・動作実証		ステージ ゲート	高度化		
	4.5億円	4.4億円	5.2億円	7.0億円	5.7億円	
項目④：次世 代レーザー及 び加工の共通 基盤技術開発	加工プラットフォーム構築 計測評価基盤技術開発		データベース運用 データベース構築			
	5.8億円	8.1億円	8.7億円	4.7億円	5.3億円	
項目⑤ ：短波長レー ザーによる加 工技術の開発				加工応用実証		
	—	—	—	3.3億円	4.5億円	
費用総額	18.0億円	21.1億円	22.4億円	22.6億円	21.7億円	

2.2 研究開発の実施体制

研究開発の実施体制を下図Ⅱ2-2-1に示す。NEDOがプロジェクト全体の進行を企画・管理するとともに、プロジェクトリーダー（PL）として国立大学法人東京大学 物性研究所 教授 小林洋平氏、サブプロジェクトリーダーとして、国立大学法人東京大学 大学院理学系研究科附属 フォトンサイエンス研究機構 特任准教授 田丸博晴氏、及び、国立研究開発法人産業技術総合

研究所 先端オペランド計測技術 OIL/分析計測標準研究部門 ラボチーム長 黒田隆之助氏が就任し、全メンバーの協調活動をリードする体制である。

また、外部有識者によるアドバイザー委員会を設定して、NEDO、PL、実施者へプロジェクトの方向性や研究開発内容への助言を提示した。

A:基礎研究、B:製品化向け基盤研究、C:プロトタイプ開発、D:ユーザーテスト、E:製品開発

	番号	実施者	タイトル	フェーズ
①高品位レーザー加工技術の開発	1	三菱電気、阪大、スペクトロニクス	高品位レーザー加工技術の開発	C-D
②高出力レーザーによる加工技術の開発	2	浜ホト、阪大、産総研	高出力レーザーによる加工技術の開発	C-D
③次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	3-1	京大、スタンレー	フォトニック結晶レーザーの短パルス化、短波長化	B
	3-2	理研、山口大	高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域・高出力深紫外LDの研究開発	B
	3-4	東工大、富士ゼロックス	高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発	B
	3-5	東大、三菱電気	高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発	B
	3-7	東大	超高速利得スイッチLDをシードとするレーザー加工用光源の開発	B
	3-8	産総研、高エネ研、浜ホト	分子振動を利用する高効率加工プロセス用赤外高出力レーザー光源開発	B
④次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	4	東大、産総研	4次世代レーザー及び加工の共通基盤技術	B
⑤短波長レーザーによる加工技術の開発	5-1	パナソニック、PSFS	高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発	C-D
	5-2	金門光波、千葉工大、レーザー総研	革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発	C-D
	5-3	ギガフオン	極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発	C-D
	5-4	阪大、島津	高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発	C-D

図Ⅱ2-2-1 「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」研究体制

2018年度には、レーザー技術の産業応用（社会実装）への取り組みを強化するため、研究開発項目③次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発に2つの研究開発テーマ（東京大学、産業技術総合研究所・高エネルギー加速器研究機構・浜松ホトニクス）を追加した。

2.3 研究開発の運営管理

NEDOは、プロジェクト執行に責任を負い、全体の進行を企画、管理している。研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握、必要な措置を講じている。プロジェクトリーダー（PL）はサブプロジェクトリーダー（sPL）と協力して、プロジェクト全メンバーの協調活動をリードしている。

① 研究開発の進捗把握・管理

研究開発の進捗把握、管理においては、毎月の進捗報告レポートによってNEDO、PLと実施者間で双方向のコミュニケーションをとり、研究開発の進捗状況把握と意見交換によって目標達成の見通しを常に把握することに努めている。また、目的に応じて階層分けした会合を実施しており、外部有識者で構成するアドバイザリーボードを組織し、アドバイザリー委員会を開催するほか、全実施者間の交流によって協調、連携活動を促進する推進会議を開催している。

その他現地へ訪問するサイトビジット方式の打ち合わせを行い研究開発の進捗状況の確認に努めている。

表 II 2-3-1 研究開発の進捗管理

●進捗報告レポート

	作成単位	目的	頻度（実施状況）
進捗報告レポート	個別テーマ	毎月の主な研究開発状況をスライド1枚にまとめ、成果と課題の整理を行う	月1回程度 (2016/10～)

●委員会、会合

	対象	目的	頻度（実施状況）
アドバイザリー委員会	外部有識者 全テーマ実施者 PL・サブPL NEDO	研究開発成果の社会への実装に向け、プロジェクト全体の方向性、妥当性を議論する	年2回程度
推進会議	全テーマ実施者 PL・サブPL NEDO	全体での成果創出に向け、全関係者で進捗を共有し、テーマ間連携を図る	年2回程度
個別テーマ打ち合わせ	個別テーマ実施者 PL・sPL NEDO	個別テーマの進捗状況を確認する（サイトビジット形式）	各研究開発テーマで年1～2回程度

アドバイザー委員会は、外部有識者からなる下記のメンバーにて構成し、プロジェクト全体の方向性、妥当性について議論を行っている。いただいた助言は研究開発およびプロジェクト方向性に反映させた。

表Ⅱ2-3-2 アドバイザー委員リスト (五十音順)

氏名(敬称略)	所属
足立 博成 (～2018年度)	トヨタ自動車株式会社 生技開発部 接合・レーザ加工グループ長
岡崎 朋也 (2019年度～)	トヨタ自動車株式会社 生技開発部 要素開発室造形技術 2G 主任
岡本 康寛	岡山大学 大学院 自然科学研究科 産業創成工学専攻 准教授
佐野 雄二	科学技術振興機構 (JST) 内閣府 ImPACT プログラムマネージャー
西澤 典彦	名古屋大学 大学院 工学研究科 量子工学専攻 教授
松尾 慎治	日本電信電話株式会社 NTT先端集積デバイス研究所 上席特別研究員
吉岡 健一	東レ株式会社 複合材料研究所 所長

② 技術分野における動向の把握・分析

本プロジェクトで取り組む技術分野について、下表のように動向把握に努めている。

表Ⅱ2-3-3 技術分野の動向把握

把握方法	内容
NEDOにおける情報収集	<ul style="list-style-type: none"> ・ 政策動向 ・ 市場動向 ・ 最新の研究開発動向
展示会への NEDO ブースの出展	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユーザーのニーズ動向
研究開発項目④における調査研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユーザーのニーズ動向 ・ 市場動向 ・ 標準化動向
個別テーマによる学会や展示会への参加	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最新の研究開発動向

③ 開発促進財源投入

NEDO 内の予算を財源として、加速予算（申請が認められると追加で配賦が可能となる予算）を獲得。加速予算により、早期に開発成果が得られる、またはよりよい成果が得られると考えられる開発について、予算を追加した。

表 II 2-3-4 開発促進財源投入例

時期	金額（百万円）	内容
2019 年 10 月	14	フォトニック結晶レーザーの最終目標であるワンチップによるワット級の発振に向け、予定よりも早く効率・出力の増大が確認されつつあり、加速資金により、開発を促進し海外に先駆けて革新的な高出力・高ビーム品質の青色レーザー光源の実現をめざした。レーザー出力を向上を早期に達成し、製品化に向けた連続発振の確認や製造方法の開発、信頼性の向上を前倒して実施。
2020 年 4 月	75	開発したレーザー光源を、東京大学・産総研（項目 4）と連携しながら柏プラットフォームに整備。加速予算で光源を追加製作したことにより、柏プラットフォームに、プロジェクトの項目 1、2、4、5-1～5-4 で開発したレーザー光源・加工機がすべて集約された。
2020 年 9 月	35	青色半導体レーザーの開発について、海外企業の研究開発が活発化しているおり、国際的な競争力および実用化時のシェアを確保するために高出力化に必要な光源を追加で製作・評価。研究開発期間中において複数の研究開発課題に対して並行して課題解決に取り組むことで、研究開発スケジュールを短縮し、早期の実用化を目指した。

④ 新型コロナウイルスに関する対応

2020 年度中の 2 回の緊急事態宣言発令を受け、研究開発進捗への影響について随時ヒアリングを実施。開発状況に大きく受けた事業者には 2 回の契約期間延長を実施した。

表 II 2-3-5 期間延長の実施内容

時期	期間 (延長前)	期間 (延長後)	概要
2020年 11月	～2021年 2月28日	～2021年 3月19日	2020年4月に発令された緊急事態宣言を受けて、研究開発進捗への影響について随時ヒアリングを実施。対策として、年度内で開発期間の延長を実施。研究期間の延長が必要と考えられたテーマについて、期間延長を実施。
2021年 3月	～2021年 3月19日	～(最大) 2021年 7月19日	2021年1月に発令された緊急事態宣言をうけて、研究開発進捗への影響について随時ヒアリングを実施。対策として、年度を跨いで開発期間の延長を実施。研究期間の延長が必要と考えられたテーマについて、期間延長を実施。

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

2.4.1 ユーザーとのコミュニケーション

本プロジェクトでは、成果を発信しユーザーとのコミュニケーションを図るため、中間成果までの成果発信として2018年4月25日～28日にパシフィコ横浜にて開かれたOPIE '18へ、またプロジェクトの最終成果の発信とマッチング促進として2021年6月30日～7月2日にパシフィコ横浜にて拓かれたOPIE '21へNEDOとしてブースを出展した。OPIEは光学、フォトニクス技術を扱う展示会であり、国際会議であるOPICと併設されることから、多くの研究者、技術者が足を運んだ(OPIE '21は新型コロナウイルスの影響により、併設にはいかなかった)。OPIE '18では、来場者約16,000人の3割にあたる約5,000人が、OPIE '21では、来場者約7,000人の3割にあたる約2,000人がNEDOブースに来場した。

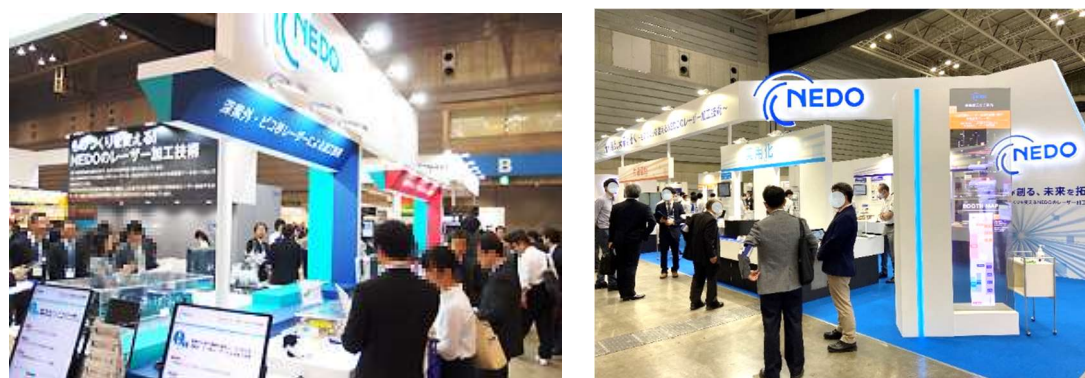


図 II 2-4-1 OPIE出展の様子(左: OPIE '18、右: OPIE '21)

2.4.2 知的財産等に関する戦略

本プロジェクト関連産業の知財に関する構造的特徴は、素材、素子、モジュール、光源、加工機、アプリケーションなど、レイヤーごとに開発・知財が比較的独立しており、強みを持った技術は製品としてサプライチェーンで受け渡される。本プロジェクトでは、知財をクロスライセンスし、各社がそれぞれ統合し商品を作るビジネスモデルを考慮している。

競争領域と協調領域の共存と、必要とされる知財戦略

競争すべき領域

個別の要素技術に関する成果は、
開発者による成果の迅速な公表・製品化を阻害しない
➡ 知財の画一的な共有の回避、一定期間の秘匿化、等

協調すべき領域

マーケット状況、全体の研究開発戦略や成果情報は、共有し波及を加速する
➡ 技術達成レベル・共通ボトルネック・成果活用戦略の議論等の共有、
公的機関成果を中心とする知財集約等の促進、等

図Ⅱ2-4-2 知財戦略モデル

2.4.3 コンソーシアムの設立

プロジェクトと社会との接点として、実施者によって2017年10月にTACMIコンソーシアム（代表は本プロジェクトのPLである小林洋平教授）が設立された。これはプロジェクトで開発するレーザー加工装置を外部ユーザーに利用を提供し、ユーザーテストによって装置のフィードバックを受ける仕組みの受け皿となることができる。コンソーシアムでは、加工プラットフォームの利用を促進し、レーザー加工のデータベース構築と利用、標準化の制定などを通し、協調・競争の最適な共存を模索することができる。

プロジェクト外も巻き込んだ産学の議論が活発化、人材育成にも貢献できることに期待している。

3. 情勢変化への対応

高出力の青色半導体レーザー光源開発では、本プロジェクトが海外メーカーに認知されたことによって開発競争がプロジェクト開始時より激化している。早期の市場参入による顧客獲得のため、技術の切り出しにより製品化を推進する方針とした。製品化に向けて機動的な対応が可能となるように、担当する島津製作所を大阪大学の共同実施先（再委託先相当）から直接の委託先へと変更する対応を取った。

レーザー加工の可能性を広げるとともに、レーザー技術の産業応用（社会実装）への取り組みを強化するため、2018年度に公募を実施。研究開発項目3 次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発に2つの研究開発テーマ（東京大学、産業技術総合研究所・高エネルギー加速器研究機構・浜松ホトニクス）を追加した。

4. 評価に関する事項

NEDO は、技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、中間評価を 2018 年度、事後評価を 2021 年度とし、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、適宜見直しを行う。

2018 年、NEDO 評価部が事務局となり外部評価委員による研究評価委員会「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」（中間評価）を実施した。

表 II 4-1 中間評価委員一覧（敬称略、順不同）

	氏名	所属、役職
分科会長	山口 滋	東海大学 グローバル推進本部 部長／理学部 物理学科 教授
分科会長代理	江川 孝志	名古屋工業大学 極微デバイス次世代材料研究センター 教授
委員	秋山 靖裕	株式会社 東芝 技術・生産統括部 技術企画室 室長
	足立 隆史	株式会社 SUBARU 航空宇宙カンパニー 製造部 第二部品課 課長
	庄司 一郎	中央大学 理工学部 教授
	平等 拓範	分子科学研究所 メゾスコピック計測研究センター 織細計測研究部門 准教授
	吉國 裕三	北里大学 理学部 物理学科 教授

プロジェクトの成果や今後の方向性について評価を得た。中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを行った。

表 II 4-2 中間評価のコメントと対応

中間評価コメント	対応
<p>最終目標の達成が難しい テーマは目標の見直し、 テーマの改廃</p>	<p>開発の最終目標出力について、一部テーマは中間評価までの達成状況を鑑みた最終目標値に再設定を実施した。また、達成が難しいと思われる出力目標について、予算の有効活用の観点からプロジェクト期間内に達成見込みのある開発内容に絞り込みを実施。予算とリソースを再配分することにより、着実な成果創出を目指した。</p>
<p>位置づけが明確でないテーマは再編成を実施</p>	<p>開発体制の見直しを行い、項目 3 及び項目 4 のうち、実用化へ向けた開発を進めるテーマについて、項目 5「短波長レーザーによる加工技術の開発」を新設し移動した。製品化向け基盤研究を実施する項目 3 の中でも実用化に近い開発をしているテーマや共通基盤技術の開発をするテーマの中で、装置開発に特化したテーマについて、実用化を意識した開発テーマとしてまとめ、実用化・事業化へ向けて開発を加速した。</p> <p>その上で、基盤研究の項目 3 はレーザー技術の高度化を、プロトタイプ開発などを行う項目 1、2、5 は加工応用実証などをプロジェクトの後半で意識して開発を実施した。</p>

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

研究開発の最終目標達成度について、下表に示す。全体として目標に対する成果は十分に達成した。実用化に近い目標を出口としているテーマは、事業終了後も、実用化・事業化に向けた取組を推進していく。基盤研究に近い目標を出口としているテーマは、事業終了後、さらなる高出力化を狙っていく。

各テーマごとの達成度については、「2. 研究開発項目毎の成果」で個別に記載する。

表Ⅲ1-1 最終目標達成度

	最終目標	成果	達成度
項目①：高品位レーザー加工技術の開発	・光パワー50W以上の深紫外ピコ秒パルスレーザー装置を搭載したレーザー加工機	・目標達成の上、加工プラットフォームに提供するとともに、実用化・事業化済み。	◎
項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	・500J級固体パルスレーザー装置を想定した250J級高出力レーザー装置の開発	・250J達成により、キロジュール級の基本設計技術の確立したうえ、加工プラットフォームでの実用化済み。	○
項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	既存技術と比較して10倍以上または新規の性能を有するレーザー光源	・6つのテーマのうち、2つのテーマで当初から引き上げた目標を達成。	○
項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	・最適加工条件の探索が可能なレーザー加工プラットフォームとデータベース	・項目①、②、④、⑤を集約した加工プラットフォームの開設とユーザー利用による実用化済み。 ・データベース運用開始。（実用化）	◎
項目⑤：短波長レーザーによる加工技術の開発	既存技術と比較して10倍以上または新規の性能を有する短波長レーザー装置	・全テーマで目標を達成したうえ、加工プラットフォームにて実用化済み。 ・光源および加工機の事業化済み。	◎

知的財産権の確保や成果の普及として論文、学会発表などのほか、積極的な広報活動も行われており、下表に実績数を示す。詳細は巻末に付属資料として添付している。

表Ⅲ1-2 特許出願、成果の発表、普及活動

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	合計
特許出願	2	25	51	79	97	27
論文	3	13	14	24	49	103
研究発表・講演	42	88	195	260	150	735
新聞・雑誌	1	26	11	5	44	87
展示会等	0	5	6	10	4	25
ニュースリリース	1	5	5	5	5	21

2. 研究開発項目毎の成果

2-1. 研究開発項目①「高品位レーザー加工技術の開発」

2-1-1. 「高品質・大口径波長変換素子の開発」（実施先：大阪大学）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

短波長深紫外レーザーの光源開発において、波長変換により紫外光を発生する非線形光学結晶が光源出力や装置寿命を決める主要光学素子の1つとなっている。数多くの非線形光学結晶の中で大阪大学が発見したCsLiB₆O₁₀（以下CLBO）が唯一の候補結晶となっているが、加工産業で求められる高出力紫外光に対してはレーザー損傷の発生が避けられず、開発のボトルネックとなっている。本テーマの実施者はCLBO内部の点欠陥に課題が顕在化する以前から着目し、独自の欠陥低減技術の開発や紫外レーザーに対する損傷耐性の向上効果などを実証してきた〔レーザー研究2013、Opt. Mater. Express 2014など〕。本事業では極めて出力の高い深紫外ピコ秒レーザー光源の実現が求められており、当該実施者が培った結晶化技術を基盤に更に高度な品質制御、欠陥低減に関する新技術開発が不可欠な状況となっている。また、紫外光強度がレーザー損傷閾値以下となるようにビーム径を拡大しながら高出力化を進める必要があるため、高品質な大口径素子を提供することが求められている。以上を踏まえ、本開発テーマにおいては（a）高レーザー損傷耐性結晶の開発、（b）大型結晶作製技術の開発の2つをサブテーマとして設定した。

（２）研究開発目標と根拠

「高品質・大口径波長変換素子の開発」の技術については、光源、加工機グループへの開発用の紫外光発生用素子供給を担いながら、紫外光出力50Wの最終目標達成に向けたCLBO結晶の（a）高品質化と（b）大型化が必要となる。目標設定にあたって、スペクトロニクス社で製品化している現行機での光学素子の仕様を元に、表Ⅲ2-1-1-1の目標を設定した。

表Ⅲ2-1-1-1. 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
（a）高レーザー損傷耐性結晶の開発	要素技術の（b）への導入、高度化	基本要素技術の開発を終了するため	（1）紫外レーザー損傷耐性1.5倍、 （2）素子化率2倍 向上	結晶欠陥制御に対する過去の実績より設定
（b）大型結晶作製技術の開発	結晶重量1.5kg超 50Wの安定発生 （SPXでの実証）	30mm角口径素子を量産する結晶積の見積もりより	結晶重量1kg 30mm角口径素子	大型装置での通過目標重量として50W発生に向けた光学素子の検証

大型化の指針として、本事業開始時に出力2Wの266nmレーザー機の製品実績情報を考慮し、同じ紫外光ビーム強度を維持するために25mm角が必要と算出し、安全係数を加えて30mm角を目標

値とした。高品質化によるレーザー損傷耐性向上ファクターは除いており、損傷耐性の向上により必要となる素子口径は小さくなるが、その場合は素子化率向上、低価格化に貢献する。

結晶重量は、本事業開始時に重量約 400g の結晶ブールが工業製品として量産化している状況を考慮し、大口径素子（ここでは 25mm 角素子を想定）を量産するために重量 3.8kg の結晶が単純計算で必要とされる。素子中央部の未使用領域（転位欠陥の密集領域）を解消して素子化率を 2 倍以上改善し、さらにレーザー損傷耐性向上ファクターを期待して約 4 倍となる 1.5kg 超を目標値として設定した。

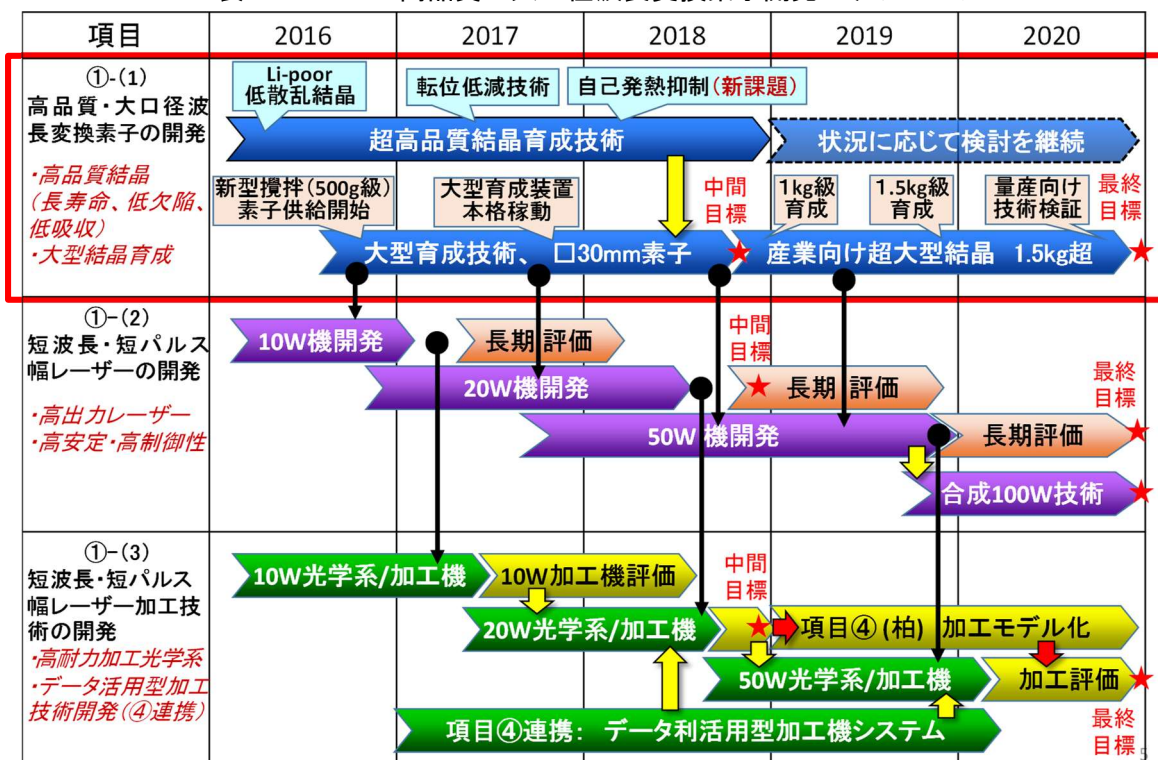
紫外レーザー損傷耐性の目標値は、本事業開始前に市販結晶の 1.6 倍の閾値向上が得られていたが[Opt. Mater. Express 2014 など]、新組成での更なる高品質化、転位欠陥等の低減の効果をこれまでの経験から予測し、1.5 倍を目標値に掲げた。

大型結晶の作製は育成装置内の容器サイズに依存し、過去にも大阪大学から重量 1kg サイズ（APL 1995）、中国で 1.8kg（JCG 2006）の報告がある。結晶内部の点欠陥（光散乱として観察される）や転位欠陥を制御した高品質結晶の開発技術では世界トップ品質を有しており、独自の溶液攪拌育成技術と合わせて世界初の高品質と大型化の両立を狙う。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-1-1-2 には共同して実施する研究開発項目①全体のスケジュールを示す。表中の太赤枠の部分为本テーマのスケジュールである。

表Ⅲ2-1-1-2. 高品質・大口径波長変換素子開発スケジュール



(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-1-1-3に示す。

表Ⅲ2-1-1-3. 研究開発項目と達成状況 (2021年3月19日時点)

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
(a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発	要素技術の(b)への導入、高度化	・Li-poor 溶液組成を導入し、低欠陥密度で高レーザー損傷耐性の結晶を実現、(b)へ導入 ・転位欠陥制御技術を開発し、(b)へ導入	◎	・高出力深紫外光を長期間発生させて見つけた、ビーム品質低下、新たな欠陥形成の原因解明と対策
(b) 大型結晶作製技術の開発	結晶重量 1.5kg 超 50W の安定発生 (SPX 社での実証)	・大型育成装置を用いて重量 1.5kg の超大型単結晶を作製 ・大口径波長変換素子を供給し、出力 50W のレーザー加工機の実現に貢献	◎	・コスト・量産性を考慮した重量 1kg 級単結晶の生産性(歩留まり)の検証

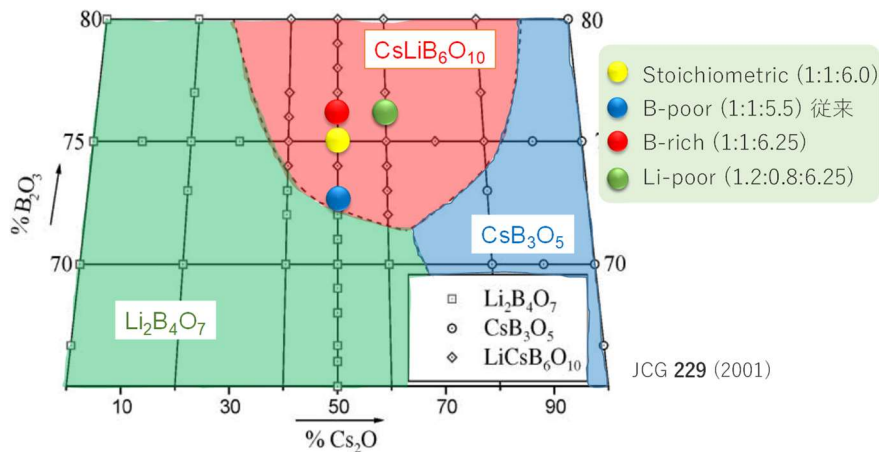
◎ 大きく上回って達成、○達成、△年度末までに達成見込み、×未達

当初計画した中間目標、最終目標は全て達成し、研究開発項目①-(2), (3)との連携を通して深紫外レーザー光源、加工機で世界初となる顕著な成果を挙げることができた。CLB0 結晶の開発においては、特にこれまで着手していなかった転位欠陥の制御、大型化に初めて取り組み、実用化に向けた基盤技術の確立につながった。事業終了後は大阪大学発のベンチャー企業で共同研究を実施している(株)創晶超光において研究成果の導入と実用化に取り組んでいる。

(5) 成果の詳細

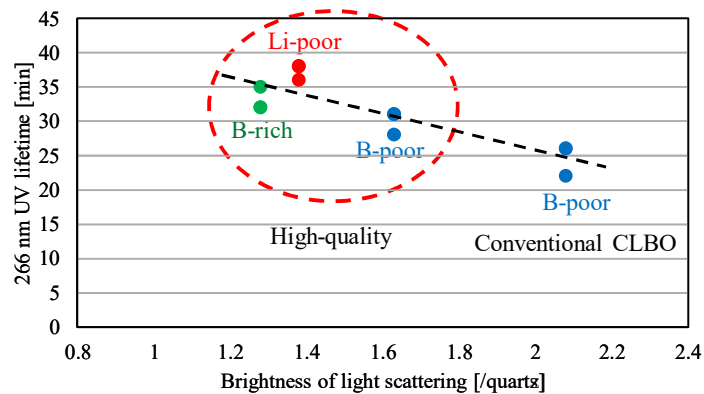
(a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発 (1)

従来、CLB0 は粘性を下げる目的でホウ素成分を減らした B-poor フラックスを用いて結晶成長が行われてきた。図Ⅲ 2-1-1-1 に示すように B-poor フラックスは $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ との初相境界領域に位置し、このことが結晶内部の輝点、光路状散乱として観察される内部欠陥の原因になっていると考えた。そこで、高品質化と大型化が期待できる新しい育成組成比として Li-poor フラックスによる結晶成長を試みた。



図Ⅲ2-1-1-1. CLBO 組成近傍の擬三元系組成図

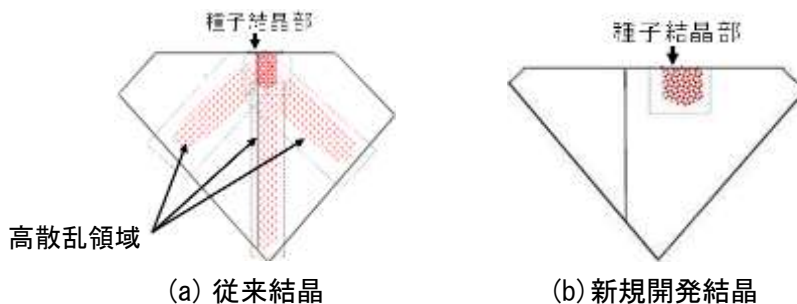
育成した各種組成から光学素子を作製し、光路状散乱の輝度（水晶を基準として比較）と 266nm 光に対する加速劣化試験での寿命の関係を調査したところ、図Ⅲ2-1-1-2 の結果が得られた。Li-poor 組成から育成した CLBO 結晶は散乱光強度が弱い（高品質）で、素子寿命も比較的長いことが明らかになった。従来品質の結晶に比べ、Li-poor 組成から育成した CLBO の寿命は約 1.5 倍となっている。



図Ⅲ2-1-1-2. CLBO の内部散乱光路明度と紫外光経時劣化寿命

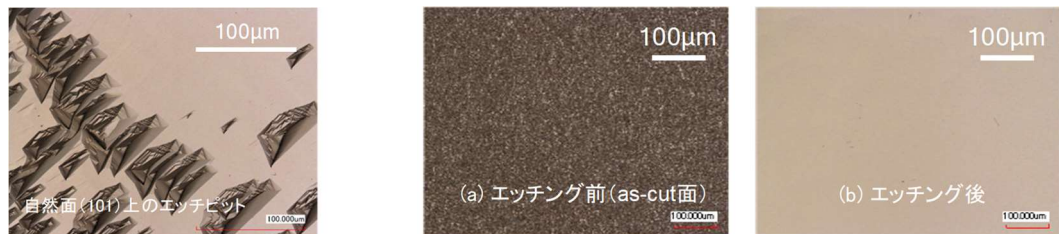
(a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発（2）

従来、CLBO 結晶の中央部には欠陥が多く存在し、経験的にレーザー損傷が生じやすいこの領域を避けるようにして素子加工が行われてきた。大阪大学の高品質結晶化技術によって結晶全体の光散乱欠陥が低減し、これまで観測されてこなかった、図Ⅲ2-1-1-3 (a) に示すように種子結晶から中央領域に伝搬する高散乱領域が明確に観測されるようになった。



図Ⅲ2-1-1-3. 可視光レーザーで確認される CLBO 内の高散乱領域

そこで、本研究では種子結晶から伝搬する転位欠陥の低減を目的に、種子結晶表面の機械加工歪層を除く化学エッチングを検討した。図Ⅲ2-1-1-4の(a)は転位評価をするためにエッチピットを露出させた表面で、(b)は加工歪層を除き、平坦面を作製した表面である。



(a) エッチピット評価用

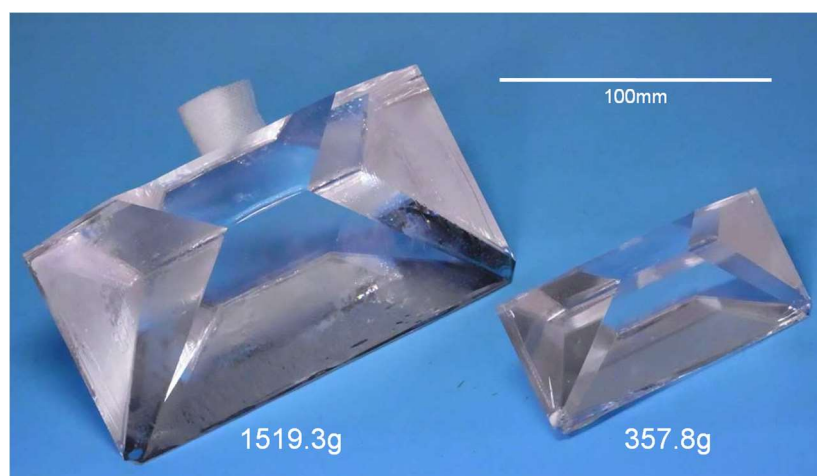
(b) 加工歪層除去用

図Ⅲ2-1-1-4. CLBO 結晶のケミカルエッチング処理表面

本技術が確立したことで、転位（ピット）フリーで加工歪のない高品質種子結晶から CLBO の成長が行えるようになった。本技術により得られた結晶は図Ⅲ2-1-1-3 (b) に示すように高散乱領域の形成が抑制できることが明らかになり、結晶中央部の欠陥抑制に成功し、素子化率は少なくとも 2 倍以上向上する見通しが得られた。

(b) 大型結晶作製技術の開発

大型化に効果的な溶液攪拌を可能にする特殊攪拌翼（大容量溶液仕様）を、流動解析シミュレーションに基づいて製作した。この攪拌翼を使い、直径 20cm 坩堝（従来は 15cm）から重量 1.5kg 級の超大型結晶の作製が見込める大型育成装置の設備導入を行った）。2018 年度末に中間目標であった 1kg 超の大型結晶の作製し、内部の散乱欠陥等がこれまでと同様に高品質な状態であることを確認した。2019 年度には最終目標であった重量 1.5kg の超大型単結晶の育成に成功した（図Ⅲ2-1-1-5 の左側の結晶）。結晶サイズは 160mm×103mm×87mm、重量 1519.3g となっている。約 27 日間かけて成長させており、水平方向（片側）の平均成長速度は約 2.8mm/day であった。

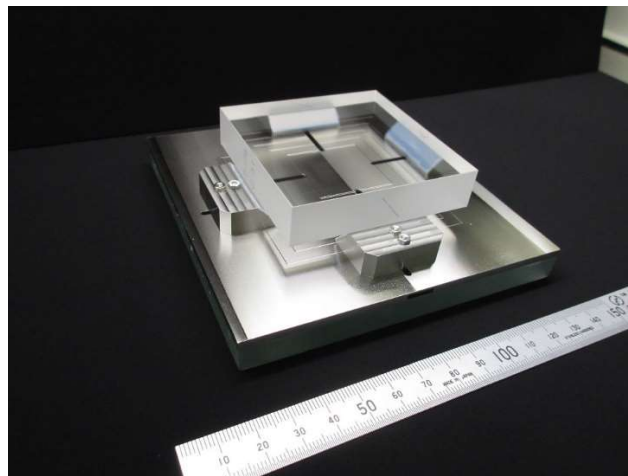


図Ⅲ2-1-1-5. 1.5kg 級超大型 CLBO 結晶（左）とプロジェクト開始時点の結晶（右）

また、開発してきた大型結晶から、平均出力 50W のピコ秒高出力深紫外光発生試験に用いる図Ⅲ2-1-1-6 の 30mm 角断面の大型素子を作製し、スペクトロニクス(株)に提供した。さらに、図Ⅲ2-1-1-5 の 1.5kg 結晶からは、研究開発項目②で開発を進めている世界最高のパルスエネルギーを有する半導体レーザー励起赤外パルス固体レーザーの緑色光発生用波長変換素子(図Ⅲ2-1-1-7)を作製した。素子サイズは 70mm×70mm×15mm であり、CLB0 を素材とした波長変換素子としては世界最大のものとなる。



図Ⅲ2-1-1-6. 紫外光発生用大型波長変換素子
左から 5mm 角(市販サイズ)、13mm 角、30mm 角断面



図Ⅲ2-1-1-7. 緑色光発生用超大型波長変換素子(70mm 角断面)

(6) 実用化・事業化への取り組み

最終目標を達成し、超大型 CLB0 単結晶を作製する育成技術の開発に成功した。プロジェクト後半では実生産を視野に入れ、コスト・生産性の点で適した重量 1kg 級の結晶成長に取り組み、計 6 個の単結晶成長を実施した。この過程で、坩堝や原料コストの低減に寄与する直径 18cm の坩堝を使用しても、重量 1.5kg の単結晶が製造できる条件も明らかになった。CLB0 結晶は次世代のレーザー加工応用に加え、半導体製造に用いるフォトマスクやウエハ検査光源にも高い需要があるため、現時点においても開発成果の事業化に対しては採算が十分に見込める。そのため、本プロ

プロジェクト終了後は大阪大学発のベンチャー企業、株式会社創晶超光（高品質 CLB0 結晶の製造販売を手掛ける）に共同研究の下で成果の実用化に取り組んでいる。

（7）知的財産権及び成果の普及

CLB0 の製造、品質評価技術はノウハウとして蓄積し、株式会社創晶超光に技術移管して、実用化を進めている。

2-1-2. 「短波長・短パルスレーザー装置の開発」(実施先:スペクトロニクス株式会社)

(1) 事業の背景・意義(目的・概要)

天然資源の乏しい日本にとってものづくり産業は生命線であり、輸出競争力を将来にわたって保持するためにはIoT技術を駆使し生産効率を最適化したものづくりが必要である。将来のものづくりの現場では、デジタル制御と親和性が高いレーザー加工の重要性が一層増すと同時に、ものづくり機器のクラウド連携や知能化が進むと考えられ、これらを融合したレーザー加工システムは我が国のものづくりにおける最重要ツールの一つとして期待されている。

1977年から1994年まで日本はレーザー技術分野において国主導の大型研究開発プロジェクトを世界に先駆けて推し進め、CO₂レーザーに代表されるガスレーザーやエキシマレーザーの開発では文字通り世界を先導し、レーザー加工機システムでも圧倒的な世界市場シェアを占めていた。しかし、1990年代に従来光源に比べて高輝度なファイバレーザーが開発され2000年代初頭にかけて北米で進展した高出力化なども決め手となり海外製の高出力ファイバレーザーが急速に世界に浸透した。現在、こうしたファイバレーザーに代表される高出力固体レーザー技術やそれを応用した加工システムにおいて、日本は海外勢の後塵を拝し、世界市場へ食い込めていないのが実情である。

研究開発項目①ではレーザー加工の高品位化・高生産性を進めるため、従来にない高輝度(高出力・高ビーム品質)かつ高効率なレーザー装置、およびそれらを用いた実用的なレーザー加工技術を開発する。本テーマ「短波長・短パルスレーザー装置の開発」では、市場ニーズが顕在化しているにも関わらず実用化できていない深紫外域の波長266nm・パルス幅100ps以下のレーザー装置を開発する。

高品位なレーザー加工の実現には、波長300nm以下の深紫外(DUV)領域でかつピコ秒オーダーの短パルスレーザーが効果的であり、波長266nmピコ秒レーザーでは従来のナノ秒レーザーや波長355nmレーザーではユーザー要求を満たすことのできなかつた材料に対して良好な加工結果が得られることが確認されている。しかしながら、生産性(タクト、コスト)の課題から実生産への適応が見送られる状況となっている。

以上を踏まえ、本開発項目において(a)ピコ秒高出力深紫外光源の開発、(b)ビームコンパニング技術によるレーザーの高出力化をサブテーマとして設定した。

(2) 研究開発目標と根拠

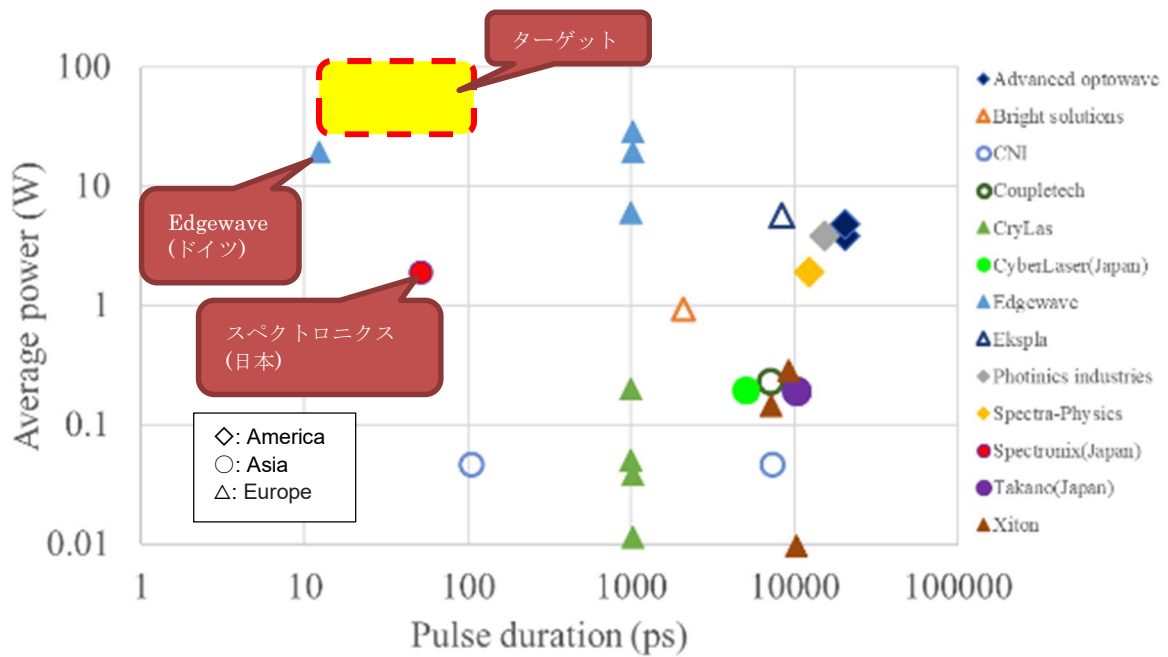
短波長短パルスレーザーを用いたレーザー加工では高品位な加工結果が確認されているが、産業用途における実生産で利用可能な生産性を実現するためには光源出力を事業前比で10倍から25倍に増加することが求められる。よって本テーマの開発目標を以下に定めた。

表Ⅲ2-1-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
ピコ秒高出力深紫外光源の開発	波長：266nm 帯 平均出力：50W超	高品位加工適用分野を金属、構造材加工に拡大	波長：266nm 帯 平均出力：20W超	半導体・電子機器の微細加工分野に適用
ビームコンパニング技術によるレーザーの高出力化	波長：266nm 帯 2台同期平均出力：100W超	高品位加工適用分野を金属、構造材加工に拡大	2019年度より実施のため、設定なし	2019年度より実施のため、設定なし

現在、半導体や電子機器の製造現場においては、波長 355nm、ナノ秒パルスのレーザー加工機が導入されており、平均出力は 20W で用いられている。355nm で加工性の悪い透明材料の加工が重要となる一方で、生産性(タクト)は平均出力と相関があるため、波長 266nm においても 20W が求められる。このため、中間目標として 20W を掲げた。また、電気自動車等に搭載される 2 次電池の電極切断に用いられるスリッターの速度は 150m/min 程度である。機械加工に替わる工法としてシングルモードファイバレーザーの適用が検討されており出力は 200W、カーフ幅 40 μ m である。いずれの方法でも切断後に厚みの 1/2 程度のバリが切断面に発生することが報告されており、これを除去するための後処理工程を必要としている。波長 266nm ピコ秒レーザーではこの加工品質の課題を解決できる可能性がある。そして、波長 266nm では 10 μ m 程度のカーフ幅での切断が見込まれることから 50W で同等の速度が実現可能である。一方、さらなる高出力化要求を見据えたスケラビリティを確立するため深紫外域におけるビーム結合技術を開発する。このため、最終目標として平均出力 50W、合成出力 100W を掲げた。

深紫外パルスレーザー光源の製品状況は図Ⅲ2-1-2-1 の通りである。(抽出条件：波長 300nm 以下、繰り返し周波数 1kHz~10MHz、ビーム品質： $M^2=2$ 以下) 主に、パルス幅が 1000ps から 30000ps に分布しており、高品位加工が期待される 100ps 以下では世界的にも Edgewave 社(ドイツ)、CNI 社(中国)とスペクトロニクス社(日本)のみである。しかし、結晶寿命や信頼性においてまだ課題があるといえる。そのため、スペクトロニクス社の現 2W 光源の持つ高品位加工性能と信頼性を、実生産可能な出力帯へ高出力化することで世界シェアの獲得が期待できる。



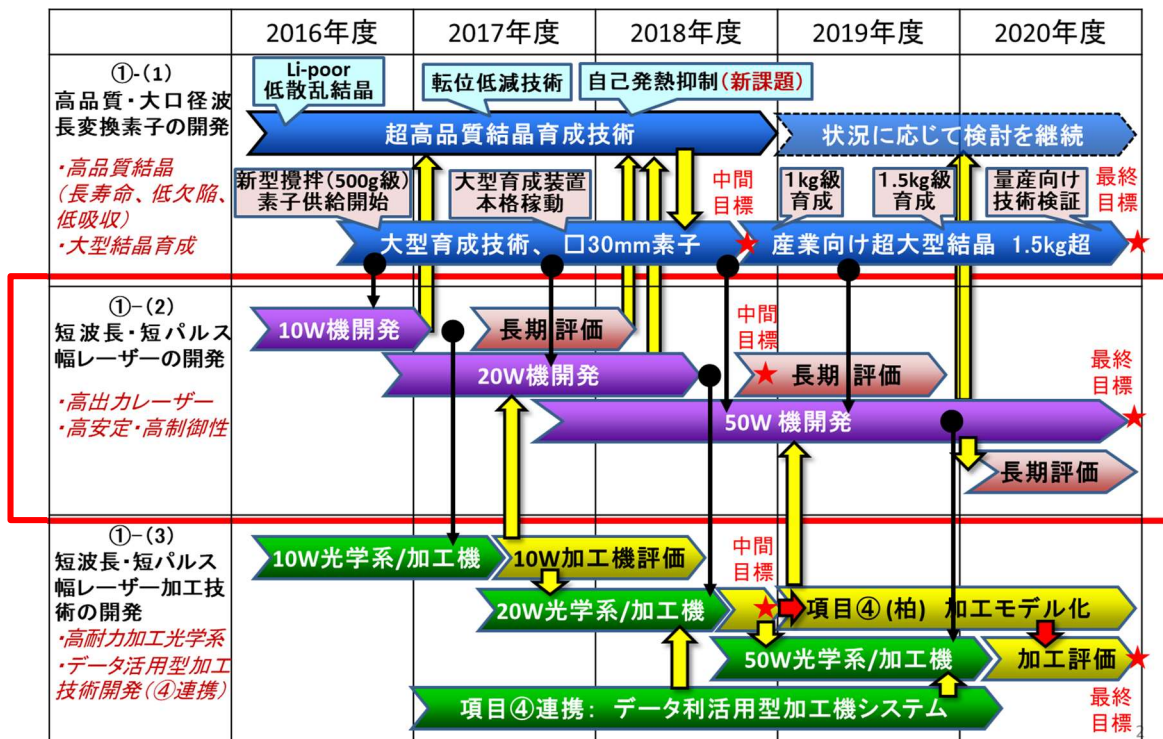
図Ⅲ2-1-2-1 プロジェクト開始前の光源ベンチマーク

(3) 研究開発スケジュール

目標を達成するために以下のスケジュールを策定した。下表は共同して実施する研究開発項目

①全体のスケジュールを示し、赤太枠の部分为本テーマのスケジュールである。

表Ⅲ2-1-2-2 短波長短パルス幅レーザー開発スケジュール



最終目標の50Wを達成するため、基本波増幅部と深紫外波長変換部で生じる物理現象と課題を明らかにし、対策技術を開発することを目的に、出力を段階的に10W、20W、そして50Wと増大し

ていく計画である。なお、計画当初の2台同期平均力100Wは中間評価後に計画見直しを行い、同期実証のみを実施する計画に変更した。

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-1-2-3に示す。ピコ秒高出力深紫外光源の開発については、10W級プロトタイプ機を2台製作し1台を10W加工検証のため加工装置に搭載、1台をCLB0結晶の長期評価を目的に連続発生試験に投入し、10,000時間の連続動作を実証した。また、20W級試作機を製作し評価の結果、平均出力26Wを達成した。20W級プロトタイプ機を3台製作し、1台を20W加工検証のため加工機に搭載、1台を加工、制御システム検証のため使用、1台は長期評価を目的に連続試験に投入し、10,000時間の連続動作を実証した。50W級試作機を製作し評価の結果50W超を達成した。また、50Wプロトタイプ機を製作し50W加工検証のため加工機に搭載した。

表Ⅲ2-1-2-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
ピコ秒高出力深紫外光源の開発	波長：266nm帯 平均出力：50W超	・50.1Wを達成。	◎	長期安定動作の改善

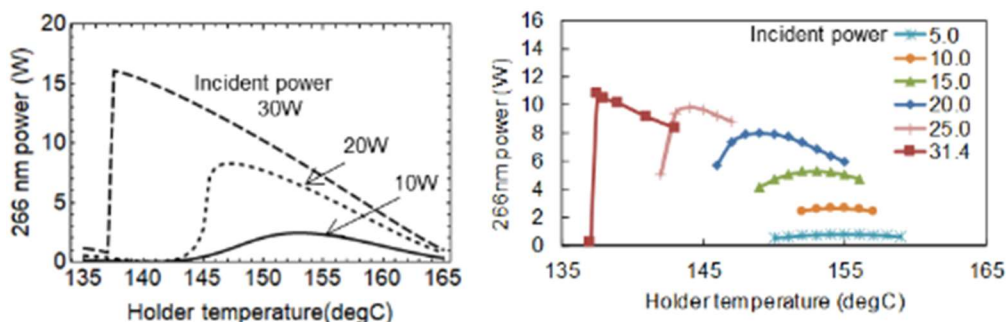
(5) 成果の詳細

高品位で高速なレーザー加工を実現するためにはレーザーパルスを生成する光源とそのレーザーパルスを高速に掃引するスキャナが同期する必要がある。加えて、パルスON指令直後から指定されたパワーのパルスを発生可能な特性（以下ON/OFF特性）が求められる。本事業以前にCLB0結晶の基礎特性に着目した独自の基本波光源を開発することで532nmから266nmへの同一強度における変換効率を市販光源の倍以上に向上した。この結果、波長変換素子のCLB0結晶に与える負荷低減に成功し、低出力ながら良好なON/OFF特性と寿命を有する平均出力2Wの深紫外ピコ秒レーザーを実現している。

高出力な266nmを実現するためには基となる波長1064nmの基本波レーザーの高出力化、266nmを発生する非線形光学結晶の紫外レーザー損傷抑制、自己加熱に起因するON/OFF特性の劣化抑制が必要である。紫外レーザー損傷とON/OFF特性劣化の抑制については2-1-1で実施する結晶自身の紫外レーザー損傷耐性の向上に加えて、本テーマ内で実施する使用技術が必要である。特に入射ビーム径を拡大してこれらの閾値以下となるようにパワー密度を低下させる技術が必要である。このため、高効率波長変換が可能な現基本波の特性を維持しつつ高出力化する増幅技術開発に加えて、大口径CLB0結晶を用いた波長変換技術の開発を進めている。

初めに10W級動作における課題抽出を行なった結果、図Ⅲ2-1-2-3に示すようなON/OFF特性の劣化が確認されたが、課題対策の結果レーザー加工に適応可能なON/OFF特性を実現した（レーザー研究、第45巻、第9号）。

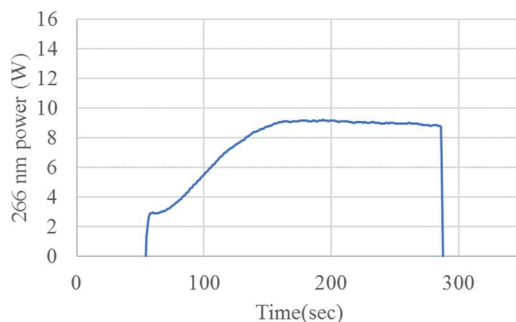
図Ⅲ2-1-2-2 は 266nm 吸収による CLB0 結晶の自己加熱特性評価を目的に CLB0 結晶内部の自己加熱を考慮した波長 532nm から 266nm への波長変換モデルによるシミュレーションと実験結果を示す。



図Ⅲ2-1-2-2 CLB0 結晶による波長変換のシミュレーション結果(左図)と実験結果(右図)

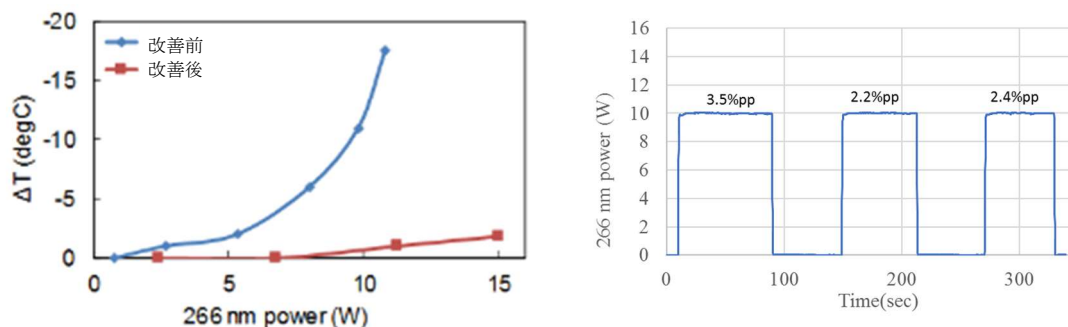
ここで、266nm 出力は CLB0 結晶内で位相整合条件を満たした際に最も出力が高くなる。そして、位相整合条件は温度に強く依存し、特定の温度で極大点を取る。また、自己加熱は CLB0 結晶内の 266nm 強度に依存する。

図Ⅲ2-1-2-2 は入力する 532nm 平均出力を一定とし、ヒーターによって温度制御される CLB0 結晶ホルダーの温度を変化させながら 266nm 平均出力をプロットした図である。発生する 266nm 出力が低く自己加熱の影響が少ない場合には出力が最大になるホルダー温度を中心に低温側と高温側で対称な特性となる。しかし、266nm 平均出力が大きくなり自己加熱の影響が現れると非対称性が現れるとともに、極大点が低温側へシフトする。この温度シフトは 266nm による自己加熱によって結晶自身が発熱するためヒーターから供給する熱量を低減しなければ位相整合しないことに起因する。レーザー加工用途の高出力深紫外レーザーが存在しない課題の 1 つはこの自己加熱による ON/OFF 特性の劣化にある。ここで、10W 出力にてレーザーパルスの ON/OFF を考える。図Ⅲ2-1-2-2(右)の場合、10W を得るためには結晶ホルダー温度を 137 度に設定する必要がある。しかし、パルス発生直後は自己加熱による熱源が存在しないため位相整合条件を十分満たせず、その出力は低い。266nm 発生の経過とともに徐々に自己加熱量が増加し、やがて位相整合条件が満たされる。そのため、図Ⅲ2-1-2-3 に示すようなパルス ON から出力が徐々に増加する特性となる。



図Ⅲ2-1-2-3 自己加熱の影響が強い場合の ON/OFF 特性

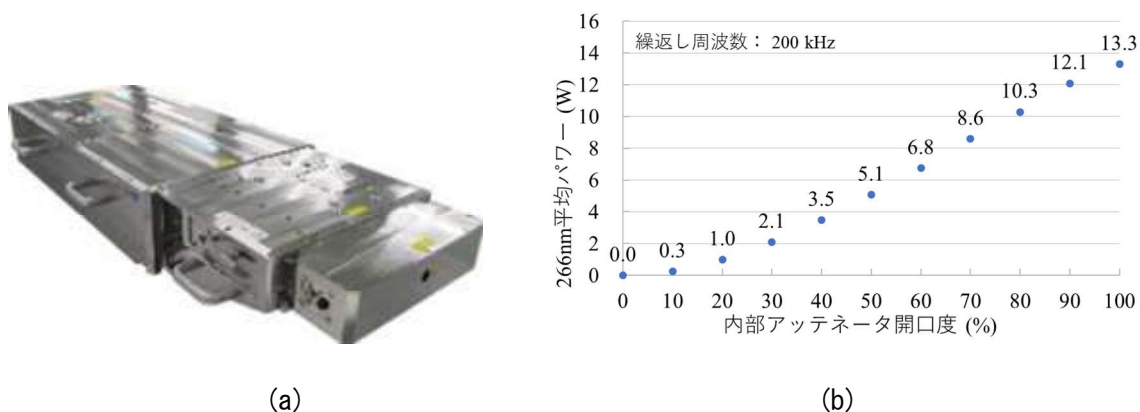
この特性は長時間レーザーを ON して使用する用途では許容されているが、レーザー加工用途ではスキャナ等と同期して高速なビーム掃引と ON/OFF を繰り返すため許容されない。この課題を解決するため、基本波レーザーと波長変換器を製作、評価した結果 10W における動作条件を見出した。図Ⅲ2-1-2-4 に CLBO 結晶の自己加熱の改善効果と ON/OFF 特性を示す。



図Ⅲ2-1-2-4 自己加熱の改善効果(左図)と改善後の ON/OFF 特性

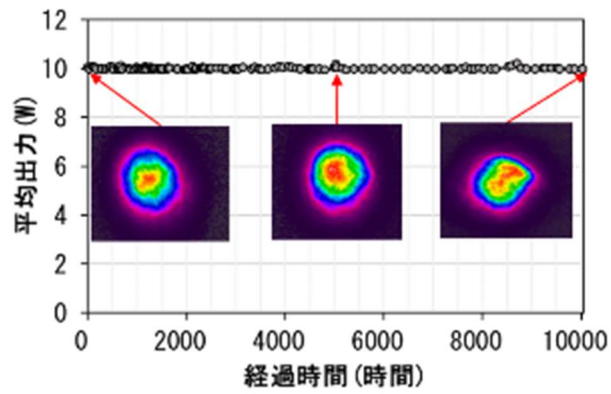
図Ⅲ2-1-2-4(左図)より、改善した動作条件では 266nm10W における自己加熱における結晶ホルダー温度変化は 11℃から 1.5℃に改善していることがわかる。また、図Ⅲ2-1-2-4(右図)より 10W にて良好な ON/OFF 特性を実現していることが確認できる。

これらの結果をもとに 10W 級プロトタイプ機を 2 台製作した。1 台は加工技術の開発用として提供し、1 台は CLBO 結晶の連続発生試験に投入した。提供した 10W 級プロトタイプ機の外観と平均出力特性を図Ⅲ2-1-2-5 に示す。



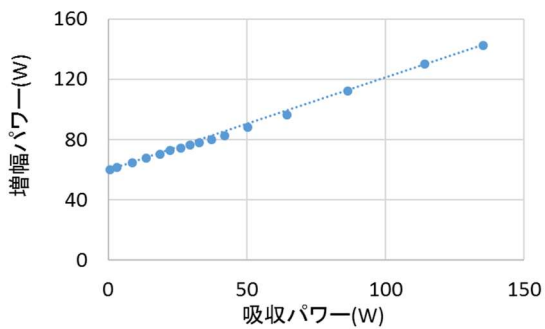
図Ⅲ2-1-2-5 10W 級光源の外観と出力特性 外観(a)と内部アッテネータを操作した際の出力特性(b)

また、図Ⅲ2-1-2-6 に連続発生試験結果を示す。10,000 時間にわたって出力を維持することを達成した。5,000 時間まではビーム形状も良好な状態を維持したが、試験終了時の 10,000 時間ではビーム形状の劣化が見られた。

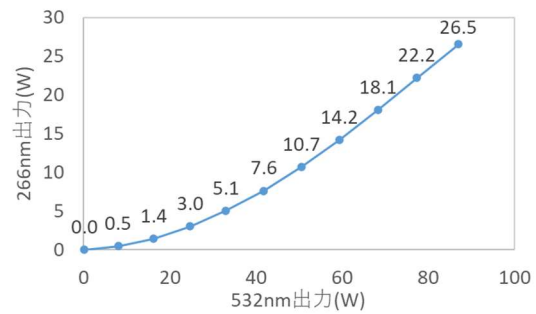


図Ⅲ2-1-2-6 266nm10W の連続発生試験結果

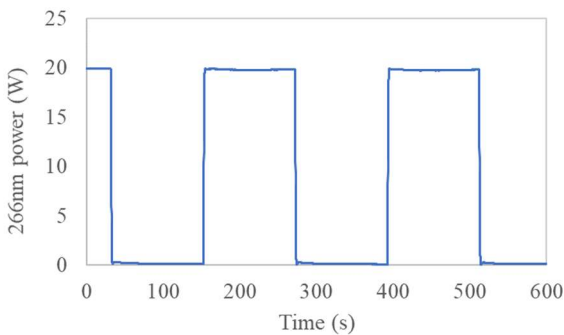
平均出力 20W への高出力化には基本波出力を増強するMOPA基本波部、及び紫外レーザー損傷耐性の向上を含めた波長変換部の最適化設計と構成段毎の動作確認の後、光源の試作を行った。図Ⅲ2-1-2-7、図Ⅲ2-1-2-8、図Ⅲ2-1-2-9、図Ⅲ2-1-2-10に増幅器の特性、大口径CLBO結晶を波長変換素子として用いた際の入出力特性、ON/OFF特性、そして連続発生試験結果をそれぞれ示す。



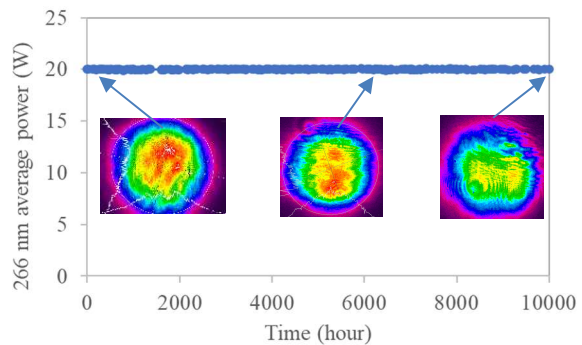
図Ⅲ2-1-2-7 増幅器の増幅特性



図Ⅲ2-1-2-8 CLBO結晶の入出力特性



図Ⅲ2-1-2-9 20W機 ON/OFF 特性

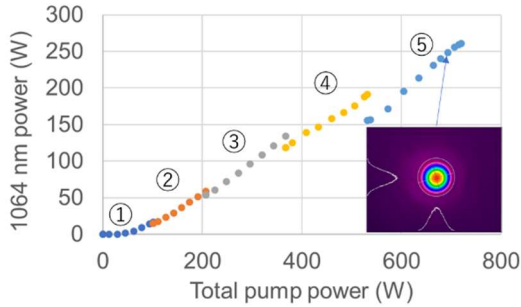


図Ⅲ2-1-2-10 連続発生試験結果

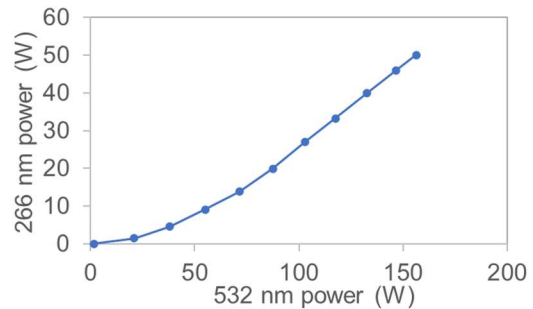
安定な 20W の 266nm を発生させるためには 1064nm 基本波の増幅出力として 125W が必要である。図Ⅲ2-1-2-7 より、最大で 140W と十分な出力が得られることを確認した。また、本基本波を LBO 結晶により 532nm に変換し、さらに大口径 CLBO を用いて 266nm を発生させた。その結果、26.5W の発生を確認し、また、加工に適応可能な ON/OFF 特性を実現した。さらに、20W において

10,000 時間の連続動作を確認した。10W と同様に 10,000 時間経過時にはビーム形状が劣化する課題が確認された。

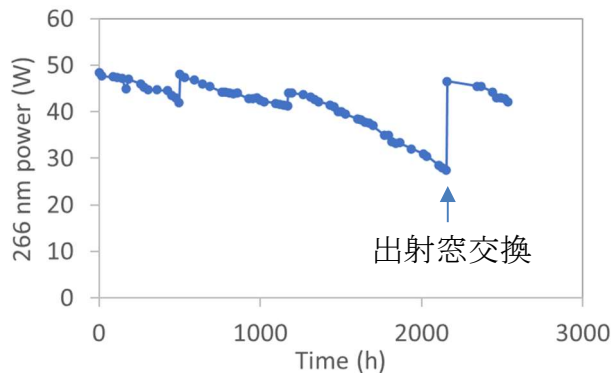
平均出力 50W への高出力化には基本波出力をさらに増強する MOPA 基本波部、及び紫外レーザー損傷耐性の向上を含めた波長変換部の試作を行った。図Ⅲ2-1-2-11、図Ⅲ2-1-2-12、図Ⅲ2-1-2-13 に増幅器の特性、大口径 CLBO 結晶を波長変換素子として用いた際の入出力特性、連続発生動作結果をそれぞれ示す。



図Ⅲ2-1-2-11 基本波の増幅特性



図Ⅲ2-1-2-12 CLBO 結晶の入出力特性

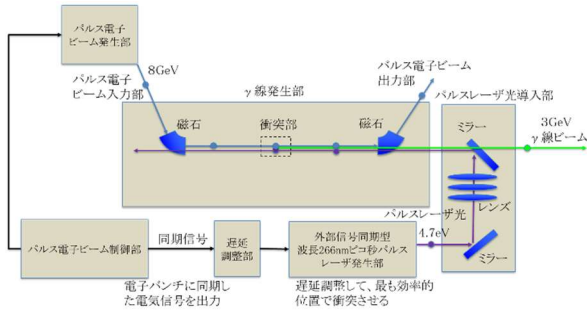


図Ⅲ2-1-2-13 50W 連続発生動作結果

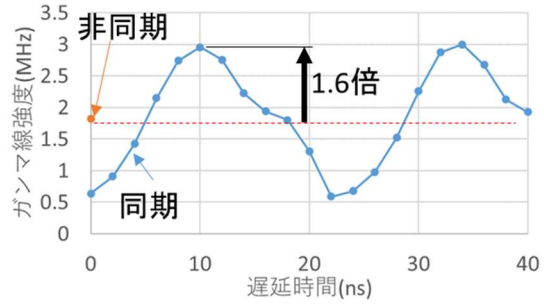
増幅部は 5 段の固体増幅器を用い、総励起パワー760W 時に 260W の増幅出力を得た。LBO 結晶を用いて 156W の 532nm 光を発生させ、さらに大口径 CLBO を用いて 266nm を発生させた。その結果 50.1W の発生を確認し、最終目標である 50W を達成した。また、2,000 時間の連続動作試験の結果出射窓構造に課題があることが明らかになった。これらの結果をもとに、三菱電機と協働し増幅器で新たに生じた熱歪課題も改善しプロトタイプ機を製作、加工機に搭載した。

同期制御開発では最大 1.5GHz のパルスを発生可能な DFB レーザーの一駆動基板と制御基板を製作した。そして、同期制御を実証するため、光速で移動する電子バンチに波長 266nm ピコ秒レーザーパルスを同期して衝突させる基礎研究を実施し、同期を実現し、かつガンマ線発生の高効率化を実証した。図Ⅲ2-1-2-14 に示す実験系にて 8GeV のパルス電子ビームに含まれる電子バンチと深紫外ピコ秒パルスレーザーを衝突させることで逆コンプトン散乱を発生させ 3GeV のガンマ線を得た。パルス電子ビーム発生器より得られる電気信号に、遅延調整部で時間遅延を付加してレーザーパルスを発生させた。遅延時間に対するガンマ線強度の相関を測定した結果、周期特

性を確認し同期状態にあることを明らかにした。さらに、ガンマ線強度が最も強くなる遅延時間に設定することで衝突部における電子バンチとレーザーパルスを確実にかつ最適な位置で衝突させることを、安定かつ長期に実現した。ガンマ線強度は非同期時と比較して最大5倍に増大し、かつ安定発生優れることを実証した。これにより、同期制御を達成し偏光結合技術と合わせることで高出力化の実現性を実証した。

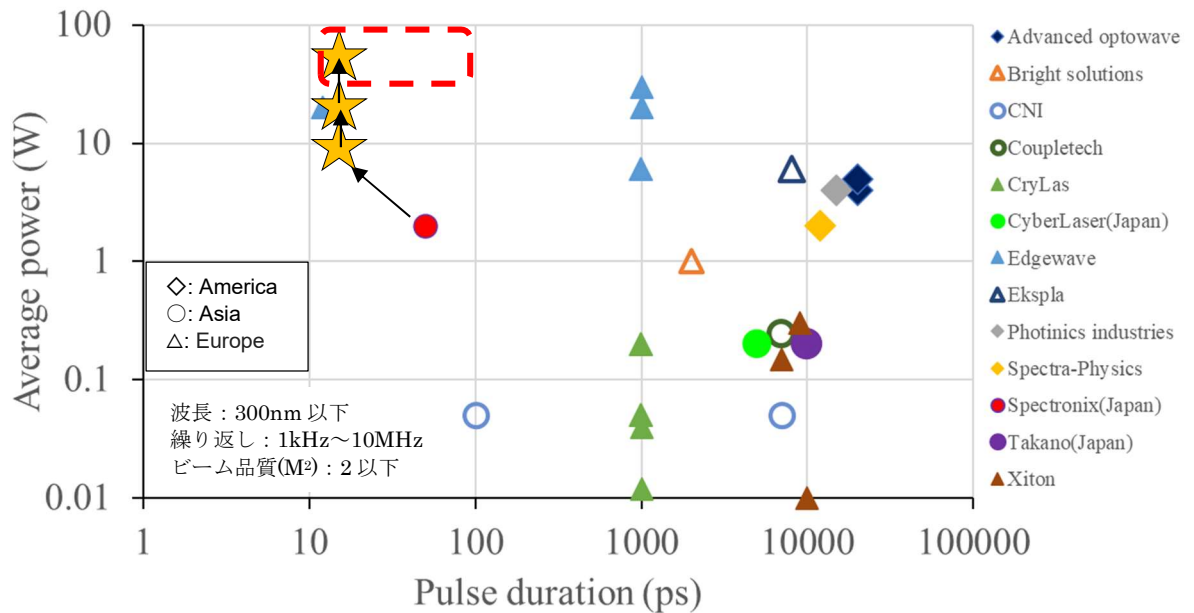


図Ⅲ2-1-2-14 同期実験系



図Ⅲ2-1-2-15 遅延時間とガンマ線強度の相関

図Ⅲ2-1-2-1で示した光源のベンチマークは本プロジェクト終了時には10W、20W、50Wが追加され図Ⅲ2-1-2-16の通りとなり世界最高出力を提供できるようになった。



図Ⅲ2-1-2-16 事業終了時の光源ベンチマーク

(6) 実用化・事業化への取り組み

本事業の成果の一つである10W級プロトタイプ機を基に、本事業とは別に製品化開発に着手した。構成や使用部材を見直し本事業で明らかになった課題を対策することで2020年3月に研究用途向けに平均出力8Wの波長266nmピコ秒パルスレーザーをリリースした。加えて、ユーザーが発振器の購入判断に必要なテスト加工を実施できるようデモ加工が可能な簡易加工システムを構築した。また、ユーザーサイトでもテスト加工が実施できるよう貸し出し機を製作準備した。これらの活動を継続し市場の早期立ち上げを目指すと共に、生産工場で使用する際の課題であるビーム形状の劣化課題を解決するための運用データの蓄積、劣化のメカニズムを明らかにする研究開

発を継続している。2024年に産業用途の波長266nmピコ秒パルスレーザーをリリースする計画である。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-1-3. 「短波長・短パルスレーザー加工技術の開発」 (実施先：三菱電機株式会社)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

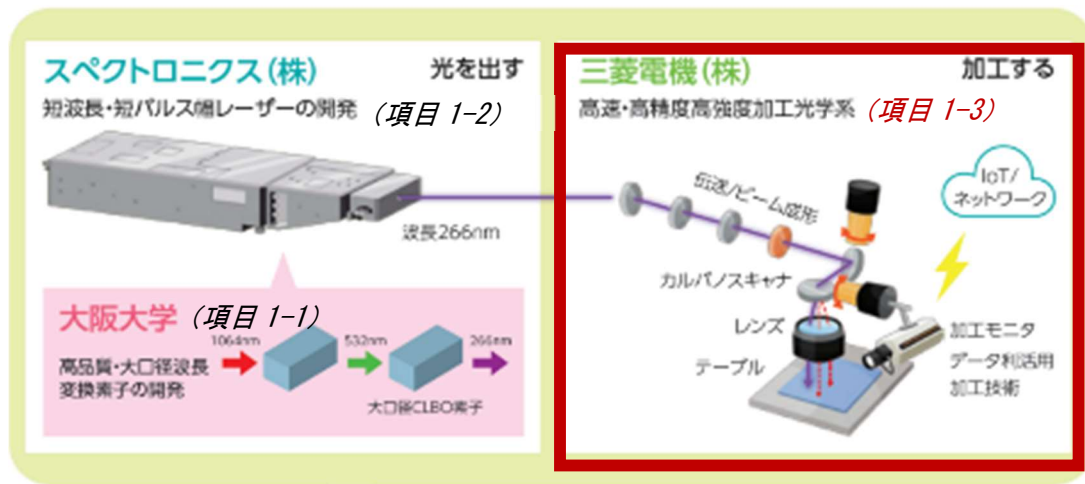
IoT や AI 技術を用いて、よりスマートな社会の構築を目指す世界的な動きの活発化に伴って、スマート化の頭脳に相当する半導体や電子機器ならびに感覚器に相当するセンサーデバイスのさらなる小型化や高機能化が求められており、レーザー加工の適用によって各種製造プロセスを高度化する試みが進められている。ここにおいて特に、半導体チップ自体の小型・高密度化の進展に比較して半導体を電子機器に組み上げる実装技術の進展が遅れ、両者の間のミスマッチ (テクノロジーギャップ) がスマート社会の実現に向けた製造技術上の課題となっている。このギャップを埋める次世代の革新的工法として、ウエハーレベルやパネルレベルのファンアウト・パッケージ技術 (FOWLP/FOPLP) 等の開発が進められているが、決定的な工法の確立には至っていない。本研究開発では、半導体・電子機器製造における上記課題に対する解決手段を提供することを目的の一つとする。

さらにスマート社会を構成するモビリティシステムに目を転じると、自動運転などによる知能化と合わせて、電気自動車 (EV) への切り替えが急速に進んでいる。電気自動車は従来の車と抜本的に異なる構成となるため、2次電池などの新しいキーパーツの製造技術の最適化が課題となっている。本研究開発では、レーザー加工を用いることによって、急速な EV シフトに対応するための新規部品製造に資する手段を提供することを目的の一つとする。

上記目的のためには、いずれも特徴サイズが $10\mu\text{m}$ 以下となるシングルマイクロメータ領域の高品位微細加工が必要となることから、本プロジェクトにおいてシングルマイクロメータ領域の加工における有用性が予見されている DUV (波長 266nm) ・ピコ秒レーザーを選択する。

高品位微細加工実現のためには、短波長、短パルスレーザーが有用であることは一般的に認識されているが、目的達成のためには実際の生産現場において使用可能な生産性を併せ持つ必要がある。現在の DUV ・ピコ秒レーザーの出力は $\sim 2\text{W}$ であるために生産性不足であり、高品位加工、且つ、実用的な生産性を併せ持つ装置が存在しないことが目的の実現に向けたボトルネックとなっている。

上記の認識の下、生産性を向上するために DUV ・ピコ秒レーザー加工の高出力化を第一の技術課題として設定し、高出力深紫外光を発生させる光学結晶技術 (項目 1-1)、高出力ピコ秒パルスレーザー技術 (項目 1-2) と密接に連携して、高品位微細加工性能と実用的な生産性を併せ持つ高出力の DUV ・ピコ秒レーザー加工技術を開発する。



図Ⅲ2-1-3-1 研究開発の概要

(2) 研究開発目標と根拠

研究開発目標と根拠を下表に示す。

技術課題に設定した DUV・ピコ秒レーザー加工の高出力化に対応する数値は、以下である。

中間目標：20W (半導体・電子機器製造等)

最終目標：50W (EV 部品加工等)

表Ⅲ2-1-3-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発	波長：266nm 帯 出力 50W 超 高品位加工実証	高品位加工適用分野を金属、構造材加工に拡大	波長：266nm 帯 出力 20W 高品位加工実証	半導体・電子機器の微細加工分野に適用

以下には、目標設定根拠の詳細を記載する。

現在、半導体や電子機器の製造現場においては、波長 355nm、ナノ秒パルスレーザーの導入が開始している。微細な加工では処理する物質の体積が少ないために比較的小出力で実生産に適用され、代表的な出力として 20W で実生産導入に求められる生産性を実現している。後述するベンチマークに示すように DUV・ピコ秒レーザー加工で 355nm では実現困難な加工品質の壁を越えることによって、20W (プロジェクト前比 10 倍) の出力で半導体・電子機器の製造現場への導入が可能になると考える。

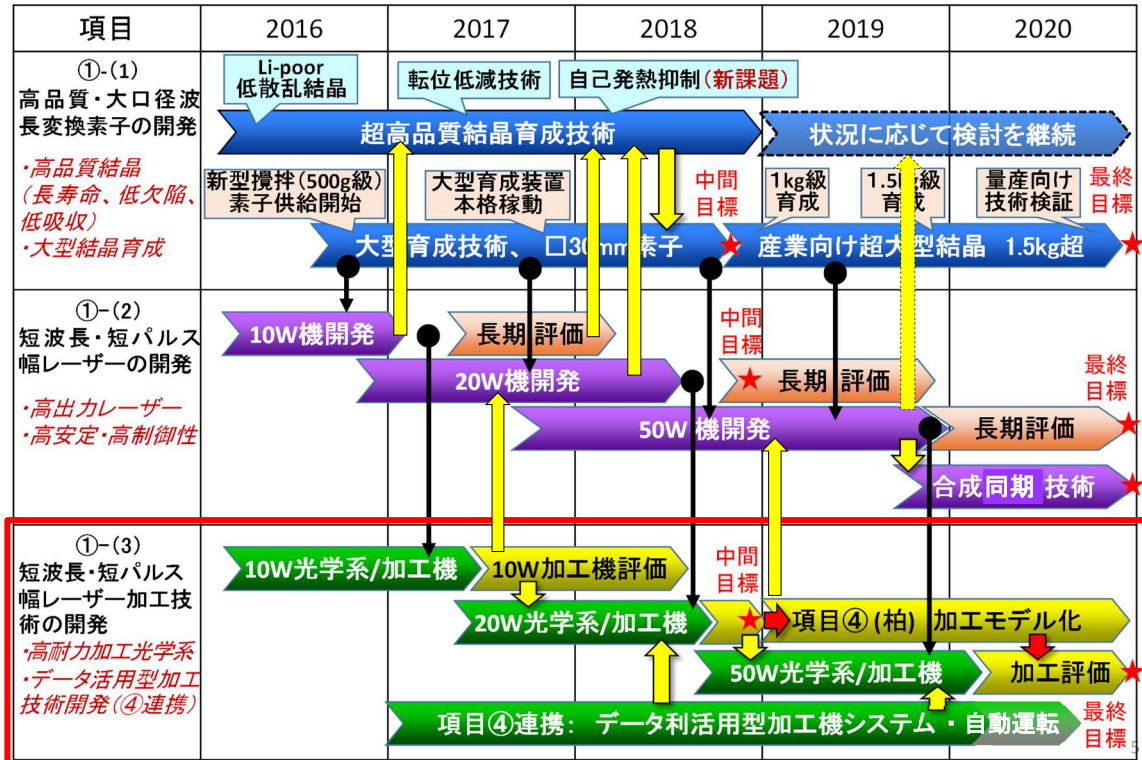
電気自動車等に搭載される 2 次電池には厚さ～10 μ m の金属箔電極が積層して用いられる。電氣的に問題なく高密度積層のためにバリのない金属箔が必要であるが、スリッターなどの機械加工では箔厚の 1/2 程度のバリ発生のために後処理が必要となり、刃先の消耗も問題となる。出力 200W 程度のシングルモードファイバレーザーを用いた非接触加工が試みられているが、同じく箔厚の 1/2 程度のバリが報告されている。この加工品質の壁を DUV・ピコ秒レーザーを用いた加工で突破できる可能性がある。求められる生産性 (加工速度) は 150-200m/min である。同速度で処

理する物質量は加工カーフ幅に比例するため、DUV・ピコ秒レーザーではファイバレーザーの1/4の出力、即ち出力50Wで実生産適用可能な生産性が得られると考える。

(2) 研究開発スケジュール

目標達成に向けた研究開発スケジュールを表Ⅲ2-1-3-2に示す。表Ⅲ2-1-3-2は共同して実施する研究開発項目①全体のスケジュールを示し、赤太枠の部分为本テーマのスケジュールである。

表Ⅲ2-1-3-2 開発スケジュール



最終目標の波長：266nm帯、出力50W超における高品位加工50Wを達成するため、結晶ならびに光源の開発と歩調を合わせ、まず10W級加工機の試作・評価→10W級評価結果を踏まえた20W級加工機試作・評価→20W級評価結果を踏まえた50W級加工機試作・評価と段階を踏んで出力を増大して加工実証していく計画である。また、プロジェクト内連携として、特に基盤技術を開発する項目4の成果を活用できるデータ利活用型の加工機システムの開発を進める計画である。

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発テーマの最終目標達成状況を下表に示す。

表Ⅲ2-1-3-3 研究開発項目と達成状況 (2021年3月19日時点)

項目(テーマ)	最終目標	成果	達成度	今後の課題
短波長・短パルス幅 レーザー加工技術の開 発	波長：266nm 帯 出力 50W 高品位加工実証	・ 50W 加工機試作完了 ・ 出力 50W でガラス高 品位・高速加工実証	○	50W 稼働の安定性 評価

◎ 大きく上回って達成、○達成、△年度末までに達成見込み、×未達

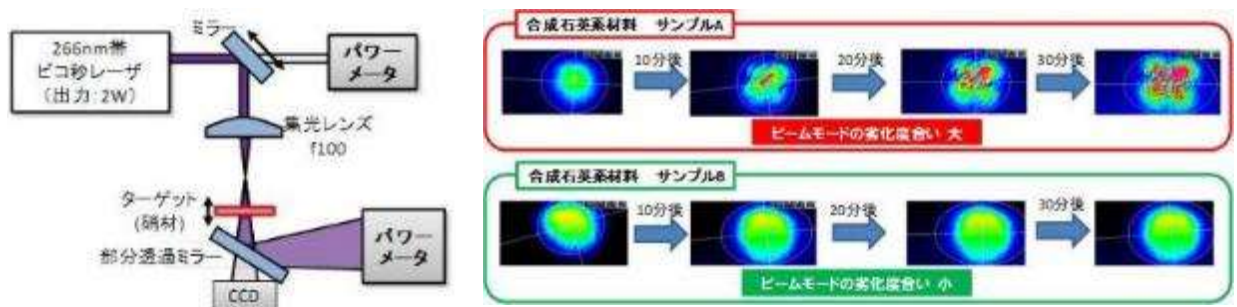
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発については 10W 級レーザー光源を搭載した加工機の試作・評価、20W 級加工機の試作・評価を踏まえて、出力 50W においても歪みの少ない加工光学系を開発し、50W 加工機の試作を完了した。試作した 50W 加工機を用いて、出力に見合う高い加工速度でガラス材料への高品位加工を実証し、最終目標を達成した。出力 50W 加工機の開発にあたっては、必要構成要素となる高出力レーザー増幅器を開発した。また、データ利活用型加工機システムの開発として、基盤技術を開発する項目 4 の成果と連携した自動運転システムを試作し、原理動作を実証した。これらの成果は、プロジェクト全体の目標に寄与すべく、東大・柏 2 キャンパスのレーザー加工プラットフォームに移設され、継続的な研究開発ならびにユーザー連携に使用される予定である。

(5) 成果の詳細

a) 高出力 DUV 加工プラットフォームの開発

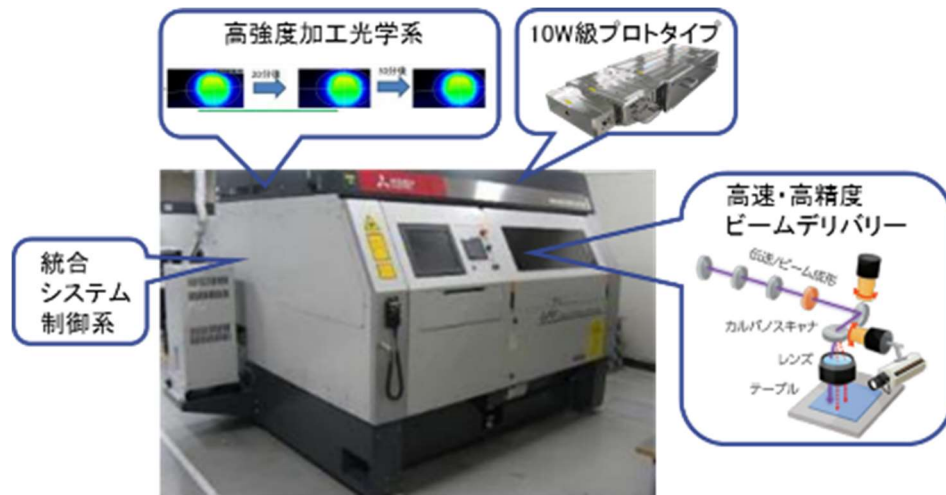
10W加工機開発

高出力の DUV・ピコ秒レーザーでは光学素子のビーム吸収によるビーム歪や光学素子の損傷、劣化を生じやすく、高出力の DUV・ピコ秒レーザーをハンドリングする光学系の開発が必要である。プロジェクト開始時点で利用可能であった出力 2W 級のレーザーを用いて市販の各種 UV 用光学材料の評価試験を実施し、照射強度と各種光学材料で発生する光学歪の関係を把握した。上記のデータベースに基づいて光学材料を選定して加工光学系を設計、試作した。



図Ⅲ2-1-3-2 UV用光学材料の評価試験

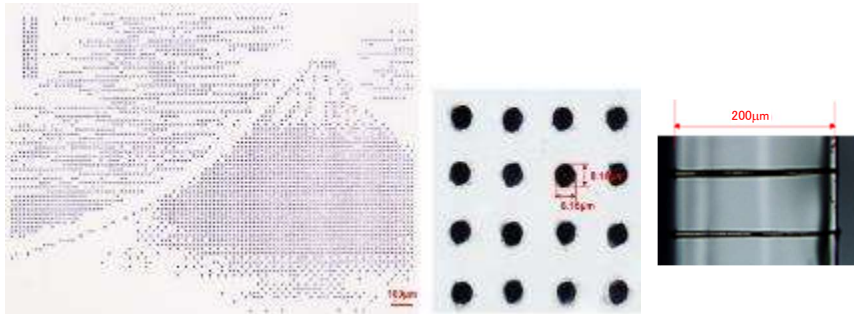
開発した高強度加工光学系と項目 1-2 で開発された 10W 級のプロトタイプ光源ならびに新規開発のシステム制御系を搭載して 10W 級の加工システムを構築した。



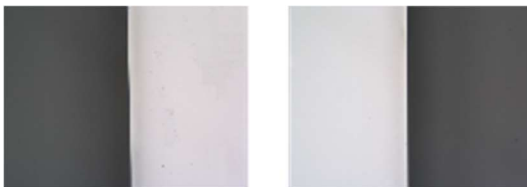
図Ⅲ2-1-3-3 10W 級 DUV ピコ秒レーザー加工機外観

10W 級高品位加工実証

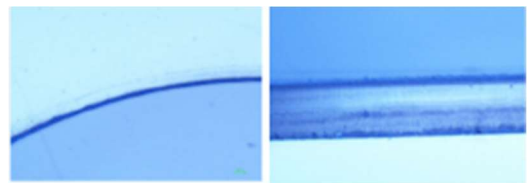
10W 級加工機を用いて、半導体・電子機器製造において多用される無アルカリガラスを中心に加工評価を実施した。図Ⅲ2-1-3-4 に加工結果のサンプル写真を示す。



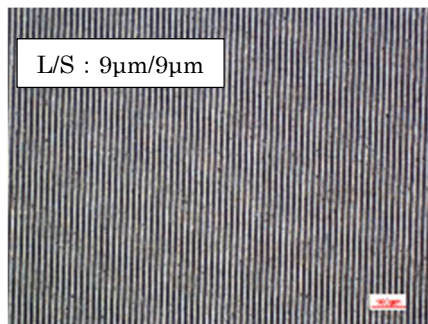
無アルカリガラス穴あけ加工サンプル



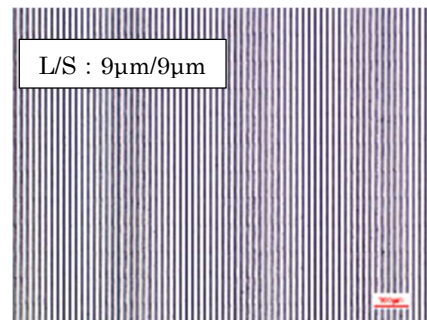
無アルカリガラス切断サンプル



ホウケイ酸ガラス切断サンプル



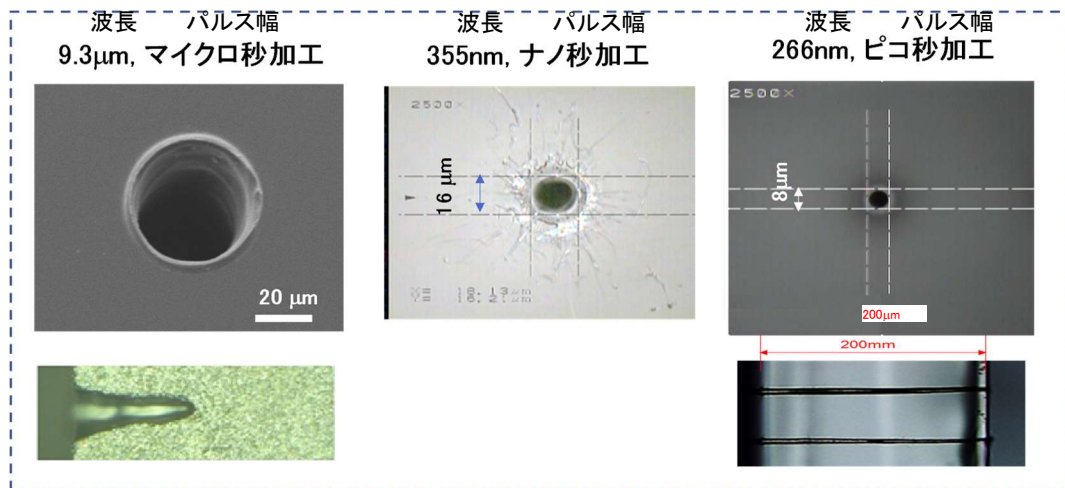
無アルカリガラス溝彫り加工サンプル



ダイヤモンド溝彫り加工サンプル

図Ⅲ2-1-3-4 10W 加工機を用いた高品位加工実証例

図Ⅲ2-1-3-5 には、DUV・ピコ秒レーザーを用いた加工と現在実生産に使用されているレーザーを用いた加工との比較を示す。開発した DUV・ピコ秒レーザー加工によって、既存のレーザーでは困難なシングルマイクロメータ領域の高品位微細加工の可能性を実証した。

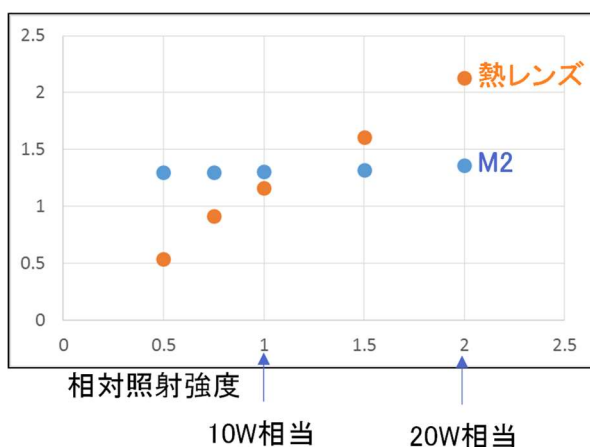


図Ⅲ2-1-3-5 既存レーザー加工との高品位微細加工性能比較

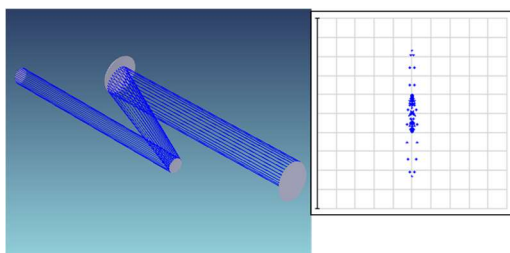
20W加工機（加工光学系）開発

10W 級加工システムを用いて、20W 以降の高出力加工実証に向けた開発を行った。図Ⅲ2-1-3-6 には 10W ビームを用いた光学系歪の評価を示す。出力 2W のビームを用いた評価から予測した特性と整合しており、初期のスケーリング則の妥当性を確認するとともに、データの拡充によって 20W 以降のスケーリング設計の確度を向上する結果を得た。また、加工評価の期間中、光学系に検知できる劣化、損傷のないことを確認した。

上記により、20W の加工光学系は現行 10W 光学系のスケーリング拡張によって実現可能と考えるが、バックアップ策として反射型光学系のシミュレーション検討を実施し、反射型光学系によって光学歪を透過型光学系の 1/15 に低減できる可能性を示す検討結果を得た。



図Ⅲ2-1-3-6 10W レーザーを用いた光学素子歪評価



同一発熱条件において
反射型熱歪は透過型合成石英の1/15

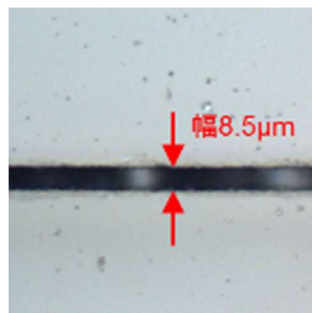
図Ⅲ2-1-3-7 反射型光学系のシミュレーション検討結果

20W級高品位加工実証

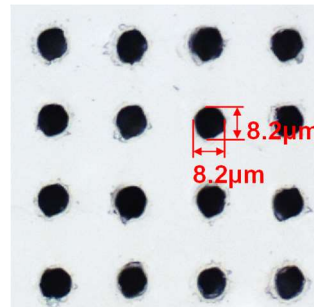
上記の加工光学系開発を踏まえて 20W 加工機を試作し、20W 級の加工評価を行った。図Ⅲ2-1-3-9 に示されるように、出力 20W において高品位の微細加工を実証するとともに、図Ⅲ2-1-3-9 に示されるように、出力に見合う加工能力の向上を確認し、高品位加工能力と高生産性を両立するレーザー加工法としての可能性を実証した。また、開発した 20W 加工機を柏 2 キャンパスのレーザー加工プラットフォームに移設し、ユーザー連携サンプル加工を開始した。



図Ⅲ2-1-3-8 20W 級 DUV ピコ秒レーザー加工機外観



切断/溝加工
(ダイヤモンド基板)



穴あけ加工
(無アルカリガラス基板)

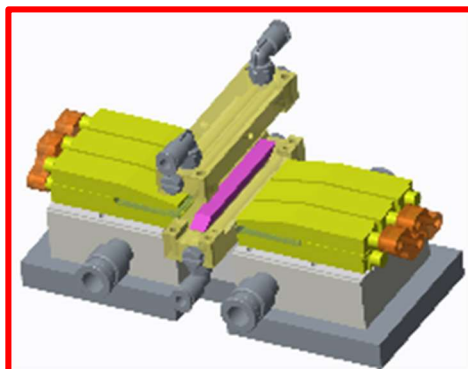
図Ⅲ2-1-3-9 20W 加工機を用いた高品位加工実証例



図Ⅲ2-1-3-10 20W/10W のガラス切断加工能力比較サンプル

50W加工機開発

出力 20W までの開発成果に加えて、図Ⅲ2-1-3-10 に示す熱歪みの少ない高出力増幅器を開発して赤外の基本波レーザー出力を最大 300W にまで増強するとともに、図Ⅲ2-1-3-7 に示した熱歪みの少ない加工光学系を投入し、出力 50W の DUV ピコ秒レーザー加工機を構築した。



図Ⅲ2-1-3-11 低熱歪み高出力増幅器の概念構成



(a) 出力 50W の達成



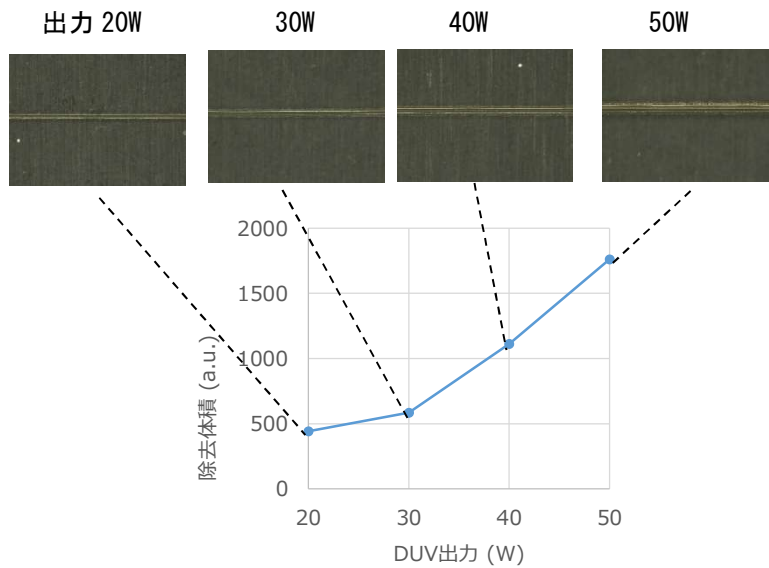
(b) 50W 級 DUV ピコ秒レーザー加工機外観

図Ⅲ2-1-3-12 50W 加工機の構築

50W級高品位加工実証

開発した 50W 級加工機を用いてガラス材の溝堀サンプル加工を実施した。結果として、図Ⅲ2-1-3-13 に示されるように、出力 20W と比較して顕著な加工品質低下を生じることなく、除去体積速度で 4 倍に達する高速高品位加工を確認した。これにより、高生産性と高品位加工性能を両立する出力 50W の DUV ピコ秒レーザー加工を実証し、本テーマの最終目標を達成したものと考えられる。

開発した 50W 級 DUV ピコ秒レーザー加工機は、プロジェクトの終了後に柏プラットフォームに移設し、次世代レーザー加工技術の継続的開発ならびにユーザー連携活動に活用する計画である。

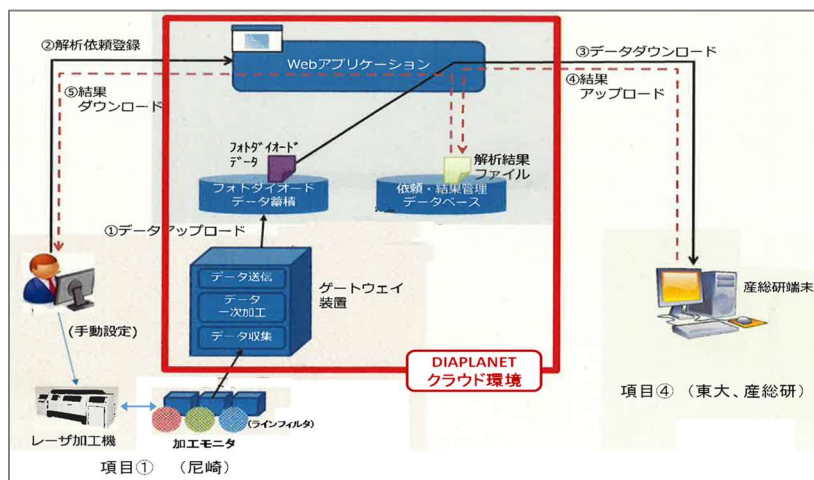


図Ⅲ2-1-3-13 ガラス溝掘加工評価における 50W 加工の有用性実証

(b) データ活用型加工機システムの開発

次世代のレーザー加工機では、データ活用のためのネットワーク通信機能を備えた構成になるものと考えられる。本テーマでは、レーザー加工を実施する加工機本体の開発と並行して、次世代加工に必須と考えられる技術として、データを有効に活用するための要素技術の試作・検証を実施した。特に共通基盤技術を開発する項目4と連携して、共通基盤技術を効率的に活用する加工システムを想定してシステムの構想、試作、検証を行った。

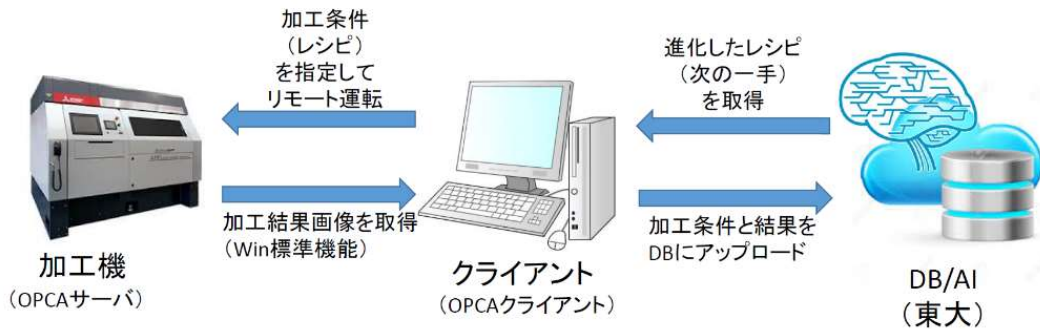
まず、加工機が備える機能として、図Ⅲ2-1-3-14に示されるようなインターネット通信機能（クラウド接続機能）を追加した。



図Ⅲ2-1-3-14 インターネット通信機能の加工機への追加

プロジェクトの最終年度には、図Ⅲ2-1-3-15に示されるように、共通基盤技術を開発する項目4で開発を進めるレーザー加工データベースと連動して、無人のリモート自動運転を行いながら自立的に最適加工条件に漸近する加工システムを設計・試作し、原理的な動作を実証した。

これら成果は、本プロジェクトが最終的に目指すIoTを活用したデータ駆動型の次世代加工技術の開発に資する成果であると考える。



図Ⅲ2-1-3-15 自律加工システムの概念構成

(6) 実用化・事業化への取り組み

上述のように、最終目標を達成し、出力 50W 級の DUV（波長 266nm）ピコ秒レーザー加工に関して、高生産性と高品位加工性能を両立するレーザー加工方法となることを実証した。開発した 20W 級の加工機を柏 2 キャンパスのレーザー加工プラットフォームに設置し、ユーザー連携ならびにプロジェクトの項目間連携によって DUV ピコ秒レーザー加工の実用上の優位性を探索・実証する活動を展開した。当該活動において、いくつかの用途においては、DUV ピコ秒レーザーが高速の高品位レーザー加工手段となる可能性を見出している。プロジェクト終了後は、20W 級加工機を 50W 級加工機更新して上記の活動を継続し、DUV ピコ秒レーザーの適用分野を開拓する開発を進める計画である。また、市場動向調査において、特に半導体後工程において微細かつ高速のレーザー加工への期待が高まっており、当該分野を意識した広報活動等を行った。当該分野の関連他機関との連携を含め、実用化に向けた開発を実施していく計画である。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-2. 研究開発項目②「高出力レーザーによる加工技術の開発」

2-2-1. 「高輝度・高効率レーザー装置の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

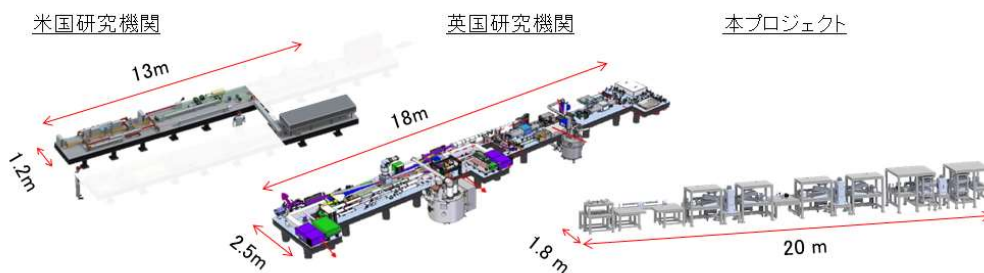
高輝度・高効率レーザー装置の開発については、浜松ホトニクスと大阪大学がキロジュール級パルスレーザーへのスケールアップが可能な小型で高効率な産業用高出力パルスレーザー技術確立する。開発した高出力パルスレーザー装置を加工システムと連結することでレーザー加工システムを構成し、ユーザーと連携した加工技術の開発に活用することで新たな金属材料の加工市場の開拓を目指す。

パルス動作のレーザーによる加工応用は、ファイバレーザーに代表される CW 動作によるレーザー応用とは異なり、パルス波形やパルスエネルギーなど多くのパラメータがあり、今後高機能加工などの分野の開拓が期待される。航空機・自動車等の輸送機器の軽量化の流れの中で、金属材料の表面硬化や高強度化技術に高出力パルスレーザープロセス（ピーニング・フォーミング）が有望視されているが、高スループット加工機に求められる高繰り返しレーザーがなく、産業化が進んでいないのが現状である。

表Ⅲ2-2-1-1 に本テーマで開発する 250J 級レーザー装置と、海外で進められている 100J 級のレーザー装置との比較を示す。米国および英国の研究機関では、科学研究用光源として開発が行われているのに対し、本プロジェクトではレーザー加工基盤技術の開発を目的とした産業用の高出力パルスレーザーとして開発を行う。先行する世界の高出力パルスレーザーを凌駕するキロジュール級レーザーへの出カスケールアップを見据えた小型・低コストで高効率なレーザー装置の開発を行い、それを搭載したレーザー加工システムを構築し新たなレーザー加工の基盤技術の確立を行う。

表Ⅲ2-2-1-1 100J 級レーザー装置のベンチマーク

	米国研究機関	英国研究機関	本プロジェクト	優位性
エネルギー	102 J	105 J	250 J	高出力
材料	ガラス(Nd)	セラミック(Yb)	セラミック(Yb)	高熱伝導・低発熱
LD	800nm帯	900nm帯	900nm帯	高輝度・低コスト
冷却方式	ヘリウム(室温)	ヘリウム(低温)	ヘリウム(低温)	高冷却能力
大きさ	14m×1.2m (17m ²)	18m×2.5m (45m ²)	20m×1.8m (36m ²)	小型
用途	科学研究	科学研究	レーザー加工	産業応用



(2) 研究開発目標と根拠

高出力レーザーによる加工技術の確立およびキロジュール級レーザーの実現可能性の評価の 2 つの目的を実現するためのレーザー技術の開発として、開発目標を以下に定めた。本テーマでは、サブテーマとして以下の(a)、(b)を実施する。表Ⅲ2-2-1-2 に目標値と設定根拠を示す。

(a) 高出力パルスレーザー装置の開発（浜松ホトニクス）

(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発（大阪大学）

表Ⅲ2-2-1-2 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(a) 高出力パルスレーザー装置の開発	500J 級固体パルスレーザー装置を想定した 250J 級高出力レーザー装置の開発	キロジュール級レーザーの実現可能性を実証	高出力 LD モジュールによる 1kJ、10Hz の達成	キロジュール級レーザーの基本設計の要素技術の確立
			高出力パルスレーザー装置による 100J 出力の確認	新たなレーザー加工の基盤技術確立に向けた光源 世界水準に追い付く
(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発	キロジュール級レーザー装置の実現可能性を確認	世界を凌駕するキロジュール級レーザーの基盤技術の確立	キロジュール級レーザーの基本設計技術の確立	100J 級レーザー装置の開発を通し基本設計技術を確認 世界水準に追い付く

目標の設定根拠として、(a)については現在市場で販売されているレーザーピーニング用のレーザー装置の出力 10-20J の 5-10 倍に相当するレーザー出力 100J を中間目標とし、最終目標をキロジュール級パルスレーザーの実現可能性の評価を目的とし、500J 級固体パルスレーザー装置を想定した 250J 級高出力レーザー装置の開発とした。キロジュール級レーザーの要素技術である LD モジュールについては、1kJ、10Hz を中間目標として設定した。

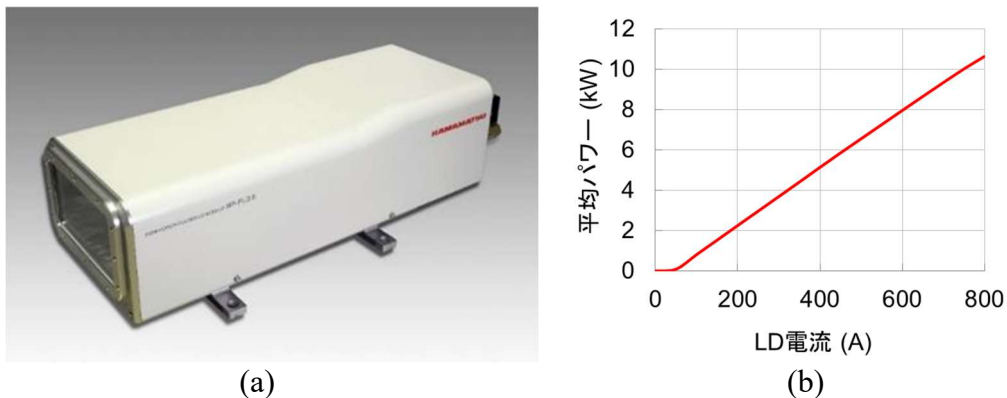
(b)については、(a)にて達成する 250J 級レーザー出力の特性を検証することにより、世界を凌駕するキロジュール級レーザーの実現可能性を世界に先駆けて確認することを最終目標とした。

(5) 成果の詳細

(a) 高出力パルスレーザー装置の開発

【高出力 LD モジュールの開発】

100J 級高出力レーザー装置および 250J 級高出力レーザー装置に用いられる励起用 LD モジュールの開発として、世界最高クラスの性能となる $1\text{kJ} \times 10\text{Hz}$ で出力可能な高出力 LD モジュールの開発を行った。この高出力 LD モジュールは、100J 以上の光エネルギーを出力する複数 LD ユニットから構成される。試作した LD ユニットの外観写真を図Ⅲ2-2-1-1 に示す。本 LD ユニットのサイズは高さ 25cm、幅 27cm、長さ 80cm であり、海外メーカーの製品と比較し単位出力あたりのサイズが約半分とコンパクトである。この LD ユニットの出力評価を行い、9 式の LD ユニットの出力の合計として 10kW ($1\text{kJ} \times 10\text{Hz}$) の平均出力を確認しプロジェクトの中間目標を達成した。



図Ⅲ2-2-1-1 (a)LD ユニットの外観, (b)高出力 LD モジュールの出力。

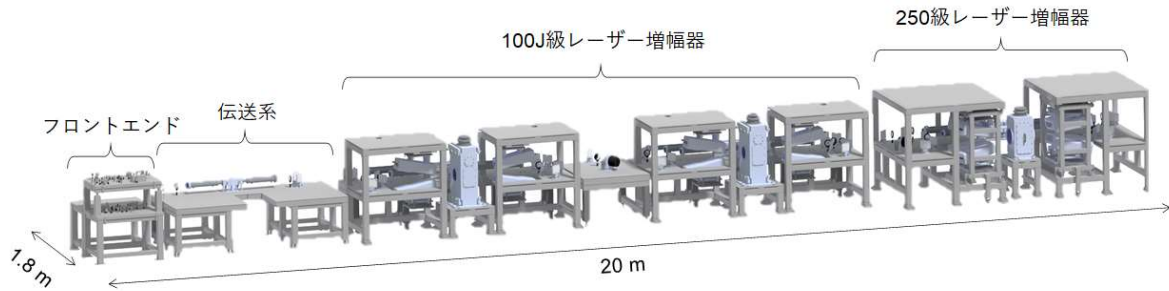
【250J 級高出力レーザー装置の開発】

250J 級高出力レーザー装置の構成図および外観写真を図Ⅲ2-2-1-2 に示す。本システムは、フロントエンド、100J 級高出力レーザー増幅器、250J 級高出力レーザー増幅器の 3 つのコンポーネントからなる。それぞれのレーザー増幅器にて LD モジュールによりレーザー媒質である Yb:YAG を励起しレーザー光を増幅する。本システムは、レーザー発振器から出力された種光を、ビーム品質などの諸特性を維持したまま光エネルギーを後段のレーザー増幅器にて増幅する主発振器・出力増幅器 (Master Oscillator Power Amplifier: MOPA) の構成である。本構成では、後段のレーザー増幅器の規模を拡大することでより高いエネルギーを高いビーム品質にて得ることができる。これにより、本システムを用いて 250J 級高出力レーザー増幅器の出力特性の評価を行い本レーザー増幅器の基本設計を 1kJ 出力までスケールした設計を検証することで、キロジュール級レーザー装置の実現可能性を確認する。

本事業の中間年度までに、250J 級高出力レーザー装置の前段部に当たる 100J 級レーザー増幅器までで構成される 100J 級高出力レーザー装置により、当時 LD 励起レーザーとしては世界最高出力となる 117J の出力を達成し、プロジェクトの中間目標を達成した。

中間年度後の本事業では、最終目標を 250J 級高出力レーザー装置の開発に定め研究開発を行った。本開発では、100J 級高出力レーザー装置の後ろに設置する 250J 級レーザー増幅器を新たに開発した。250J 級レーザー増幅器は、Yb:YAG セラミクスに対し入射角度を変えて 2 パスするシステ

ム構成であり、250J 級レーザー増幅器内に設置されたテレスコープにより 100J 級レーザー増幅器内の Yb:YAG セラミクス上のレーザー光の像を 250J 級レーザー増幅器内の Yb:YAG セラミクスへ結像させている。この像転送を行うことでレーザー光の近視野像の劣化を抑制でき、それにより高エネルギー出力時の光学素子のダメージを抑制することができる。また、250J 級レーザー増幅器に可変形鏡を導入しレーザー光の波面を平坦に保つ制御を行うことでも光学素子のダメージの抑制を行った。



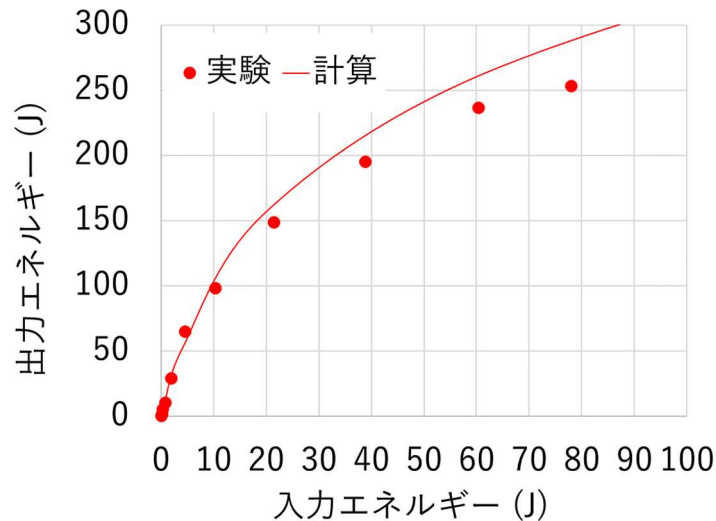
(a)



(b)

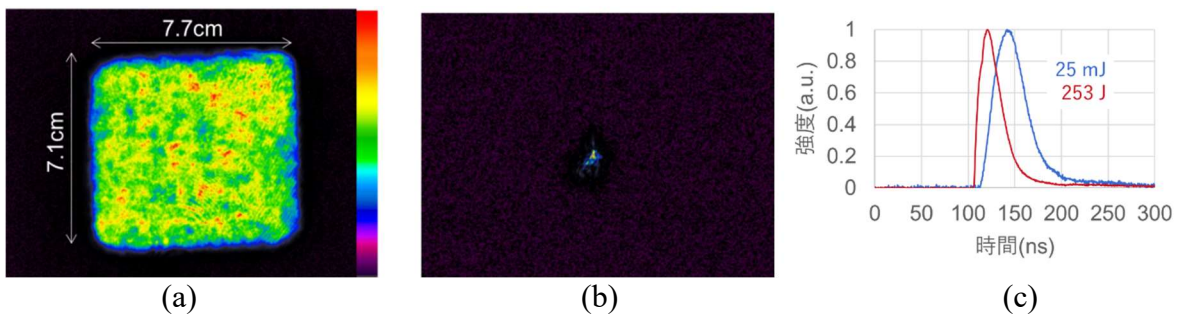
図Ⅲ2-2-1-1 (a)250J 級レーザー装置の構成図, (b)250J 級レーザー装置の外観.

本システムのレーザー増幅試験の結果を図Ⅲ2-2-1-3 に示す。この増幅試験では、250J 級レーザー増幅器の LD 励起エネルギーは 890J として行い、入力エネルギーの増加に対する出力エネルギーの変化を計測した。また、繰り返し周波数は、ダメージリスクを最小限とするために 0.2Hz (5 秒毎に 1 ショット) とした。増幅試験の結果、100J 級レーザー増幅器から出力された 79J のパルスエネルギーを入力した時に、253J の出力エネルギーを達成した。この時の光-光変換効率は 19.7% であり、Yb:YAG セラミクスに蓄積されたエネルギーからの抽出効率は 44.0% であった。これらの結果により最終目標の 250J 級レーザー出力を達成した。



図Ⅲ2-2-1-3 250J 級レーザー装置の出力エネルギー特性.

出力光の近視野像および遠視野像を図Ⅲ2-2-1-4(a), (b)に示す。平均値／ピーク値で表されるフィリングファクターで 0.54 と高い均一性を確認した。ビームサイズは 7.1cm×7.7cm であり、この時の平均フルエンスは 4.5J/cm² と見積もられた。遠視野像では、単一スポットとなる回折限界のビーム品質を有した集光特性であることを確認した。図Ⅲ2-2-1-4(c)にレーザーパルスの時間波形を示す。青線が 25mJ の低出力時の波形であり赤線が 253J の高出力時の波形である。低出力時のパルス幅は 38.8ns であったのに対し、高出力時は 26.8ns と短パルス化が見られた。これは蓄積されたエネルギーが枯渇したことに起因しており、効率良くエネルギーを抽出できていることを裏付けている。出力エネルギーが 253J であることから、パルス幅 26.8ns を用いたピーク強度は 9.4 GW と試算された。



図Ⅲ2-2-1-4 250J 級レーザー装置の出力特性。(a)近視野像, (b)遠視野像, (c)時間波形.

【100J 級高出力レーザーの高繰り返し化の開発】

レーザー加工の加工速度を向上する上で、レーザー照射の繰り返し周波数を増加させることは有効な手段である。そこで、250J 級高出力レーザー装置の前段部にあたる 100J 級高出力レーザー装置を用いて高繰り返し動作に向けた研究を行った。一般にレーザーを高繰り返して動作させる場合、励起パワーの増加に伴い熱レンズ効果と呼ばれるレーザー波面の乱れが生じることから球面レンズ等により補正を行うが、高エネルギーレーザーにおける熱レンズ効果は複雑な波面歪み

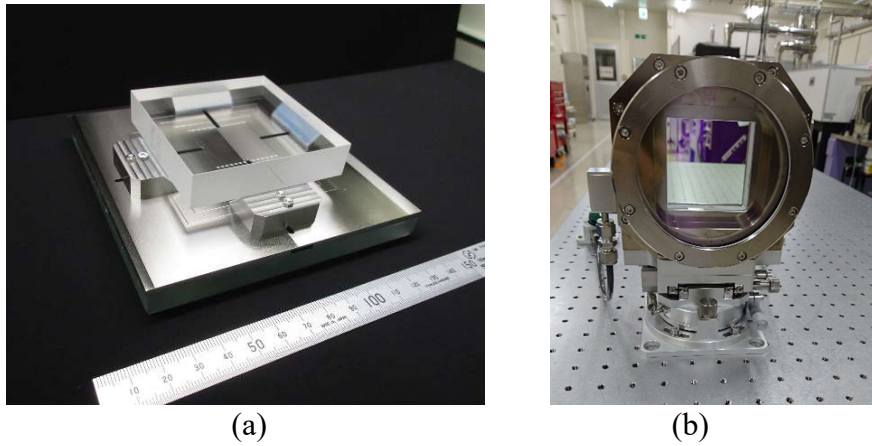
が引き起こされるため補正が困難である。そこで、100J 級高出力レーザー装置では任意の波面を生成することが可能な可変形鏡を導入し、10Hz 動作においても波面歪みを 1 μ m (RMS) 以下に抑えられることを確認した。また、高繰り返しで励起することにより 150K に冷却している Yb:YAG セラミックスの温度が上昇し増幅性能が低下する課題においても、低温・高圧ヘリウムガスによる冷却技術の確立により 10Hz 動作においても 100J 出力に必要な増幅性能が得られることを実験により確認した。これらの実験結果から 100J \times 10Hz 動作の見通しは得られた。

【波長変換技術の開発】

高エネルギーレーザーパルスによるレーザー加工技術の確立に向け、レーザー光の波長を変化させた加工試験や照射スポットのサイズを様々に変えた加工試験などを行い、それらの加工結果を基に新たな加工方法を探索することが重要である。更にはそれらの加工結果をデータベース化し人工知能を用いた機械学習や深層学習を行うことにより、予期せぬ新しい加工技術が確立されることが期待される。そこで本事業では、これらの取り組みを加速するために高エネルギーレーザー光の波長を変換する機能の拡張とレーザー光の照射スポットサイズを変化させる研究開発を新たに追加して実施した。

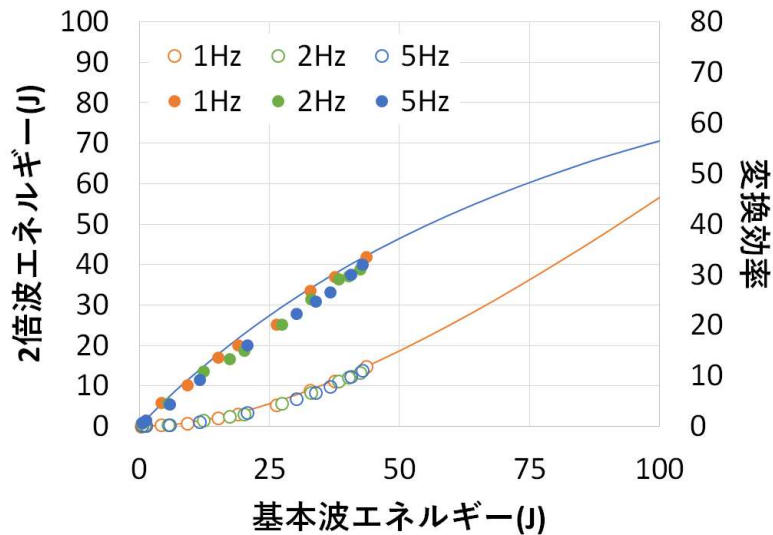
レーザー光の波長を変化させる機能拡張として、100J 級レーザーの第 2 高調波を発生させる研究開発を行った。100 級のレーザーパルスは、光学素子に施される誘電体多層膜コートでの光学損傷を抑制するために一般にビームサイズが 5~10cm 程度と大口径となる。そのため、レーザー光の第 2 高調波を発生させるために用いられる非線形光学結晶においても同様に大口径で有る必要があるが、一般的な非線形光学結晶はサイズが 1cm 程度と小型であり 100J 級レーザーに適用可能な大型な非線形結晶は 2~3 種類に限られる。その中でも CLBO 非線形光学結晶は大阪大学が開発した国産の非線形光学結晶であり、大型の結晶育成が可能だけでなくキロワット級の高平均出力レーザーにも適用可能な温度特性を有しているなど有望な材料である。そこで本研究開発では、大阪大学が製作した世界最大サイズの CLBO 結晶を用いた波長変換器の試作を行い波長変換試験を行った。

図Ⅲ2-2-1-6 に CLBO 結晶および CLBO 波長変換器の写真を示す。大阪大学にて CLBO 結晶としては世界最大サイズとなる 7 cm \times 7 cm、厚さ 1.5 cm の素子化に成功した。位相整合タイプは Type-II である。また、CLBO は専用の光学ホルダに設置した。本光学ホルダは、光学窓を備えた気密性のある容器内に結晶を設置できる構造となっており、CLBO は強い潮解性を有していることから窒素雰囲気中でホルダに設置する作業を行うことで低湿度下での保持を実現した。本光学ホルダは外部からガスを封入できる機構を備えており定期的な窒素パージが可能である。また、本光学ホルダは 2 軸の回転調整ステージを有しており、電動アクチュエータを備えることで遠隔から結晶角度の調整が可能である。これにより、大口径の CLBO を適切な環境で使用できる波長変換器の実用化を進めた。



図Ⅲ2-2-1-6 (a) CLBO 結晶, (b)CLBO 波長変換器.

図Ⅲ2-2-1-7 に波長変換試験で得られた第 2 高調波の出力エネルギーおよび変換効率の結果を示す。実験は繰り返し率を 1Hz、2Hz、5Hz で行い変換効率の変化を評価した。1Hz の実験において、43.6J の基本波入力の際に、第 2 高調波出力として 14.6J を得た。その時の波長変換効率は 33.5% であった。実験結果と計算結果は良く一致しており、100J の基本波入力により変換効率 55%にて 55J の第 2 高調波出力が得られる見込みを得た。また繰り返し率を 5Hz とした試験を行い、1Hz 時と同等の第 2 高調波出力および変換効率を確認した。これらの実験結果から基本波出力 100J×10Hz による、高効率・高平均出力の第 2 高調波発生の見通しを得た。

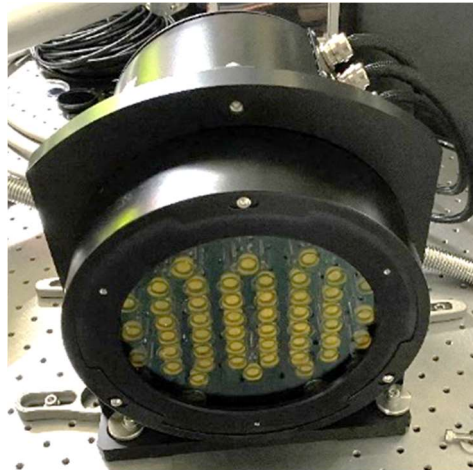


図Ⅲ2-2-1-7 波長変換試験の結果.

【集光パターン可変技術の開発】

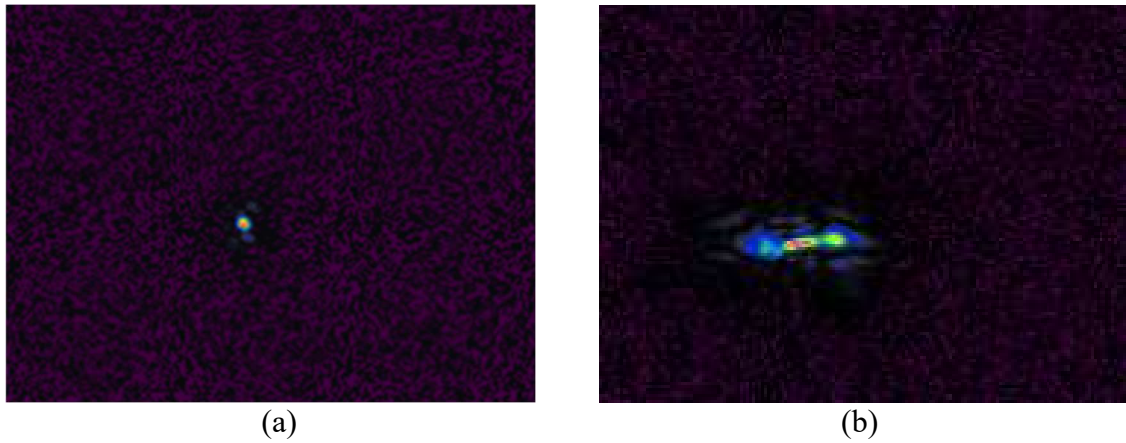
レーザーピーニングでは照射面積を大きくすることで残留応力を深く形成できるとの報告があることから照射面積は重要な加工パラメータとなっている。一般に、レーザー加工において一定の照射強度を維持したまま照射面積を大きくするためには、レーザーエネルギーを面積に準じて

増大させなければならない。そのため、レーザー光の照射面積の変化によるレーザーピーニングの加工結果を評価するには、本レーザーシステムのような高エネルギーレーザーが必要となる。ここで、レーザー光の集光点のパターンはレーザー光の波面の形状により制御することができることから、レーザー光の波面を制御する可変形鏡を用いて照射スポットの形状を変化させるシステムを構築した。可変形鏡の写真を図Ⅲ2-2-1-8に示す。本可変形鏡は、口径は直径 200 mm であり光学基板に 52 個のアクチュエータが取り付けられている。このアクチュエータを押し引きして光学基板の形状を変形させることで、この光学基板を反射したレーザー光の波面を変調することができる。通常、可変形鏡に付属されているソフトウェアでは、レーザー加工の要求に応じてプログラマブルにレーザー光の波面を制御することができない。そこで本研究開発では、可変形鏡を外部から直接制御し、任意の波面をプログラマブルに生成するためのシステム開発を行った。本システムは一般的なパソコンで制御することができるソフトウェアを有し、LAN を経由して可変形鏡とコマンド通信を行うことができる。このソフトウェアにより予め設定した保持時間、移行時間、波面形状に準じてレーザー光の波面を変化させ、それによりレーザー光の集光スポットの形状をプログラマブルに変化させることができる。



図Ⅲ2-2-1-8 可変形鏡の外観写真。

図 Ⅲ2-2-1-9 に本システムにより形成した単一の集光スポットと水平ライン状の集光パターンの例を示す。水平ライン状の形状では、縦方向には回折限界程度まで集光されているのに対し横方向には 10 倍以上に引き伸ばされている。ここで、単一スポットと同じレーザー照射のエネルギー密度を水平ライン状の集光パターンで得るためには、レーザーエネルギーを 10 倍以上に増大させる必要がある。そこで、広いレーザーエネルギーの可変性を有している本レーザーシステムを用いることで、レーザーの照射強度を一定に保ったまま照射面積を変えた時のレーザーピーニングなどの加工効果の評価を行うことが可能となる。このように、レーザーの照射パターンの可変システムを高エネルギーレーザーへ実装することにより、レーザー照射パターンとレーザーエネルギーを変化させた加工結果を自動で取得できるシステムを構築することができる。



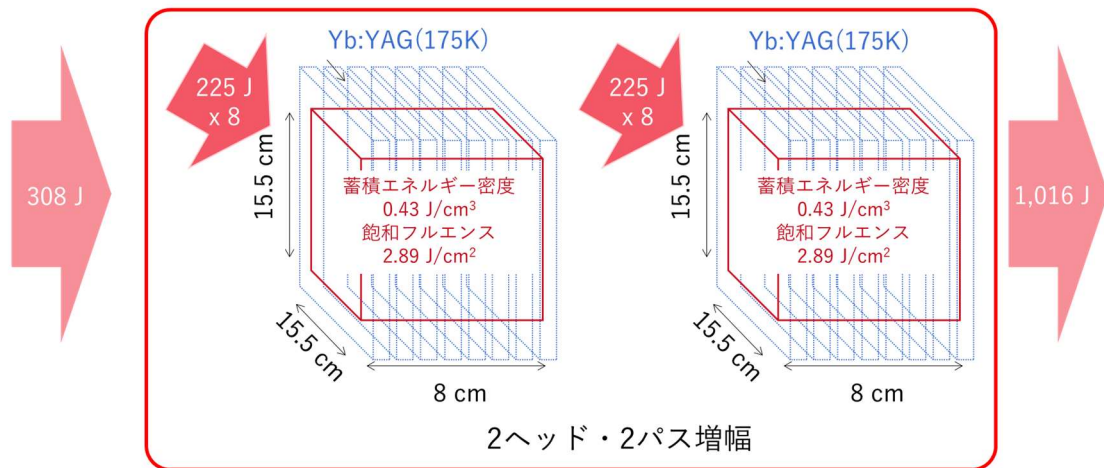
図Ⅲ2-2-1-9 集光パターン。(a)単スポット,(b)水平ライン。

【キロジュール級レーザー装置の実現可能性の確認】

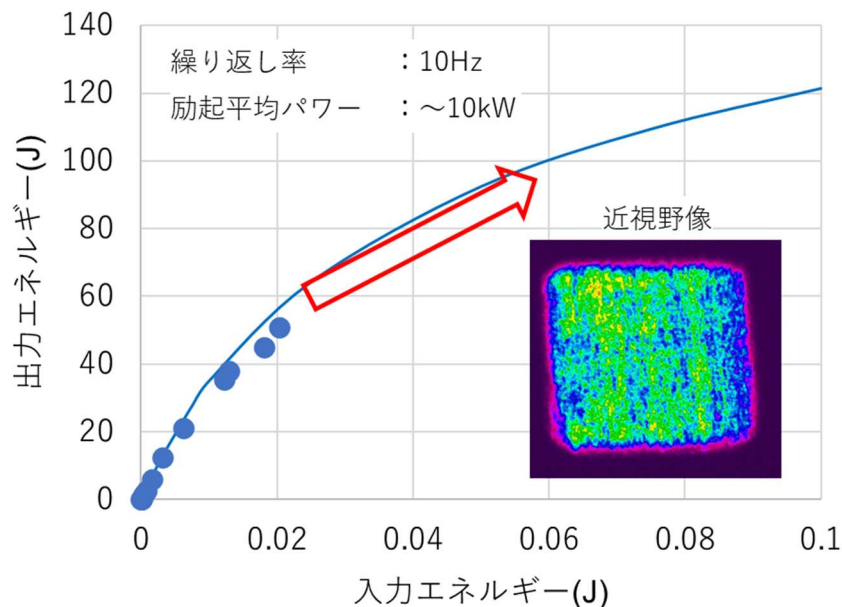
本研究開発課題では、キロジュール級パルスレーザーの基本設計技術の確立に向けた 250J 級レーザーシステムを構築し、キロジュール級パルスレーザー装置の基本設計に必要な未知のパラメータを実験的に確定する研究を行った。250J 級レーザー増幅器の開発を通して、低温・高圧ガスのヘリウムガスを冷媒とした低温冷却 Yb:YAG セラミックスによる LD 励起ディスク型レーザー増幅器の増幅試験を行い、LD 励起としては世界最高となる 250J 出力を達成した。このレーザー増幅器はスケール性を有した設計であることから、本設計を基に 1kJ 級のレーザー出力が可能なレーザー増幅器の基本設計を行うことができる。本研究で得られた 250J のレーザー出力の実験値（飽和フルエンス、蓄積エネルギー密度、各種効率など）をそのまま適用した 1kJ レーザーの基本設計を表Ⅲ2-2-1-5 示す。その結果、励起エネルギー 3.6 kJ に対し、蓄積エネルギー 1.2 kJ が得られ、308J を入力した時に 1.01kJ が得られることが確認された。この基本設計では、レーザーエネルギーを増大させる際にリスクとなる光学損傷も、出力フルエンスが 250J 級レーザー増幅器の実験値と同じであることから回避されている。このように、本基本設計で用いた各種パラメータは 250J 出力で得られた実験結果をベースに導出されており実現性の高い設計であると言える。本基本設計に基づき概略設計を行ったキロジュール級レーザー増幅器のモデルを図 Ⅲ2-2-1-10 に示す。本モデルでは表Ⅲ2-2-1-5 に示したパラメータから、より実現性を高めるために、寄生発振や自然放出光の増幅作用の影響を抑制するために、蓄積エネルギー密度を $0.43\text{J}/\text{cm}^3$ に軽減する軽微の変更を行った。本基本設計および基本設計モデルの作成によりキロジュール級レーザー装置の実現可能であることを明らかとしプロジェクト最終目標を達成した。

表Ⅲ2-2-1-5 キロジュール級レーザーの基本設計

パラメータ	250J 級レーザー 増幅器(実験)	1kJ 級レーザー 増幅器(設計)
励起エネルギー	890 J	3.6 kJ
蓄積エネルギー	399 J	1.2 kJ
出力エネルギー	253.6 J	1.01 kJ
励起効率		44.8%
抽出効率		44.0%
光-光変換効率		19.7%
入力エネルギー	78 J	308 J
ビームサイズ	7.1 cm x 7.7 cm	15.5 cm x 15.5 cm
飽和フルエンス (E_s)		2.89 J/cm ²
蓄積エネルギー密度 (E_{st})		0.58 J/cm ³
入力エネルギーフルエンス (E_{in})		1.43 J/cm ²
出力エネルギーフルエンス (E_{out})		4.63 J/cm ²



図Ⅲ2-2-1-10 キロジュール級レーザー増幅器の基本設計モデル.



図Ⅲ2-2-1-11 キロジュール級レーザー増幅器の基本設計モデル.

(6) 実用化・事業化への取り組み

100J 級高出力レーザー装置から出力された 50J 級レーザーパルスをロボットアーム式レーザー加工機に伝送しレーザーピーニング試験を実施した。この加工試験にて、7cm×7cm 程度のビームサイズを有するレーザー光を、加工材料へ 5mm×5mm で照射するための照射光学系を構築した。この時、単純にレンズで集光するとレーザー光の回折の影響によりパターンが大きく劣化してしまう課題が新たに判明した。そこで、集光パターンの劣化を抑制しフラットトップに近い照射パターンを実現する光学手法を開発した。また、最終目標の達成に加えた実用化に向けた技術開発としてレーザー出力の高繰り返し化、波長変換および集光パターン可変性に関する技術開発を行った。これにより、様々な条件でのレーザー加工が可能となり広範囲に亘る加工データの取得に寄与できる。更に、レーザーエネルギーや加工モニタなどのデータを自動で取得しサーバーに蓄積していくソフトウェアシステムを開発した。ここで収集したデータは TACMI コンソーシアムに送信され加工データベースの構築へ貢献する。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載する。本研究開発テーマにて、特許出願 8 件（内、外国出願 4 件）を行い 30 件の学会発表を行った。この学会発表の内、3 件が発表賞などの賞の獲得に繋がり本成果の普及に大きく寄与した。2021 年 6 月には世界最高となる 250J を出力する LD 励起個体レーザーの開発に関するプレスリリースを NEDO と共同で実施した。また 2021 年 6 月 29 日に開催された展示会（OPIE2018）に出展し成果を広く発信した。

2-2-2. 「高出力レーザーによる加工基盤技術の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学、産業技術総合研究所）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

高出力レーザーによる加工基盤技術の開発については、金属材料等の強化技術やその二次加工へ高出力レーザーを適用することで高付加価値化や従来になかった新しい加工技術を確立することで省エネ社会の実現に資する。現在、地球温暖化への対策としてCO₂ガス排出量を削減する取り組みが世界的規模で進められている。産業界においても、環境に配慮したものづくりとして低CO₂ガス排出化の取り組みがなされている。自動車業界や航空産業においてはアルミ合金や炭素繊維樹脂（CFRP）を用いることで車両・機体重量の軽量化を図り燃費の向上が図られている。また産業界においても種々の金属材料が用いられているが、これらの金属材料を強化し耐久性を向上させることが必要不可欠である。部品寿命が長期化することによって、結果として産業分野の省エネにつながることを期待される。そこで既存の金属材料の強化手法（ショットピーニング等）との比較試験により高出力レーザーによる加工基盤技術の指針を得ていく。その他、産業界では金属材料の加工として、フォーミングなどの応用が期待されている。しかし、これらの技術においては、まだその加工原理の解明が十分進んでおらず、これらの技術を使いこなしてものづくり現場での要求に応える高い制御性や安定性を確立するには、高出力レーザーによる系統的な加工基盤技術の開発が不可欠である。そこでこれらを開発していくことで新しい産業応用分野を開拓して、省エネ社会の実現を目指している。

（２）研究開発目標と根拠

高出力レーザーの新たな産業応用を開拓するとともに、高出力レーザー照射加工の非接触な計測・分析評価技術を開発することを目的として本テーマの開発目標を以下に定めた。

- (a) 高出力レーザー加工システムの開発（浜松ホトニクス株式会社）
- (b) 高出力レーザーの加工技術の開発（大阪大学）
- (c) 計測分析評価技術の開発（産業技術総合研究所）

表Ⅲ2-2-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(a) 高出力レーザー加工システムの開発 (b) 高出力レーザーの加工技術の開発	ユーザー機関と連携して、高パルスエネルギーレーザーの新しい産業応用分野の開拓	実用化につなげるためにユーザー機関と連携した加工試験が必要	10～100GW/cm ² の強度で繰り返し照射可能な100J級出力に対応したレーザー加工システムの構築	レーザーピーニング加工強度を含み、サンプル加工の際にパラメータ可変とするため
(c) 計測分析評価技術の開発	非接触な計測・分析技術の実証	実用化した場合を想定して、非接触な評価手法の実証が必要	高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するのに必要な計測技術の仕様策定	既存レーザー等を用いたレーザー加工試験を通じて、必要な計測技術の仕様が明らかになるため

上記の設定根拠について、(a)高出力レーザー加工システムの開発および(b)高出力レーザーの加工技術の開発については、途中でサンプル加工の際にパラメータ可変するための加工システムが必要になり、最終では実用化につなげるためにユーザー機関と連携した加工試験が必要であるため、それぞれを目標として設定した。

(c)計測分析評価技術の開発については、途中で必要な計測技術の仕様が明らかにした上で、最終では実用化した場合を想定すると非接触な評価手法の実証が必要となるため、それぞれを目標として設定した。

(3) 研究開発スケジュール

本研究開発テーマの研究開発スケジュールを表Ⅲ2-2-2-2に示す。

表Ⅲ2-2-2-2 高出力レーザーによる加工基盤技術開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
(a) 高出力レーザー加工システムの開発	基礎的加工 検証試験	加工システム 基本仕様決定	100J 級加工 システムの構築	ユーザー連携 レーザー加工試験	新奇応用・500J 加工実証	10～100GW/cm ² の強度で繰り返し照射可能な 100 J 級出力に対応したレーザー加工システムを活用して高パルスエネルギーレーザーの新しい産業応用分野を開拓
(b) 高出力レーザーの加工技術の開発	高出力レーザー加工 検証	加工検証 シミュレーション 解析	加工システムへ フィードバック	シミュレーション 予測と加工検証	新奇加工技術・ 実用化へ フィードバック	
(c) 計測分析評価技術の開発	分析評価 技術検討	分析評価計測 システム構築	非接触計測技術 の仕様検討	計測・分析技術 の開発	計測・分析技術 実証	高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するのに必要な計測技術の実証

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-2-2-3に示す。高出力レーザー加工システムの開発については、高出力レーザーの加工技術の開発と連携して進め、計画を前倒しして実施しており100J級出力に対応したレーザー加工システムの構築が完了しており、中間目標を達成している。また、計測分析評価技術についても、高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するのに必要な計測技術の仕様策定を開始しており、中間目標をほぼ達成している。

表Ⅲ2-2-2-3 研究開発項目と達成状況

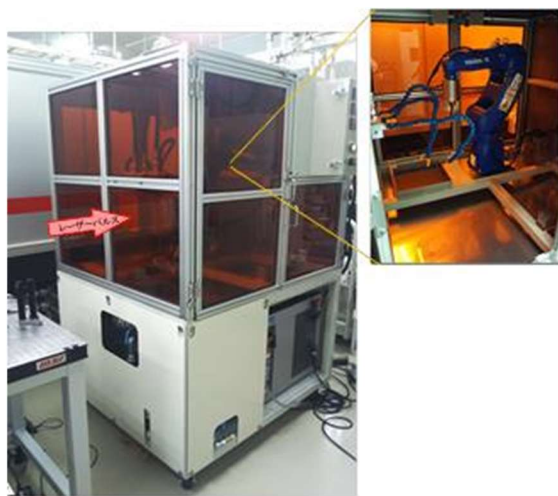
項目	最終目標	成果	達成度
(a) 高出力レーザー加工システムの開発	ユーザー機関と連携して、高パルスエネルギーレーザーの新しい産業応用分野の開拓	高パルスエネルギーレーザーを用いたレーザーピーニング加工を実用化した	○
(b) 高出力レーザーの加工技術の開発			
(c) 計測分析評価技術の開発	非接触な計測・分析技術の実証	放射光を用いた非接触計測技術を実証した	○

(5) 成果の詳細

(a) 高出力レーザー加工システムの開発

【高パルスエネルギーレーザー加工システム】

100J級のレーザーパルスによる光学素子の損傷を避けるためには、ビーム直径が100mm程度となる。したがって、レーザー側を光学ミラー等で加工エリアまで導光し、6軸制御のマニピュレーターで加工対象となる試料を保持して、レーザー照射位置まで移動させて加工する方式とした。図Ⅲ2-2-2-1と表Ⅲ2-2-2-4に構築したレーザー加工システムの外観写真と基本仕様をそれぞれ示す。以上により、10~100GW/cm²の強度で繰り返し照射可能な100J級出力に対応したレー



図Ⅲ2-2-2-1 レーザー加工システムの外観

表Ⅲ2-2-2-4 レーザー加工システムの仕様

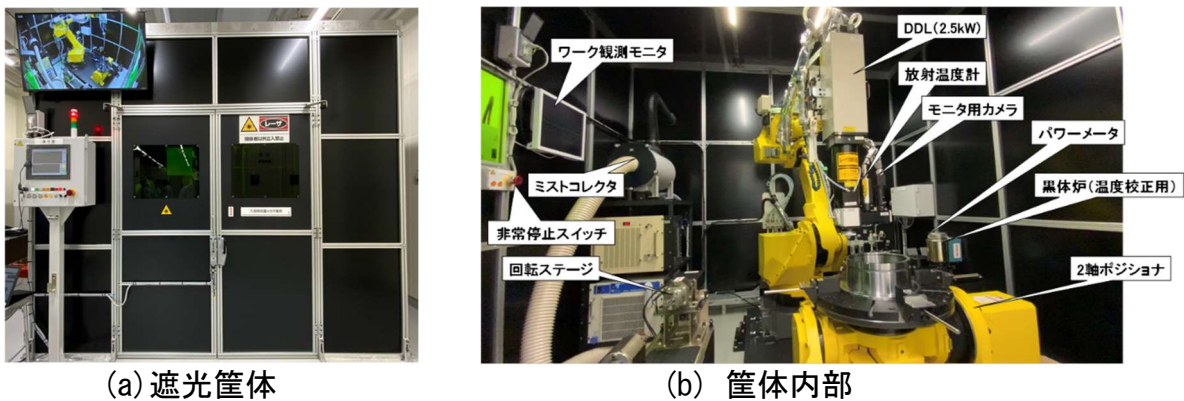
項目	仕様
試料保持	6軸制御ロボット
可搬重量	8kg
伝送レーザー口径 [mm]	150x150
レーザー強度 [GW/cm ²]	10~100
加工エリア (W x D x H) [mm]	600x600x450

レーザー加工システムの構築を完了した。本システムを用いてユーザー機関との加工検証試験を実施した。

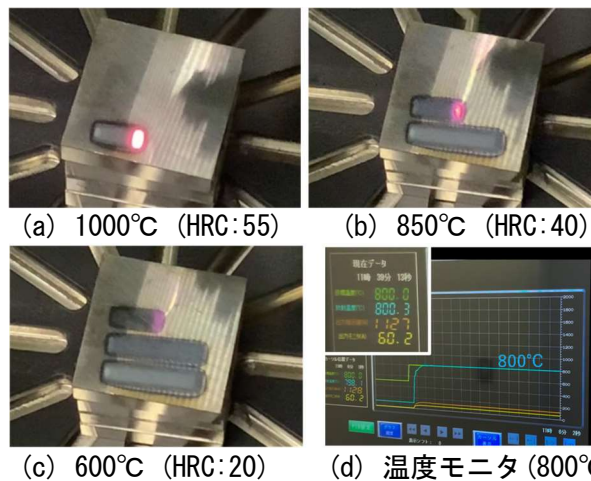
【LD 加熱加工システム】

高出力 LD は固体レーザーの励起用の光源としてもキーデバイスであり、高出力 LD からの出力を直接加工に用いることで焼入れ等の熱処理が可能となる。そこで高出力 LD モジュールによる熱入力を制御可能な LD 加熱加工システムを構築した。

ロボットアームに搭載された最大出力 2.5kW の LD モジュールは、遮光用のアルミ製の筐体（約 3m × 3m × 3m）内の設備ベース上に設置された。ワーク保持用の架台は、最大重量 400kg まで対応可能な汎用ワーク架台とシャフト等の回転部品を保持する高速回転ユニット（ワーク最大荷重 20kg、最大回転数 1000rpm）を備えている。レーザー出力の校正および放射温度計の校正のために、パワーメータ、黒体炉をそれぞれ備えている。また、加工時のオイルミストを吸引するためにミストコレクターを備えた。LD 加熱加工システムの筐体および筐体内部の外観を図Ⅲ2-2-2-2 に示す。照射面における強度分布はトップハット（均一）プロファイルとなっており、縦 2.5mm × 横 2.5mm から縦 12.5mm × 横 62.5mm まで 35 通りのパターンで照射することができ、レーザー照射中の材料の温度は 100~2000℃の範囲でモニタリングし安定化することが可能となっている。炭素鋼 S45C への焼入れの様子を図Ⅲ2-2-2-3 に示す。



図Ⅲ2-2-2-2 LD 加熱加工システムの外観



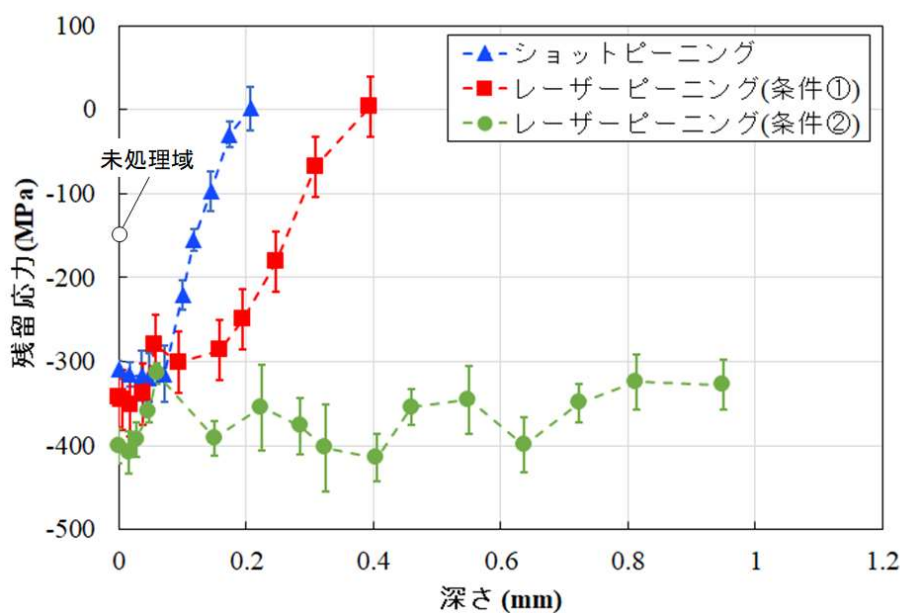
図Ⅲ2-2-2-3 炭素鋼 S45C へのレーザー焼入れの様子。設定温度とロックウェル硬度（HRC）の値。

東京大学・柏 II キャンパスに設置された本装置は、LD モジュールをパルス駆動（最短パルス 4ms）することができるため、レーザー焼入れに限定しない新しい用途を開拓していくことが可能である

【アルミニウム合金 A7075-T651 へのレーザーピーニング処理】

アルミニウム合金 A7075-T651 は航空機等の高い強度が要求される機械部品やスポーツ部品などに広く使用されている。そこで、上述の高パルスエネルギーレーザー加工システムにてレーザーピーニング加工を行った。比較のためにショットピーニング処理を施した試験片も評価した。試験片のサイズは幅 12 mm × 長さ 90 mm × 厚さ 10 mm の板状である。ピーニング条件を表Ⅲ2-2-2-5 に示す。ピーニング処理によって付与された圧縮残留応力は 2θ - $\sin^2\psi$ 法を用いた X 線回折 (XRD) 測定によって測定した。

圧縮残留応力の材料内部の分布を測定した結果を図Ⅲ2-2-2-4 に示す。測定は XRD による残留応力測定と電解研磨とを逐次繰り返すことによって実施した。縦軸は残留応力値を表しており、正の値が引張応力、負の値が圧縮応力を示している。最表面では、未処理の領域は -148 MPa の圧



図Ⅲ2-2-2-4 残留応力の深さ方向分布

表Ⅲ2-2-2-5 ピーニング条件(左表: レーザーピーニング、右表: ショットピーニング)

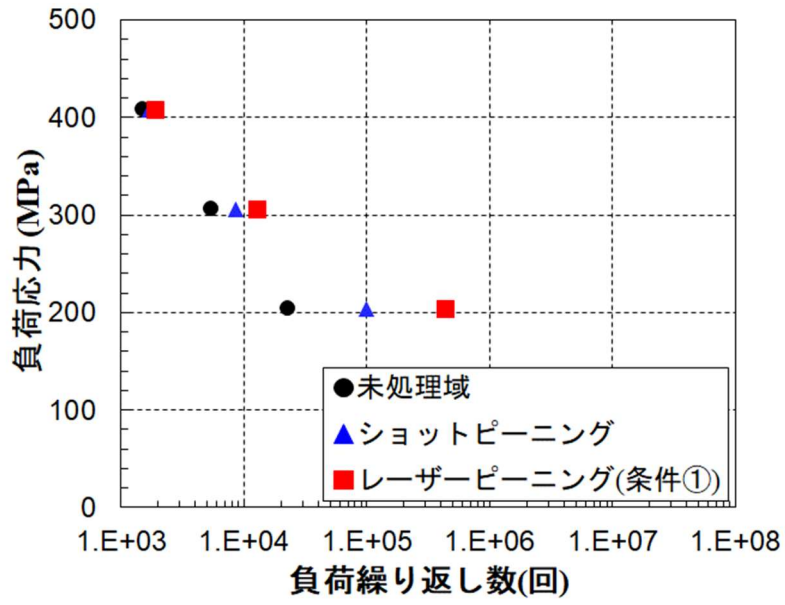
レーザーピーニング	条件①	条件②	ショットピーニング	
波長	1064 nm	1030 nm	投射材料	ガラス
パルスエネルギー	72 mJ	38.7 J	サイズ	0.250 - 0.425 mm
パルス幅	24 ns	28 ns	エア圧	0.15 MPa
繰返し	10 Hz	1 Hz	アークハイト	0.279 mmN
照射ビームサイズ	f 0.2 mm	□ 5 mm	カバレッジ	300 %
レーザー強度	9.6 GW/cm ²	5.5 GW/cm ²		
カバレッジ	624 %	1000 %		

縮応力なのに対し、ショットピーニング処理面には-310 MPa、レーザーピーニング処理面には条件①では-346 MPa、条件②では-401 MPaの圧縮応力が付与された。また形成された圧縮応力層の深さは、ショットピーニング処理領域では0.2 mm程なのに対し、レーザーピーニング処理領域(条件①)では0.4 mm程であった。さらに5年度目を実施した条件②では深さ1 mmの領域においても圧縮応力の低減が確認されず、条件①に比べてもかなり深部まで圧縮応力が付与されていることが示唆される結果となった。以上より、最表面・材料内部ともにレーザーピーニングの方がショットピーニングよりも高い圧縮応力が付与され、高パルスエネルギー・大照射面積化により付与される圧縮残留応力層を深くすることができることを示した。

次に、ピーニング処理によって付与された圧縮残留応力が疲労特性に及ぼす影響を評価するために回転曲げ疲労試験を実施した。負荷繰返し速度を1700 rpm、応力比を-1とし、負荷応力は407、306、204 MPaとした。得られたSN曲線を図Ⅲ2-2-2-5に示す。

縦軸は試験片に負荷した応力であり、横軸は試験片が破断するまでの負荷を加えた繰返し数である。いずれの負荷応力においても、未処理の試験片に対してレーザー(条件①)およびショットピーニング処理をした試験片の疲労寿命が向上した。またレーザーピーニング処理をした試験片の方がショットピーニング処理をした試験片よりも疲労寿命が向上することを確認した。204 MPaの負荷応力で比較すると、未処理の試験片は 2.3×10^4 回で破断したのに対し、ショットピーニング処理を施した試験片は 9.9×10^4 回、レーザーピーニング処理を施した試験片は 4.4×10^5 回においてそれぞれ破断し、未処理の試験片に対する疲労寿命の向上率は、ショットピーニング処理では4.3倍、レーザーピーニング処理では19倍であった。これはレーザーピーニング処理の方がショットピーニング処理よりも材料表面・内部ともに高く深い圧縮残留応力が付与されたことによるものであると考えられる。

レーザーピーニング処理はショットピーニング処理よりも表面荒れを抑えた状態で、材料内部により深い圧縮残留応力を付与することができる技術である。さらにはレーザーピーニングは、高パルスエネルギー・大照射面積化することで圧縮応力層を深くすることができ、さらなる処理の高機能化が期待できる。



図Ⅲ2-2-2-5 回転曲げ疲労試験のSN曲線

(b) 高出力レーザー加工技術の開発

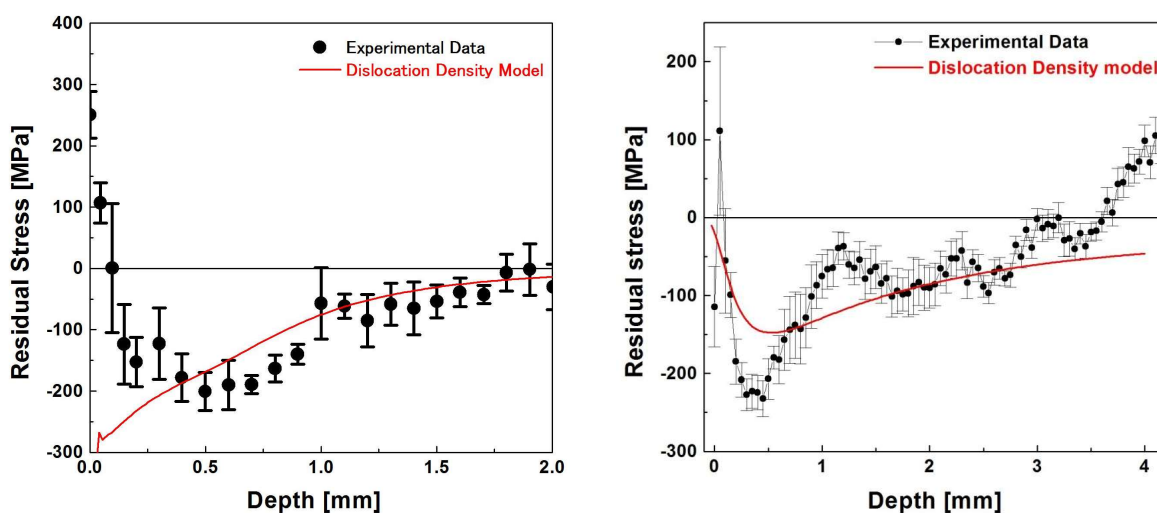
【パワーレーザー照射によるピーニングの予測技術の開発】

大出力パルスレーザー装置を用いたレーザーピーニングの基盤技術を確立するため、シミュレーションおよび実験を活用した加工予測に関する開発を実施した。

高出力レーザーパルス照射により、材料表面にプラズマが発生しアブレーションが起こり、その反作用で材料内部に衝撃波が伝播し、この衝撃波によって材料内部に残留応力が形成される。この一連の過程を数値シミュレーションおよびモデル計算を通して付加される残留応力の数値化法を開発した。

具体的には、転位密度モデルを用いて衝撃波圧力と転位密度の関係を考慮することでモデルを構築した。さらに照射レーザーパルスの空間分布の制御を行うことによって、より材料深部に残留応力を付加できることを予測し、既存のシングルショット大出力レーザー照射による実験を通してその予測性能を実証した。図Ⅲ2-2-2-7 に直接照射による残留応力分布とリング型に照射した場合の残留応力分布の実験値と計算値をそれぞれ示す。(a) 直接照射の条件はレーザー波長 527nm、レーザーエネルギー5.58J、照射径 1mm、照射強度 142GW/cm² である。リング型照射のレーザー条件は波長 1054nm、レーザーエネルギー618J、照射径 5 mm、照射強度 629GW/cm² である。直接照射の場合、表面での表面の熱影響がある領域では計算結果から外れているが、内部ではよい一致が見られた。リング型照射の場合、深さ 0.5 mm で残留応力が最大値を示してから減衰していく様子が再現された。

以上により、SUS304 に対してナノ秒レーザーピーニングによって生成される残留応力場を転位密度モデルにより解析し、ミクロな局所応力で説明できることを示した。



図Ⅲ2-2-2-7 残留応力の計測値 (a) 通常の照射 (b) リング照射. 実線はモデル計算値

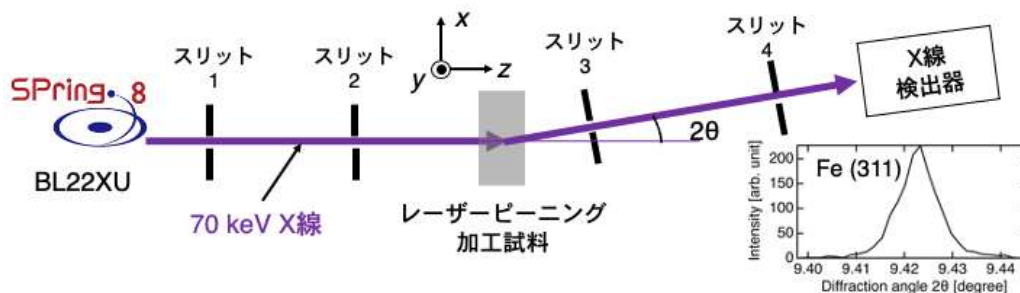
(c) 計測分析評価技術の開発

レーザーピーニングでは試料の同じ箇所に繰り返しレーザーを照射して加工が施されるが、加工機構の解明には1レーザーパルスで誘起される加工特性を分析、評価する必要がある。従来、残留応力の評価にはX線回折装置が用いられてきたが、X線の照射野径が1～数mm程度で高い空間分解能を得ることはできない。また、X線の光子エネルギーが低いため表面近傍の応力しか測定できず、表面研磨しながら内部の応力を測定する必要がある。材料を表面研磨した場合、応力の解放、再構築の影響で、高精度の残留応力分布測定が困難になる。金属材料内部に形成される複雑な形状を持つ残留応力層分布を非接触（非破壊）で測定するには、放射光施設からの単色性、平行度の高い、高エネルギーX線を利用する必要がある。高出力レーザーを用いて作製された加工試料を、放射光施設の高エネルギーX線を用いて分析した。

レーザーピーニングではレーザー駆動衝撃波が残留応力層を形成するので、金属材料内部の衝撃波伝搬特性を知ることが重要である。金属材料内部の残留応力層分布を多次元かつ非破壊で測定し、集光径が数mmのレーザー駆動衝撃波の伝搬特性を調べた。

大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号ガラスレーザーを用い、基本波光（波長 1.05 μm、エネルギー300 J、パルス幅 10 ns）を3mm径に集光し、あらかじめ熱処理してひずみを除去した鉄鋼材料 SUS304（20 mm 角 x 5 mm 厚さ）板に照射してレーザーピーニング加工試料を作製した。試料作製は真空中で行った

SPring-8 の BL22XU ラインに設置された応力イメージング測定装置を用い、ひずみスキャンニング法に基づき試料の残留応力分布を測定した。実験配置を図Ⅲ2-2-2-9 に示す。ほぼ平行光と見なせる 70 keV の X 線（ビームサイズは 50 μm x 300 μm）を用い、検出器の観測角度を変化させて、試料を透過する X 線強度を測定し、右下に示した X 線回折のロッキングカーブを得た。



図Ⅲ2-2-2-9 ひずみスキャンニング法を用いたひずみ分布測定法

回折角 θ 、無ひずみ時の回折角 θ_0 を用いて、ひずみ ε は式(1)で与えられる。

$$\varepsilon = -(\theta - \theta_0) \cot \theta_0 \quad (1)$$

ロッキングカーブのピークが広角側にシフトした場合は、圧縮のひずみが形成されていることになる。試料表面に形成されたレーザー照射痕中心を原点として、X線光軸と直交する2軸（x、y軸）に沿って試料をスキャンし、深さ方向、半径方向を軸としたひずみ2次元マップを作成するためのデータ取得を行った。試料をX線の光軸を中心に90度回転して二方向（ $\chi = 0^\circ, 90^\circ$ ）からxy平面に平行な面内ひずみ分布を測定した。レーザーピーニングの場合、面内ひずみが面直ひずみよりも支配的になるので、平面2軸応力状態に近いと考えられる。平面2軸応力状態では、各々

の方向で測定されたひずみを ε_0 、 ε_{90} とすると、半径方向の応力 σ_x とそれに直交する径方向の応力 σ_y は式 (2) で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_0 + \nu\varepsilon_{90}), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{90} + \nu\varepsilon_0) \quad (2)$$

式 (2) において E 、 ν はヤング率、ポアソン比で、SUS304 では各々 197 GPa、0.3 である。無ひずみ時の回折角 θ_0 をレーザー集光領域外の材料深層の値を用いて決定した。

半径方向 0.5 mm、深さ方向 0.2 mm の間隔で取得した 2 次元ひずみ分布より作成した (a) 半径方向、(b) 周方向の残留応力分布を図 III 2-2-2-10 に示す。図 III 2-2-2-10 において、(c) は $\chi=0^\circ$ 方向、(d) は $\chi=90^\circ$ 方向で測定された X 線回折プロファイルの半価幅分布である。試料表面に生成される高温プラズマの熱影響で表面は引っ張りになっているが、内部には 1.5 mm 程度の深さまで圧縮応力層が形成されており、最大の圧縮応力は 300 MPa 程度と見積もられた。従来のパルスエネルギー 1 J クラスのレーザーを用いたレーザーピーニングでは、アブレーション圧力の持続時間を長くするためのプラズマ閉じ込め層（水等を利用）を用いて、1 mm 程度の圧縮応力層の付与が報告されているが、プラズマ閉じ込め層のない真空中でも深層の加工が可能であることを実証した。

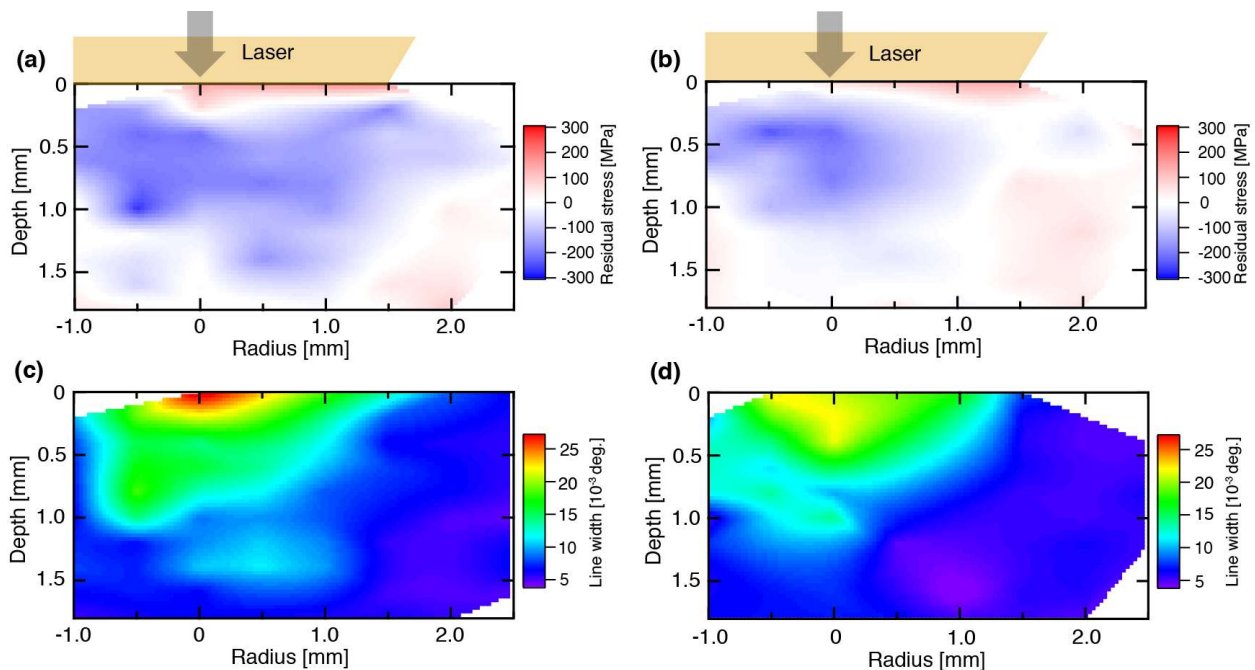


図 III 2-2-2-10 (a) 半径方向および (b) 周方向の残留応力分布。(c) $\chi=0^\circ$ 方向、(d) $\chi=90^\circ$ 方向で測定された半価幅分布

図 III 2-2-2-10 (a) (b) から材料内部の圧縮応力層の分布は、レーザー集光領域を底面とする円すい状の分布をしていると考えられる。衝撃波の反作用として発生する希薄波は、衝撃波の伝搬を妨げる。希薄波はレーザー集光域の周辺から侵入し、衝撃波を減衰させるため、円すい状の圧縮応力層の分布が形成されたと考えられる。塑性変形により結晶方位が乱れるとロッキングカーブの半価幅が大きくなる。図 III 2-2-2-10 (c) (d) の半価幅分布も衝撃波の影響層の分布を表すと考えられる。各々の方向の半価幅分布も残留応力分布と同様に、レーザー集光領域を底面とする円すい状の分布をしており、上述の衝撃波伝搬の描像を裏付けている。今回の実験では、300 J という

高パルスエネルギーのレーザーを用いることにより、集光径を3 mmと大きくすることができた。そのため、レーザー集光域の周辺から侵入による衝撃波の減衰を抑制することができたため、深層の加工を可能としたとも言える。高パルスエネルギーの特徴を生かした大面積加工に加え、深層加工を実証することができた。

(6) 実用化・事業化への取り組み

ユーザー機関との連携が進展し、高エネルギーレーザーパルスを用いたレーザーピーニングが実用化できた。これにより、従来技術では解決できないニーズに対する解決策を提供でき、それにより最終目標である新しい産業応用分野が開拓できた。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-3. 研究開発項目③「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

2-3-1. 「フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化」

(実施先：京都大学、スタンレー電気株式会社)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

レーザー加工分野においては、熱の影響が少ない精密加工を可能とする短パルス光源や、金属材料の高効率な加工を可能とする短波長光源の開発が極めて重要となっている。これらにより、自動車や航空機等の軽量化・低燃費化に向けて注目を集めている軽量・高強度・高剛性の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 等の先端素材の加工や、今後ますますその重要性が増すセンサーデバイスやスマートフォン等の電子機器製造における銅やセラミックス材料の高効率な加工などが可能となり、レーザー加工のマーケットの大幅な拡大が期待されている。開発項目① (および開発項目④) グループにおいては、これらの背景を見据え、短パルス・短波長光源の開発が進められている。ここでの開発では、既存の比較的大がかりなレーザー技術をベースとして、直近の次世代光源として提供可能な状態へと展開することを目指している。本研究開発課題 (項目③-1) では、このような短パルス光源、短波長光源を、小型でコンパクトな半導体レーザーワンチップにより実現すべく、我が国発の独自の半導体レーザー技術である「フォトニック結晶レーザー (Photonic Crystal Surface-Emitting Laser: PCSEL)」の(A)短パルス化、および(B)短波長化を目指した技術開発を行い、その次の世代の光源、つまり次々世代光源として提供可能とするための基盤技術開発を目指している。

ここで、フォトニック結晶レーザーとは、活性層の近傍に、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもつフォトニック結晶を内蔵した半導体レーザーであり、世界的にも極めてユニークなレーザーである。空気/半導体などの大きな屈折差をもつフォトニック結晶構造の周期性に起因して形成されるフォトニックバンド構造において、光の群速度がゼロとなる特異点 (Γ点) では、大面積でコヒーレントな共振状態が形成され、これにより、大面積での単一縦横モード動作が可能となり、高いビーム品質かつ、高出力の発振が可能となり、かつ基板上部への光出射、すなわち面発光動作が可能となるところに最大の特長がある。このようなフォトニック結晶レーザーを、短パルス化、短波長化することで、以下のような展望が期待される。すなわち、近赤外波長域 (940~980nm 帯) フォトニック結晶レーザーの短パルス・高出力動作の実現により、上述の熱の影響の極めて少ない、微細で精密な加工が可能な超小型半導体レーザーとして活用可能となることが期待される。さらに、レーザーの出射面上部に、非線形結晶を配置するだけの簡単な構成で、小型・レンズフリーで、高効率に波長変換 ($2\omega \sim 4\omega$) を行うことで、青色・紫外域短パルスで高出力動作が得られると期待される。また、フォトニック結晶レーザーを青~紫色波長域へと短波長化しつつ高出力化することにより、高いビーム品質で、直接、フォトンエネルギーの大きなレーザー光出射が可能となり、よりシャープで高効率な加工の実現が可能になるものと期待される。さらなる短波長化も、 2ω の波長変換のみで可能となる。本研究では、このような次々世代技術としての展望を見据えつつ、かつ、さらに、その派生効果として生じると期待される他の興味深い応用可能性 (高度センシング、自動車照明、医療応用等々) を見据えつつ、その基本概念実証 (POC) として、

- (A) 近赤外波長域のフォトニック結晶レーザーにおいて、高ビーム品質を保ったまま、高出力・短パルス動作（パルス幅：サブナノ秒、ピーク出力：10ワット級（平均出力：数ワット以上））可能なことを実証すること、
- (B) 青紫色波長域のフォトニック結晶レーザーの、高ビーム品質かつワット級動作の可能性を実証すること、

の2つの目標を当初の最終目標として設定した。ただし、(A)に関しては、3年目の中間評価段階で上記の目標をほぼ達成することが出来たため、4年目以降は目標を大幅にアップデートし、パルス幅：10～100ピコ秒、ピーク出力：当初目標より1桁大きい100ワット級、ビーム品質： $M^2 \sim 2$ ）を目指すこととした。この5年間のプロジェクトでこれらのPOCを実証することで、上述の展望へ向けた開発への大きな弾みになるものと期待される。

(2) 研究開発目標と根拠

フォトニック結晶レーザー技術は、我が国発の独自技術であり、これまでに世界に先駆けて、波長 940～980nm 帯において、高ビーム品質 ($M^2 < 2$) ワット級連続 (CW) 動作を実現するとともに、青～紫色波長領域での電流注入発振をも世界で初めて実現することに成功している。

本プロジェクトにおいては、この独自のフォトニック結晶レーザーを短パルス化・短波長化することで、小型・コンパクト・安価な半導体レーザーの特長を最大限生かす次々世代光源としての基盤技術開発を行うことを目標としている。前項でも述べたように、将来的には、自動車や航空機の軽量化に向けて期待される CFRP 等の先端素材の加工や、電子デバイスにおける銅などの加工の困難な金属材料の高効率加工などを可能とする、小型でコンパクトな加工システムの提供に資するものと考えられ、レーザー加工市場のさらなる拡大に寄与することが期待される。また、この技術は、加工応用以外にも、アイセーフ条件と長距離測距を両立するリモートセンシング (LiDAR) 用光源、車のヘッドライト用の高輝度光源、レーザーメスなどの医療用光源などとしても、その市場の視野に入るものと期待される。

このような魅力的な応用を見据えて、すでに前項でも記載のとおり、その展開の概念実証 (POC) としての最終目標を次表のように設定した。

表Ⅲ2-3-1-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠
(A) フォトニック結晶レーザーの短パルス化	<p>(当初目標) 高ビーム品質を保ったままでの、高出力・短パルス動作（パルス幅：サブナノ秒、ピーク出力：10ワット級（平均出力：数ワット以上））の実現可能性を実証する。</p> <p>(アップデート目標) 高ビーム品質を保ったままでの、高出力・短パルス動作（パルス幅：10～100ピコ秒、ピーク出力：当初目標より1桁大きい100ワット級（平均出力：ワット級～10ワット級）、ビーム品質：$M^2 \sim 2$）を実証する。</p>	<p>(当初目標) 次々世代の加工システム等への応用を見据え、本格検討開始の端緒となりうる水準を考慮し、その概念実証 (POC) として設定した。</p> <p>(アップデート目標) 中間評価時にほぼ当初の最終目標を達成したことを受けて、既存の短パルス光源を圧倒的に凌駕出来ると考えられる10～100倍のピーク出力を実現する水準として設定した。</p>
(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化	GaN系フォトニック結晶レーザーの高度化を進め、高ビーム品質かつワット級の発振の可能性を実証する。	次々世代の加工システム等への応用を見据え、本格検討開始の端緒となりうる水準を考慮し、その概念実証 (POC) として設定した。

(A) 短パルス動作については、これまで、フォトリック結晶レーザーでサブナノ秒かつ高出力動作の事例がなく、全く新しい技術開発となるため、当初の最終目標では、加工応用への本格検討開始の端緒となりうる動作特性として、パルス幅：サブナノ秒、ピーク出力：10ワット級（平均出力数ワット以上）を設定していた。ただし、中間時点までに、ほぼ目標を達成したため、大幅にアップデートした最終目標として、パルス幅：当初目標より1桁短い10～100ピコ秒、ピーク出力：当初目標より1桁大きい100ワット級（平均出力：ワット級～10ワット級）、ビーム品質 $M^2 \sim 2$ を設定した。

(B) 短波長化においては、これまでに、電流注入による GaN 系 PCSEL の初期実証には成功しているが、閾値電流密度が極めて高く（ $\sim 70 \text{kA/cm}^2$ ）、出力が極めて小さい（ $< 1 \text{mW}$ ）という状況であった。そこで、最終目標としては、加工応用展開が視野に入る水準である、高ビーム品質でワット級の発振可能性を実証することを目標とした。

これらの目標の達成により、(A) に関しては、既存の半導体レーザーパルス光源の10～100倍の輝度をもつ高ピーク出力・短パルス光源が実現し、(B) に関しては、既存の GaN 面発光レーザーの10～100倍の輝度の短波長光源が実現する。これらは、次々世代のレーザー加工の基本技術となる他、照明、センシング、医療応用等の幅広い応用に繋がると期待できる。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-1-2 フォトリック結晶レーザーの短パルス化・短波長化の開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
(A) フォトリック結晶レーザーの短パルス化	<ul style="list-style-type: none"> 理論解析手法の開発開始 作製手法の開発に着手 	<ul style="list-style-type: none"> 電極構造等の設計 フォトリック結晶共振器の設計 分割電極構造デバイスの試作・評価 	<ul style="list-style-type: none"> 設計法の確立 短パルス動作の評価系構築 試作と評価、および出力増大に向けた検討 	<ul style="list-style-type: none"> ピーク出力数10ワット級動作の実現に向けた検討（発振面積の拡大・分割電極構造の最適化等） 	<ul style="list-style-type: none"> 高ピーク出力（100ワット級）・短パルス動作に向けたPCSELの高度化 ナノ秒パルス電源による評価 	（アップデート目標） 高ビーム品質を保ったままの、高出力・短パルス動作（パルス幅：10～100ピコ秒、ピーク出力：当初目標より1桁大きい100ワット級（平均出力：ワット～10ワット））、ビーム品質 $M^2 \sim 2$ の実証
(B) フォトリック結晶レーザーの短波長化	<ul style="list-style-type: none"> GaN系材料フォトリック結晶レーザーの設計を開始 フォトリック結晶の形成法の検討を開始 	<ul style="list-style-type: none"> フォトリック結晶形成法の構築 初期評価（バンド測定等） 京都大学への成長装置導入 	<ul style="list-style-type: none"> 設計深化 結晶成長技術の基礎確立 試作、評価により短波長フォトリック結晶レーザーの可能性を探索 	<ul style="list-style-type: none"> 高出力実現に向けた高度化 結晶成長技術の品質向上 高反射電極構造の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 解析および試作、評価を継続し、高度化を進め、GaN系PCSELのワット級動作を実証 	GaN系フォトリック結晶レーザーの高度化を進め、高ビーム品質かつワット級の発振の可能性を実証

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目ごとの最終目標とその達成状況を下表に示す。(A) フォトニック結晶レーザーの短パルス化においては、既に記載した通り、最終目標を当初の 10 倍のピーク出力 (100 ワット級) にアップデートして研究開発を推進した。まず、PCSEL において受動 Q スwitching 動作を実現するため、電流注入領域 (利得領域) の内部に可飽和吸収領域を導入した PCSEL 構造を提案し、その時間応答の解析を可能とする独自の解析手法を開発した。次に、可飽和吸収領域に広く光を分布させるために、二重格子フォトニック結晶という独自のフォトニック結晶構造が有効であることを見出した。さらに、二重格子フォトニック結晶 PCSEL に円環状の可飽和吸収領域を導入することで、高次モード発振を抑制しつつ基本モードで安定した短パルス発振が得られることを明らかにした。さらに、デバイスの大面積化 (直径 800 μm) と、二重格子構造および可飽和吸収領域の形状の最適化を行うことにより、最終的に、パルス幅数 10 ピコ秒未満、ピーク出力 120 ワット以上、高ビーム品質 ($M^2 \sim 2$) という高ピーク出力・短パルス動作を実現することに成功し、アップデートした最終目標を達成した。

また、(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化においては、PCSEL を構成する材料を窒化ガリウム (GaN) 系とし、青紫色から青色帯における高ビーム品質・ワット級の動作を目標に開発を進めた。まず、共振器損失を低減するため結合係数を増大したデバイス構造の設計と、結晶成長技術により均一な空孔を形成する新たな空孔形成法の開発を行った。続いて、閾値電流密度の大幅な低減、および、出力の大幅な向上を実証したのち、さらなる出力効率の向上を目指し、非対称フォトニック結晶の導入、内部損失の低減、電極反射との位相調整等に取り組み、デバイスの高度化を進めた結果、最終的に、青色帯域で、極めて狭いビーム広がり角 ($\sim 0.15^\circ$) を維持しながらワット級発振を実現し、最終目標である短波長・高ビーム品質・ワット級動作の実証に成功した。

表Ⅲ2-3-1-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
(A) 短パルス化	<p>高ビーム品質を保ったまま、高出力・短パルス動作を実現</p> <p>(当初目標) パルス幅：ナノ秒以下 ピーク出力：10 ワット級 (平均出力：数ワット以上)</p> <p>(アップデート目標) パルス幅：10～100 ピコ秒 ピーク出力：100 ワット級 (平均出力：ワット～10 ワット) ビーム品質：$M^2 \sim 2$</p>	<p>下記の特性を有するフォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力動作を実現</p> <p><u>パルス幅：30 ピコ秒以下</u> <u>ピーク出力：120 ワット以上</u> (平均出力：3 ワット以上) <u>ビーム品質：$M^2 \sim 2$</u></p>	◎ (当初目標の10倍に相当するアップデート目標をも達成)	目標を十分に達成したため、特になし。
(B) 短波長化	GaN系PCSELにて高ビーム品質かつワット級動作の実現	<p>下記の特性を有する GaN 系フォトニック結晶レーザーの開発に成功：</p> <p><u>ビーム品質：$M^2 \sim 1$</u> <u>出力：>1 ワット</u></p>	○	目標を十分に達成したため、特になし。

(5) 成果の詳細

(A) フォトニック結晶レーザー (PCSEL) の短パルス化

本項目では、PCSELの短パルス化・高ピーク出力化を実現するため、電流注入領域（利得領域）の内部に可飽和吸収領域を導入したPCSELを提案し、その設計および開発を行った。具体的な研究開発の工程を以下に示す。

- (A-1) 短パルス発振実現のための方針の検討（2016年度）
- (A-2) 光子およびキャリアの空間分布を考慮した包括的な過渡応答解析手法の確立（2016年度）
- (A-3) デバイス試作、評価系の構築、および短パルス発振の実現（2017～2018年度）
- (A-4) デバイス構造の深化によるピーク出力20W級動作の実証（2018～2019年度）
- (A-5) 大面積短パルスPCSELの開発によるピーク出力100W級動作の実証（2019～2020年度）

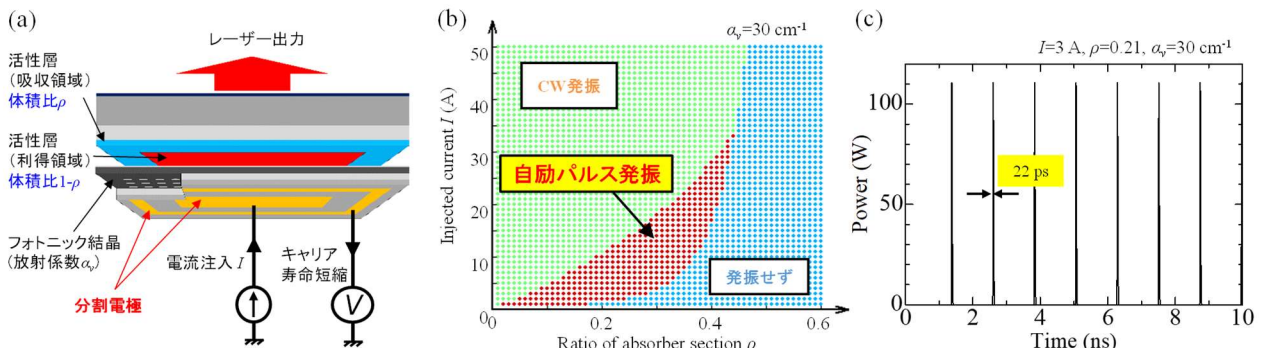
上記の工程に従って研究開発を進めた結果、(A-4)にて当初の最終目標（ピーク出力：10W級、パルス幅：サブナノ秒）を前倒しで達成することに成功した。その後、目標を一桁高く設定し、2019～2020年度の研究開発（A-5）で、アップデートした最終目標（ピーク出力：当初目標より1桁高い100W級、パルス幅：10～100ps、ビーム品質： $M^2 \sim 2$ ）をも達成した。以下に、各開発項目で得られた成果の詳細を記載する。

(A-1) 短パルス発振実現のための方針の検討 (2016 年度)

本サブテーマにおいては、まず、これまで連続動作（ならびにパルス幅 100~200 ns 程度の幅広いパルス動作）に限られていたフォトニック結晶レーザーについて、サブナノ秒（さらには、10~100 ps）という短パルス発振を実現する手法についての検討を行った。本研究では、PCSEL の電極を分割し、フォトニック結晶共振器を複数の領域に分割した上で、それぞれの領域に印加する電圧（あるいは注入する電流）を制御することで、共振器の一部を吸収状態から利得状態（あるいは透明状態）へと急激に変化させて、短パルス動作を得ることを検討した。

具体的な構造の一例として、図Ⅲ2-3-1-1(a)に示すように、フォトニック結晶共振器を利得領域と吸収領域に分割し、それらの注入電流量を独立に制御可能とする分割電極を有するレーザー構造を提案した。本構造では、利得領域のみに直流電流を注入し、吸収領域のキャリア寿命を逆バイアス印加や水素イオン注入等で短縮しておく。このとき、吸収領域では、共振器内の光子数の増加に伴って吸収が飽和するため（可飽和吸収効果）、光の急激な増幅が生じて、高ピークパワーの短パルス発振を、自励的に得ることが可能となると期待される。

上記のような、分割電極を有するフォトニック結晶レーザーにおいて、自励パルス発振が原理的に可能かどうか調べるために、まず、レート方程式を用いた基礎的な解析を行った。ここでの解析では、利得領域と可飽和吸収領域において、キャリアは一様に分布すると仮定し、共振器内の光は単一モードでかつ共振器内に一様に分布すると仮定した（なお、その後、フォトニック結晶共振器内のキャリアおよび光の面内分布をも考慮した解析へと発展させているが、これについては(A-2)節で詳述する）。利得領域の大きさを 200 μm 角、フォトニック結晶の面垂直方向への放射係数を 30 cm^{-1} 、可飽和吸収領域のキャリア寿命を 10ps と仮定し、電流注入量 I と吸収領域に存在する光の割合 ρ を変化させて自励パルス発振が生じる条件を調べた結果、図Ⅲ2-3-1-1(b)に示すように吸収領域に存在する光の割合 ρ をある程度大きくすることで、上記で述べた原理により、自励的なパルス発振が得られることが判明した。なお、吸収領域に存在する光の割合が大きすぎる場合には発振に至らず、注入電流が大きい場合には、初期はパルスの動作するものの、次第に連続動作に近づいていくことも明らかとなった。自励パルス発振の例として、具体的に $I=3\text{A}$ 、 $\rho=0.21$ とした場合のパルス波形を図Ⅲ2-3-1-1(c)に示す。同図より、まず最も基礎的な解析により、パルス幅数 10 ps、ピーク出力 100 W 級（平均出力 1 W 級）の短パルス発振が実現しうるということが判明した。



図Ⅲ2-3-1-1. (a) 分割電極 PCSEL 構造の模式図 (b) 自励パルス発振の発生条件 (c) レート方程式による基礎解析結果

(A-2) 光子およびキャリアの空間分布を考慮した包括的な過渡応答解析手法の確立 (2016 年度)

前節では、短パルス動作を得るための基本方針を示し、フォトニック結晶レーザーの面内で一様なキャリア分布や光分布が存在するとした単純化したモデルで、自励パルス発振の可能性を示した。しかしながら、フォトニック結晶面内の光分布やキャリア分布は考慮されておらず、具体的なデバイス構造における解析を可能とする必要があった。そこで、短パルス動作が期待される、フォトニック結晶レーザー構造を探索し、その解析および定量的な評価を行うために、フォトニック結晶における光結合や光子・キャリアの空間分布をも正確に考慮したパルス発振の解析手法を構築した。具体的には、PCSEL 内を $+x, -x, +y, -y$ 方向に伝搬する基本波の振幅を R_x, S_x, R_y, S_y とし、これらが空間的・時間的に緩やかに変化すると仮定することで、以下の時間依存 3 次元結合波方程式の導出を行った。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} = v_g \left[-i\delta + \frac{g(N) - \alpha_{in}}{2} \right] \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} + iv_g \mathbf{C} \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \\ R_y \\ S_y \end{pmatrix} - v_g \begin{pmatrix} \partial R_x / \partial x \\ -\partial S_x / \partial x \\ \partial R_y / \partial y \\ -\partial S_y / \partial y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}$$

ここで、 v_g は群速度、 $g(N)$ は利得係数（吸収の場合は負）、 N はキャリア密度、 α_{in} は内部損失、 δ は屈折率の時間変化による波数離調、 \mathbf{C} は結合波行列、 f は自然放出光雑音を表す。上式の左辺は電界の時間変化、右辺第 1 項は周波数変化および増幅・減衰、第 2 項は 4 つの基本波の結合、第 3 項は空間伝搬、第 4 項はレーザー発振の立ち上がりに関連するランダムな自然放出光雑音を表す。一方、利得領域と吸収領域のキャリア密度の時間変化を表すレート方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{ed_{QW}} - \frac{N}{\tau_c} - v_g g(N)U + D\nabla^2 N \quad (\text{利得領域})$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{N}{\tau_{sa}} - v_g g(N)U + D\nabla^2 N \quad (\text{吸収領域})$$

ここで J は電流密度、 d_{QW} は活性層厚さ、 τ_c および τ_{sa} は各領域のキャリア寿命、 U は光子エネルギー密度（振幅の 2 乗に比例）、 D は拡散係数である。以上の式を連立することで、2 次元的に配置された利得領域および吸収領域をもつ PCSEL のパルス発振特性の解析が可能となった。本手法では、フォトニック結晶における光結合やその空間分布を正確に考慮しつつ、光とキャリアの相互作用の時間変化をも考慮しており、短パルス PCSEL の包括的な過渡応答解析手法の確立に成功した。本成果は、本プロジェクトの根本となる学理が確立出来たことを意味し、Physical Review B [T. Inoue, S. Noda et al., Physical Review B **99**, 035308 (2019)] にも論文が掲載され、学術的にも高い評価を得ることが出来た。

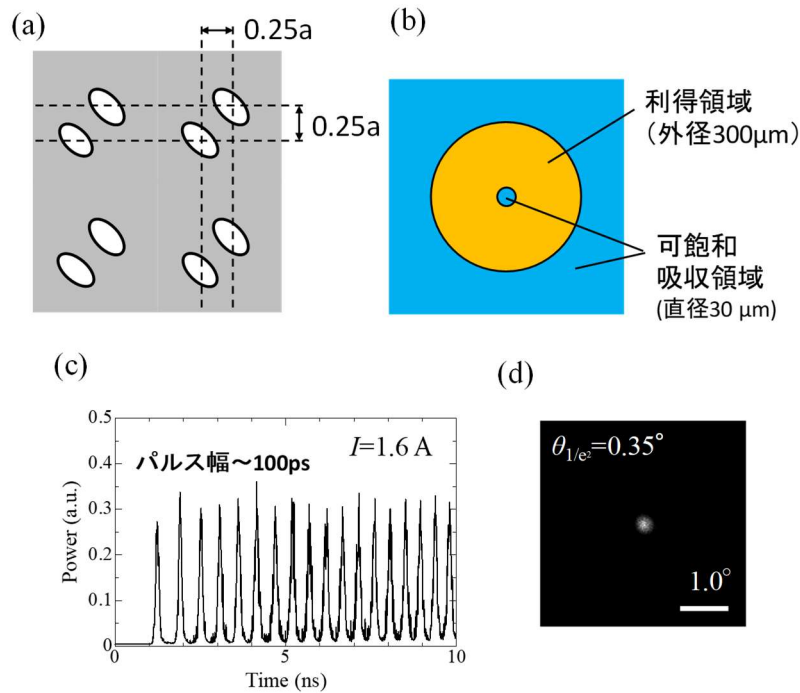
(A-3) デバイス試作、評価系の構築、および短パルス発振の実現 (2017~2018 年度)

前項で構築した解析手法を用いて、具体的な短パルス PCSEL の設計を行うとともに、短パルス PCSEL の形成法の検討・試作を行い、駆動・評価系の構築を通じて、短パルス動作の実験評価を行った。ここでは、可飽和吸収領域に多くの光子を分布させるためのフォトニック結晶構造として、図Ⅲ2-3-1-2(a)に示すように、単位格子内に 2 つの空孔を 1/4 周期だけ離して配置した二重格子構造を導入することを検討した。本構造においては、2 つの空孔のそれぞれで 180° 方向に回

折される波の位相差が $\lambda/2$ となり、消失性の干渉が引き起こされる。そのため、空間的に面内に光をフィードバックする効果を意図的に抑制することが可能となり、利得領域で発生した光を可飽和吸収領域により多く分布させることが可能になる。さらに、可飽和吸収効果をより増大させるため、可飽和吸収領域に多くの光子を分布させられる電極構造として、利得領域の中央にも可飽和吸収領域を配置した、図Ⅲ2-3-1-2(b)のようなドーナツ電極構造を採用した。本デバイス構造において、(A-2)で新たに開発した理論解析法により過渡応答特性を解析した結果、パルス幅 100 ps 未満、ピーク出力 2 W 程度の自励パルス発振が得られることが明らかとなった。

次に、短パルス発振の鍵となるフォトニック結晶構造である二重格子フォトニック結晶を有するデバイス技術の開発を行った。電子ビーム露光およびドライエッチングにより、GaAs 系材料に空孔を形成したのち、MOCVD 法による埋め込み再成長法を用いて空孔を埋め込むことで、二重格子構造を精密に作製する手法を確立した。さらに、作製した二重格子フォトニック結晶を有する PCSEL について、まずは可飽和吸収領域を導入せずに全面に電極を形成したデバイスを作製し、パルス電流駆動により評価した結果、500 μm という大面積においてコヒーレント動作を実現することに世界で初めて成功した。本成果は、Nature Materials 誌に掲載され[M. Yoshida, S. Noda et al., Nature Materials 18, 121-128 (2019)]、また、幸いにも同誌 2019 年 2 月号の表紙を飾るとともに、各種新聞雑誌等で報道され、国内・海外から大きな関心を集めた。

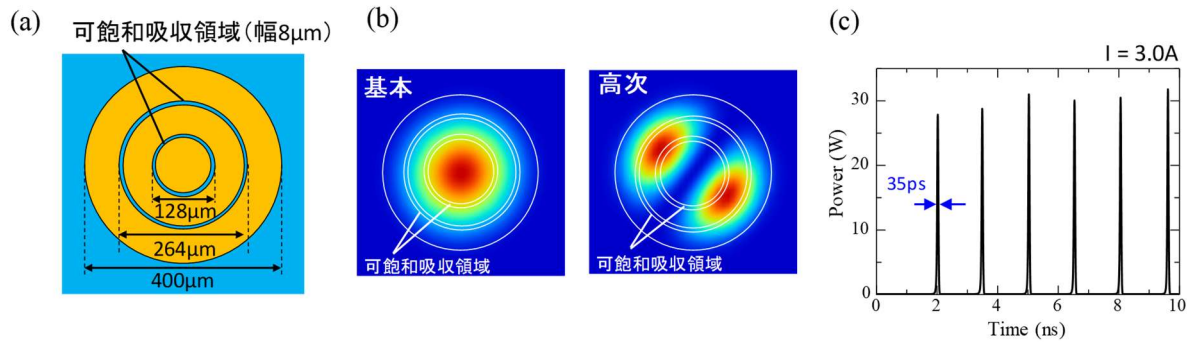
続いて、PCSEL からの短パルス発振の実現を目指し、可飽和吸収領域の形成プロセスの確立と短パルス PCSEL の試作を行い、短パルス駆動・評価系の構築並びに評価を行った。可飽和吸収領域を形成する手法として、電流注入のための p 側の電極（ドーナツ電極）を形成した後に、電極以外の領域に、p クラッド層および活性層まで水素イオンを注入する方法を検討した。ここで、水素イオンを注入した領域では、注入により結晶性が低下するためにキャリア寿命が短くなるとともに、キャリア p 型のドーパントが不活性化して電氣的に絶縁状態となることから、可飽和吸収領域かつ電流のアイソレーションの領域として機能させることができる。評価系としては、PCSEL からの発光をシングルモードファイバに結合させ、その時間応答を、立ち上がり時間 12 ps の InGaAs フォトディテクタおよび帯域幅 40 GHz のサンプリングオシロスコープにより測定することで、高い時間分解能でパルス動作を測定することが可能な系を構築した。作製したデバイスに、1.6 A の電流を注入し、過渡応答特性の測定を行った結果を、図Ⅲ2-3-1-2(c)に示す。測定結果より、パルス幅 \sim 100 ps、繰り返し周波数 2.3 GHz の、自励パルス発振動作が実現できている様子が見て取れる。加えて、作製したデバイスにおいて遠視野像を評価した結果、図Ⅲ2-3-1-2(d)に示すように、単峰状のビームが得られており、かつビーム拡がり角が 0.35° 程度と極めて小さいことが明らかとなった。以上より、高ビーム品質 ($M^2 < 2$) な状態を維持しながら、PCSEL から直接的に、パルス幅 100 ps 程度の短パルス発振を得ることに世界で初めて成功した。



図Ⅲ2-3-1-2. 短パルス PCSEL の初期実証 (a) 試作デバイスの二重格子フォトニック結晶構造の模式図 (b) 電極構造の模式図 (c) 時間応答波形の測定結果 (d) 遠視野像の測定結果

(A-4) デバイス構造の深化によるピーク出力 20W 級動作の実証 (2018~2019 年度)

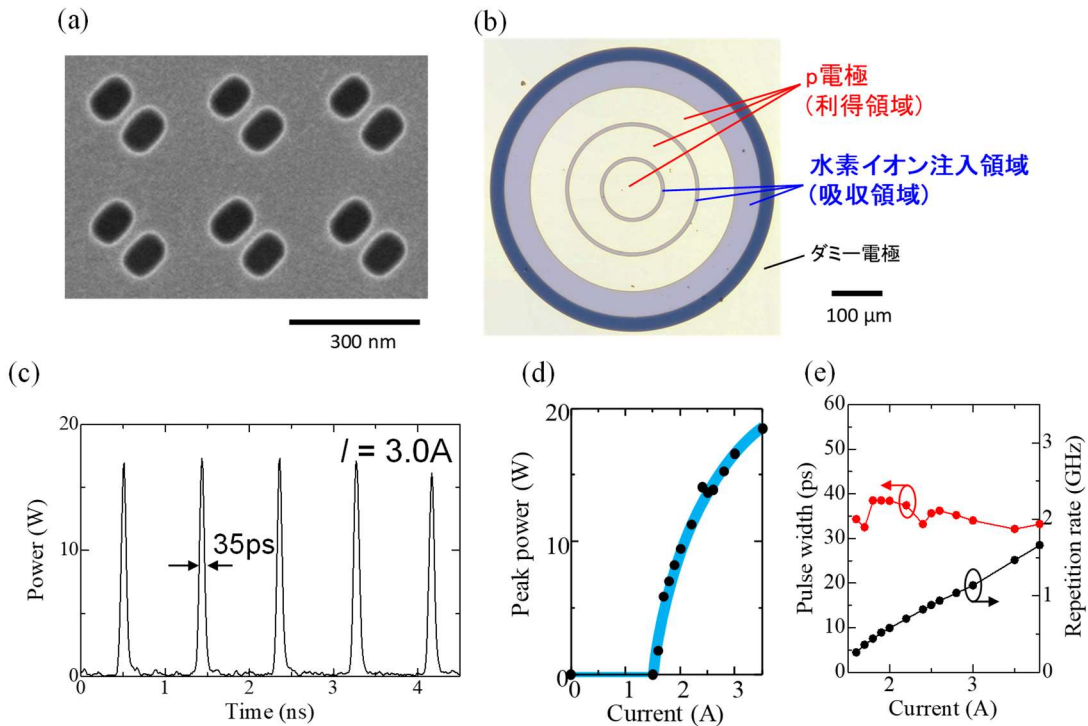
次に、(A-3)で得られた短パルス発振のピーク出力をさらに向上するべく、発振面積の拡大と、可飽和吸収領域の配置の改良を行った。具体的には、面積を拡大した際にも、基本モードでの安定したパルス発振を得ることができる可飽和吸収領域の配置として、図Ⅲ2-3-1-3(a)に示すような、利得領域の内部に円環状の可飽和吸収領域を配置した電極構造を考案した。同電極構造においては、図Ⅲ2-3-1-3(b)に示すように、双峰状の電磁界分布をもつ発振モード（高次モード）の電界が強い領域に、可飽和吸収領域が重なっているため、高次モードの発振損失が大きくなり、高次モード発振を抑制することが出来る。同時に、単峰上の電磁界分布をもつ基本モードに対しても、可飽和吸収効果を適切に強めることが出来るため、短パルス発振のピーク出力のさらなる向上が期待できる。上記で設計した二重格子フォトニック結晶構造と分割電極構造を有する直径 400 μm の短パルス PCSEL について、電流 3 A を注入した際に得られる過渡応答波形の解析結果を図Ⅲ2-3-1-3 (c)に示す。パルス幅 35 ps 程度の断続的なパルス発振が得られており、わずか 3 A の電流注入でピーク出力 30 W 級のパルス発振が得られることが数値計算により判明した。



図Ⅲ2-3-1-3. (a) 設計構造における利得領域と可飽和吸収領域の配置 (b) 基本モードおよび高次モードの光子分布 (c) 設計した短パルス PCSEL の過渡応答解析結果。

続いて、設計構造に基づき、利得領域と可飽和吸収領域を有する短パルス PCSEL の作製手法の確立を行った。二重格子フォトニック結晶 (図Ⅲ2-3-1-4(a)) は、(A-3) で確立した作製技術により作製を行った。また、利得領域と吸収領域の配置を決める裏面電極の顕微鏡写真を図Ⅲ2-3-1-4(b) に示す。利得領域の直径は 400 μm とし、円環状可飽和吸収領域の幅は 8 μm とした。さらに、フォトニック結晶の下部に多層反射膜 (DBR) を成長し、フォトニック結晶からの距離を適切に調整することで、下方に出射された光を上方へ強め合いの位相で反射させて、ピーク出力の増大を行った。

作製した直径 400 μm の短パルス PCSEL について、ストリークカメラを用いて過渡応答特性の評価を行った結果を図Ⅲ2-3-1-4(c) に示す。パルス幅 35 ps の断続的なパルス発振を得ることに成功した。注入電流を変えて、ピーク出力・パルス幅・繰返し周波数を測定した結果を図Ⅲ2-3-1-4(d) および図Ⅲ2-3-1-4(e) に示す。図Ⅲ2-3-1-4(d) より、わずか 3.5 A の電流注入で 20 W 級のピーク出力を実験的に得ることに成功した。また、図Ⅲ2-3-1-4(e) より、パルス幅 30~40 ps 程度を維持しつつ、繰返し周波数を 0.4~1.2 GHz の範囲で制御可能であることが確認出来た。以上の結果より、当初の最終目標 (ピーク出力 10 W 級、パルス幅 100 ps 未満) を達成したため、最終目標のピーク出力を 100 W 級へと一桁高く設定することとした。

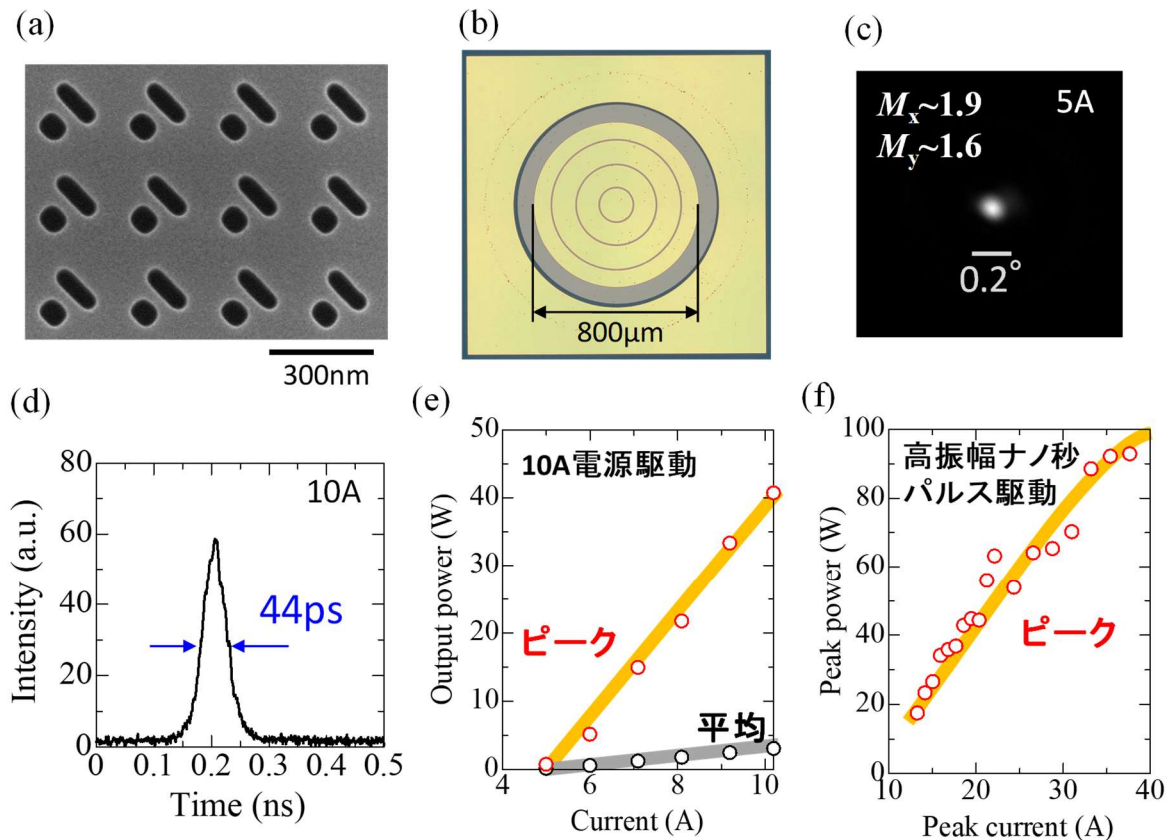


図Ⅲ2-3-1-4. (a) 作製した二重格子フォトニック結晶の電子顕微鏡写真 (b) 作製した直径 400 μm 級短パルス PCSEL の分割電極構造の光学顕微鏡写真 (c) ストリークカメラで測定した過渡応答特性 (d) 作製デバイスのピーク出力の電流値依存性 (e) 作製デバイスのパルス幅および繰返し周波数の電流値依存性

(A-5) 大面積短パルス PCSEL の開発によるピーク出力 100 W 級動作の実証 (2019~2020 年度)

(A-4)の実証結果を踏まえ、利得領域と吸収領域を有する短パルス PCSEL の直径をさらに拡大することにより、アップデートした最終目標（ピーク出力 100 W 級）の達成を目指した。具体的には、(i)発振面積の拡大とそれを可能とするフォトニック結晶の設計・作製、(ii)可飽和吸収効果を最大化するための分割電極構造の最適化の 2 点に取り組んだ。(i)に関しては、発振面積を直径 800 μm まで拡大しても安定な自励パルス発振を得ることができる、新たな二重格子フォトニック結晶構造の設計を行った[図Ⅲ2-3-1-5(a)]。本構造は、図Ⅲ2-3-1-4(a)の二重格子フォトニック結晶構造に対して、重心間距離 d ・各空孔の充填率 (FF)・楕円率をさらに細かく調整しており、4つの基本波のより完全な打ち消し合いが生じることで、大面積光源でも可飽和吸収領域に光が均一に広がることが期待される。また、(ii)に関しては、直径 800 μm の円電極の内部に、円環状の可飽和吸収領域を 3 つ配置した構造 (図Ⅲ2-3-1-5(b)) の設計を行った。本構造は、直径 800 μm という大きな面積においても、高次モードとの発振閾値差を維持しつつ、基本モードに対して十分な可飽和吸収効果を確保できる構造である。同構造を作製し、基礎的な発振特性の評価を行った結果、図Ⅲ2-3-1-5(c)に示すように、単峰で狭いビーム拡がり角 ($M^2 < 2$) の遠視野像が得られ、直径 800 μm という大面積での単一モード発振が確認出来た。また、同デバイスの過渡応答特性の評価を行った結果、図Ⅲ2-3-1-5(d)に示すように、パルス幅 40 ps 程度の短パルス発振が得られていることを確認した。次に、注入電流を変化させて得られた短パルスのピーク出力の測定を行った。はじめに、最大電流振幅 10 A のパルス電源で光源を駆動した際の、ピーク出力およ

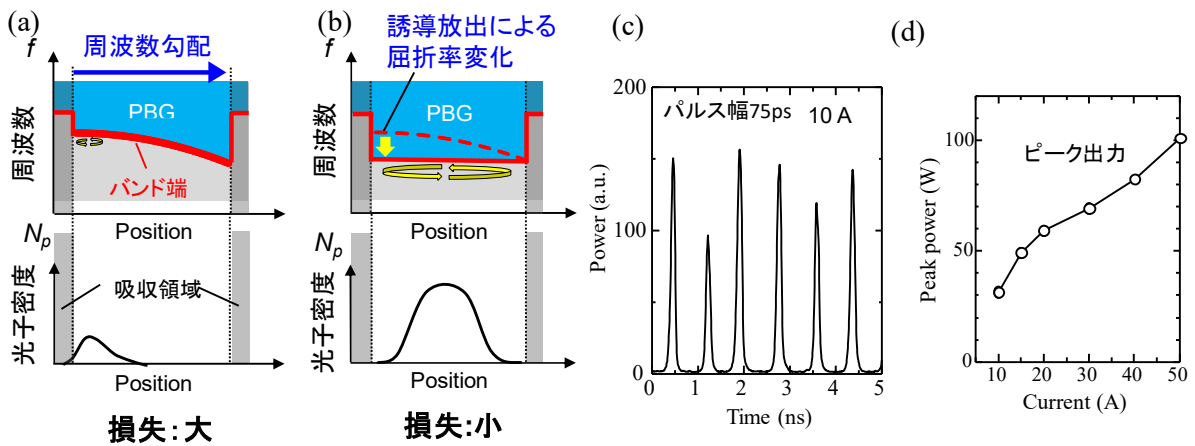
びの平均出力（電流注入時間の平均）の結果を図Ⅲ2-3-1-5 (e)に示す。10 Aの電流注入で40 W級のピーク出力（3~4 Wの平均出力）が得られた。次に、作製光源を高振幅ナノ秒パルス電源（パルス幅 1.5 ns）で駆動することで、さらに高いピーク出力の単一（もしくは少数）パルスを発生させて過渡応答特性の評価を行った。得られたピーク出力の測定結果を図Ⅲ2-3-1-5(f)に示す。注入電流の増加とともにピーク出力が増大し、36 Aの振幅の際に、ピーク出力 100 W級、パルス幅 30 ps 程度のパルス発振が得られた。以上の結果より、大面積短パルス PCSEL において、一桁高く設定した最終目標（ピーク出力 100 W 級、パルス幅 10~100 ps、 $M^2 \sim 2$ ）を達成した。さらに、最適化された直径 1 mm の光源では、300 W 以上のピーク出力が得られることを数値計算により明らかにした。なお、(A-4) および (A-5) の項目に記載した、可飽和吸収領域を用いた短パルス・高ピーク出力 PCSEL の開発に関する成果は、2021 年 3 月に Nature Photonics 誌に掲載され、その概念図が同 4 月号の表紙に掲載されるなど、国内・海外から大きな関心を集めた[R. Morita, T. Inoue, S. Noda et al., Nature Photonics 15, 311-318 (2021)]。また、NEDO からプレス発表をして頂いた [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101415.html]。



図Ⅲ2-3-1-5. (a) 大面積デバイス用に作製した二重格子フォトニック結晶の電子顕微鏡写真 (b) 作製した直径 800 μm 級短パルス PCSEL の分割電極構造の光学顕微鏡写真 (c) 遠視野像の測定結果 (d) ストリークカメラで測定した過渡応答特性 (e) (f) 作製デバイスのピーク出力および平均出力の注入電流値依存性。

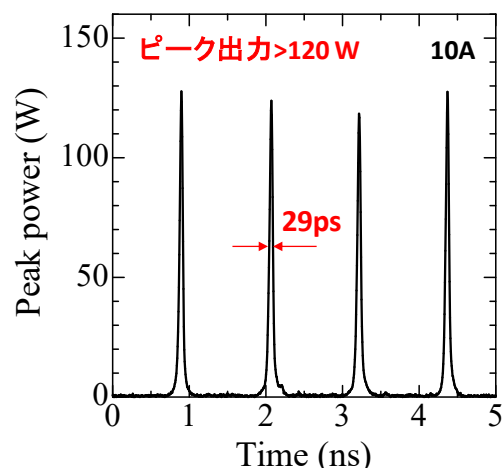
また、上記の可飽和吸収領域を用いた短パルス・高ピーク出力 PCSEL の開発と並行して、可飽和吸収領域を導入せずとも、フォトニック結晶面内に周波数勾配を導入するだけで、PCSEL の 100 W 級短パルス発振が実現可能であるという、当初予想していなかった興味深い結果をも見出すこ

とに成功した。周波数勾配を導入した PCSEL では、面内の一部がフォトニックバンドギャップ (PBG) として働くため、発振開始時には光が端に局在して損失の大きい (低 Q 値) 状態となる (図Ⅲ2-3-1-6(a))。一方、発振後は誘導放出に伴う周波数変化により PBG が消失し、面全体での低損失な発振 (高 Q 値状態) に移行するため、自発的に Q スwitching と等価な動作が生じ、短パルス・高ピーク出力発振が得られる (図Ⅲ2-3-1-6(b))。この手法では、可飽和吸収領域を導入する水素イオン注入の工程を必要としないため、作製プロセスの簡素化と内部損失の低減による効率向上が期待される。以上を踏まえ、面内で 130 GHz 程度の周波数勾配が存在する直径 1 mm の二重格子 PCSEL を作製し、注入電流 10 A にて過渡応答特性を測定した結果を図Ⅲ2-3-1-6(c) に示す。パルス幅 75 ps 程度の自励パルス発振が得られており、可飽和吸収効果を用いないデバイスにおいて、短パルス発振を得ることに成功した。さらに、高振幅短パルス電源で駆動し、ピーク出力の電流値依存性を測定した結果を図Ⅲ2-3-1-6(d) に示す。最大でピーク出力 100 W 級、パルス幅 40 ps 程度の短パルス発振が得られており、周波数勾配を導入するという新しい原理によっても、一桁高く設定した最終目標 (ピーク出力 100 W 級) を達成することに成功した。



図Ⅲ2-3-1-6. (a) (b) 周波数勾配を導入した PCSEL における発振前後の面内周波数分布および光子分布の変化 (c) 作製した周波数勾配型 PCSEL の過渡応答特性の測定結果 (d) 作製デバイスのピーク出力の電流値依存性。

以上の研究開発により、アップデートした最終目標は全て達成されたが、その後も、短パルス PCSEL のさらなる高ピーク出力化に向けた研究開発を継続している。具体的には、可飽和吸収領域を利用した短パルス化の手法と、周波数勾配を利用した短パルス化の手法を組み合わせることで、より大きな Q スイッチング効果を得て、ピーク出力をさらに増大することを目指した。実際に、円環状可飽和吸収領域と周波数勾配を導入した直径 800 μm のデバイスを作製し、その過渡応答特性を評価した結果、図Ⅲ2-3-1-7 に示すように、僅か 10A の電流注入にてピーク出力 120 W 超（平均出力 3 W 超）を得ることに成功した。このときに得られたパルス幅は 30 ps 未満であり、ビーム拡がり角 ($1/e^2$ 幅) も 0.15° 未満 ($M^2 < 2$) と高いビーム品質が得られた。



図Ⅲ2-3-1-7. 可飽和吸収領域と周波数勾配を導入した PCSEL の過渡応答特性

(A-6) PCSEL の短パルス化のまとめ（最終目標の達成度）

以上、(A-1) から (A-5) に記載した通り、当初の最終目標（ピーク出力：10 W 級（平均出力数 W 級）、パルス幅：サブナノ秒）のみならず、その目標を 1 桁向上させたアップデート目標（ピーク出力：当初目標より 1 桁大きい 100 W 級（平均出力：W 級～10 W 級）、パルス幅：当初目標より 1 桁短い 10～100 ps、ビーム品質： $M^2 \sim 2$ ）についても、全ての指標において目標を達成することが出来た。

(B) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の短波長化

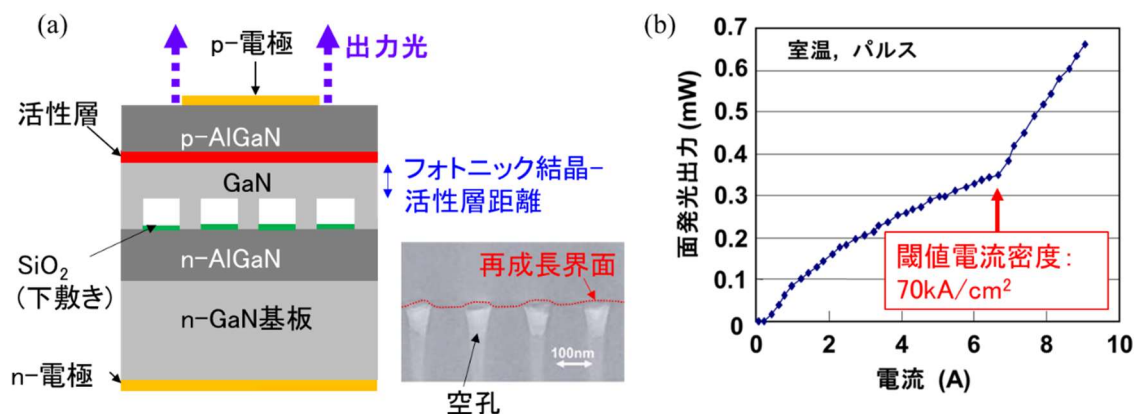
本項目では、短波長・高ビーム品質・高出力レーザー光源の開発を目指し、PCSEL の短波長化に取り組んだ。具体的には、PCSEL を構成する材料を窒化ガリウム（GaN）系とし、青紫色から青色帯における高ビーム品質・ワット級の動作を目標に開発を進めた。具体的な研究開発の工程を以下に示す。

- (B-1) 低閾値電流密度・高出力動作に向けた課題の抽出（2016 年度）
- (B-2) 低閾値電流密度化に向けたデバイス設計（2016 年度）
- (B-3) フォトニック結晶形成技術の構築（2016～2017 年度）
- (B-4) GaN 系 PCSEL のデバイス化：低閾値電流密度化・高出力化の実証（2018 年度）
- (B-5) 非対称フォトニック結晶の導入（2019 年度）
- (B-6) ワット級・高ビーム品質動作の実証（2019～2020 年度）

上記の工程に従って研究開発を進めた結果、最終目標である短波長・高ビーム品質・ワット級発振を実証することに成功した。以下に、各開発項目で得られた成果の詳細を記載する。

(B-1) 低閾値電流密度・高出力動作に向けた課題の抽出 (2016年度)

本 NEDO プロジェクト開始前に初期的なレーザー発振動作の実現に成功していた GaN 系フォトニック結晶レーザーにおいては、図Ⅲ2-3-1-8(b)のように、閾値電流密度が $\sim 67 \text{ kA/cm}^2$ と非常に高く、また、光出力も 1 mW 以下と低い状況であり、これらの改善が課題であった。そこでまず、閾値電流密度ならびに光出力に関して分析を行い、高出力動作に向けた具体的な課題を抽出し、解決指針を構築することから検討を始めた。



図Ⅲ2-3-1-8. (a) プロジェクト開始前の GaN 系 PCSEL の構造 (b) 電流-光出力特性

まず、閾値電流密度が高い原因について、課題の抽出を行った。閾値電流密度が高い一因として、フォトニック結晶共振器の損失が大きいことが考えられる。そこで、 $940\text{--}980 \text{ nm}$ 波長域のフォトニック結晶レーザーで培った解析技術をもとに、GaN 系 PCSEL に対する 3 次元結合波理論を独自に開発し、共振器損失の解析を行った。この結果、初期実証デバイス ($100 \mu\text{m}$ 角) では面内損失が $\sim 100 \text{ cm}^{-1}$ と見積もられることが分かった。これに加えて、図Ⅲ2-3-1-8(a)の挿入図に示すように、初期デバイスは、 SiO_2 層を下敷きにして、空孔が埋まらないように成長を行っていたが、これにより、不均一性が大きくなり、散乱損失をさらに増大させていたと考えられる。また、併せて再成長界面やその上部の活性層への Si 不純物の混入や界面の乱れによる欠陥形成も、吸収損失のさらなる増大要因になっていたと考えられる。これらが、共振器損失に加わるため、全体として極めて大きな損失が生じていたと考えられる。

さらに、出力に関しても課題を抽出した。初期のデバイスでは、GaN 系材料での PCSEL 動作を実証することに主眼をおいていたため、図Ⅲ2-3-1-8(a)のように、p 側電極により出射光が遮られ、共振器内の光のごく一部のみしか外部に取り出すことが出来ない状況であった。このことに加えて、対称性の高い円形のフォトニック結晶構造であったために、面垂直方向への回折において消失性の干渉が生じ、その結果として上部への光取り出し効果が弱くなっていたことも、光出力を制限する要因であった。

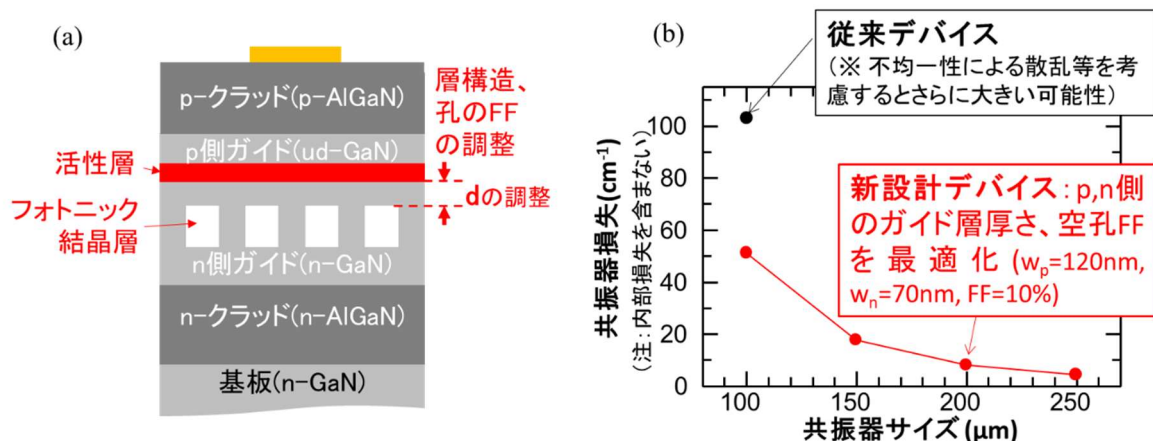
以上を踏まえて、低閾値電流密度化に向けて、フォトニック結晶による 1 次元・2 次元回折効果を十分に高めて共振効果を得つつ、共振効果に応じたデバイスサイズとすることで共振器損失 (面内漏れ損失) を抑制することとした。さらに、 SiO_2 下敷き無しで空孔を形成し、フォトニック結晶の均一性や活性層近傍の品質を向上し、不要な散乱・吸収損失を低減することをも検討し

た。また、高出力化に向けては、出射光を遮らない窓状電極の採用、および、面垂直方向への放射係数の増大のために格子点形状に非対称性を導入すること等、を検討した。

(B-2) 低閾値電流密度化に向けたデバイス設計 (2016 年度)

まず、前述した独自の 3 次元結合波理論を用いて、共振器損失を抑制可能なデバイス構造の探索を行った。プロジェクト開始前のデバイスにおいては、 SiO_2 下敷きを用いた空孔埋め込み等に起因して、活性層とフォトニック結晶層の距離 (図Ⅲ2-3-1-9(a)) が 150 nm と比較的大きくなっていて、フォトニック結晶効果を低下させ、結果として面内漏れ損失を増加させる原因の 1 つになっていたと考えた。そこで、フォトニック結晶-活性層間距離の調整を行うとともに、活性層およびフォトニック結晶の両側のガイド層 (GaN) の厚さ、さらにはフォトニック結晶空孔の充填率 (FF) も併せて調整することで、フォトニック結晶層への光の分布割合を増大させ、それらを総合して、よりフォトニック結晶効果を強めることを検討した。

図Ⅲ2-3-1-9(b)には、フォトニック結晶-活性層間の距離を、初期デバイスの 150 nm から 60 nm 程度まで近づけ、かつ、ガイド層の厚さを p 側、n 側ともに微調整した際の、共振器損失 (面内漏れ損失) の解析結果を示している。また、その共振器サイズ依存性も併せて示している。新設計デバイスにおいては共振器損失が、初期のデバイスと比べて大幅に低減できている様子が見て取れ、共振器サイズを $\sim 150 \mu\text{m}$ 以上とすることで、従来デバイスと比較して、共振器損失を 1/10 以下となる 10 cm^{-1} 程度以下にまで抑制できることが判明した。

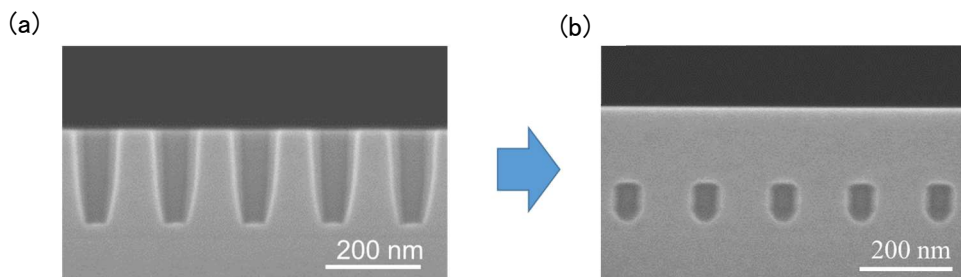


図Ⅲ2-3-1-9. GaN 系 PCSEL の共振器損失を低減するためのデバイス層構造の設計
(a) 層構造の概要 (b) 共振器損失の解析結果

(B-3) フォトニック結晶形成技術の構築 (2016~2017 年度)

前節において述べたように、フォトニック結晶と活性層の距離を近接させつつ、共振器サイズを適切に設定することにより、十分なフォトニック結晶効果を得ることが出来ることが判明した。そこで、続いてフォトニック結晶の形成技術の開発を検討した。ここで、(B-1) 節で述べたように、空孔を MOCVD 成長により形成する際に、従来は、 SiO_2 を空孔下敷きにしていたが、このことが構造の不均一や、不純物の混入の要因となっていた。この点を考慮して、本プロジェクトにおいては、 SiO_2 下敷き無しで、適切な空孔を埋め込む手法について、検討を行った。

まず、フォトニック結晶構造を、電子ビーム描画およびドライエッチングにより形成する手法について検討を行った。ドライエッチング法としては、誘導結合プラズマを用いた反応性イオンエッチングを用い、ガス種 (Cl_2 、 BCl_3 、Ar) と混合比率、圧力、およびプラズマ生成電力 (ICP 電力) とイオン加速電力 (BIAS 電力) 等のエッチングパラメータを調整することで、良好な垂直性をもつエッチングを、GaN 系材料に対して大面積で均一に行うことが可能となった (図Ⅲ2-3-1-10(a))。次に、このような構造に対して、空孔を埋め込む手法について、詳細に検討した。まず、選択的に n-GaN の {10-11} 面を成長させることによって、空孔を残したままで再成長が可能であることを見出した。選択成長後の表面は、{1-101} 面に起因して、錘状の凹凸をもつ表面形状となるため、この凹凸を平坦化するように成長条件を調整した。図Ⅲ2-3-1-10(b) に平坦化後の SEM 像を示す。平坦化された表面は、原子間力顕微鏡 (AFM) による表面観察で、 $R_a \sim 0.15 \text{ nm}$ と良好な平坦性をもつことが分かった。空孔の均一性は非常に良好であり、従来の空孔形成法で課題であった散乱損失は大きく低減されるものと考えられる。また、活性層とフォトニック結晶層の間隔に関しても、結晶成長の条件を調整することで、プロジェクト開始前の 150 nm もよりも十分に小さくできることも確認した。

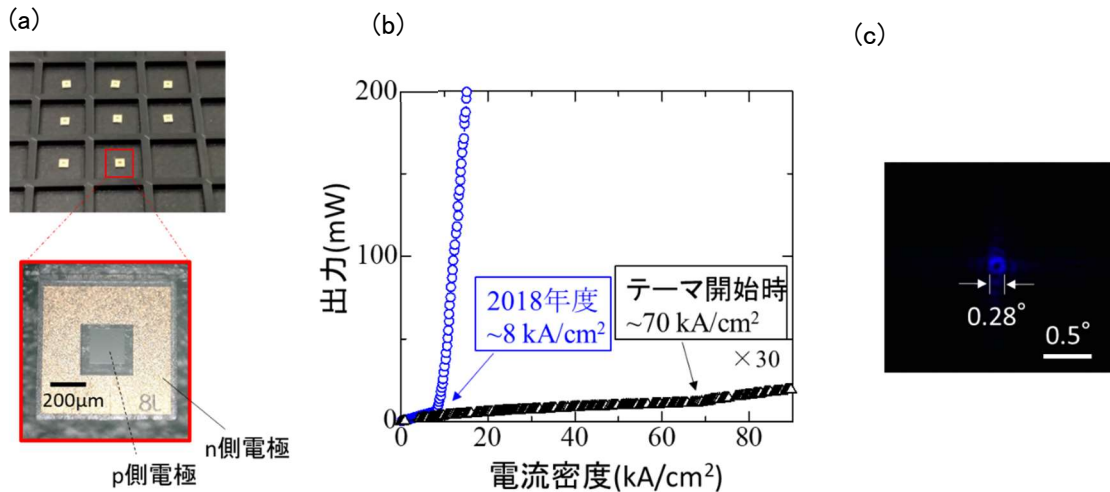


図Ⅲ2-3-1-10. フォトニック結晶の断面 SEM 像 (a)ドライエッチング後 (b) MOCVD による再成長後

(B-4) GaN 系 PCSEL のデバイス化：低閾値電流密度化・高出力化の実証 (2018 年度)

以上 (B-1) ~ (B-3) にて、プロジェクト開始前の課題の抽出を通し、共振器損失低減構造の設計、新たな空孔形成法の開発に成功した。ここで、いよいよ電流注入型 PCSEL のデバイス作製に取り組んだ。まず、n-GaN 基板の上に n 型クラッド層、n 型光ガイド層を MOCVD 装置で結晶成長した。成長した基板を一度装置から取り出し、電子ビーム描画およびドライエッチングにより正方形・単一格子フォトニック結晶を形成し、再び MOCVD 装置で、前述の新たに開発した空孔形成法を用いて、フォトニック結晶を GaN 膜中に埋め込み、その後、活性層、p 側光ガイド層、p 型クラッド層、p 型コンタクト層を順に成長した。続いて、成長した基板に電流注入するために電極を形成した。このとき、基板側から光を効率よく取り出すために、n 電極には窓構造を採用した。作製したデバイスの写真を図Ⅲ2-3-1-11(a) に示す。デバイスは n-GaN 基板を上にして置かれており、GaN は可視光に対し透明であるため、p 電極が基板越しに見えている。この窓を通して、レーザー光が取り出される。作製したデバイスの電流-光出力特性を測定した結果を図Ⅲ2-3-1-11(b) に示す。同図に示したとおり、閾値電流密度はプロジェクト開始前の約 $1/9$ である $\sim 8 \text{ kA/cm}^2$ まで低減され、低閾値電流密度化に成功した。出力は 200 mW 以上のピーク出力を得ることに成功した。また、図Ⅲ2-3-1-11(c) に示す遠視野像からは、ビーム拡がり 0.28° の極めて狭いドーナツ状の

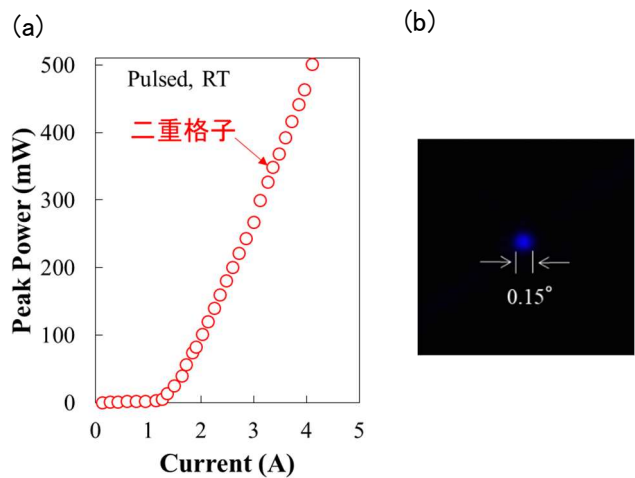
ビームが観測された。この結果は、閾値電流密度の大幅な低減と、出力の大幅な増大に成功したことを意味するだけでなく、これまで GaN 系 PCSEL 困難であった、正方格子における 2 次元コヒーレント発振に初めて成功したことを示す[注：プロジェクト開始前は、構造揺らぎゆえに正方格子では 2 次元コヒーレント発振が得られず、2 次元結合の強い三角格子のみ狭い遠視野像が得られていた]。遠視野像がドーナツ状であることは、配置したフォトニック結晶の格子点構造の対称性に起因しており、電界分布の影響で面垂直方向への回折が消失性の干渉となっているためである。この段階で、中間目標として掲げていた、GaN 系 PCSEL の低閾値電流密度化の実証を達成した。



図Ⅲ2-3-1-11. (a) 作製したデバイスの写真 (b) 電流密度-光出力特性 (c) 遠視野像

(B-5) 非対称フォトニック結晶の導入 (2019 年度)

本研究開発ステップでは、最終目標である高ビーム品質・ワット級動作に向け、まずフォトニック結晶への非対称性の導入に取り組んだ。GaN のフォトニック結晶はその結晶構造から対称的な六角柱構造を取ることが判明したため、1 つの空孔で非対称性を導入することは難しい。そこで、GaAs 系 PCSEL で採用が進められている二重格子フォトニック結晶を導入することとし、まず、二重格子フォトニック結晶の設計に取り組んだ。ここでは、詳細な設計の説明は割愛するが、二重格子の空孔はそれぞれ長六角柱と正六角柱で構成され、これまでの単一格子フォトニック結晶から 1 次元・2 次元結合係数の大きさを大きく変動させることなく、放射係数（面垂直方向への回折）を向上させる構造を探索した。作製に当たり、二重格子フォトニック結晶は 2 つの空孔間距離が近く、近接効果により空孔が繋がらないよう、電子ビーム描画の調整を行った上で、フォトニック結晶の形成に取り組んだ。また、空孔形成のメカニズム



図Ⅲ2-3-1-12. (a) 電流-光出力特性 (b) 遠視野像

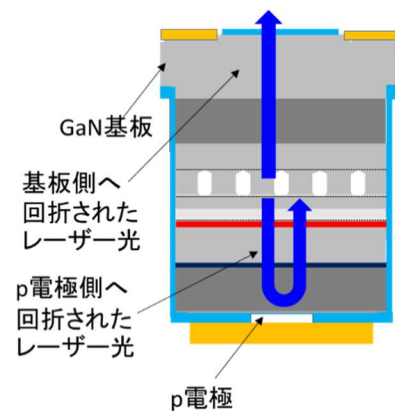
に基づき、二重格子フォトニック結晶の GaN 結晶面に対する方向を工夫した。作製したデバイスの電流-光出力特性を図Ⅲ2-3-1-12(a)に示す。フォトニック結晶～活性層の成長条件をさらに詰めることで、放射係数は増加したにも関わらず、閾値電流密度は 2018 年度と比較しさらに低減され、二重格子フォトニック結晶を導入しても 5 kA/cm^2 以下であった。二重格子フォトニック結晶の採用により、スロープ効率は向上し、ピーク出力で 500 mW を得ることに成功した。さらに、格子点への非対称性導入の効果により、ビーム形状は単峰形状となり、さらに広がり角の狭い ($\sim 0.15^\circ$) のビームが得られた (図Ⅲ2-3-1-12(b))。

(B-6) ワット級・高ビーム品質動作の実証 (2019～2020 年度)

非対称性フォトニック結晶の導入に成功し、最終目標であるワット級出力に向け、2019 年度から 2020 年度にかけ、さらなる高効率化を進めた。具体的には、内部損失の低減と電極反射光の位相調整を検討した。以下にそれぞれ記述していく。

まず、内部損失の低減について検討を進めた。PCSEL の損失には、(a)放射係数 α_v 、(b)面内損失 $\alpha_{//}$ 、(c) 内部損失 α_i があり、(b)、(c)の損失を極力低減させ、(a)のレーザー出射に関わる損失を適切に設定することが、さらなる高出力・高効率化につながる。内部損失 α_i は主に材料による光吸収に起因し、GaN 系半導体レーザーにおいては、p 型層での吸収が支配的であると考えられる。そのため、p 型層 (p-AlGaIn 電子ブロック層/p-AlGaIn クラッド層/p-GaN コンタクト層) に分布する光を低減すべく、n 側および p 側の光ガイド層厚さを調整した構造を新たに設計した。新たに設計したエピ構造の端面出射型レーザーを作製することにより内部損失を評価したところ、 $\alpha_i \sim 4\text{-}5 \text{ cm}^{-1}$ まで低減可能なことを確認した。

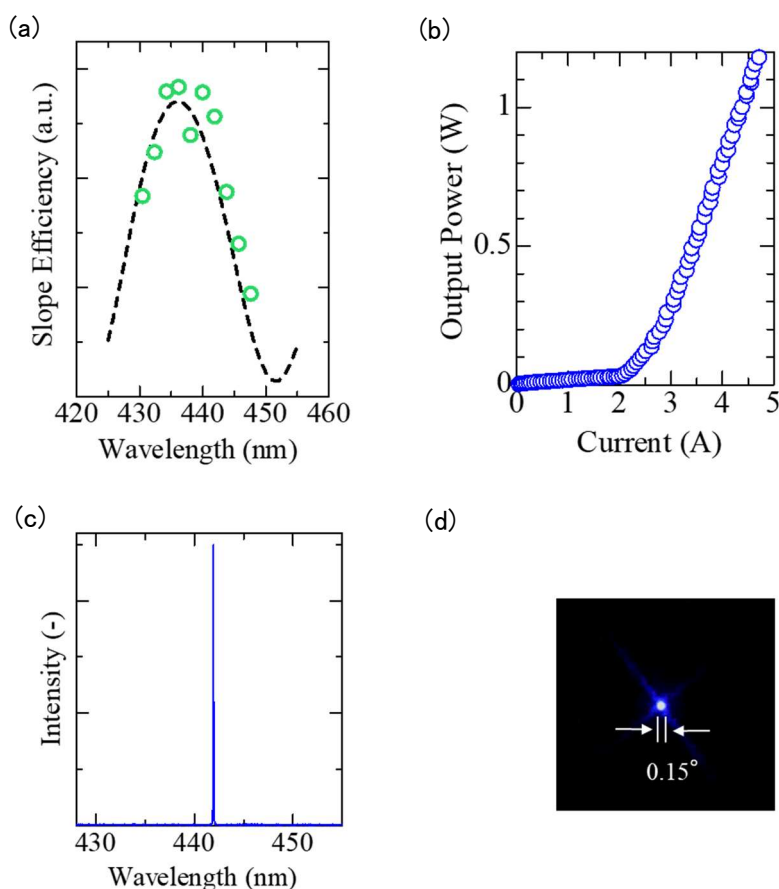
次に、電極反射光の干渉について検討を進めた。フォトニック結晶の回折によりレーザー光は図Ⅲ2-3-1-13 における上下方向、すなわち、直接基板側へ出射されるレーザー光と、p 電極側へ出射されるレーザー光の 2 つの成分に分かれる。p 電極側へ出射されたレーザー光は p 電極で反射され、直接基板側へ出射されたレーザー光と干渉する。このときフォトニック結晶から p 電極までの距離の往復分が光路長差となり、位相差が生じる。両光を強め合いの条件で干渉させるため、基板面内に発振波長 (= フォトニック結晶の格子定数) を変化させた複数の光源を準備し、デバイス化した。このとき、エピ構造は前述の内部損失の低減された構造を採用し、



図Ⅲ2-3-1-13. GaN 系 PCSEL のレーザー出射方向を示す模式図。p 電極で反射したレーザー光が干渉する

フォトニック結晶には高出力化が期待できる二重格子フォトニック結晶を配置した。作製したデバイスの、発振波長に対するスロープ効率の変化を図Ⅲ2-3-1-14(a)に示す。発振波長によりスロープ効率が徐々に変化しており、位相差により理論通りスロープ効率が増減する様子が見てとれた。強め合いの干渉であった、共振波長 $\sim 442 \text{ nm}$ の電流-光出力特性を図Ⅲ2-3-1-14(b)に、発振スペクトルを図Ⅲ2-3-1-14(c)に示す。これまで培ってきた要素技術、および、干渉の位相調整の効果により、発振波長 $\sim 442 \text{ nm}$ の青色帯域において、最終目標である 1 W を超える出力を得ることに成功した。続いて、発振時の遠視野像を測定した結果を図Ⅲ2-3-1-14(d)に示す。広がり角

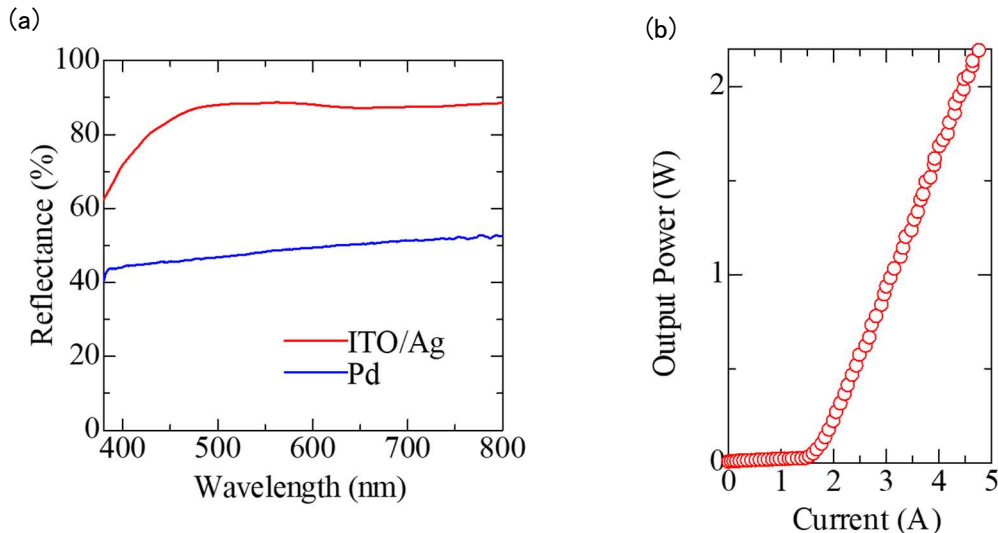
0.15° の極めて狭い出射角の単峰状のビーム形状が観測された。以上により、青色帯・ワット級かつ高ビーム品質動作であることが確認され、この時点で最終目標を達成した。



図Ⅲ2-3-1-14. (a)発振波長とスロープ効率の関係 (b)電流-光出力特性 (c)発振スペクトル (d)遠視野像

最後に、さらなる高出力化を目指し、電極の高反射率化について検討した。これまで p 電極には仕事関数が大きく、p 型 GaN との接触抵抗を低減させやすい Pd 電極を採用してきた。GaN/Pd における反射率は 400 nm 帯で 40-45%程度であり、電極側へ放射されたレーザー光の半分以上を無駄にしている。そこで、高反射電極の検討を進めた。GaAs 系 PCSEL には、反射層として AlGaAs/GaAs 半導体 DBR が採用されているが、GaN 系において、p 型半導体 DBR の形成は物理的・技術的に難易度が高い。そこで、透明導電体/高反射膜の構造で反射率を向上させることを考えた。透明導電体には可視光に対して透過率の高い酸化インジウムスズ (ITO) を、高反射膜には銀 (Ag) をそれぞれ採用することを検討した。ITO の成膜条件、および、焼成条件 (温度、時間、雰囲気) を最適化していくことで、固有接触抵抗は $10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$ 台まで低減され、十分に低い接触抵抗を得ることに成功した。また、光学特性についても評価したところ、青色帯で吸収係数 $\alpha_{\text{ITO}} \sim 2600 \text{ cm}^{-1}$ と、一般的に GaN 系半導体レーザーに報告されている値に近い値が得られ、透明性に問題ないことを確認した (ITO は結晶性、組成、酸素欠損等により大きく光学特性が変化する)。図Ⅲ2-3-1-15(a) に従来採用してきた Pd 電極と、今回新たに検討した ITO/Ag 電極の GaN 媒質中の反射率を比較し

た。同図に示したとおり、反射率は～45%から～80%に向上し、出力の向上が期待できる。そこで、実際にデバイスへの採用を進めた。図Ⅲ2-3-1-15(b)に電流-光出力特性を示す。電極反射の効果で、スロープ効率はPd電極と比較しておよそ30%向上し、最終目標をさらに超え、2 W級の発振が確認された。



図Ⅲ2-3-1-15. (a)電極の反射率 (b)ITO/Ag 高反射電極を採用したデバイスの電流-光出力特性

(B-7) PCSEL の短波長化のまとめ (最終目標の達成度)

以上、(B-1)から(B-6)に記載した通り、研究開発を推進した。これにより、 $M^2 \sim 1$ 、出力 > 1 W のレーザー特性を得ることに成功し、最終目標：GaN系PCSELにて高ビーム品質かつワット級動作の実現を達成した。

以上の成果は、フォトリック結晶レーザーの短パルス化の成果と併せて、オンラインで日本語版、英語版の両方で、国内外に向けて発信されている。

日本語版：<https://www.youtube.com/watch?v=XeAqItoo0wQ>

英語版：<https://www.youtube.com/watch?v=r4hMVCyhhlg>

(6) 実用化・事業化への取り組み

(A) フォトリック結晶レーザーの短パルス化

本サブテーマにおいては、既に記載した通り、フォトリック結晶レーザーの短パルス化の研究開発を行い、アップデートした最終目標（ピーク出力 100 W 級、パルス幅 10~100 ps）を全て達成した。上記の特性は、自動運転等で必須の LiDAR 技術において、アイセーフ条件を満たしつつ、長距離測距・高分解能な測距を可能とするため、次世代の遠距離リモートセンシング用光源としても最適な光源といえる。さらに、光源のピーク出力が kW 級に達すれば、レーザーのエネルギー密度 $0.2 \sim 2$ J/cm² に相当し、多くの材料の加工閾値を超えるため、半導体レーザー単体での直接

微細加工・マーキングも実現可能になると期待される。そこで、これらの分野への展開を見据え、本プロジェクトでは、光源開発と並行して、様々な光源企業との連携を開始した。具体的には、光源製造企業やそのユーザー企業（LiDAR メーカー等）との話し合いを通じて、パルス幅 100 ps 未満の短パルスフォトニック結晶レーザーの具体的な応用先について検討を行うとともに、連携企業へのフォトニック結晶レーザー作製技術に関する技術移転をすでに開始している。以上の詳細は、IV-2-3-1 節に記載しているので参考にして頂くと幸いです。

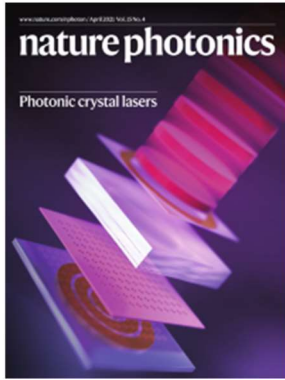
(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化

本サブテーマにおいては、フォトニック結晶レーザーの短波長化を目指し、最終目標であった GaN 系フォトニック結晶レーザーの高ビーム品質かつワット級動作の実現に成功した。本レーザーは、ファイバーレーザーでは発振させることができない青色波長帯域で高出力・高ビーム品質化が可能であり、非常に魅力的なデバイスである。本プロジェクトでは、スタンレー電気社員を京都大学に常駐させ共同研究を進めることで、密な連携から光源開発を加速化させると同時に、円滑に技術移管をしてきた。また、応用展開に向け、ユーザー企業（スタンレー電気社内含む）との議論も開始してきた。これらの議論の中から、センシング分野、照明分野、加工分野等への展開が期待できることがわかり、関連企業からは、すでにサンプルの提供も求められている。以上の、社会実装に向けた戦略の詳細については、IV-2-3-1 節に記載しているので参考にして頂くと幸いです。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財権活動の実績および、講演等の成果普及活動については、添付資料の表に記載している。なかでも、二重格子フォトニック結晶のコンセプトの実証に関する研究成果と、短パルスフォトニック結晶レーザーの実現に関する研究成果については、それぞれが Nature Materials 2019 年 2 月号および Nature Photonics 2021 年 4 月号に掲載され、それぞれ雑誌の表紙に取り上げられた（図Ⅲ2-3-1-16(a)）。また、これらの成果については、京都大学と NEDO が共同でプレスリリースを行い、各種メディアで報道されるなど、大きな注目を集めた。また、フォトニック結晶レーザー技術のより一層の普及のため、OPIE' 18 および OPIE' 21 にて、フォトニック結晶レーザーの展示およびデモンストレーションを行い、フォトニック結晶レーザーが、小型・コンパクトで、非常に高いビーム品質（レンズ無しでも、ビーム拡がりほとんどない）でありながら、短パルス化・短波長化が実現したこと等を発信した（図Ⅲ2-3-1-16(b)）。また、フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化に関する研究開発に関して、日本語版および英語版の動画を作成し、NEDO Youtube Channel で公開することで、一般の方に対しても広く成果の普及を行った。

(a)



(b)



図Ⅲ2-3-1-16. 成果普及活動の例 (a)著名学術雑誌の表紙掲載 (b) OPIE'21 展示の様子

2-3-2. 「高品質 AlN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LD の研究開発」 (実施先：理化学研究所、山口大学)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

我が国のものづくりにおける最重要ツールであるレーザー加工において、先端素材を用いた高付加価値製品の多品種生産を目指すものづくり業界から、次世代の加工システム用レーザー光源としてレーザーの高出力化、短波長化、短パルス化、ビームの高密度化、小型軽量化、低消費電力化、低コスト化が要望されている。特にレーザー加工の本質を考えた場合、従来と異なる原理に基づいた次世代のレーザー加工技術、すなわち、高い光子エネルギーによるレーザー加工（深紫外・短波長レーザー加工）が重要視されている。次世代レーザー加工システムのコンパクト化・低消費電力化・低コスト化を実現するためには、小型で、高効率、高出力短パルス動作が可能な半導体レーザーダイオード (LD) で現行レーザー光源を置き換えることが要となる。

本研究開発は、直接遷移型半導体の中でバンドギャップが最も大きい窒化アルミニウム (AlN) 半導体を基板材料として用い、その上に窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) 系材料を用いた深紫外高出力 LD を開発することにより、次世代レーザー加工用の高出力 LD 光源を創出することを目的とする。

レーザー加工用・深紫外 LD が開発されれば、レーザー加工以外にも、殺菌・浄水、医療・バイオ産業、高密度光記録、照明、樹脂硬化・形成、印刷・塗装など非常に幅広い応用分野への波及が同時に期待でき、広域な市場開拓により我が国の経済再生への多大な貢献が期待できる。

理化学研究所は、青色 LD が実現された早期から、次世代の AlN 結晶を用いた深紫外発光デバイスの研究に着手し、これまでその開発に於いて長期間にわたり世界をリードしてきた。また、山口大学では、高品質な窒化物結晶基板の作製技術の開拓を先行して行ってきた。両機関でこれまで開拓し培ってきた深紫外デバイス技術を融合して有効に利用しさらに発展させることで、本研究開発で目的とする最短波長領域・深紫外高出力 LD の開発を行う。

AlN 結晶上に AlGaIn 系深紫 LD を作製し、最短波長 (UVB~UVC 波長帯の 260~320nm) の深紫外 LD を実現する。深紫外 LD を実現するために、高品質 AlN 結晶の開発、高い発光効率の実現、高濃度 p 型 AlGaIn クラッド層の開発、電子注入効率の高効率化などの技術開発を行う。また、実用型の長寿命・高出力深紫外 LD を実現するために、AlN 単結晶基板上の深紫外 LD を開発する。

本研究開発期間では、高品質 AlN 結晶基板上で深紫外 LD 素子を開発し UVB-UVC 深紫外 LD の動作実証を行い、さらにそれらの高出力化を目指す。

(2) 研究開発目標と根拠

AlGaIn 深紫外 LD を実現するためには、高品質 AlN 結晶基板の開発、高い発光効率の実現、高濃度 p 型 AlGaIn の各開発が必要である。本研究では、下記に示す各要素技術開発を行うとともに、UVB~UVC LD の動作を実現し、さらにそれらの高出力化を目指す。

① サファイア基板上高品質 AlN 結晶の開発 (理研)

深紫外 LD 開発では、活性層の高い内部量子効率、高濃度 p 型クラッド層、ならびに素子寿命の

向上を実現するために、低い貫通転位密度のAlN結晶テンプレートが要求される。本研究では、これまで用いてきた「アンモニアパルス供給成長法」に加え「高温アニール法」を併用することにより、サファイア基板上の高品質なAlNテンプレートを実現する。これまで理研では、 $1 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 程度の貫通転位密度を実現している。それに加え「高温アニール法」を併用することで最終的には $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度の貫通転位密度の実現を目標とする。

②加工基板上・高品質AlN結晶の実現（山口大）

山口大学はこれまでの研究で、加工サファイア基板（PSS）上の高品質GaN結晶の開発を行い、青色LEDの高効率化で実績を上げている。その技術を用いて、「ストライプ状低転位密度AlN結晶」の開発を行い、深紫外LDの高性能化を試みる。加工基板上のELO（横方向埋め込み成長）を用いることにより、貫通転位密度をストライプに沿って低減することが可能である。低転位化されたストライプ上に共振器を形成することで、素子の高性能化が期待できる。本研究では、ストライプ状低転位密度AlNの実現により、深紫外LDの高性能化の指針を得る。

③深紫外の高い内部量子効率の実現（理研）

高品質AlNテンプレートを用いることでAlGaIn深紫外発光層の内部量子効率（IQE）の向上を実現する。これまでの開発において、AlGaIn深紫外量子井戸発光層のIQEは、35%程度が観測された。本研究では、低貫通転移密度AlNテンプレートを開発し、さらにAlGaIn量子井戸発光層の構造最適化を行う事で、最終的に70%程度のIQEの実現を目指す。

④高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現（理研）

p型AlGaInのホール濃度が低いため、深紫外LDにおいて、レーザー発振にいたるまでのホール注入が困難となる。そのため、p型AlGaInの高ホール濃度化が必要である。本研究では、短周期超格子（SPSL）や分極ドープ効果を利用することにより、p型AlGaInの高ホール濃度化を検討する。SPSLを用いることで、見かけ上のアクセプター準位が浅くなり、縦方向のホール伝導特性が改善する効果が期待できる。また、AlGaInの組成傾斜層は分極効果により高いホール濃度を発生させることができ、深紫外LDのホール注入を行うための有効な手段と考えられる。

また、深紫外LDにおいてp型層のホール濃度が低い場合、n型層から注入された電子はp側層にリークしてしまい、電子注入効率を低下させることが大きな問題になる。本研究では、電子ブロック層を最適化することにより電子注入効率の向上を行う。電子注入効率は、p型層のホール濃度が低く、さらにLD動作に於いて高電流注入を行った場合、低下は顕著である。より高い実効的バリア高さ持つ電子ブロック層の導入が必要となる。本研究では、p型層の低抵抗化と電子ブロック層の最適化を行うことで、実際の深紫外LDで必要とされる高い注入電流密度と電子注入効率を実現する。

⑤UVB～UVC領域深紫外LDの実現（理研）

上記で開発したエピウェファァーを用い、LDデバイス加工、ならびに、レーザー共振器の作製により深紫外LDを試作し、その動作実証を行う。はじめに、電流注入型レーザーを実現する前段階として、光ポンプによるレーザー発振を試み、その低閾値動作により、十分な光利得が得られているかの実証実験を行う。光ポンプレーザー発振を得ることにより、共振器ミラーができていないかの検証も同時に行う。続いて、UVC～UVB領域の波長260～320nmの深紫外LDの実現を目指す。UVB～UVC領域の深紫外LDで200mW程度の出力動作を目標とする。

表Ⅲ2-3-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
高品質 AlN 結晶の実現（理研）	貫通転移密度 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$	高温アニール効果でさらに転位密度を低減	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$	現在の高温成長条件下の最適化で可能な範囲の低転位化を実現
加工基板上高品質 AlN（山口大）	ストライプ状低転位 AlN で貫通転位密度 $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 程度を実現、LD ストライプ幅 $10 \mu\text{m}$ 程度の低転位領域を確保	ストライプ幅の拡大と厚膜 ELO 成長で低転位領域幅の拡大が可能	ストライプ状低転位 AlN 結晶の実現	加工基板上の ELO 成長で 1 桁程度の転位低減が可能
高 IQE の実現（理研）	IQE70%程度の実現	貫通転位密度 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ で IQE 70%程度が可能	IQE50%程度	貫通転位密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ で IQE 50%程度が可能
高濃度 p 型 AlGaIn と高い電子注入効率の実現（理研）	注入電流密度 5KA/cm^2 程度、電子注入効率の向上を実現	LD 発振に向けて必要とされる注入電流密度の実現。分極効果を用いた p 型高濃度化を考慮	注入電流密度 2KA/cm^2 程度の実現	p 型クラッド層の低抵抗化と電子ブロック層の最適化を考慮
UVB-UVC 領域 LD の実現（理研）	UVB-UVC LD の動作実証、低閾値化とピーク出力 200mW 程度の実現	後半 2 年での短波長化と高出力化を考慮	UVB-UVC LD の誘導放出の実証	IQE 向上、高濃度 p 型 AlGaIn、共振器ミラー実現の各技術を考慮

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-2-2 深紫外 LD 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
高品質 AlN 結晶の実現（理研）	成長装置建設と AlN 成長条件の最適化	高温アニール効果の実証	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ の実現		貫通転移密度 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ の実現	貫通転移密度 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ の実現
加工基板上高品質 AlN（山口大）	加工構造形状等の	平坦性製膜条件の	ストライプ状低転	加工基板上非極性	加工基板上非極性	ストライプ状低転位 AlN で貫通

	検討	検討	位 AlN 結晶の実現	AlN 結晶の検討	AlN 結晶の実現	転位密度 $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 程度を実現、LD ストライプ幅 $10 \mu\text{m}$ 程度の低転位領域を確保
高 IQE の実現 (理研)	活性層製膜条件の検討	IQE 測定方法の確立	IQE60% 程度	IQE70% 程度	IQE80% 程度	IQE70% 程度の実現
高濃度 p 型 AlGaIn と高い電子注入効率の実現 (理研)	p 型成長条件の検討	超格子効果の発現	注入電流密度 2KA/cm^2 程度の実現	縮退ドープ効果の発現と MQB による EIE 向上の実現	注入電流密度 5KA/cm^2 、EIE 60% 程度の実現	注入電流密度 5KA/cm^2 程度、電子注入効率の向上の実現
UVB-UVC 領域 LD の実現 (理研)	LD 作製方法の確立と測定系の立ち上げ	レーザー共振器形成と LD の試作	UVB-UVC レーザーの光ポンプ発振の実現	UVB-UVC LD の動作実証	UVB-UVC LD の低閾値化と高出力化の実現	UVC-UVC LD の動作実証、低閾値化とピーク出力 200mW 程度の実現

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。以下、各項目について説明する。

① サファイア基板上高品質 AlN 結晶の開発

高品質 AlN 結晶成長用の MOCVD を構築し、高温 ($\sim 1400^\circ\text{C}$) AlN 結晶成長条件の最適化を行うことにより、サファイア基板上高品質 AlN 製膜を行った。高温アニール装置を導入し、 1700°C アニール条件の最適化による AlN 高品質化を行った。MOCVD 成長、高温アニールと MOCVD 再成長による AlN 製膜プロセスにより、貫通転移密度の低減を観測し、貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度の AlN 結晶を実現した。目標とする $3 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ 程度のへの到達はできなかった。

② 加工基板上・高品質 AlN 結晶の実現

加工基板上の ELO (選択横方向成長) AlN の形成を行い、貫通転移密度の低減メカニズムを明らかにするとともに、LD 共振器で必要とされる無転位領域の幅を考慮して、幅広のストライプ構造上に ELO-AlN を成長した。幅広ストライプ構造を平坦に埋め込むために、 $40 \mu\text{m}$ 艇の膜厚の AlN を再成長した。結果として、幅 $10.4 \mu\text{m}$ のストライプ状無転位領域を確保し、深紫外 LD への利用が可能な無転位テンプレートの作製に成功した。

③ 深紫外の高い内部量子効率 (IQE) の実現

フォトルミネッセンス (PL) の励起強度依存性と測定温度依存性から IQE を厳密に測定する方

法を用いて、作製したAlGaIn量子井戸のUVB-UVC発光のIQEの測定を行った。その結果、IQEは研究開始当初35%が観測された。その後、AlNテンプレートの高品質化と量子井戸の成長条件の最適化を行うことにより中間報告までに51%が観測された。さらに最終報告までに63%のIQEが観測された。

④ 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

本研究では、短周期超格子（SPSL）構造、及び、Al組成傾斜AlGaIn分極ドープ効果p型層（成果の詳細で説明）を用いた高濃度p型層の実現を試み、双方で、ホール伝導度の向上を確認した。それらをクラッド層として用いた深紫外LD構造を試作し、中間報告までに最大で 1.5KAcm^{-2} 程度の電流注入を実現した。その後最終報告までに、分極ドープp型クラッド層の構造、コンタクト層の最適化と、測定におけるパルス電流幅の低減（熱的効果の低減）により、最大で 83KA/cm^2 の度の注入電流を実現した。高注入に至るまで、自然放出光出力はリニアに変化し、電子注入効率を保持しながら高注入が得られていることを確認した。

⑤ UVB～UVC領域深紫外LDの実現

LDデバイス加工、ステルスダイシングもしくはエッチングプロセスを用いたレーザー共振器作製により深紫外LDの試作を行った。電流注入による発振動作検証の前段階として、光ポンプによるレーザー発振動作を実現した。その結果、レーザー発振の閾値キャリア密度は世界最小レベルを実現し、また共振器縦モードも観測され、深紫外における高い光利得とステルスダイシングによる共振器ミラー形成が確認された。その後、目標とするUVB-UVC LDの動作実証を複数回試みているが、プロジェクト終了までには達成できず、今後の課題として残った。

表Ⅲ2-3-2-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後に残された課題
高品質 AlN 結晶の実現（理研）	貫通転移密度 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ の実現	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度を実現	△ 目標は未達であるが、技術水準としては世界トップレベルが実現できた。	貫通転移密度 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 以下への低減
加工基板上高品質 AlN（山口大）	ストライプ状低転位 AlN で貫通転位密度 $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 程度を実現、LD ストライプ幅 $10 \mu\text{m}$ 程度の低転位領域を確保	加工基板上 ELO 成長により、AlN 結晶でストライプ状に $10.4 \mu\text{m}$ 幅の無転位領域を確保	○	加工基板上 ELO-AlN 結晶上での UVB-UVC LD の実現
高 IQE の実現（理研）	IQE70%程度の実現	IQE63%の実現	△ 目標は未達であるが、技術水準としては世界トップレベルが実現できた。	AlN 貫通転移密度のさらなる低減による IQE70%以上の実現
高濃度 p 型 AlGaIn と高い電子注入効率の実現（理研）	注入電流密度 5KA/cm^2 程度、電子注入効率の向上の実現	分極ドープ効果を用いた高ホール濃度 p 型 AlGaIn クラッド層を実現。それを用いた LD 構造で 83KA/cm^2 の注入電流密度を実現。60%程度の注入効率を確保	○	分極ドープ効果 p 型クラッド層を用いた UVB-UVC LD の動作実現とその低閾値化
UVB-UVC 領域 LD の実現（理研）	UVB-UVC LD の動作実証、低閾値化とピーク出力 200mW 程度の実現	光ポンプによる UVC レーザー発振を実現し世界最低閾値キャリア濃度を実現した。UVB-UVC LD のレーザー共振器の作製プロセスを確立。未だ LD の発振動作には至っていない。	△ LD 発振動作の実現は時間的に委託期間では間に合わなかったが、光ポンプによる発振動作と高電流注入に実現により、レーザー発振のめどは立ったので、今後の短期間の実験で検証できると考えられる。	UVB-UVC LD の動作実証、低閾値化と高出力化の実現

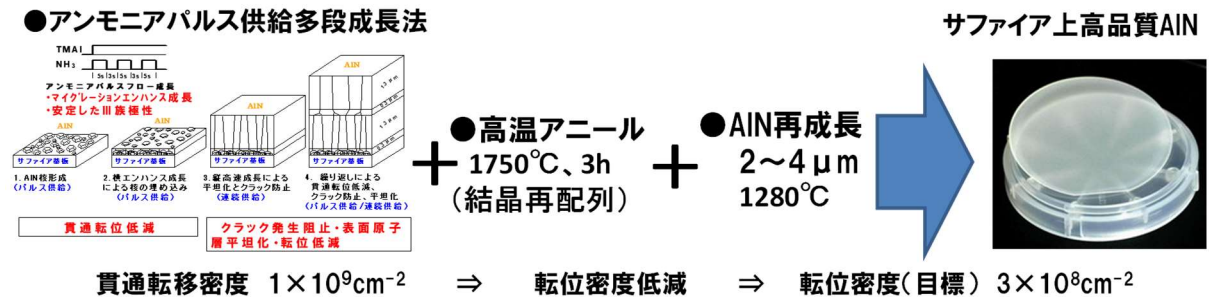
（5）成果の詳細

① サファイア基板上高品質 AlN 結晶の開発

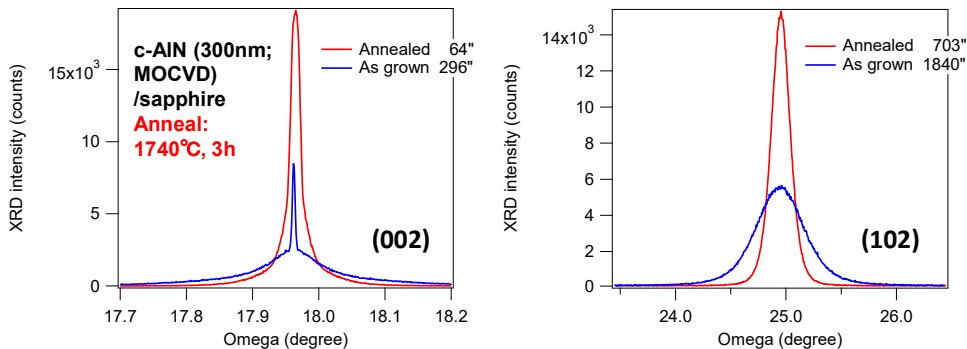
2016-2017年度に、高品質 AlN 結晶成長用の MOCVD を構築し、その後、AlN 結晶成長条件の最適化を行い、サファイア基板上高品質 AlN 製膜を行った。さらに、高温アニール装置を導入し、アニール条件の最適化による AlN 高品質化を行った。図Ⅲ2-3-2-1に、「アンモニアパルス成長法」と「高温アニール法」を併用して用いた、サファイア基板上 AlN の高品質化の概念を示す。サファイア基板上に「アンモニアパルス成長法」を用いて厚さ 300nm の AlN を製膜後、 1740°C で3時間アニールを行い、その後さらに MOCVD 法を用いて厚さ $2 \mu\text{m}$ の AlN を製膜した。図Ⅲ2-3-2-2に、

はじめに製膜した300nm厚AIN結晶のX線回折の結果を、アニール前後において比較する。X線半値幅は、(002) 反射で296から64arcsecへ、(102) 反射で1840から703arcsecへ低減しており、結晶の明らかな改善が見られた。高温アニールを行った後さらに2μm厚のAINを成長させた結果、(102) の半値幅は308arcsecが得られ、従来法の1回成長のバッファ（380arcsec）よりも低い値が得られた。X線回折の半値幅から、刃状転位密度は従来の $1 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ よりも低減し $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度が得られた。

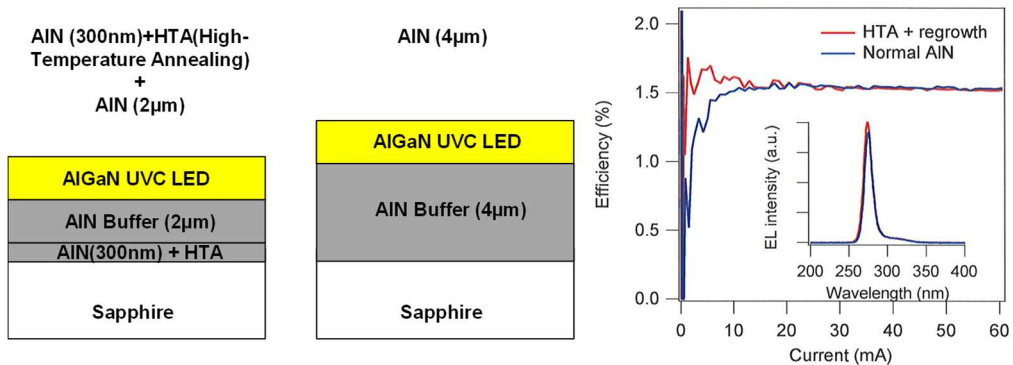
図Ⅲ2-3-2-3に、従来の1回成長AINと、高温アニール法AIN結晶バッファ上に作製したUVC-LEDの動作特性の比較を示す。通常バッファではAINをサファイア基板の上に4μm製膜している。UVC-LEDの比較を行った結果、ほぼ同じ値の外部量子効率（EQE）が得られた。高温アニール法ではトータル膜厚が2.3μmと薄いにも関わらず、同等の効率で発光が観測されたことから、薄膜で高品質AINが得られることが分かった。今後は、スパッター成長によるAIN基基板の導入、アニール条件と再成長条件にさらなる最適化により、より低い貫通転移密度が得られると考えられる。



図Ⅲ2-3-2-1 「高温アニール法」を用いたサファイア基板上AINの高品質結晶製膜の概念



図Ⅲ2-3-2-2 1段階目成長AIN結晶のアニール前とアニール後のX線回折半値幅の比較

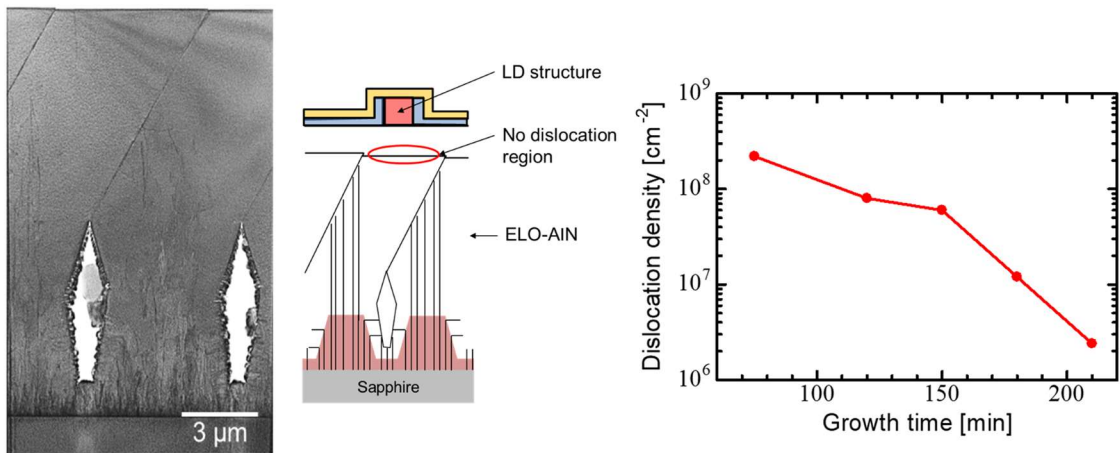


図Ⅲ2-3-2-3 従来の1回成長AINと高温アニールAIN結晶上に作製したUVC-LEDの動作特性の比較

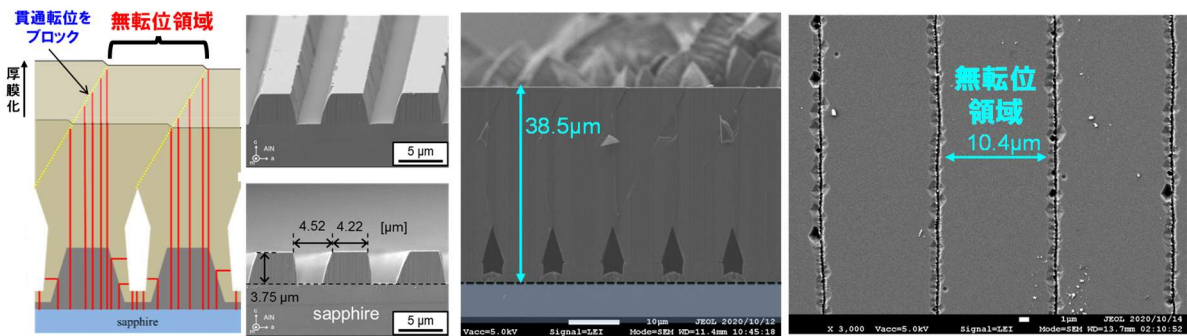
② 加工基板上・高品質AIN結晶の実現

現在の無転位のAIN単結晶基板は2インチ径で100万円と高価であるため、深紫外発光素子の将来の産業化にあたり、安価なAIN/サファイア基板の役割は大きい。我々は、加工基板上にAINの選択横方向成長（ELO：Epitaxial Lateral Overgrowth）を行う事により、深紫外LDに利用できる低転位密度ELO-AINテンプレートの作製を行なった。

最初に、サファイア基板の上にAINをMOVPE法により成長し、通常のリソグラフィ工程と誘導結合型反応性イオンエッチング（Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching：ICP-RIE）によるドライエッチング加工によりAIN加工基板を作製した。次に、MOCVD法を用いてAINのELOを行いUV-LD用のAINテンプレートを作成した。



図Ⅲ2-3-2-4 ELO-AINの断面TEM像、転位終端の模式図、表面転位密度のAIN成長時間依存性



図Ⅲ2-3-2-5 ELO-AINにおける転位低減モデル、エッチングにより形成されたAINストライプのSEM鳥瞰写真、AIN-ELO成長後の断面SEM像、及び、ウェットエッチング（KOHとNaOHの混合物の融液）を用いた表面エッチピット観測SEM像

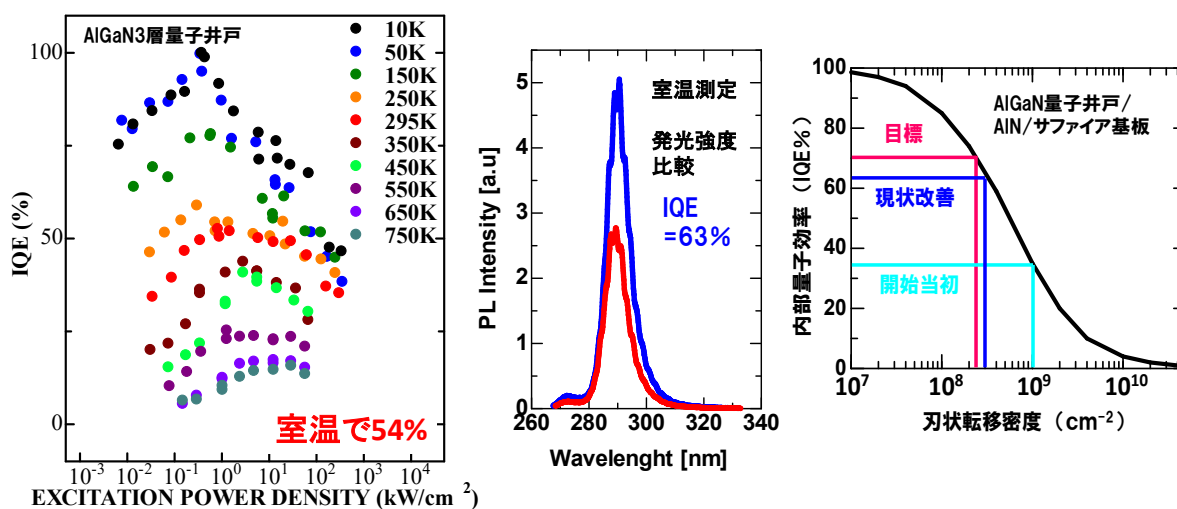
転位低減のモデルを検証するために、ELO-AINテンプレートの断面透過型電子顕微鏡（TEM）を用いた転位挙動の解析を行った。まず、これまでのELOで観察されてきたボイドによる転位の終端効果で結晶品質が向上している。また、ボイドの終端部から発生するステップバンチングに起因する結晶のズレが転位を終端させている。これは、TEM観察によって、ステップバンチング

が生じている箇所に、AIN原子面のズレが観測されたこと、その原子面のずれた箇所に到達した転位が消滅していることより明らかとなった。言い換えれば、ボイドを起点に成長したAINが隣のボイドから成長したAINを飲み込んでいる（オーバーグロース）といえる。その結果、オーバーグロースしたAIN表面上に転位が存在しない。ボイドを起点とした結晶間の界面はc面に対して約20°であることがわかり、{11-22}面と推定された。図Ⅲ2-3-2-4に、実際に得られた成長時間と転位密度の関連を示す。210分の成長（膜厚18μm）によって転位密度は $2 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ に低減され、ストライプ上でほぼゼロまで低減する（無転位）事が分かった。

ELO法を用いた、深紫外LD用ストライプAINテンプレートの作製に関して図Ⅲ2-3-2-5に示す。作製を予定しているLDの共振器リッジ幅を考慮しストライプ幅を12μm周期の構造を形成した。ストライプ上で貫通転位を完全に消滅させるために、38.5μmの厚さのAIN層を再成長した。その結果、図Ⅲ2-3-2-5に示す様に10.4μm幅の無転位領域を形成することに成功し、深紫外LDのリッジ共振器用のテンプレートとして十分使える幅を確保した。

③ 深紫外の高い内部量子効率の実現

アンモニアパルス供給多段成長法を用いて作製された高品質AINテンプレート上にAlGaIn量子井戸活性層を作製し、内部量子効率（IQE）の測定を行った。フォトルミネッセンス（PL）の励起パワー密度依存性と測定温度依存性を用いて、270-300nmで発光するAlGaIn量子井戸のIQE測定を厳密に行った。PL測定の励起パワー密度を $1 \sim 10^6 \text{W/cm}^2$ まで6桁変化させ、低温（4K）と室温（295K）においてその強度を比較した。低温で比較的弱励起の時に得られた発光効率を100%と仮定し、室温における発光効率を求めIQEを算定した。IQEは、AlGaIn量子井戸の成長条件を最適化することにより、室温に於いて54%が観測された。貫通転移密度とIQEの関係予測から得られる値（ $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ で約50%）とほぼ一致した。さらに、量子井戸構造を最適化したサンプルにおいて、室温におけるPL強度比較からIQEは最高値で63%が推定されることが分かった。さらにPL測定は高温の750K（477℃）まで行い、高温でもIQEとして16%が得られ、高温としては高い値を観測した。今後は、貫通転移密度を $1 \sim 2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度に低減することで80%以上の高いIQEが実現可能と考えられる。



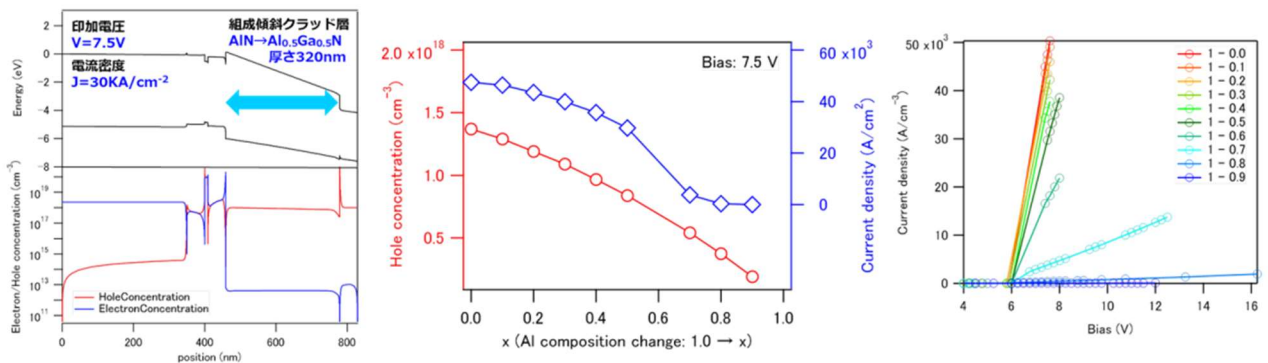
図Ⅲ2-3-2-6 AlGaIn量子井戸におけるPL強度の励起パワー密度、測定温度依存性による発光内部

量子効率 (IQE) の測定、室温におけるPLの発光強度比較、及び、IQEと貫通転移密度の関係

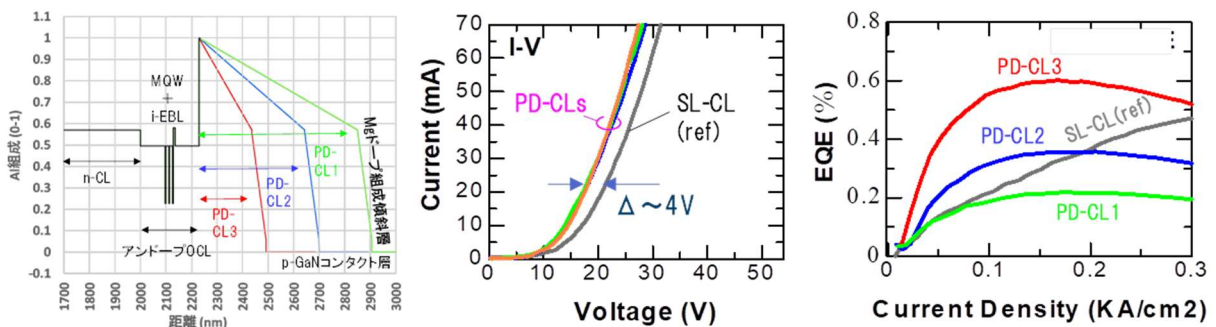
④ 高濃度p型AlGaInと高い電子注入効率の実現

深紫外 LD では、p 型 AlGaIn クラッド層の伝導度が著しく低いことが避けがたい要因となり、長い間レーザー発振が得られなかった。ホール伝導度を上げるために比較的薄い p 型クラッド層を用いると、十分な光閉じ込めが行われず、導波路ロスが高くなり、発振動作が得られない。従って、導波路ロスを低く抑えるため十分な厚さの p 型クラッド層の層厚が必要で、且つ、レーザー発振に必要な高いホール伝導度が要求される。当研究では、長い間、超格子構造を用いて p 型クラッド層の低抵抗化を試みてきたが、レーザー発振が得られる十分な成果が得られなかった。そこで、当プロジェクト後半では、分極効果 p 型クラッド層を用いた深紫外 LD の研究を行った。

p 型分極ドープ層を用いた 280nm 帯深紫外 LD 構造のシミュレーション設計を行った。p 型 AlGaIn 分極ドープ層を実現する方法として、Al 組成傾斜 AlGaIn を導入した。クラッド層に組成傾斜 AlGaIn 層を用い、ホール伝導度の改善と導波路損失の低減を同時に実現する構造を設計した。分極効果により発生するホール濃度をシミュレーション計算により求めた。その結果、AlGaIn クラッド層において、Al 組成を 100%から 50%程度まで組成傾斜を行うことによって、分極効果によって $8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 程度の高いホール濃度が励起されることが分かった。また計算から、分極効果によるホール伝導度の改善により、電流-電圧 (I-V) 特性は著しく改善されることが分かった。



図Ⅲ2-3-2-7 組成傾斜（分極ドープ）クラッド層を用いた UVC-LD における、ホール誘起効果と電流-電圧特性改善のシミュレーション結果



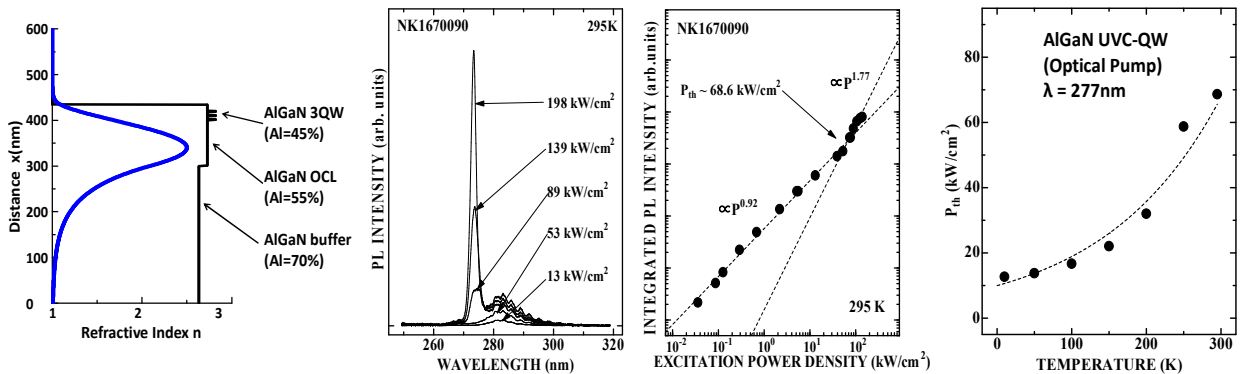
図Ⅲ2-3-2-8 組成傾斜（分極ドーパ）クラッド層を用いた深紫外 LD（発光波長 290nm）における、電流-電圧（I-V）特性の改善、自然放射発光（LED 発光）効率の改善

解析に基づき、分極ドーパ AlGaIn クラッド層を有する深紫外 LD 構造を試作し、ホール伝導度の向上の効果を調べた。250、450、650nm の 3 種類の層厚の分極ドーパクラッド層（Polarization Doped Cladding Layer : PD-CL）を有する深紫外 LD 構造（発光波長 290nm）を試作し、電流注入を行った。いずれも従来の超格子クラッド層を用いた深紫外 LD の場合よりも低い電圧で動作した。また、膜厚が 250nm の分極ドーパクラッド層を用いた場合、LED モードで高い発光効率を得られた。これは分極効果でホールが励起され、高い注入効率を得られているためだと考えられる。

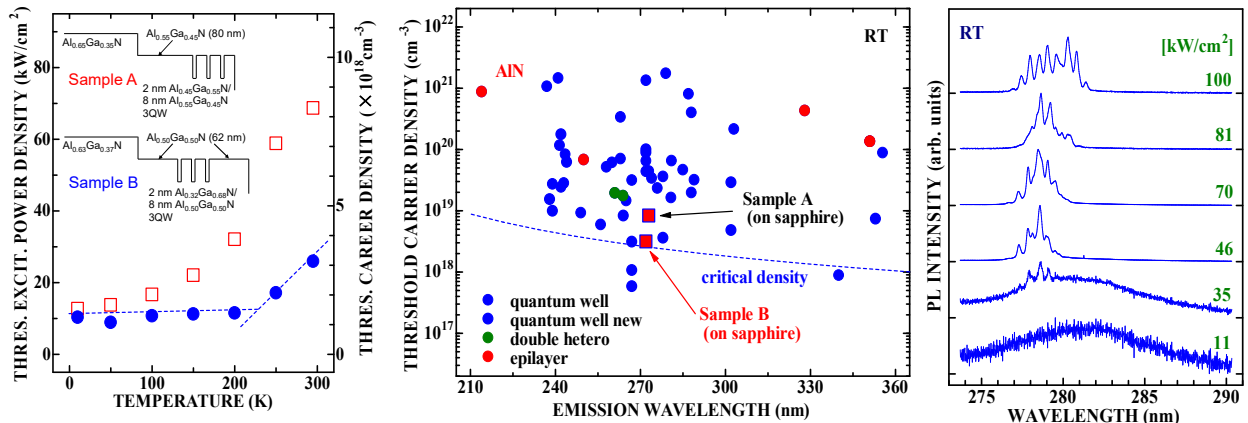
⑤ UVB-UVC深紫外LDの実現

⑤-1 深紫外 AlGaIn 活性層を用いた低閾値光ポンプ発振の実現

AIN テンプレート上に AlGaIn 量子井戸活性層を作製し、光ポンプ発振動作の実現を試みた。光ポンプ発振用のサンプルとして、深紫外-LD 構造の量子井戸活性層までの成膜を行い、p 側光閉じ込め層、及び p 型クラッド層が無い構造を用いた。ステルスダイシング法によりレーザーミラーを形成した。共振器長は 1.2mm とした。シリンドリカルレンズを用いてライン状にレーザー光を照射して励起しミラー端面から発光スペクトルを観測した。



図Ⅲ2-3-2-9 光ポンプ誘導放出実験に用いたAlGaInレーザー構造、室温における光励起発光スペクトルと発光積分強度の励起パワー密度依存性、及び、誘導放出発光の閾値励起パワー密度の測定温度依存性

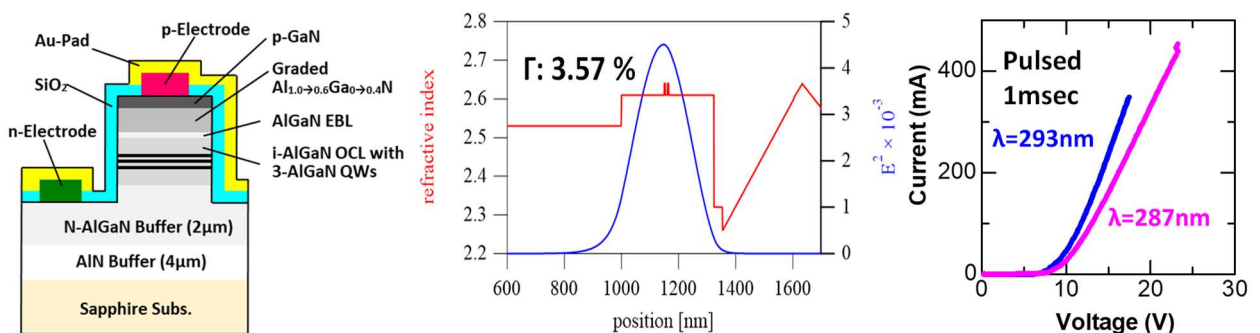


図Ⅲ2-3-2-10 2種類の量子井戸サンプルにおける光ポンプ誘導放出の閾値励起パワー密度の温度依存性の比較、本研究で得られた励起閾値キャリア密度の世界との比較、短共振器サンプルで得られた誘導放出スペクトルにおける共振縦モードの観測

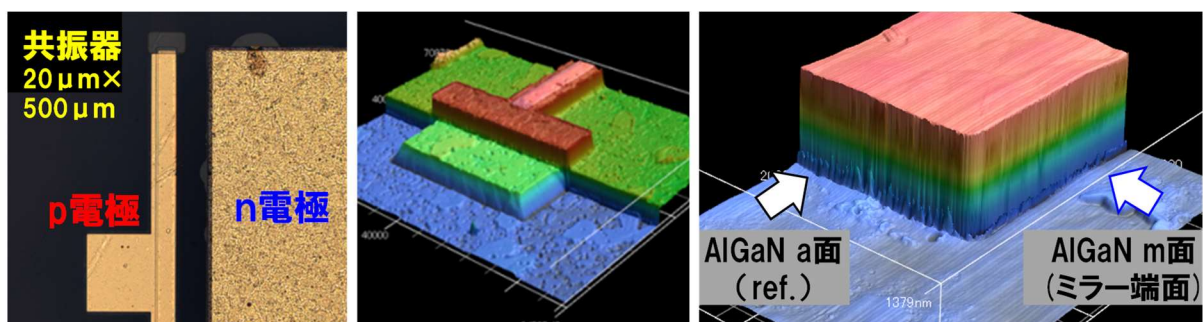
誘導放出発光は波長 277nm 付近から観測された。誘導放出発光の閾値励起パワー密度は、10K で 12.7 kW/cm²、室温で 68.6 kW/cm²であった。従来まで用いていた、上側光閉じ込め層が無いサンプル（サンプル A）に加え、上側光閉じ込め層を有するサンプル（サンプル B）の 2 種類を用い、両者で閾値励起パワー密度を比較した。その結果、上側光閉じ込め層を有するサンプル B の方でより低い閾値励起パワー密度を観測し、これまで本研究で室温において得られた最も低い値である 26kW/cm² を観測した。本研究で得られた閾値キャリア密度は、世界のトップレベルの低い値であることが分かった。さらに、短い共振器における誘導放出光を観測した結果、共振縦モードの観測に成功し、本実験で得られた結果は、光ポンプレーザー発振動作であることを実証した。

⑤-2 深紫外 LD 構造の作製と高電流注入の実現

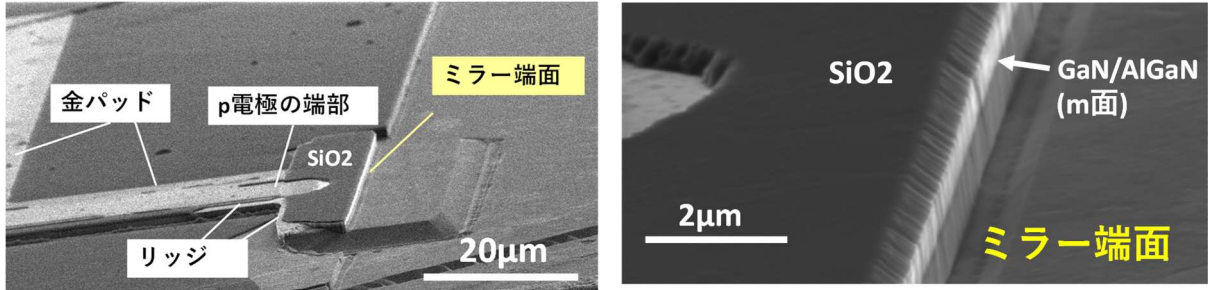
AlGaIn 深紫外 LD の作製と動作の検証を行った。サファイア/AlN テンプレート上に n-AlGaIn バッファ層、アンドープ光閉じ込め層、AlGaIn 多重量子井戸活性層、アンドープ光閉じ込め層、アンドープ組成傾斜（分極ドープ）AlGaIn クラッド層、p-GaN コンタクト層を成膜し、その後、共振器リッジ構造を形成した。共振器ミラーは、ドライエッチングとウェットエッチングによる垂直エッチングにより形成した。リッジストライプ幅は 20μm、p 型電極幅は 6μm とした。また、共振器長は 500μm から 1.2mm で変化させた。共振器ミラーの垂直性をレーザー顕微鏡と走査型電子顕微鏡（SEM）で観測した。



図Ⅲ2-3-2-11 組成傾斜（分極ドープ）クラッド層を用いた深紫外 LD の構造模式図、バンドダイアグラムと光閉じ込めフィールド分布の解析値、及びパルス電流注入時の V-I 特性



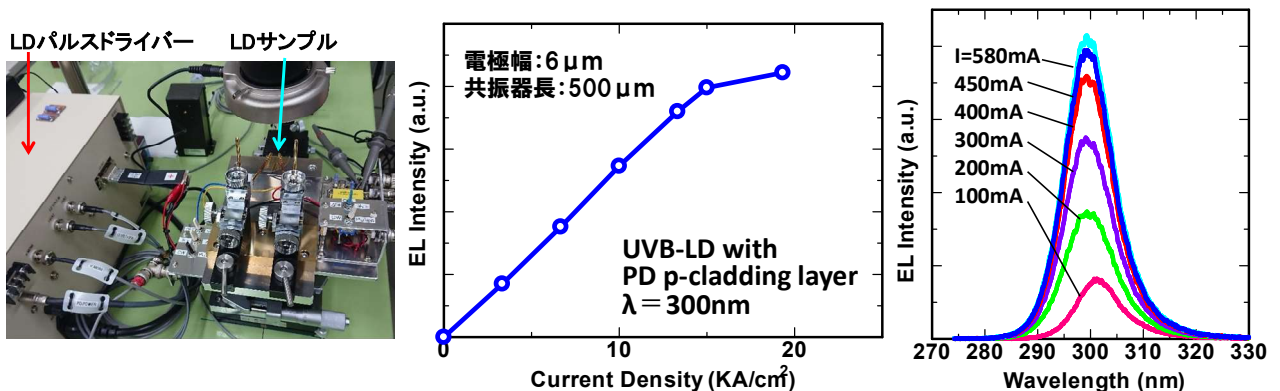
図Ⅲ2-3-2-11 試作した深紫外 LD 共振器の上面写真、共振器ミラー付近の鳥瞰写真、共振器ミラーの拡大写真（いずれもレーザー顕微鏡を用いて撮影）



図Ⅲ2-3-2-12 試作した深紫外 LD の共振器ミラー部の SEM 観測

組成傾斜 AlGaIn クラッド層の Al 混晶組成比は、1 から 0.6 まで変化させ、膜厚は 250-350nm とした。レーザー発振が可能な光閉じ込め係数を得られる様に、光閉じ込め層と分極効果クラッド層の膜厚を設定した。解析から求められた光閉じ込め係数は 3.6% であった。本構造に 1msec 程度のパルス電流注入を行った結果、約 20V で 400mA の注入電流（6kA/cm² の注入電流密度に相当）を達成し、分極ドープ p 型クラッド層の高電流注入に対する有効性が確認された。

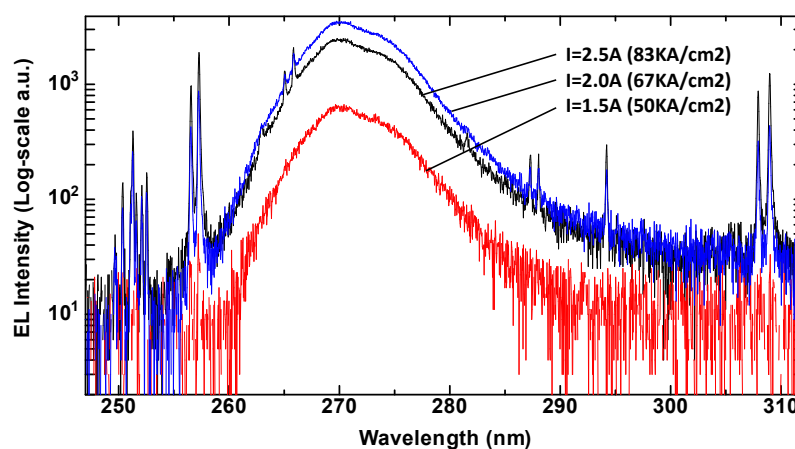
図Ⅲ2-3-2-12 に試作した深紫外 LD の共振器ミラーの SEM 写真を示す。ほぼ垂直なミラーが形成されている。ただし、ミラーのラフネスは気になる。今後の改善事項として考慮する必要がある。電流のパルス幅を 100nsec 程度に小さくすることで熱の効果を低減し、さらに高い注入電流密度が可能になると考えられる。本研究では、共振器長 500μm のサンプルに、パルス幅 150nsec の短パルス動作に於いて電流注入を行った。その結果、電流値は最高 580mA まで素子破壊なしに流すことに成功し、最大で 19.7kA/cm² の電流密度を実現した。電流密度 16kA/cm² 付近まで光出力はリニアに増加しており、電流増加に伴う効率の低下は起こっていないことが分かる。発光スペクトルは自然放出光スペクトルから変化が見られず、誘導放出は起こっていないことが確認された。



図Ⅲ2-3-2-13 構築した LD パルスドライバーと深紫外 LD の I-L 特性、及び発光スペクトル

さらに、同様の LD 構造に於いて、組成傾斜クラッド層の厚さを 200~300nm で変化させた幾つかのサンプルに於いて、同様の電流注入動作を試みた。電流値を最大で 2.5A、電流密度を 83KA/cm² までサンプルを破壊せず電流注入を行ったが、発振動作が未だ得られていない。図Ⅲ2-3-2-14 の共振ピーク様の鋭い発光は誘導放出光では無いことを確かめている。

レーザー発振が得られなかった原因としては、導波路構造が設計通りに作製されておらず、導波路ロスが予想以上に大きい事、また光閉じ込め係数が十分に大きくなく概ね 3%に達していないこと、また、図Ⅲ2-3-2-12 で観測したミラーのラフネスが比較的大きい事、が挙げられる。本プロジェクト後のもさらにこれらの問題点を追究し解決して、発振動作を実現する予定である。



図Ⅲ2-3-2-14 作成した深紫外 LD の注入電流密度 83KA/cm² における発光スペクトル（共振ピーク様の発光は、誘導放出ではないことを確認している。）

（6）実用化・事業化への取り組み

① サファイア基板上高品質AIN結晶の開発

今後、高温アニール法の最適化により $2 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 程度の貫通転移密度を実現する予定である。また、AIN製膜に生産性の高いDCスパッター法を用いた高温アニール法Al基板を開発している。また、1回のMOCVD高温成長（ $\sim 1700^\circ\text{C}$ ）で高品質AINを製膜する方法を検討している。

② 加工基板上・高品質AIN結晶の実現

ELO-AIN成長を行う事により、ストライプ幅10 μm の無転位領域を有するAINテンプレートを本研究で実現したため、今後はその上に深紫外LDを作製することで、転位低減による低閾値・高出力動作を目指す。

③ 深紫外の高い内部量子効率の実現

これまでの研究で60%程度のIQEを実現した。今後は、AINの転位密度をさらに下げることで、80%程度のIQEを実現し、深紫外LDにおける高い光利得をする予定である。高い光利得を得ることで、深紫外LDの高出力動作を目指す。

④ 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

分極ドープ高濃度 p 型層を用いる事により深紫外LDで必要とされる高い注入電流を実現した。

しかし、動作電圧はまだ高く、電子注入効率も改善の余地がある。高出力・深紫外LDの実現に向けて、分極ドープ構造にさらに工夫を加え、低電圧駆動、高電子注入効率を実現する予定である。

⑤ UVB～UVC領域深紫外LDの実現

レーザー発振が得られなかった原因としては、導波路構造が設計通りに作製されておらず、導波路ロスが予想以上に大きい事、また光閉じ込め係数が十分に大きくなり概ね3%に達していないこと、また、ミラーのラフネスが比較的大きい事、が挙げられる。本プロジェクト後のもさらにこれらの問題点を追究し解決して、発振動作を実現する予定である。さらなる高IQE化、分極ドープ構造の最適化、注入効率の向上より、最終目標であった、UVB-UVC LDの200mW出力動作を達成する見込みである。また、ELO-AIN低転位基板上に深紫外LDを作製することで、社会実装に向けて、1W程度出力の実現を目指す予定である。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-3-3. 「高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）

本項目は、2018年度まで、研究開発項目③-3「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）として実施した。中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の成果の詳細は、2-5-1. 「高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）にまとめて記載する。

2-3-4. 「高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発」（実施先：東京工業大学、富士フイルムビジネスイノベーション株式会社(旧富士ゼロックス株式会社)－再委託先産業技術総合研究所)

(1) 事業の背景・意義（目的・概要）

次世代のレーザー加工システムにおいては、加工時の材料へのダメージを最小限にとどめることと、加工システムそのものが低消費電力となり、地球環境への影響が少ないことが求められている。また、安価な小型・可搬型加工機への要望も強い。老朽化が進みメンテナンスが必要となった構造物に対して、あるいは、解体が決まった構造物の分解のために、工場で使用するような大型機を用意することは容易ではない。トンネルや橋梁などの老朽化は人命に影響する可能性も高く、修復への迅速な対応が求められる。

このような場合、加工用光源には、なにより持ち運びできる可搬性が重要となる。また駆動電力部もなるべくコンパクトに構成することが望ましく、低消費電力であることも必須となる。表1は、各種レーザーの特性をまとめたものである。小型・可搬性・低消費電力を満足する、機動性に優れた機械加工システムを想定した場合、半導体レーザーの直接利用が有望である。半導体レーザーは、電力の光への変換効率に優れ70%程度の高い変換効率を得られている。しかし、出力増大には、ビーム品質の劣化が伴う。一般的に単一モードのビーム品質の優れた狭ストライプレーザーでは、1W程度のCW出力が限界であり、多モード動作となるワイドストライプの半導体レーザーをアレイに配置したLaser Barでは、数百Wの出力が可能でも、ビーム品質がファイバレーザーには対抗できない。そのアレイをスタックにしたモジュールでは、kW出力のものも製品化されているが、ビーム品質はさらに悪く、高輝度を必要としない熱処理や固体レーザーの励起光源などの用途に限られる。外部共振器や波長合波の構成を取ることで、ビーム品質を大幅に改善された方式も実用化されているが、実装コストやモジュールサイズに課題が残されている。

※ WBC = Wavelength Beam Combining

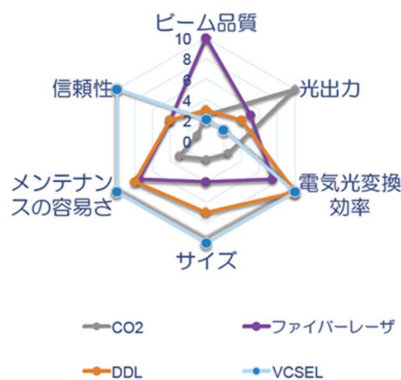
	SOA VCSEL (本研究開発)	VCSEL array	EEL array (WBC※)	EEL array	Fiberレーザ	Diskレーザ	CO ₂ レーザ
材料系	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	SiO ₂ (Ybドープ)	Nd :YAG	CO ₂
代表的な波長	850nm (本研究) ※他の波長域も可	800 - 980nm	970nm	920 - 1020 nm	1070 nm	1030 nm	10.6um
光出力 (kW)	0.1 (目標値)	~ 9.6	0.5 - 8	0.15 - 6	1.5 (S.M.) - 100 (M.M.)	1-12	1-20
WPE (%)	40 - 60	40 - (60)	>40	40 - 50	30 - 40	>30	10
占有面積 (m ²)	0.1 (光源部)	0.1 (光源部)	0.89 - 1.13	0.25 - 0.65	0.3 (S.M.) - 2.8 (M.M.)	0.8 - 2.4	0.53(ヘッド) -4.16
M ²	<10 (目標値)	-	(12.3)	(100)	<1.1 : S.M. >10 : M.M.	(6.1)	(2.3)
BPP (mm・mrad)	<3 (目標値)	>1000	2.5 - 16	8 - 50	< 0.37 (S.M.) >4 (M.M.)	>2	5 - 8
コスト (Price ratio/W)	1	1	9 450万/1K	8	10 500万/1K	20 1000万/1K	6 300万/1K

表Ⅲ2-3-4-1 本研究レーザーと各種レーザーの比較

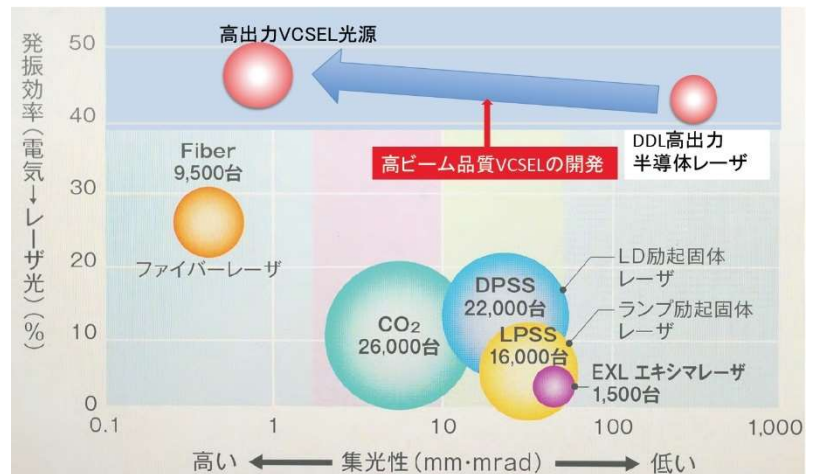
一方、安価で電気光変換効率が高く2次元アレイが可能な半導体レーザーとして、面発光レーザーが広く普及している。面発光レーザーは日本発の半導体レーザー光源であり、半導体基板の垂直方向にレーザー発振するために、二次元アレイ化が容易・低消費電力という優れた特長を持つ。しかしレーザー出力を決定する活性層体積が端面発光型半導体レーザーに比べて小さいため、端面型半導体レーザーが1素子でワット級の光出力を発光するのに比べ、特に単一モード素子では数mWの光出力に留まっている。発光面の大口径化（多モード素子）、あるいは2次元アレイ化によって、数百Wクラスの高出力動作も報告されているが、それぞれの発光面の位相がランダムであるため、端面発光型レーザーと同様に、高出力化と高ビーム品質化は両立しない。本研究開発の目的は、我が国発の面発光レーザー構造を用いて、高出力と高ビーム品質を両立できる新しい半導体レーザーを開発し、次世代のレーザー加工機への革新技術をもたらすことである。

図Ⅲ2-3-4-1は、レーザー加工への応用の観点から、各種レーザーの性能をまとめたものである。先に述べたように、短距離光通信やマウスなどの光センサ応用で発展してきた面発光レーザーは、電気光変換効率、サイズ、信頼性、実装コストの点で他のレーザーを凌駕するが、高出力と高ビーム品質を両立させることができない。図Ⅲ2-3-4-2は各種加工用レーザーのビーム品質と出力を示している。高出力と高ビーム品質を両立させる新型面発光レーザーの実現によって、現在の加工用レーザーにない、発振効率とビーム品質を獲得できる。その他にも面発光レーザーは、結晶表面から光を放射するため本質的に端面の光損傷(COD)が存在しない。また、端面発光型レーザーでは、2次元アレイを構成して高出力化しているが、この場合スタック状に実装するなどの必要があり、実装コストが増大するが、面発光レーザーはモノリシックな2次元アレイを容易に構成できるといった利点がある。高い変換効率に加えて、様々な優位性があるため、もし高出力化と高ビーム品質動作を両立させることができれば、ファイバレーザーに対しても大きな優位性が期待でき、通信・センサ応用からレーザー加工への新たな展開が期待できる。レーザー加工への応用の観点から、面発光レーザーの特徴は以下に集約される。

- 1) 高い電気光変換効率(>60%)
- 2) 精密な2次元レーザーレイ実装が可
- 3) 量産性・低コスト(ウェハスケールのモジュール化)
- 4) COD (Catastrophic Optical Damage) Free
- 5) 単一波長動作かつウェハ内での波長制御が可能(波長合波も可能)
- 6) 小型・軽量の実装
- 7) 短パルス生成も容易



図Ⅲ2-3-4-1 各種レーザーの性能比

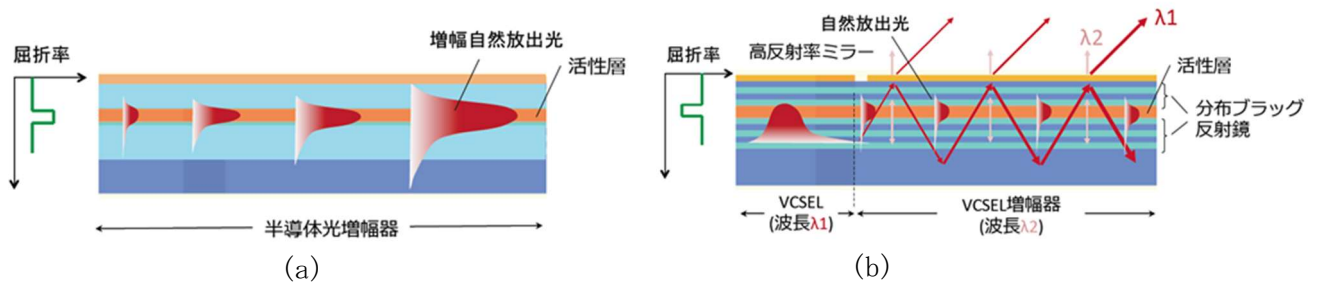


* 既存技術については、「省エネルギーレーザー加工のための高効率ファイバ結合型レーザー光源の研究開発」(NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2011) から引用

図Ⅲ2-3-4-2 各種加工レーザーにおける集光性とエネルギー効率の関係

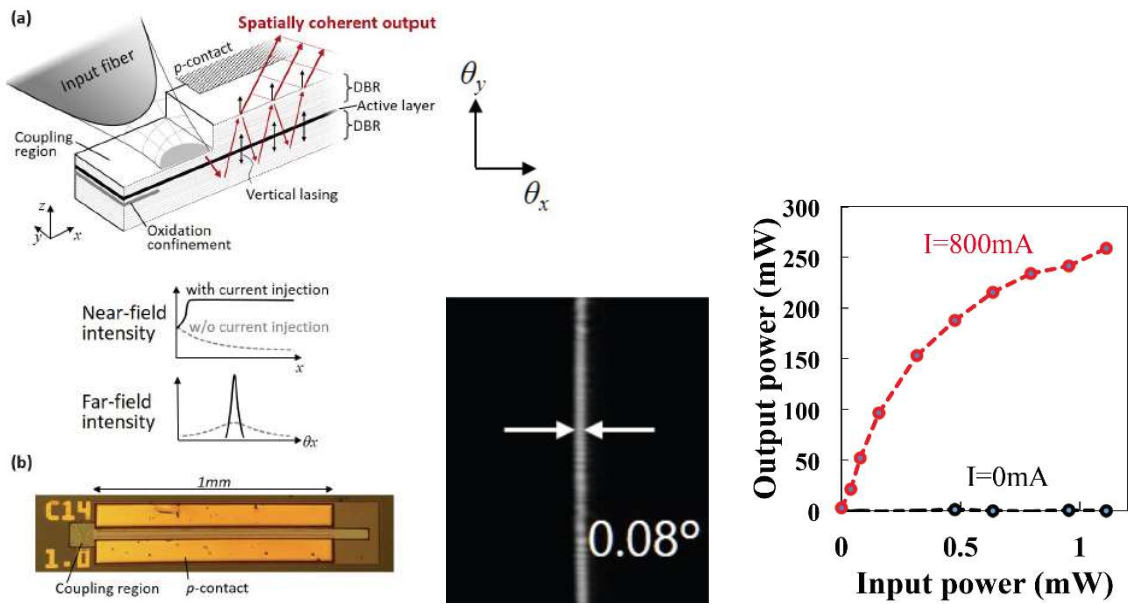
(2) 研究開発目標と根拠

面発光レーザーをレーザー加工に応用する場合の課題、すなわち高出力化と高ビーム品質化を両立する問題を解決する新規構造として、面発光レーザー素子と光増幅器を同一基板に集積化させることにより、活性領域を拡大させて、ワットクラスの光出力を得る新方式が本研究の研究者より考案されている(特許出願済)。図Ⅲ2-3-4-3は原理を示す概念図と概観図を示している。横方向集積の考え方は、2009年に本テーマの研究者から提案されている(IEEE IPS 2007)。本来の垂直方向の放射を遮蔽することで、横方向波数成分により、スローライト(群速度が遅い波)が横方向に励振されるものだが、これまで、光変調器や光検出器などの集積化が実証されてきた(OL2012、APL2013)。ここでは右側の増幅器VCSELでも電流注入することでレーザーとして動作させる。ここに種光源であるVCSELからのコヒーレントなスローライトが伝搬することで、その伝搬光は減衰することなく伝搬し続ける。レーザーを2つ連結しているが、不安定な注入同期現象ではなく、波長についての精密な条件は不要である。ここでは、左から右への一方向性の結合を実現するためには、図Ⅲ2-3-4-3で、 $\lambda_1 < \lambda_2$ の条件だけが満足すれば良い。この方式を用いることで、後述するように約1mm長の光増幅器から1W以上のレーザー出力を得ることが可能となる。また、種光源(左側のVCSEL)によって、右側のVCSEL増幅器のモードが完全に制御されるため、理想的には回折限界の狭い放射角が得られる。すなわち、高出力化と高ビーム品質化の両立が可能になる。この場合、光出力の上限はVCSEL増幅器の長さで決まる。通常の半導体光増幅器は、図Ⅲ2-3-4-3(a)に示すように、増幅自然放出光(ASE)が増大するため、素子長を数mm程度の長さまでしか長尺化できない。それに対して、本研究の構造では、用いるのはスローライトモードで、導波モードでは無いため、活性領域近傍の屈折率を下げることで、ASEの成長を抑圧できることが判明した。すなわち、理想的には無限に長尺化できる可能性がある。すなわち、素子長に比例して高出力化が期待できる。本研究では、この新しいコンセプトに立脚し、光増幅器集積型面発光レーザーの技術開発を行い、高出力化と高ビーム品質化の両立にチャレンジし、量産性に優れた小型実装可能な新型半導体レーザーを実現することを目指した。



図Ⅲ2-3-4-3 (a) 通常の半導体光増幅器と (b) スローライトVCSEL増幅器

実際にこの予見された優れた特性は、実験的に検証されており、図Ⅲ2-3-4-4はVCSEL増幅器の初期実験の結果を示している (GLEO 2016)。素子長は1mmであるが、外部光源 (1mW入力) を使ってスローライトを励振し遠視野像を観測すると、ほぼ回折限界に近い 0.08° の広がり角が観測された。直交方向は5 μm 幅程度の導波路幅のため、 10° 程度の広がり角だが、これも回折限界で決まっている。まだ放熱のためのボンディングや大電流仕様の電極構成にしていなかったため出力は十分ではないが、CWで30mW、パルス駆動で250mW以上が得られている。外部光源を用いているが、横モード抑圧比30dB以上の単一モード動作である。これは、通常の単一モード面発光レーザーの約100倍の出力である。また入力波長の範囲も20nm以上あり、注入同期のような精密な波長制御が不要であることを示唆している。



図Ⅲ2-3-4-4 VCSEL増幅器で外部光源を用いた遠視野像と高出力動作。ほぼ回折限界の出射ビームと単一モードで250mW以上の出力が得られている。(通常の単一モードVCSELの約100倍) (GLEO 2016/OEC C 2016)。

高出力化と高ビーム品質化を両立する問題を解決する新型面発光レーザー開発に向けて、大学と企業が役割分担を行って効率よく研究開発を進めた。主な役割分担の考え方は以下の通りである。

【東京工業大学】：理論と新しい原理に基づく構造の動作実証と長尺化・高出力化の限界究明

【富士フィルムビジネスイノベーション】：高出力化のための電気抵抗・熱抵抗低減、均一性向上による性能向上、放熱などの周辺技術による高出力化実証

上記、大学で新規構造を試作し検証結果を経て、企業側の量産技術に展開する役割分担の考えに基づき、設定した最終目標と設定根拠、および中間目標値を表Ⅲ2-3-4-2に示す。開発目標を達成すべく、以下の研究項目を実施した。

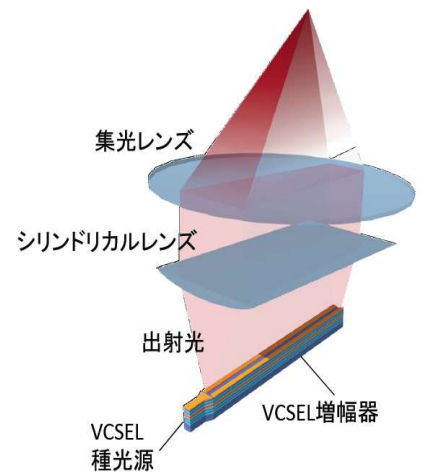
表Ⅲ2-3-4-2 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
高出力面発光レーザーの研究開発 (大学)	長尺化の限界究明 2次元レイアウト 構造の集積光源実現 [光出力 > 100W (パルス)、 $M^2 < 2$]	ファイバレー ザーの代替を 可能とする小型 加工レーザー光 源の可能性検証 になる。	・高ビーム品質動 作の理論的検証 ・増幅器集積光源 の実現 光出力 > 1W (パル ス)、 $M^2 < 2$	本研究の根幹で ある「高出力・ 高ビーム品質動 作」及び「VCSEL とVCSEL増幅器と の一方方向性結合 を可能にする構 造」を理論的に 明確化し、具現 化へ備える。
VCSEL-VCSEL 増幅 器集積光源の実現 (富士フィルムビ ジネスイノベー ション)	・集積素子のアレ イ化実現と高出 力・高ビーム品質 動作の実現 [光 出力 > 50W、 $M^2 < 10$] ・スタンドアロン 動作する増幅器光 源搭載モジュール の実現	複合材料・金属加 工に必要なエネ ルギー密度を、 約 32MW/cm ² と見 積もった場合、 0.1kW(CW)を 20um 径に集光するこ とで達成でき る。	・VCSEL 増幅器の 高出力化実現 [①SMSR30dB 以上 の単一波長動作 ②光出力 > 5W、 $M^2 < 2$]	・VCSEL 増幅器の 構造設計を行 い、増幅器性能 を高めておくこ とで、将来の集 積化と高出力化 に備える ・本開発の新規 光源での増幅動 作と高ビーム品 質動作の可視化 を行う

東京工業大学では、「長期的視点に基く高出力面発光レーザーの研究開発」のために具体的には下記研究項目を実施する。

- ・ スローライトと増幅自然放出光を取り入れた進行波レート方程式による提案構造の動作解析を行い、提案構造の理論的妥当性の検証と、高出力化・高ビーム品質化を実現するためのデバイスの設計を行う。

- ・ 上部反射鏡の一部を変えることで（成膜、あるいは酸化）、種光源であるVCSELの波長と増幅器であるVCSELの波長を変えて、2つのVCSEL間の一方向性結合を実現し、増幅器集積面発光レーザーの安定動作を実証する。また、量産に適した上記波長の制御方法を開拓し、効果を検証する。ビーム品質の評価を実施して、図Ⅲ2-3-4-5に示すように既存の光学系を用いたときの集光特性について検証する。

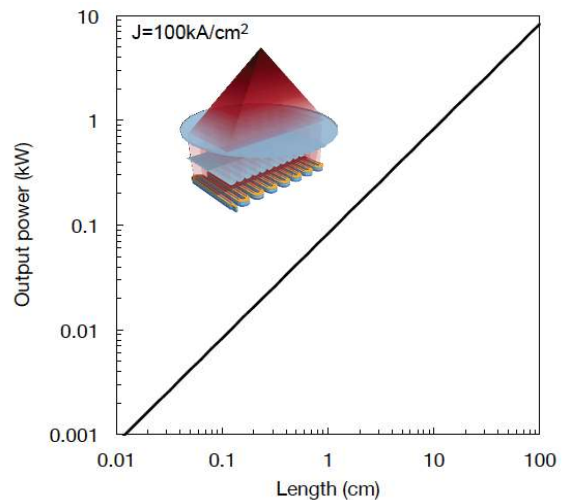
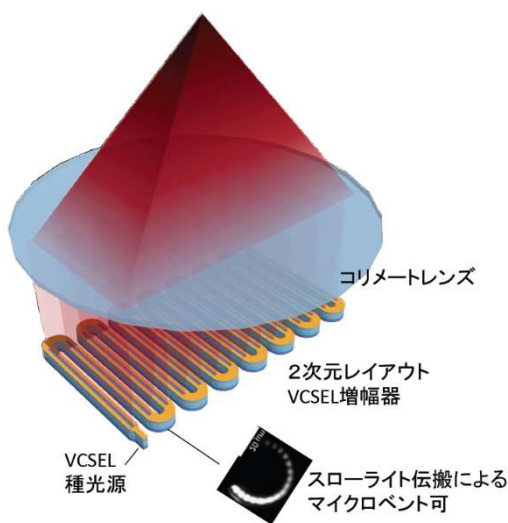


図Ⅲ2-3-4-5 既存レンズを用いた集光光学系

- ・ 増幅自然放出光を抑圧する新しい層構造を導入して、増幅器の長尺化の限界を明らかにする。実際には、面発光レーザーと面発光レーザー増幅器増の横方向集積素子を製作し、モード安定性、出力向上、ビーム品質などの諸特性を明らかにする。

- ・ 図Ⅲ2-3-4-6、図Ⅲ2-3-4-7に示すように、2次元レイアウト構造を導入して、1cm角のチップ内に増幅器導波路を引き回して長尺化の限界究明を進める。初期的な計算では、総長1cmの長さまで拡張することで、50Wクラスの出力が期待できる。

- ・ さらに、本研究開発実施中に見出された長尺面発光レーザー増幅器に表面回折格子を装荷して、高出力動作と高ビーム品質を可能にする新型面発光レーザーの開発を行う。



図Ⅲ2-3-4-6 2次元レイアウト構造を導入した増幅器集積面発光レーザーの構造とシミュレーション

富士フィルムビジネスイノベーションでは、「高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発」のために具体的には下記を実施した。

- ・ まず、VCSEL増幅器単体の高出力化を目指して、増幅器の性能改善を行う。具体的には、電気抵抗低減、ウェハ層構造の最適化による熱抵抗低減を進め、増幅器単体での高出力化を進める。

- ・ また、東京工業大学との連携を図りながら、東京工業大学で先行して進めた結果をフィードバックかけつつ、面発光レーザーと増幅器の集積化を図り、光源と増幅器の一体型光デバイスの試作を行う。このとき、素子実装上の課題（電流注入の経路や温度制御方式など）にも対応していく。試作品の作製や性能評価を通じて、最大出力を得るための最適化設計、ビーム強度プロ

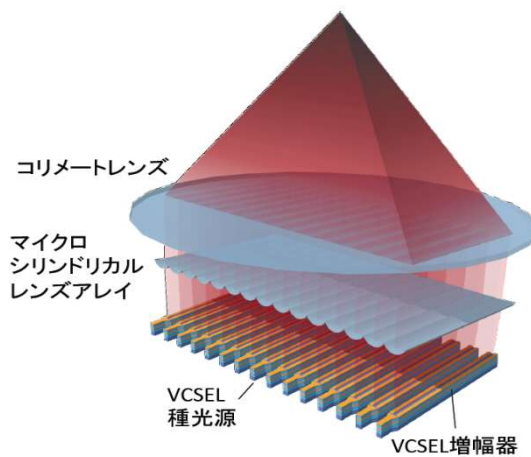
ファイルなどの改良や測定を行った。

・ これらデータを取得後、レーザー加工などの実用化に向けた光学系設計の検討を実施する。光増幅器集積型面発光レーザーは、一素子で端面型と同等以上の光出力が得られる見込みであることに加え、二次元アレイ化も容易である。図Ⅲ2-3-4-7に示すように、増幅器集積面発光レーザーのアレイ化とマイクロシリンドリカルレンズのアレイ化設計を行い実装などの周辺技術を開拓していく。

・ 実際に、増幅器集積光源のアレイ集積化を進め、kW級高出力動作の可能性を探る。

・ 高出力動作には、素子の熱抵抗のみならず、ヒートシンクでの放熱設計も重要である。チップのみならずキロワット出力を目指した放熱設計を進める。

・ さらに、外部種光を必要とせずスタンドアロン動作する増幅器光源を搭載したモジュールの設計と実装を行い、本開発デバイスを用いることで、増幅動作と高ビーム品質動作が、小型で可搬性のある形で実現できることを示す。



図Ⅲ2-3-4-7 増幅器集積光源のアレイ化による高出力化

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールは表Ⅲ2-3-4-31a, bに示すよう設定した。

表Ⅲ2-3-4-3a 長期的視点に基く高出力面発光レーザーの研究開発 スケジュール

		2016	2017	2018	2019	2020
評価装置	高出力パルス動作特性評価装置導入	導入				
VCSEL増幅器	VCSEL増幅器の動作解析と原因究明	動作解析手法の確立	高出力構造設計: 50W/cm			
	増幅自然放出光を抑制する新構造検討		試作及びパルス動作特性の測定と高出力指針取得			
	VCSEL-VCSEL増幅器集積光源の構造設計	構造設計	一方結合を実現する構造検討	高出力化とビーム品質の限界の明確化	高ビーム品質動作の理論的検証	
VCSEL増幅器集積光源	VCSEL-VCSEL増幅器集積光源の試作と評価	製造プロセス確立	試作及びモード安定性・ビーム品質などの諸特性把握	VCSEL-VCSEL増幅器集積光源試作	光出力>1W(パルス)、M ² <2を実現	2次元レイアウト構造の長尺VCSEL増幅器実現 光出力>100W(パルス)、ビーム品質M ² <2
	2次元レイアウト化・長尺化とビーム品質評価				VCSEL-VCSEL増幅器集積光源試作	長尺化の限界把握
	高出力化とビーム品質改善				高出力・高ビーム品質を両立する設計指針確立	長尺化限界究明

表Ⅲ2-3-4-3b 高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発 スケジュール

		2016	2017	2018	2019	2020
評価装置	高出力VCSEL評価用装置導入	設計・発注	導入	試作したVCSEL増幅器およびVCSEL-VCSEL増幅器の評価		
VCSEL増幅器	VCSEL増幅器試作と評価	増幅器構造検討	一次試作と評価	二次試作と評価	VCSEL増幅器の単一波長動作確認(SMSR>30dB) VCSEL増幅器の光出力>5W(CW)、M ² <2	
	VCSEL増幅器長尺化(高出力化)		長尺化構造設計 電流注入均一化検討 放熱構造設計 試作用ウエハ・マスク設計	三次試作と評価	四次試作と評価	
VCSEL-VCSEL増幅器集積光源	VCSELとVCSEL増幅器との集積化検討と試作・評価		種光源VCSELとの集積化検討 集積型一次試作と評価	集積型二次試作と評価	集積型三次試作と評価	
	インコヒーレントでの集光光学系検討		VCSEL-VCSEL増幅器集積光源(単体)の集光光学系の設計	集光光学系試作・組み込み	集積化光源モジュールの実現	
			VCSEL-VCSEL増幅器集積光源(アレイ)の集光光学系の設計と試作検討		集光光学系試作と性能評価	
	アレイ化検討			アレイ状VCSEL増幅器の設計検討	アレイ化一次試作と評価 アレイ化二次試作と評価	アレイ光源からの光出力>50W、M ² <10
					アレイ化三次試作と評価 アレイ化四次試作と評価	
	アレイ状VCSEL増幅器放熱構造設計			アレイ状VCSEL増幅器の放熱構造設計		
	モジュール実装			モジュール設計・試作・動作確認		
再委託	ビーム品質測定評価	ビーム品質評価準備	試作品のビーム品質評価・加工用レーザ光源への適用性評価			

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-3-4-4に示す。

東京工業大学では、高出力・高ビーム品質の新型面発光レーザー増幅器、単一波長面発光レーザーと光増幅器をモノシリックに集積させた高出力集積光源、および単一モード動作を可能にする新型面発光レーザーの研究開発を行った。

まず、スローライト伝搬モードと増幅自然放出光を取り入れた進行波レート方程式による面発光レーザー増幅器の動作解析手法を確立し、長さcm級の長尺化により、100ワット級高出力動作の可能性を示すとともに、実験的にその有効性を明らかにした。長尺化によって活性層内で導波モードとして発生する増幅自然放出光(ASE)の成長が支配的になり、増幅器が飽和する。これを抑圧する手法として量子井戸近傍のSCH層の屈折率を下げることで導波モードをカットオフにする構造を提案し、実験的にその効果を検証して、1cm級の長尺化が可能であることを示した。また、実際に長尺VCSEL増幅器を試作し、1~10mmの素子長の異なるVCSEL増幅器の遠視野像を測定し、素子長に反比例してビーム拡がり角が狭くなることを示した。6mm長の増幅器においてビーム拡がり角を回折限界の2倍の0.015°まで狭窄化することに成功した(2次元の平均M²~

1.5 相当)。本構造は素子長に比例して光出力が増加し、850nm 帯および 980nm 帯それぞれの素子において光出力のスケールリングを示した。CW 動作時では熱飽和によって光出力が制限されるが、パルス動作時では、10mm 長の素子で最大 10W の光出力が得られ、単一モードの VCSEL 光源としては従来技術に対して約千倍の高出力化に成功した。パルス幅としては、約 5 ナノ秒の短パルス化にも成功している。さらに小型チップ化のために、微小曲げ半径による折り返し構造を提案・試作し、チップ面積 1mm × 0.5mm で 7W 以上の光出力を実現した。これは、チップ平均パワー密度に換算すると 1.4kW/cm² に相当し、スケールリング則から、3mm × 3mm へのチップ面積拡大により、パルス出力 100W 以上の高出力動作の可能性を示した。

さらに、面発光レーザーの表面に周期構造を形成して、安定な単一のスローライドモードでの発振する新構造を提案し、素子長 6mm でパルス出力 10W の単一モード発振・高ビーム品質を実現した。この構造は、面発光レーザーの量産技術をほぼそのまま展開できるため、新規な高出力面発光レーザーが可能になる。さらに、表面回折格子面発光レーザーと面発光レーザー増幅器を 1 チップに集積した集積光源を試作し、パルス出力として 4W の単一モード出力と、0.05° の狭出射ビームを実現した。

本高出力光源の付加的な機能として、長尺 VCSEL 増幅器によるビーム掃引機能を実現し、11° の偏向角を得て、解像点数は約 600 点におよび、さらに、回折光学素子 (DOE) を積層することで、電気的な 1D のビーム掃引で、偏向角 100° 以上、解像点数 4,000 を実現するなど、増幅機能を有する非機械式の光偏向器としては世界最高性能を達成した。これによって、機械的なビーム掃引機構を要さない新たなレーザー加工技術への展開や、LiDAR などのセンサー応用への展開が期待できる。

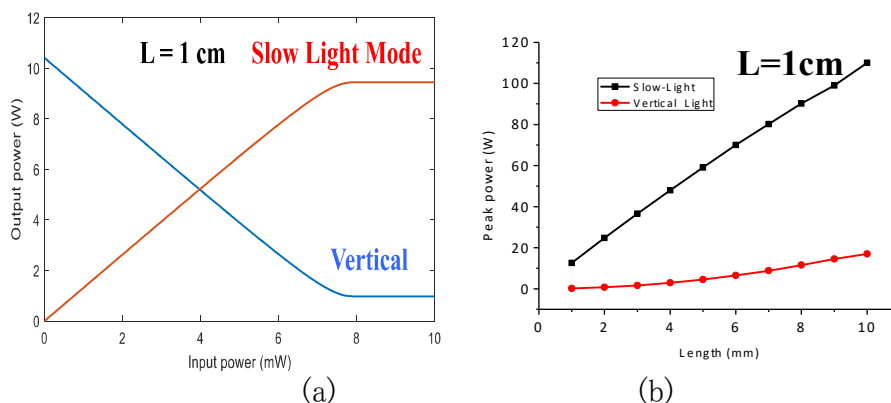
富士フイルムビジネスイノベーションでは、外部より種光を入力し動作させる面発光レーザー増幅器 (VCSEL SOA) において、連続波 (CW) 駆動で、素子長 10mm の素子から 3.25W の最大シングルモード光出力が得られること、素子長 2mm の素子を用いたビーム品質評価では、1 に近い M2 値が得られることを実験と計算の両面から確認した。さらに、この VCSEL SOA 構造をベースに、出射面上に回折格子を作製することで外部からの種光入力を不要とし、電流注入のみでモード制御できるスローライトレーザー (SLL) を試作し、素子長 6mm の素子から、1.8W の最大シングルモード光出力が得られることを実証した。また、この SLL 素子を高い冷却性能を有するマイクロチャネルクーラー (MCC) 上にアレイ化実装することで、10 本のアレイ化により、18.3W の最大光出力が得られることを確認した。最終目標として設定した光出力 > 50W、M2 < 2 には届かなかったものの、28 本以上のアレイ化を行うことで、光出力 50W に到達する見込みを得た。さらに、ウェハ表面から斜め方向に出射し、素子の長尺方向にはコリメートされるという特徴的なビーム特性に対応した集光光学系と、数 A の大電流で、かつ ns オーダーのパルス幅で高速変調可能な駆動ボードを設計・試作し、SLL チップと合わせてモジュール化することで、持ち運び可能な小型光源モジュールを試作した。さらに、この小型光源モジュールの試作品を再委託先である産総研に持ち込み、加工用光源としての適用性評価を実施した。パルス幅 5ns で、duty 比などを駆動パラメータとして、各種材料へ照射実験を行い、樹脂フィルム、エラストマー材料、ポリプロピレン板などに対して明瞭な加工痕を確認し、加工応用事例を明らかにすることができた。

表Ⅲ2-3-4-4 研究開発項目と達成状況

研究開発項目	最終目標	成果	達成度
<p>高出力面発光レーザーの開発 (東京工業大学)</p>	<p>高ビーム品質動作の理論的検証 光出力>100W (pulse), M2<2</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ VCSEL 増幅器の単一モード 10W 級動作検証と 100W 級動作のスケール則実証、ビーム拡がり角を 0.015° 実現 (平均 M2~1.5 相当) ・ 5 ナノ秒の短パルス動作実証とパルス出力 5 倍以上増大の可能性提示 ・ 微小曲げ半径による折り返し構造を実現、チップ面積 1mm × 0.5mm で 7W (チップ平均パワー密度 1.4kW/cm²)。スケーリング則から、3mm × 3mm へのチップ面積でパルス出力 100W の可能性示唆。 ・ 表面周期構造を有する面発光レーザーを提案し、素子長 6mm でパルス出力 10W の単一モード発振・高ビーム品質を実現 ・ 増幅器集積光源でパルス出力 4W の単一モード出力と、0.05° の狭出射ビーム実現。 ・ 長尺 VCSEL 増幅器によるビーム掃引機能を実現、解像点数 600 点、さらに、回折光学素子 (DOE) を積層することで、解像点数 4,000 を実現。 	<p>△</p>
<p>高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発 (富士フイルムビジネスイノベーション)</p>	<p>1. 光出力>50W (CW), M2<10 2. 駆動モジュールの設計・評価</p>	<p>1-1. 10mm 長 VCSEL 増幅器 (SOA) : 3.25W (CW), M2~1.5 1-2. 6mm 長スローライトレーザー (SLL) : 1.8W 1-3. SLL10 本アレイ : 18.3W (28 本アレイで 50W 到達の見込み) 2. 小型駆動モジュール設計試作完了、樹脂材料への加工実験を実施</p>	<p>△</p>

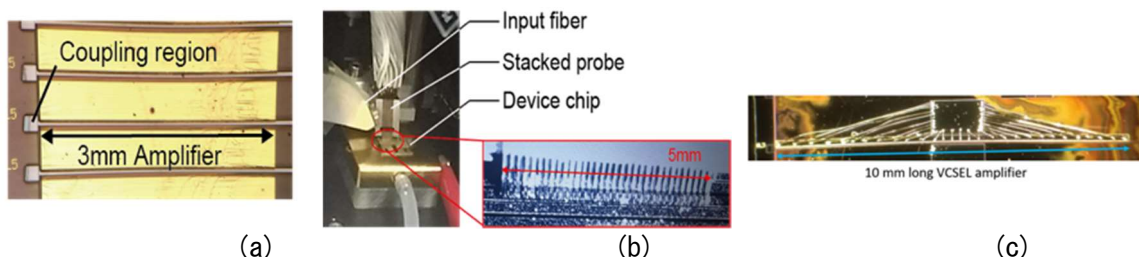
(5) 成果の詳細

「高出力面発光レーザーの研究開発」では、スローライトと増幅自然放出光を取り入れた進行波レイト方程式による面発光レーザー増幅器の動作解析手法を確立した。スローライトと増幅自然放出光を取り入れた進行波レイト方程式による面発光レーザー増幅器の動作解析手法を確立し、ワット級高出力動作の可能性を示すとともに、実験的にその有効性を明らかにした。図Ⅲ2-3-4-a1に示すように、長さ1cm超でCW10ワット級の高出力、パルス動作で駆動電流密度を10倍に増大させ、CWでの約10倍、すなわち100W級の高出力動作の可能性を示した。



図Ⅲ2-3-4-a1 VCSEL 増幅器の高出力特性のシミュレーション結果 (a) CW、(b)パルス動作

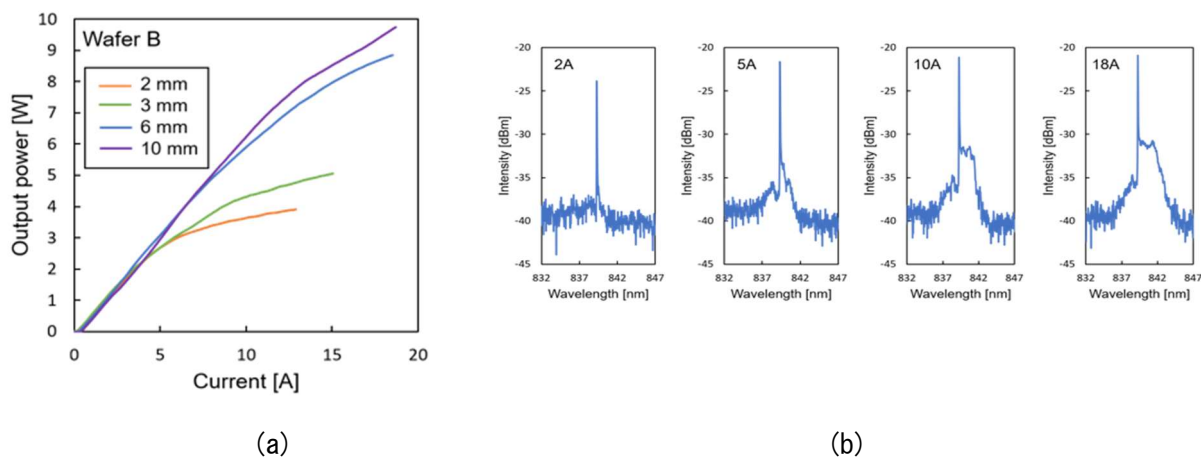
本研究では2つの波長帯850nm帯と980nm帯のVCSEL ウェハを用いてVCSEL 増幅器を作製し、その特性を評価した。基本構造は通常のVCSEL 構造であるが、導波モードによる増幅自然放出光を抑圧するためのSCH層のAl組成を大きくし、導波モードをカットオフになるように設計した。通常の面発光レーザーの製作プロセスを用いて、長さ1mm~10mmの長尺VCSEL 増幅器を作製した。横方向は、酸化狭窄構造で、幅3~4 μ mの酸化開口に光を閉じ込める構造を用いている。図Ⅲ2-3-4-a2(a)に試作した長尺VCSEL 増幅器の表面写真を示す。特に長尺素子については、注入電流を均一化するために、図Ⅲ2-3-4-a2(b)、(c)に示すように多点プローブや、多点ワイヤボンディングを用いた。



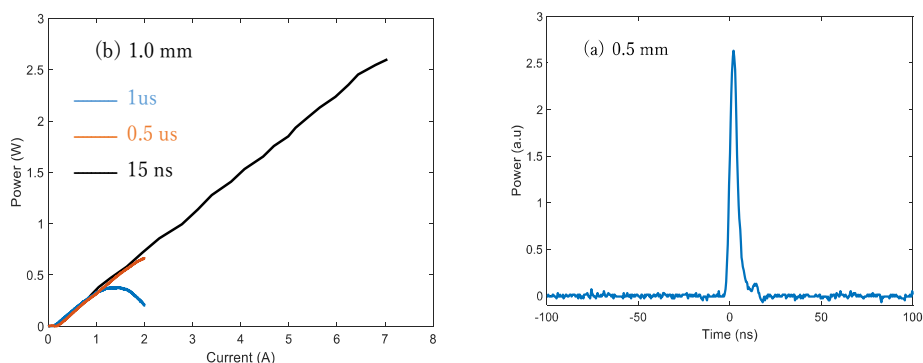
図Ⅲ2-3-4-a2 (a) 試作したVCSEL 増幅器、(b)多点プローブによる注入電流均一化、(c)10mm長素子の多点ワイヤボンディング

自己発熱の影響を軽減するため、パルスモードでの光出力特性を評価した。パルス電流はパルス幅100ns、繰り返し周波数1kHzの条件で電流注入を行った。外部の波長可変光源からの光をレンズファイバを用いて素子左端の光結合部から波長839nmの光を結合した。素子長2mm~10mmのI-L特性を図Ⅲ2-3-4-a3(a)に示す。また、図Ⅲ2-3-4-a3(b)に示すように単一モード動作が得られ

ていることがわかる。素子長 10mm の長尺素子に対しては、10W の光出力が得られた。現行の光出力の律速要因としては、パルス内での自己発熱による温度上昇がある。実際に、素子長 0.5~1mm の VCSEL 増幅器に対して、高周波プローブを用いて、15nsec 以下の短パルス電流で駆動した。図Ⅲ2-3-4-a4 に示すように、短パルス化によって、ピーク出力は 5 倍以上まで増加し、素子長 1mm に対しても出力 2.5W を超えた。これは、長尺素子でパルス幅をナノ秒まで短パルス化することで、数十 W を超える高出力化の可能性を示唆している。現状では、パルスドライバ電源による制約があり、モジュール実装によってパルス電源直近に配置することによって、より高電流での動作、高出力化が可能になる。



図Ⅲ2-3-4-a3 (a) VCSEL 増幅器のパルス動作時の電流対光出力特性と (b) 発振スペクトル

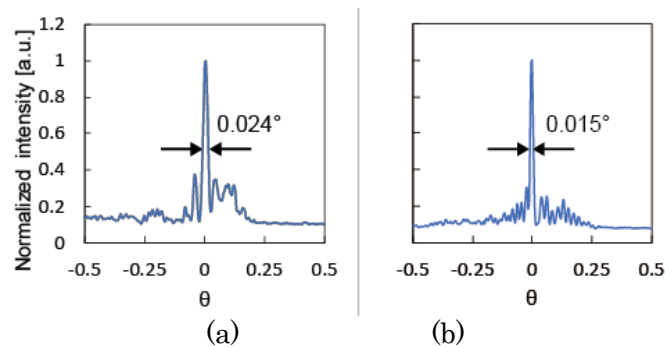


図Ⅲ2-3-4-a4 VCSEL 増幅器の短パルス動作 左：光出力特性、右時間応答波形（パルス幅 5nsec）

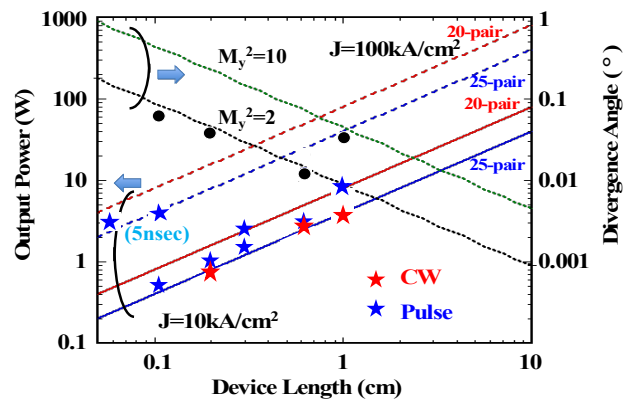
試作素子のビーム品質の評価を行った。図Ⅲ2-3-4-a5 に素子長 6mm の VCSEL 増幅器の遠視野像を示す。それぞれ、(a)は 1 点プローブ、(b)は多点プローブを用いての評価結果である。多点プローブにより注入電流均一化を行った場合は、最小 0.015° のビーム拡がり角が得られた。素子長 6mm の回折限界は 0.007° であるため、理想的な回折限界の約 2 倍の拡がりであり、直交方向は回折限界のガウスビーム形状であることを考慮すると、2次元の平均的な M^2 としては、 $M^2=1.5$ を実現した。また、図Ⅲ2-3-4-a6 に、VCSEL 増幅器の素子長に対する最大光出力とビーム品質（ビーム拡がり角）を示す。素子長に比例して出力は増大し、反比例してビーム拡がり角が小さくなるスケールング則が成り立つことを実験的に実証した。これらの結果から、素子長を 20mm までの長尺化とナノ秒オーダの短パルス化により、100W 級の高出力化が可能であることがわか

る。これらの一連の高出力 VCSEL 増幅器の設計・試作結果は、共同研究先の富士フィルム BI 社に技術移管し量産技術での試作へと展開した。

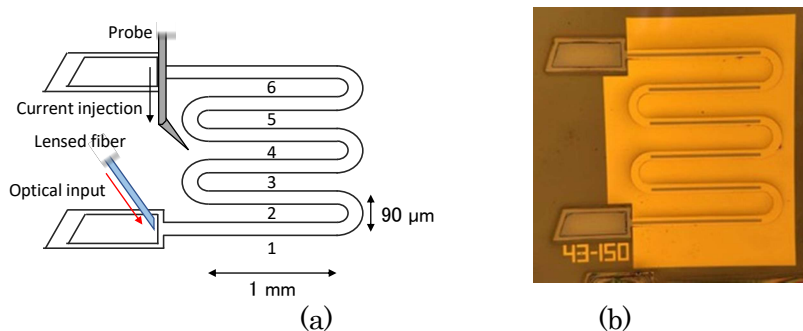
本研究開発では、図Ⅲ2-3-4-a7 に示すように微小な曲げ半径（曲率半径 $30\mu\text{m}$ 以下）による折り返し構造の VCSEL 増幅器を提案・実現した。図Ⅲ2-3-4-a7 (b) に示すように、総長 10mm 折り返し構造を用いた長尺化の試作素子において、図Ⅲ2-3-4-a8 (a) に示すように、チップ面積 $1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ で 7W の光出力を得た。これは、チップ平均パワー密度に換算すると $1.4\text{kW}/\text{cm}^2$ に相当する。その遠視野増は、図Ⅲ2-3-4-a8 (b) に示すように、フェーズドアレイと同様にアレイによる光干渉により、ドットパターンの遠視野像が得られている。スケーリング則から、 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ のチップ面積拡大により、100W 以上の光出力が期待できる。



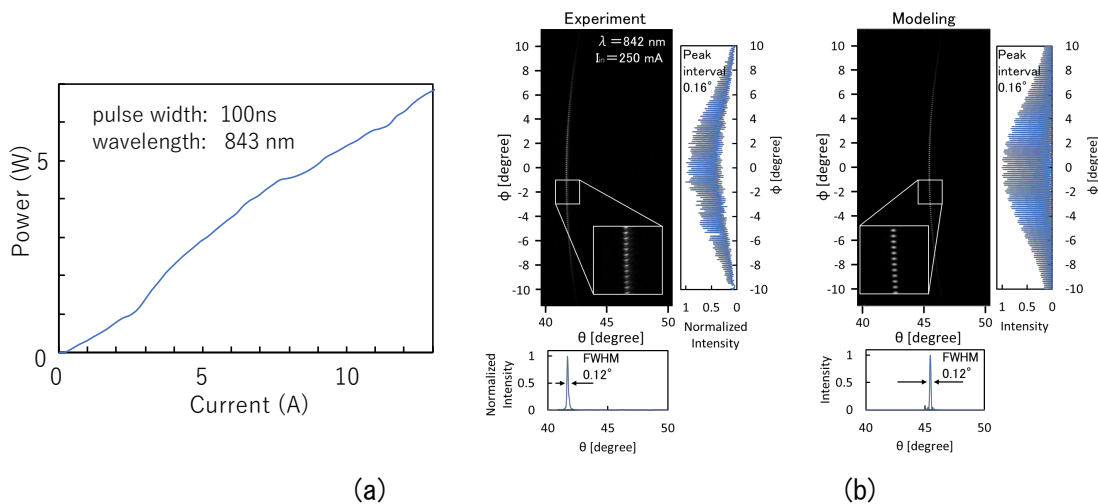
図Ⅲ2-3-4-a5 素子長 6mm の VCSEL 増幅器の遠視野像(a)1点プローブ、(b)多点プローブ



図Ⅲ2-3-4-a6 VCSEL 増幅器の素子長に対する出力とビーム品質



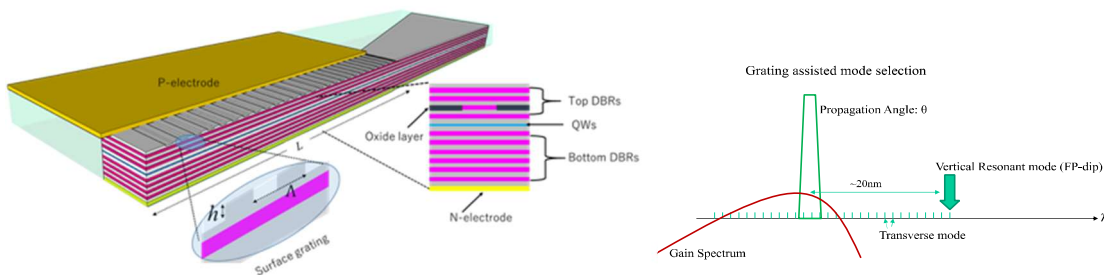
図Ⅲ2-3-4-a7 12mm 長の長尺折り返し増幅器の構造概念図Ⅲ(a)と試作素子の顕微鏡写真(b)



図Ⅲ2-3-4-a8 折り返し構造の(a)電流対光出力特性と(b)遠視野像

本研究開発期間中に、VCSEL 増幅器に光の帰還機構を導入することで、種光源無しに高出力かつ高ビーム品質のレーザーが実現できることを見出した。図Ⅲ2-3-4-a9 にその構造とモード選択の概念図Ⅲを示す。いわゆる光通信で普及している分布帰還型 (DFB) レーザーと類似の考えであるが、本提案構造の新規性と特色は、 1) VCSEL の特色である表面出射のため、端面破壊などがなく、長尺化により高出力動作が可能、 2) 回折格子は表面に形成すればよく、DFB レーザーなどで必要な再成長が不要で、量産技術である VCSEL プロセスが転用可能、 3) 導波モードではなく、スローライト伝搬モードを対象としているため、回折格子の周期を決定する位相屈折率が通常の導波モードの 1/5 以下であり回折格子形成が通常のステッパー露光などで形成可能、 4) スローライト伝搬により回折格子の結合係数が増大するため、回折格子深さが数十 nm の浅い構造でも大きな結合が得られるため、構造の製作が容易。

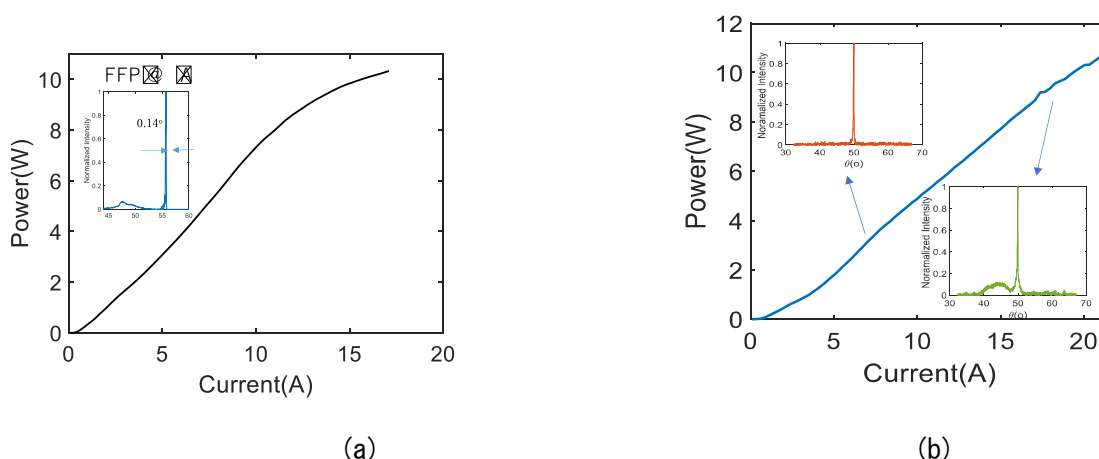
この新構造の高出力素子に対して、素子の解析・設計を行った。図Ⅲ2-3-4-a9 に示すように、数 mm 以上の長尺素子に対しても安定な単一モード動作が可能である。



図Ⅲ2-3-4-a9 表面回折格子面発光レーザーの構造図とモード制御

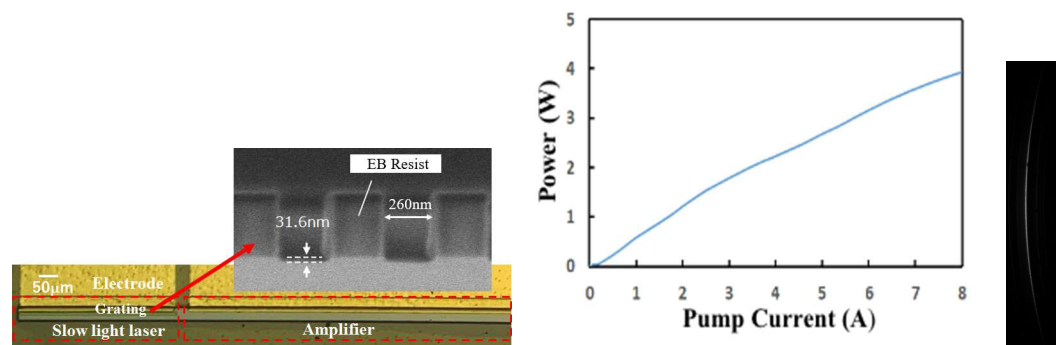
実際に通常の 850nm 帯 VCSEL ウェハを用いて表面回折格子を通常のフォトリソグラフィで 6 次回折格子 (周期 3.3 μ m)、電子ビーム露光で 1 次回折格子 (周期 0.52 μ m) を製作した。図Ⅲ2-3-4-a10 に、素子長 6mm でのパルス動作時の電流対光出力特性を示す。それぞれ、10W 以上の高出力動作を実現した。単一モード動作と単峰性の狭出射ビームを実現した。2 次元の平均 M^2 は約 2.2 で

あるが、前述した VCSEL 増幅器の場合と同様に単一プローブによる電流不均一性がビーム品質の劣化要因であり、多点プローブ等でこの課題は解決できる。



図Ⅲ2-3-4-a10 長尺素子の電流対光出力特性：(a)回折次数6次の表面回折格子 VCSEL (L=6 mm)、(b)回折次数1次の表面回折格子 VCSEL (L=6mm)

VCSEL 増幅器モジュールの小型化を実現するために、外部光源を使わずに、単一波長面発光レーザーと増幅器の集積構造に取り組み、種光源である単一モード面発光レーザーと VCSEL 増幅器の一方向性結合を可能とする集積化を初めて実現し、 $M^2 \sim 2$ に相当するビーム品質を得た。単一モード VCSEL 集積化に関しては、図Ⅲ2-3-4-a11(a)に示すように、種光源に表面回折格子を形成することにより、種光源の長尺化による高出力化と単一モード化を両立し、単一モード VCSEL 集積の VCSEL 増幅器の高出力化に成功した。図Ⅲ2-3-4-a11(b)に示すように VCSEL 増幅器出力として、パルス幅 50nsec でパルス出力 4W を実現した。また、図Ⅲ2-3-4-a11(c)に示すように、単一モード動作、ビーム広がり角 0.066° の狭出射ビームを確認した。前述したように、集積光源についても、増幅器の長尺化と短パルス化により、5倍以上の高出力化が期待できる。

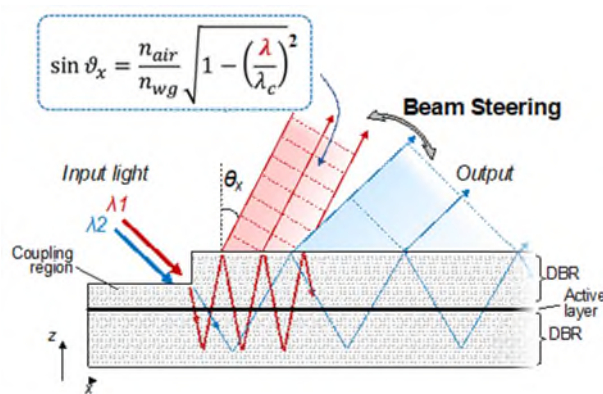


図Ⅲ2-3-4-a11 (a) 種光源集積型 VCSEL 増幅器、(b) 電流対光出力特性、(c) 遠視野像

本研究開発で得られた付加的な機能として、ビーム偏向機能を実現した。ビーム偏向機能は、VCSEL 増幅器に結合する光の波長を変化させることで実現できる。図Ⅲ2-3-4-a12に示すように、VCSEL 増幅器の大きな導波路分散によって、VCSEL 増幅器の上部に放射するラインビームの偏向角を波長を変えることで可能になる。光源集積素子においては、電気的に種光源の波長を変えることで、非機械的にビーム偏向が可能になる。さらに、回折格子素子(DOE)をビーム偏向器に積層す

ること、最大偏向角、解像点数を3~7倍に拡大できることを見出した。また、伝搬方向の異なる偏向器を1チップに集積する対向集積で、長さ4mmの素子の偏向角を10°から126°、解像点数を400から4,000以上に拡大することに成功した。これは、機械式偏向器も含め、世界最大の1D解像点数である。さらに、DOEと対向集積により、波長可変光源集積素子に対しても、最大偏向角100°、解像点数1,600を実現した。

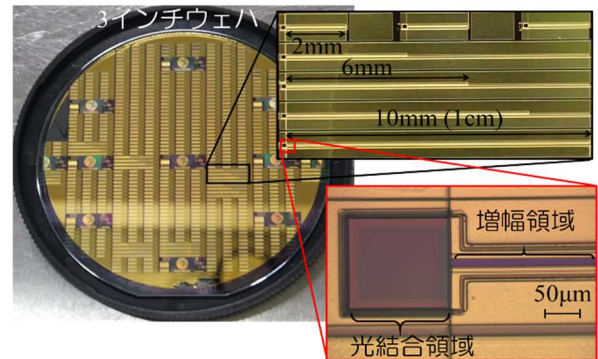
これらの非機械式レーザービームの偏向機能は、加工ビームの電気的な高速ビーム掃引や多点同時加工、線状ビーム生成を可能にし、製造工程における高精度加工処理の高速化に展開できると思われる。また、電気的な高出力レーザーパルスのビーム掃引機能は、LiDARなどの3Dセンシング分野や、レーザー加工分野におけるプロセスモニタ機能の創出にも寄与できる。



図Ⅲ2-3-4-a12 VCSEL 増幅器のビーム偏向機能

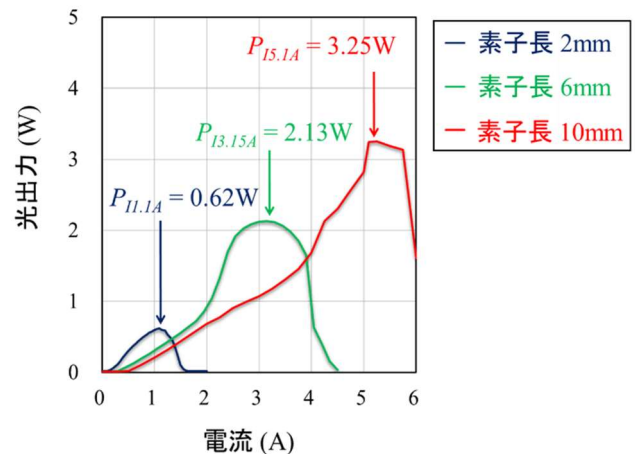
「高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発」では、高出力面発光レーザーの評価装置を設計、導入するとともに、3インチウエハプロセスにより長尺面発光レーザー増幅器の試作を行った

(図Ⅲ2-3-4-b1)。素子長の異なる VCSEL SOA を試作し、電流-光出力特性を測定した結果、最大シングルモード光出力が、0.62W(素子長 2 mm)、2.13W(素子長 6 mm)、3.25W(素子長 10 mm)と素子長が長くなるのに従って、スケールアップで増加していくことを確認した。この結果を図Ⅲ2-3-4-b2 に示す。なお、電流-光出力特性上に現れているキックは、電流が増加するのに従って利得波長がシフトし、種光波長によるモード制御性が変化することに起因して発生している。図Ⅲ

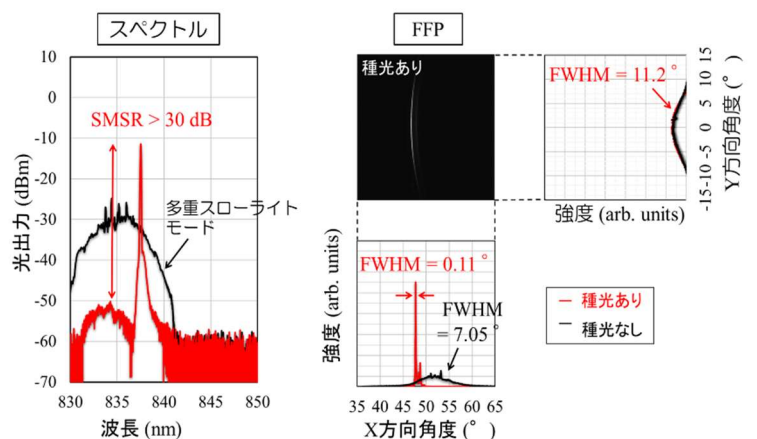


図Ⅲ2-3-4-b1 3インチウエハプロセスによる長尺面発光レーザー増幅器

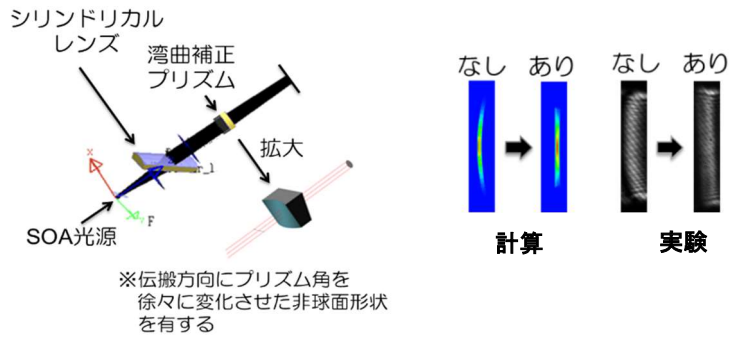
2-3-4-b3 には、素子長 10 mm の VCSEL SOA を電流 5.1A で駆動した際のスペクトルおよび FFP の測定結果を示す。赤線は種光入力あり、黒線は種光入力なし(フリーランニング時)の測定結果である。種光入力なしの条件では、モード制御されず、利得波長に応じた多重スローライトモードが出力され、XY 両方向に広がったビームが射出されている。一方、種光入力ありの条件では、モードが制御されて X 方向の拡がり角が 0.11° まで狭まり、ライン状のビームが射出されることが確認できた。この時のシングルモード抑圧比(SMSR)は、30dB を超えており、十分なシングルモード制御性が得られている。さらに、図Ⅲ2-3-4-b3 の FFP に示す通り、VCSEL SOA からの射出ビームは、やや弓なりの湾曲したライン状ビームになっているが、湾曲補正プリズムを挿入することで、直線状に補正できることを確認している(図Ⅲ2-3-4-b4)。



図Ⅲ2-3-4-b2 長尺面発光レーザー増幅器の単一波長 CW 高出力動作

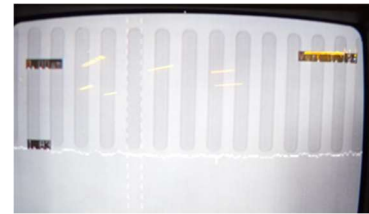


図Ⅲ2-3-4-b3 素子長 10 mm の VCSEL SOA を電流 5.1A で駆動した際のスペクトルおよび FFP (赤線：種光入力あり、黒線：種光入力なし)

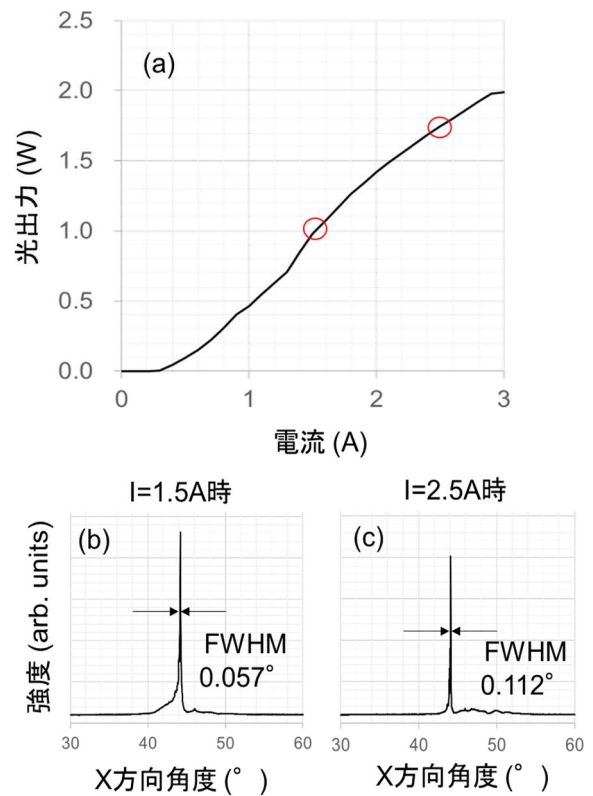


図Ⅲ2-3-4-b4 補正プリズムを使ったビーム形状補正結果

最終年度に、VCSEL SOA の構造をベースに、出射面上に回折格子を作製することで、種光入力不要でモード制御可能な新規光源スローライトレーザー(SLL)が東工大から発案されたことを受け、SLL 素子の開発を実施した(図Ⅲ2-3-4-b5 に半導体表面に形成した回折格子像を示す)。図Ⅲ2-3-4-b6 に、素子長 6mm の SLL チップの電流-光出力特性と FFP の測定結果を示す。種光入力が必要とする VCSEL SOA とは異なり、電流注入のみでも 3A 付近までモード制御され、1.8W の最大シングルモード光出力を得ることができた。さらに、この 6mm 長の SLL チップ 10 本を、放熱性に優れる AlN 基板の上に直列接続してアレイ化することで(図Ⅲ2-3-4-b7)、最大 18.3W の光出力を得た。図Ⅲ2-3-4-b8 には、アレイ化して測定した電流-光出力特性と、それぞれ 1 本の状態で個別に測定した結果を合計した特性を比較している。電流値 3A 付近まで、両者の結果はよく一致したが、アレイ化した素子は、電流値 3.3A で光出力が飽和した。アレイ化したことで熱クロストークが生じ、内部温度上昇が大きくなったためと推定している。さらに、図Ⅲ2-3-4-b9 に、SLL 本数を変化させた時の、それぞれの最大光出力を示す。光出力はほぼ本数に比例して光出力が増加しており、本研究開発の目標値 50W を達成するためには、28 本以上の SLL チップが必要と見積もられた。アレイ化した際の光出力は、1 素子から得られる光出力と本数の掛け算となる一方、ビーム品質を示す M2 値は

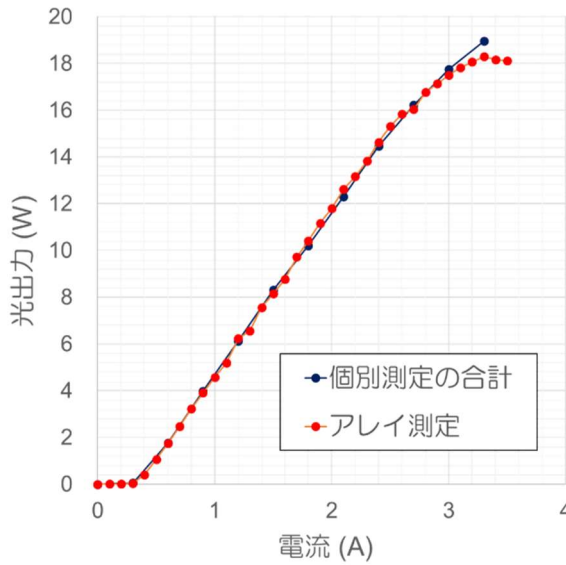


図Ⅲ2-3-4-b5 半導体表面に形成した深さ 30nm、周期 3 μ m の回折格子の顕微鏡像

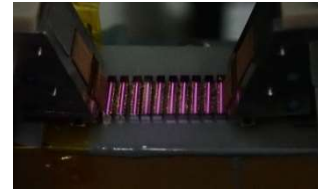


図Ⅲ2-3-4-b6 素子長 6mm、回折格子深さ 30nm、回折格子周期 3 μ m の SLL チップの
(a) 電流-光出力特性
(b) 1.5A 駆動時の FFP
(c) 2.5A 駆動時の FFP

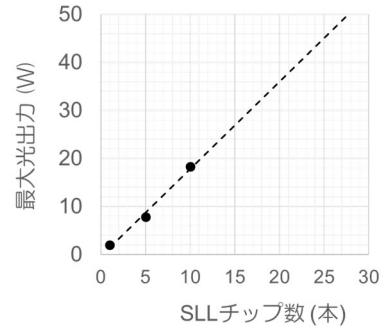
本数の平方根に比例して悪化する。よって、高ビーム品質と高出力を維持するためには、1チップの光出力を向上して、出来る限り少ない本数で出力を増加させる必要がある。



図Ⅲ2-3-4-b8 SLL アレイ (n=10) と個別測定した合計値との電流-光出力特性の比較



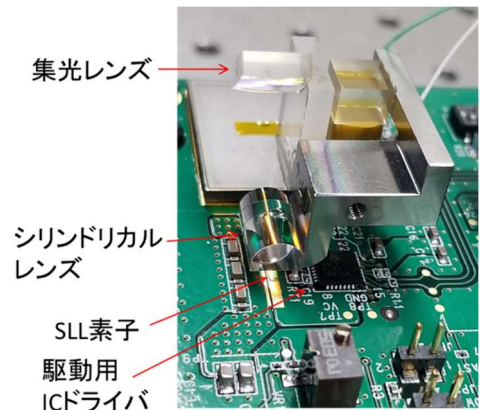
図Ⅲ2-3-4-b7 SLL アレイ (n=10) の駆動の様子



図Ⅲ2-3-4-b9 SLL チップ本数と最大光出力

SLL 素子の開発と並行して、SLL 素子を制御するための駆動ボードの設計を行い、SLL 素子および光学系を組み込んだ SLL モジュール(サイズ : 80mm×160mm)を試作した。パッケージ内の配線が高速化を律速するため、SLL チップはボード上に直接実装することとし、駆動用の IC ドライバと近接させることで、配線長が出来る限り短くなるよう設計した。また、集光性能を改善するため、集光光学系をカスタム設計し、駆動ボード上で、SLL 素子を駆動してアクティブアライメントを行い取り付けた。図Ⅲ2-3-4-b10 に SLL モジュール試作品の SLL チップ周辺部を示す。さらに、ユーザビリティを向上させるべく、FPGA からの信号でパルス駆動を行い、あらかじめプログラムした複数の点灯パターンの中から、dip スイッチの組み合わせで切替え可能な構成とした。

図Ⅲ2-3-4-b11 に、SLL モジュールの駆動評価結果を示す。CW 駆動時と duty 比を 3 水準変えたパルス幅 5ns のパルス駆動の電流-光出力特性(a)を比較すると、duty 比が下がるに連れて、熱飽和点が高電流側にシフトし、duty 比 1%の条件では、電流 5A まで光出力が増加し続けて、3W 近い光出力が得られることを確認した。さらに、集光点でのビームプロファイル(d)も電流 4.5A に至るまで単一ピークを維持し、最大のピーク集光密度(b)は、72.6kW/cm² と見積もられた。

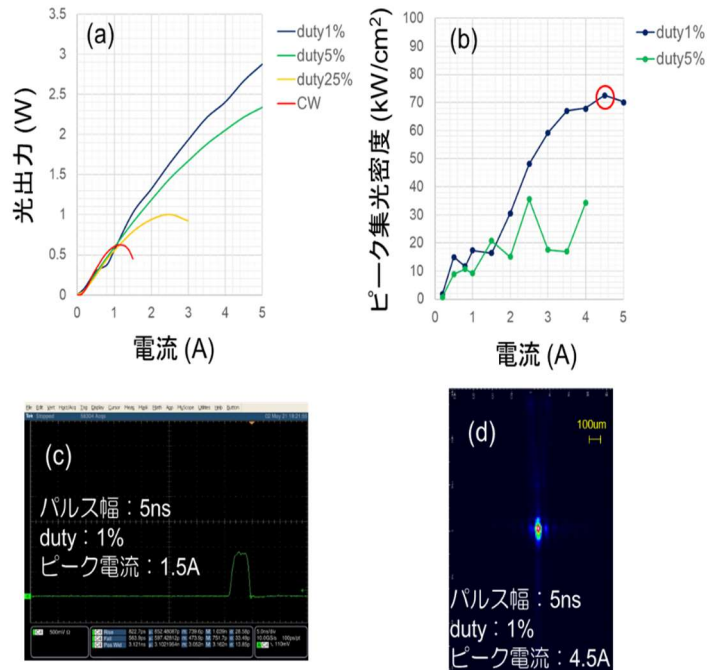


図Ⅲ2-3-4-b10 SLL モジュール試作品の SLL チップ周辺拡大図

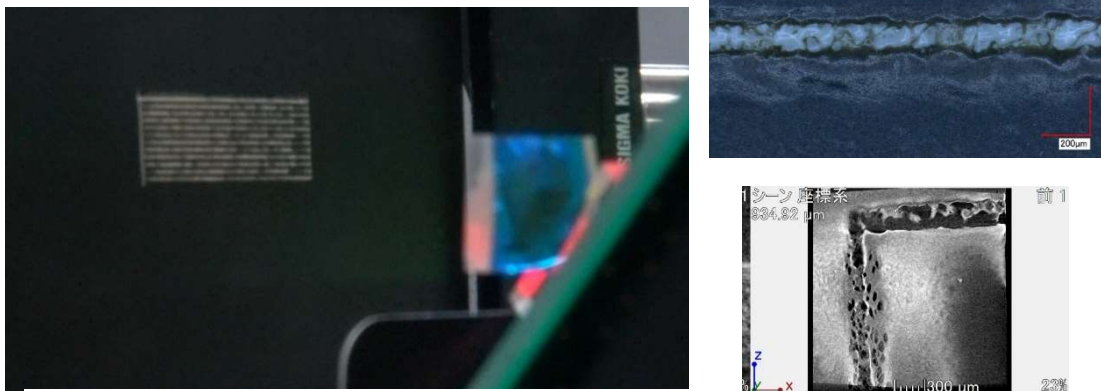
また、パルス光波形(c)も、立ち上がり(立ち下がり)時間は、サブnsオーダーに改善し、パルス幅5nsでも十分に駆動可能なことを確認した。なお、電流1.5Aの時のM2値は1.73であった。

このSLLモジュールを産総研に持ち込み、加工光源(レーザー波長850nm)としての適用性評価を実施した。まず、光パルス系列間における光出力値が200 μ sにわたって安定に発振していることを確認した。次に測定全パルス光の強度平均値に対する出力変動の評価を行い、駆動電流500mAで、光出力の安定性が $\pm 5\%$ 以内に入っていることを確認した。これは、加工用途の光源として使用する際の重要な特性であり、今回のモ

ジュール光源が加工应用到展開できる十分な性能を有していることを実証できた。さらに、加工感度5mJ \cdot cm $^{-2}$ のアライメント・ペーパーに対して、良好な多重線状の表面層除去加工を行うことができた。この結果を図Ⅲ2-3-4-b12に示す。加工ラインの光学顕微鏡とX線CT断層像観察から、加工幅100 μ mで高品位な除去加工ができていることがわかった。光源自体のサイズは極めて小さいにも関わらず、除去加工を行うだけの光ビームの強度ならびに集光特性を有していることが実証できた。なお、パルス幅5nsec、周期20nsec、Duty25%の駆動条件(0101モード)におけるアライメント・ペーパーの加工閾値は、設定電流値80mAであった。表Ⅲ2-3-4-b1に各種材料に加工試験を行った結果概要を示す。パルス幅5nsで、duty比などを駆動パラメータとして、各種材料へ照射実験を行い、樹脂フィルム、エラストマー材料、ポリプロピレン板などに対して明瞭な加工痕を確認し、加工応用事例を明らかにすることができた。エラストマー材料では、良好な溝加工が観測された。添加剤として配合されているカーボンブラックが光吸収サイトとなって、効率のよい除去加工が進行していると考えられる。板厚0.8mmの黒色着色ポリプロピレン板へのレーザー照射では、加工部周囲が土手のように盛り上がる結果が得られた。この現象より、バンプ型マーキング加工としての応用が期待される。従来のマーキング加工は、視認性の向上を主要な応用展開先として考えられてきたが、表面形状の凹凸を簡便に変化させることができる本現象は、指先の皮膚感覚による凹凸知覚特性を用いるマーキング手法などに展開できると可能性がある。「高出力高品位微小レーザー光源」を生かした各種材料への加工応用事例を明らかにすることができた。



図Ⅲ2-3-4-b11 SLLモジュールの評価結果
 (a) 電流-光出力特性 (b) 電流-ピーク集光密度特性
 (c) パルス光波形 (d) 集光点でのビームプロファイル



図Ⅲ2-3-4-b12 アライメント・ペーパー（感度 5mJ/cm²）への多重線加工結果(左), 光学顕微鏡写真(右上), X線CT平面断層像(右下)
 (多重線: 12ライン、0.1 mm 間隔 15 mm 長、レーザー: 0101 モード、500 mA、光平均出力: 0.23 W(オフィール社製 FL250-BBPDS 検出器の実測値))

表Ⅲ2-3-4-b1 加工試験結果概要

加工材料	照射条件	0101(500mA)	0101(300mA)	0101(80mA)	0001(200mA)	0001(100mA)	0110(45mA)
アライメント・ペーパー (加工感度: 5mJ・cm ⁻²)		加工確認 (表面層除去加工)	加工確認 (表面層除去加工)	加工確認 (表面層除去加工)	加工確認 (表面層除去加工)	加工確認 (表面層除去加工)	加工痕なし
エラストマー材料 (アクリル系ゴム、添加剤として カーボンブラックを33%含有)		加工確認 (クリーンな除去加工)	加工確認 (クリーンな除去加工)	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし
ポリプロピレン板(黒色着色)		加工確認 (パンパ型マーキング)	加工確認 (パンパ型マーキング)	加工確認 (パンパ型マーキング)	加工確認 (パンパ型マーキング)	加工痕なし	加工痕なし
レーザープリンタ用黒色トナー (OKI-DATA製プリンタ用トナー)		光吸収に起因する トナー粒子融着を目視確認	未検討	未検討	未検討	未検討	未検討
金コートガラス板		加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし
黒色塗料塗布表面のガラス板		加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし
黒色塗料塗布表面のポリイミド板		加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし
アルマイト処理アルミニウム板 (黒色着色)		加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし	加工痕なし

【ベンチマーク】

表Ⅲ2-3-4-1の他の高出力レーザーとのベンチマークに関しては、特に直接半導体レーザーとの比較では、現時点ではCW出力3.25W、パルス出力10Wであり、単一エミッターとしての出力レベルでは1/10以下であるが、ビーム品質（M2値）に関しては50倍程度の優位性がある。また、量産・低コスト化が可能な単一モード面発光レーザーとの比較では、単一モード面発光レーザーの最高出力は10mW程度に留まっており、既に1000倍以上の高出力化に成功している。100W級高出力動作を実現することで、既存の高出力直接半導体レーザーに比べて、ビーム品質、小型化、コストの面から強い競争力が期待できる。

（6）実用化・事業化への取り組み

種光源を必要としないSLLチップの実現によって、目標とする50Wには到達できなかったもの、6mm長の単一素子から約2Wと標準的なVCSELの約1000倍のシングルモード光出力が得られた。さらに、このSLL素子10本をアレイ化することで18Wを達成し、28本をアレイ化することで光出力50Wに到達できる見込みである。しかし一方で、チップ数の平方根に比例してビーム品質は悪化するため、高出力と高ビーム品質とをさらに高いレベルで両立させるためには、チップあたりの光出力をさらに向上していく技術開発が必要である。大学での、さらなる高出力が期待できるSLLチップを種光源に用いた集積型増器の研究開発の進展状況に応じて、企業でも試作を実施していく。一方で、本事業での活動によって得られた、W級の光出力で高ビーム品質を維持した新規光源は、直接加工用途だけでなく、例えば、LiDAR用測距光源としての用途やレーザー加工のその場観察用光源として展開できる可能性がある。特にLiDAR用途に向けては、本開発チップの特徴でもあるライン状ビームを1次元的にスキャンすることで、測距動作の高速化と長距離化とを両立できる利点がある。まずは、現在の光出力レベルでも適用可能なLiDAR用途に向けて検討を進め、その後、光出力の向上に合わせて、加工領域へと展開していく。

（7）知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-3-5. 「高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発」（実施先：東京大学—再委託先 株式会社 QD レーザー、三菱電機株式会社）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

レーザーを用いた生産装置市場は年率 8% で成長しており、産業装置としてのレーザーの重要度が増している。2030 年以降もレーザー装置の利用は伸長すると予測され、産業用エネルギー削減の観点からもレーザー装置の消費エネルギー低減が求められている。このトレンドの一つの現われとして、効率 10% 程度の CO₂ レーザーから効率 30% 程度のファイバレーザーへの切り替えが進行している状況にある。2030 年以降の次世代産業用高出力レーザーは、圧倒的に高い効率を有していることから、半導体レーザーが主役になる可能性が高いものと考えられる。特に、量子ドットレーザーは現存の半導体レーザーの効率をさらに抜本的に向上させる可能性を有しており、次世代のレーザー加工光源の中核を担う素子として期待できる。

本研究開発の目的は、量子ドットレーザーを「次々世代加工に向けた究極的新規光源」と位置付け、従来の適用領域とは大きく異なる高出力・高注入電流領域において高効率動作を実現することにより、レーザー加工の分野の光源に革新をもたらすことである。

本研究開発においては、高品質・高密度・高均一量子ドットを形成する結晶成長技術の開発を行うとともに、レーザーの高出力化を実現する量子ドットレーザー基板の結晶成長技術の確立を図る。さらに、高出力レーザーに適した活性層及び光共振器の設計等にもとづき、高出力量子ドットレーザーを作製し、量子ドットレーザーの大出力化の可能性を実証する。さらに、高出力量子ドットレーザーの加工応用に向けた周辺要素技術として、発振ビームを加工に適した状態に制御する外部光学系を考案するとともに、高出力化に伴って必要となる高出力量子ドットレーザーに適した水冷パッケージを開発する。これらの成果を集約することにより、高出力可能な集積量子ドットレーザーを実現する。

（２）研究開発目標と根拠

本研究開発においては、高出力量子ドットレーザーの実現可能性の実証を目的としているため、開発目標を以下に定めた。

◎中間目標（2018年度）

量子ドットレーザー出力密度 1 W/mm² 可能性実証

◎最終目標（2020年度）

量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm² 可能性実証、集積出力 100 W 可能性検証（研究の進展により2018年度中間評価後当初の目標値 10 Wから上向）

表Ⅲ2-3-5-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
レーザー出力密度	10 W/mm ² 可能性実証	現状の高出力半導体レーザーの出力密度が 10 W/mm ² 程度であるため。	1 W/mm ² 可能性実証	最終目標に向けた目標として妥当と考える
レーザー集積出力	100 W 可能性検証	目標値と同等レベルもしくはそれ以上を実現できれば、近い将来量子井戸レーザーを凌駕し、加工技術に革新をもたらす可能性があるため。	該当なし	

上記の目標設定根拠は以下のとおりである。現状の高出力半導体レーザーの出力密度は 10 W/mm² 程度であり、量子ドットレーザーにおいてこれと同等以上の性能が実現できれば、レーザー加工技術に革新をもたらすことが可能であるため。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-5-2 量子ドットレーザー開発スケジュール

	H28(2016)	H29(2017)	H30(2018)	H31(2019)	H32(2020)
(1)高密度量子ドット形成技術基盤の開発	・高密度化 ・多層化 (10層)			・高均一化 ・多層化 (20層)	
(2) 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証	光共振器設計		素子構造最適化 性能限界の検討		
	大出力用量子ドットレーザー試作開発 出力: 1W/mm ² 可能性実証			出力: 10 W/mm ² 可能性実証 集積出力 100 W 可能性検証	
(3)高出力量子ドットレーザー加工応用に向けた周辺要素技術開発	・大出力量子ドットレーザー用パッケージ開発 ・加工適用ビーム操作方式の試作検証			実用化開発に向けた応用形態の試作検証	

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。最終目標である量子ドットレーザー出力密度については、出力密度 10 W/mm² 以上を達成し、レーザー集積出力については 110 W を実現する最終目標を上回る成果を達成した。

表Ⅲ2-3-5-3 研究開発項目と達成状況

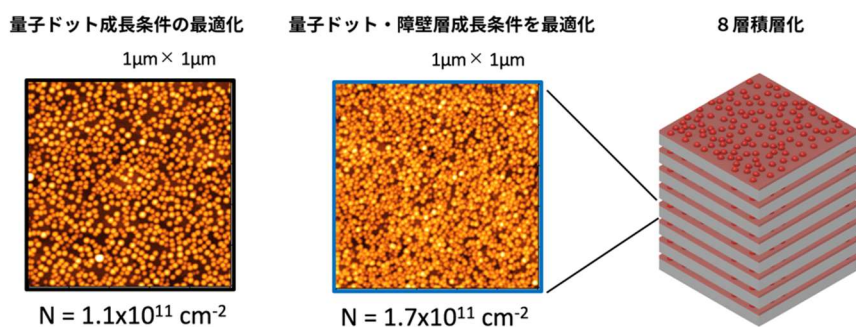
項目	最終目標	成果	達成度
レーザー出力密度	10 W/mm ² 可能性実証	> 10 W/mm ²	◎
レーザー集積出力	100 W 可能性検証	110 W	◎

(5) 成果の詳細

1. 高密度量子ドット形成技術基盤の開発（東京大学、QDレーザー株式会社）

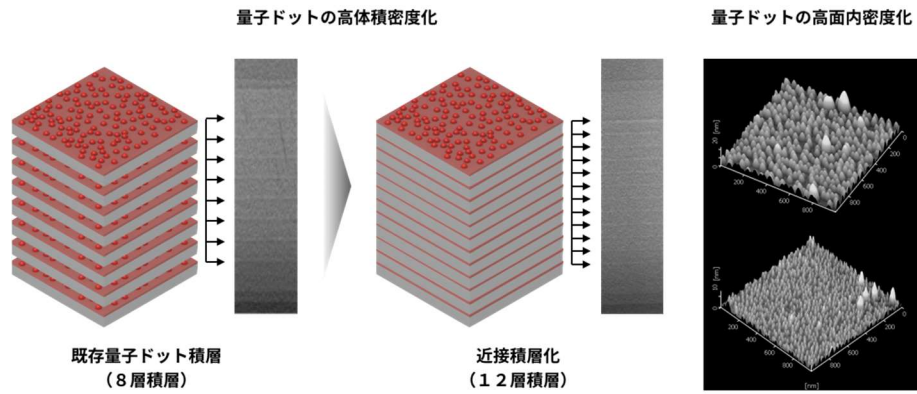
高密度量子ドット形成技術基盤の開発は、最終目標である量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm² 可能性実証のために従来に比して面内で高い密度を有する InAs/GaAs 量子ドットの形成することに取り組んだ。InGaAs/GaAs 量子ドットの形成は、Stranski-Krastnanow 成長モードに基づき自己組織化結晶成長の手法を用いた。高出力化のためには、量子ドット層からの利得を増加が必要であり、それを実現するためには、量子ドットの総面密度（一層当たりの面密度×層数）を増大することが不可欠である。このために、本開発では、面内密度の高密度化及び、量子ドット層の多層化を主眼にして、結晶成長技術の研究を行った。

高効率・高出力量子ドットレーザーの実現に向けた結晶成長技術の基礎的データを得るために、高い面積密度が得られるさまざまな条件での成長を行った。1.15 μm 帯 InGaAs 量子ドットについて、量子ドット原料供給量の最適化を図ることにより、 $1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ までの面内高密度化を実現した。一方、1.05 μm 帯量子ドットについては、量子ドットおよび障壁層の成長温度の最適化を図ることで、この波長帯としては世界最高の面内密度である $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ を有する量子ドット層の形成にも成功した。



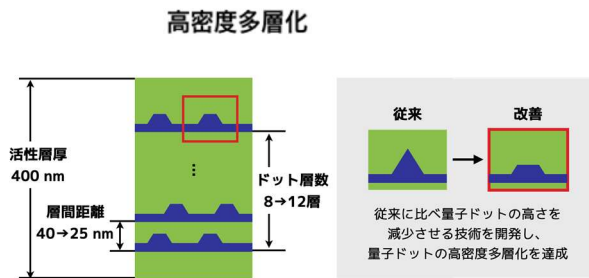
図Ⅲ2-3-5-1 量子ドットの高面内密度化及び高体積密度化

その上、高体積密度量子ドットの実現に向けた結晶成長技術を検討し、基礎的な成長条件出しを行うことで、量子ドットの部分キャップおよびインジウムフラッシュ法の最適化を図り、成長面の平坦性を確保させ、面内量子ドット密度および活性層の総厚を一定にしたまま、8層から12層まで積層数を増やすことに成功した。上記の成果を踏まえ、量子ドットレーザー素子を作製し、既存の量子ドットレーザーと同等な性能を確保することができた。

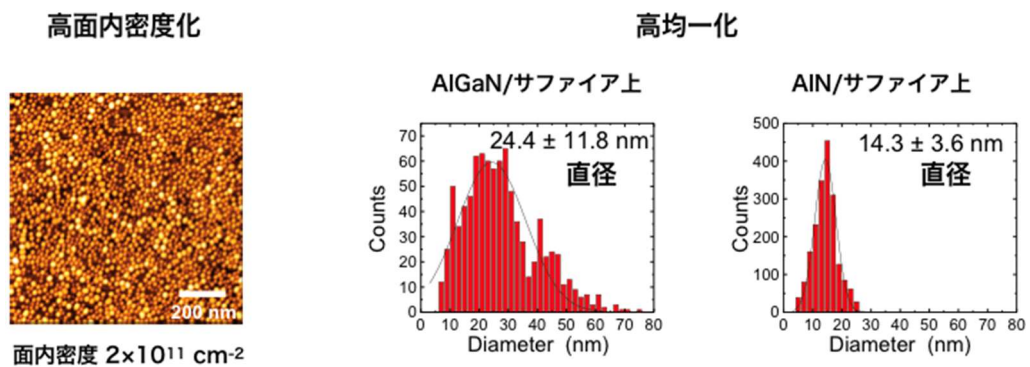


図Ⅲ2-3-5-2 量子ドットの高体積密度化及び高面内密度化

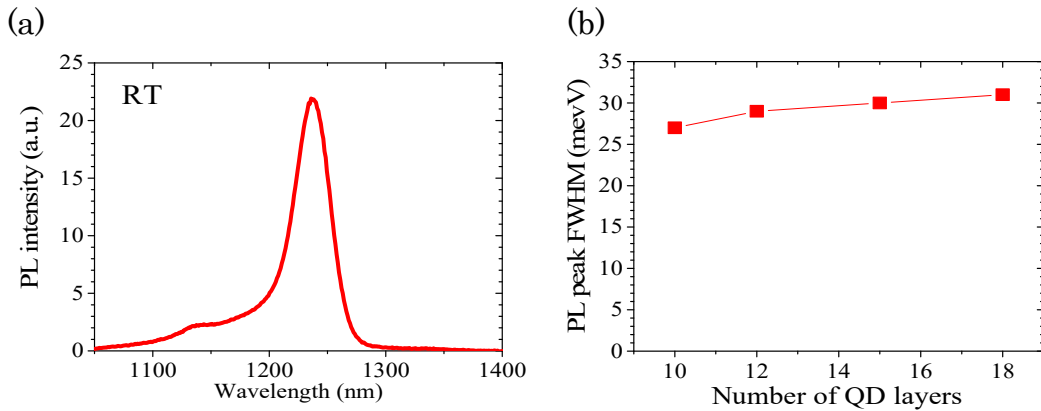
これらの結果を踏まえ、InGaAs 材料を用いた高面内密度量子ドット成長技術および量子ドット形成後の歪み低減技術の導入による高密度多層化を行うことで、従来の3倍の高密度化を達成した。特に、この試料を用いたレーザー素子の試作では、12層積層サンプルにおいてレーザー正味モード利得 70 cm^{-1} を達成した。成長条件のさらなる最適化を図ることにより、レーザー性能の向上が期待される。最終的には InAs/GaAs 量子ドットのさらなる高体積密度化のため、量子ドットおよびキャップ層の形成条件の最適化を行い、積層数を18層とした。第18層の面内量子ドット密度は $4.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、発光ピークの半値幅は 31 meV であり、多層化にもかかわらず量子ドットのサイズの不均一化の増大を抑制することができた。



図Ⅲ2-3-5-3 高密度多層化の要素技術開発



図Ⅲ2-3-5-4 GaN系量子ドットにおける高面内密度化及び高均一化



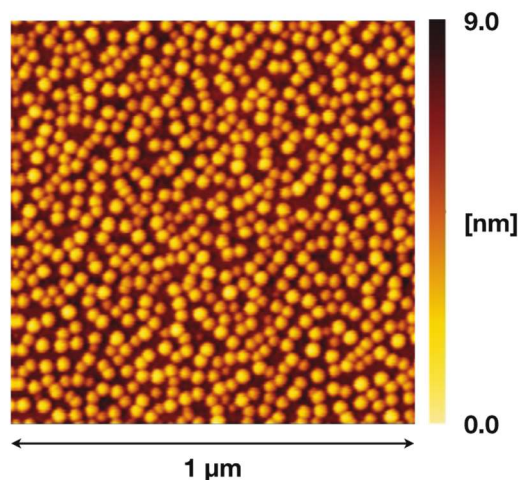
図Ⅲ2-3-5-5 18層積層量子ドットの(a)発光特性および(b)半値幅の層数依存性

2. 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証 (QDレーザー株式会社、東京大学)

本開発においては、高出力レーザーに適した量子ドット活性層及び光共振器の設計等を、量子ドットの利得媒質としての物理の理解に立脚して行い、大活性層体積を有する量子ドットレーザーにおける高出力かつ安定動作を実現する構造を明らかにするべく、試作を実施し、優れたデバイス特性の実用化に近い点まで進めることができた。最終的には、高出力量子ドットレーザー向け量子ドットウエハの結晶成長の改善、レーザーチッププロセス開発を行い、発振波長 $1.1\mu\text{m}$ 量子ドットレーザーの、同一波長量子井戸レーザーからの優位性を確認した。また波長 $1.24\mu\text{m}$ 量子ドットレーザーチップを作製し、連続光出力 1.6W の値を達成した。

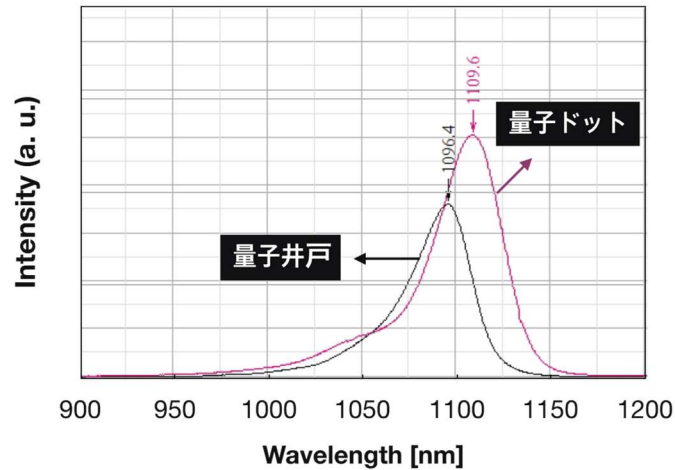
図Ⅲ2-3-5-6 に、本試作で用いた基本的な量子ドット構造の原子間力顕微鏡 (AFM) 写真を示す。現時点では、InGaAs を用いた量子ドット構造であり、量子ドット密度としては、 $7.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 程度のものとなっている。これを基本的な層構造とし、量子ドットの層数、障壁層・クラッド層の厚さ及び光共振器反射率等をパラメータとして振りつつ、最適な構造の調査を進めている。

本量子ドット構造については、PL 波長 $1.1 \mu\text{m}$ 程度で、密度の高いものを用いているが、東京大学における成果も取り込み、より密度が高く、レーザー特性のさらなる改善が可能な活性層へと改善も行った。



図Ⅲ2-3-5-6 レーザーに用いた、密度 $7.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ の InGaAs 量子ドットの AFM 像

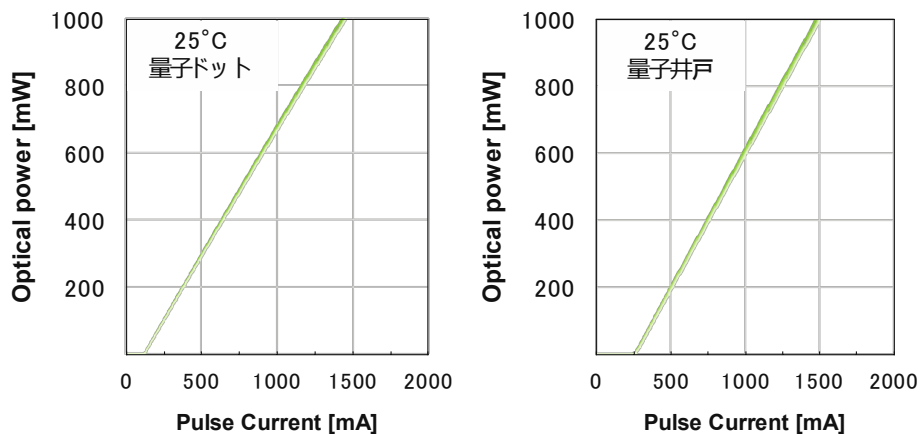
1. $1\mu\text{m}$ 帯の量子ドットの発光特性を、ほぼ同じ波長で発光する量子井戸と比較した結果を図Ⅲ2-3-5-7に示す。532 nm の励起光を用いたフォトルミネッセンス発光特性であるが、量子ドットと量子井戸で、ほぼ同じ発光ピーク、半値幅のものが得られていることが明確である。実際には、若干量子ドットの方からが発光強度が高いレベルである。



図Ⅲ2-3-5-7 量子ドット活性層と量子井戸活性層の発光特性の比較 (PLスペクトル)

これらの活性層を元に、初期的な評価を行うべく、ブロードエリアストライプ構造の π 半導体レーザーの試作を行い、レーザー特性の評価を行った。図Ⅲ2-3-5-8に、これらのレーザーの電流-光出力特性を示す。

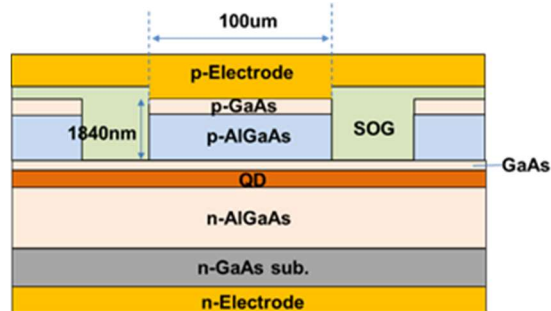
これらは室温 (25°C) での、パルス電流による測定結果であるが、従来用いられてきている量子井戸活性層と比較しても、現時点で初期的に作製した量子ドット活性層の構造にて、すでに同等の光出力が得られていることが明確である。さらには、発振閾値電流については量子ドットの方が優れており、量子ドットにおける高い効率が実現できていることが実験的にも明らかになった。レーザー出力は 1 W であり、共振器長 1 mm 、ストライプ幅 $100\ \mu\text{m}$ のレーザー構造であることを考慮すると、出力密度 $10\text{ W}/\text{mm}^2$ を達成していると結論付けられる。



図Ⅲ2-3-5-8 量子ドット (QD) 活性層と量子井戸 (QW) 活性層のレーザーにおける、電流-光出力特性

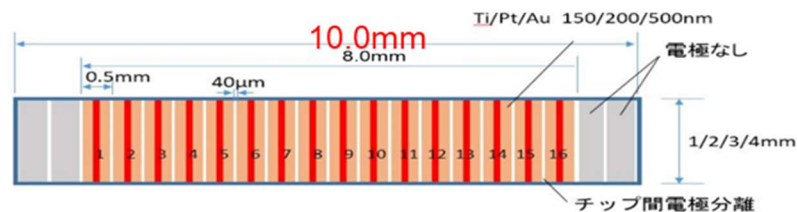
量子ドットの特徴として、温度上昇時にも特性変化が小さいことが明らかになっており、電流注入による温度上昇下の環境においても、この優れた特性が継続され、量子井戸より優れた特性が実現されていくことが期待される。

半導体レーザーの構造についても、検討、改善を行った。高出力特性を実現するにあたっては、活性層や、その周囲の抵抗成分より発生する発熱の影響を低減することが重要である。そのため、図Ⅲ2-3-5-9 に示す様なレーザー構造を設計し、実際の試作も行った。



図Ⅲ2-3-5-9 高出力用に設計、製作した、量子ドット活性層半導体レーザー構造（断面図）

ここで、活性層からの発熱を電極側に速やかに移動させるべく、熱抵抗の小さいAlGaAsをクラッドとし、電極側への熱の移動効率を高めた。この基本的な構造を、さらなる高出力化のためのアレー構造とし、16チャンネルの活性層を含むレーザーアレーを作製した。この構造を 図Ⅲ2-3-5-10 に示す。



図Ⅲ2-3-5-10 16チャンネルを集積した、量子ドットレーザーアレー構造（上面図）

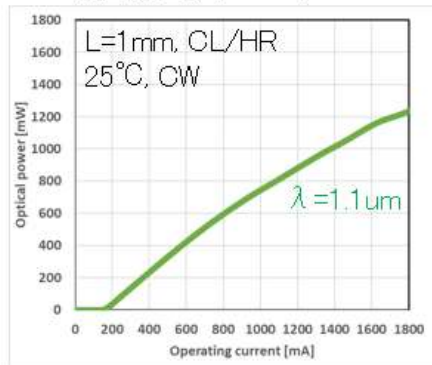
各チャンネルは、100 μm の電極幅を有し、共振器長は 1、2、3、4 mm と振って作製している。またストライプ感覚は、0.5 mm となっている。

ここまでは、波長 1.1 μm の量子ドットを用いたレーザーの結果であるが、さらにまた、波長 1.24 μm の量子ドットレーザーによる高出力化に向けた実験も行い、8層の構造で、初期試作として、1.3W以上の光出力を得ることができた。これらの結果とともに、量子ドットレーザーのさらなる改善として、量子ドット層数の増加、光学結合改善に向けた光ガイド層の設計と導入、また波長水準の増加、を行った。

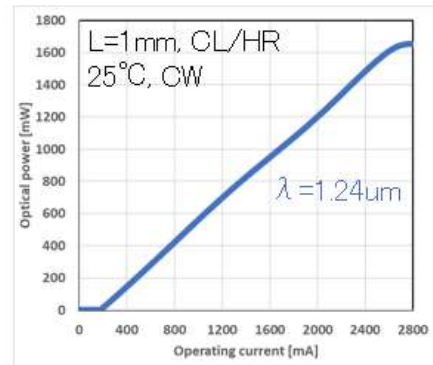
その後、これらの開発から、1.1 μm 帯の量子ドットレーザーでは、量子ドット層 12層が最適とわかり、光出力としても 1.2W が達成できた。電流-光出力変換効率 60%、光出力密度 10W/mm² 以上も得られた。波長 1.24 μm の InAs 量子ドットを用いた量子ドットレーザーにおいても、層構造の改善から、量子ドット層 8層において、1.6W 以上の光出力が達成できた。これらの結果を図Ⅲ2-3-5-11 に示す。

特にこの CW 光出力 1.6W を達成した発振波長 1.24 μm 量子ドットレーザーチップの、エミッタ数 16ch 素子での高出力発振を実証した。また、さらなる高出力化を可能とするための、チャンネル数を増加した、19ch の素子を作製した。このレーザーアレー構造を、図Ⅲ2-3-5-12 に示す。この多チャンネル素子により、加工用の高出力量子ドットレーザーの初期的な構造が実現できた。

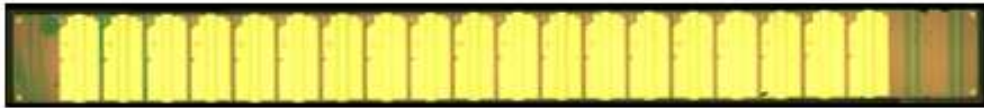
・1.1 μm 量子ドット
12層
CW駆動で1.2W達成
効率 \sim 60%
光出力密度 $>$ 10W/mm 2



・1.24 μm 量子ドット
量子ドットでの最適波長
CW駆動で1.6Wを達成



図Ⅲ2-3-5-11 1.1 μm 帯、また1.24 μm 帯の量子ドットレーザーの連続光出力特性



図Ⅲ2-3-5-12 1.24 μm 帯の量子ドットレーザーを用いて新規作製した、19 エミッターアレイ構造

3. 高出力量子ドットレーザー加工応用に向けた周辺要素技術開発（三菱電機株式会社）

高出力化に伴って、温度安定性に優れた量子ドットレーザーと雖も、効果的な排熱・冷却が必要となる。また、単一の半導体レーザーの出力では加工対象がごく限られた範囲となることから、幅広い加工応用のためには、複数の半導体レーザーを集積して加工に適した高輝度・高出力のビームを生成する技術が必要となる。

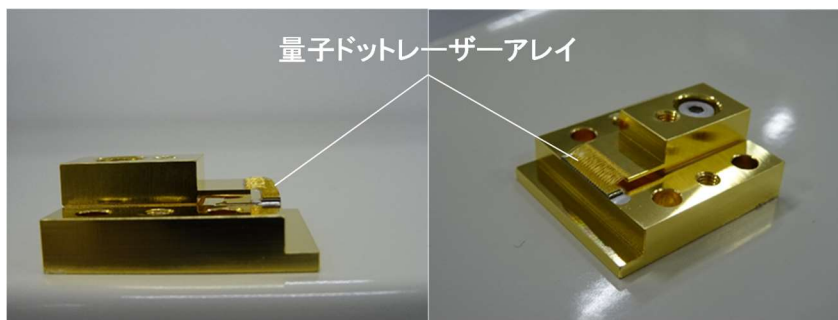
本研究開発では、集積化した高出力半導体レーザーによる高い発熱密度においても安定な動作を実現するために、高出力量子ドットレーザー用の高冷却パッケージを開発する。高冷却パッケージに搭載した高出力量子ドットレーザー発振ビームの特性評価と並行して、加工に適した高輝度・高出力ビームを生成するための技術として、複数ビームを同軸重畳するビーム結合光学系ならびに高集光ビームを発生する外部共振器に関する考案・試作・検証を実施し、高出力量子ドットレーザーの加工応用に向けた周辺要素技術の確立を図る。

(a) 高冷却パッケージ開発

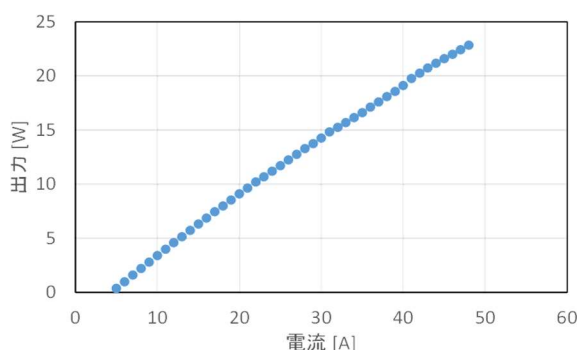
半導体レーザーチップの仕様検討、シミュレーションベースのパッケージ構造設計、ならびにダミーの半導体レーザーチップを用いたパッケージ製作プロセスの条件出しを経て、サブテーマ2において開発された発光点(エミッタ)数=16の高出力量子ドットレーザーアレイを搭載したパッケージを試作した。試作した量子ドットレーザーパッケージの外観を図Ⅲ2-3-5-13に示す。

図Ⅲ2-3-5-14には、第1次試作の量子ドットレーザーパッケージの入出力特性を示す。駆動電流48 Aにおいて顕著な出力飽和を生じることなく集積パッケージ出力23 Wを得た。この結果

は、試作したパッケージが顕著な出力飽和を生じることなく高い発熱を処理していることを示している。

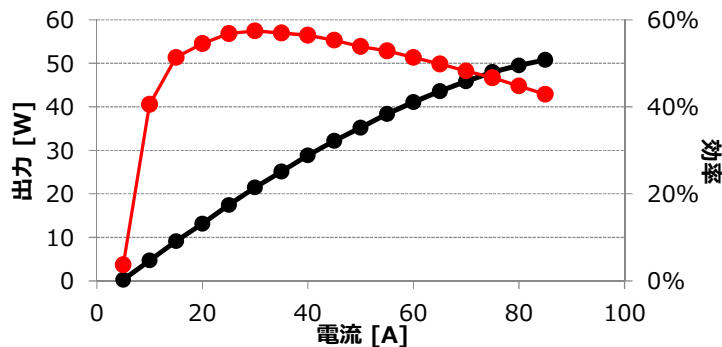


図Ⅲ2-3-5-13 試作量子ドットレーザーパッケージの外観



図Ⅲ2-3-5-14 第1次試作パッケージの入出力特性

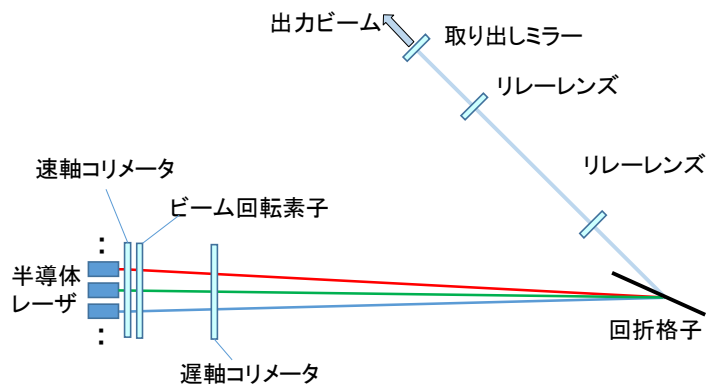
図Ⅲ2-3-5-15 には、冷却構造に改良を加えて冷却性能を高めた第2次試作の量子ドットレーザーパッケージの入出力特性を示す。最大出力 >50 W、最大効率 $>57\%$ を確認し、量子ドットレーザーによる高効率・高出力動作が可能であることを実証した。



図Ⅲ2-3-5-15 第2次試作パッケージの入出力特性

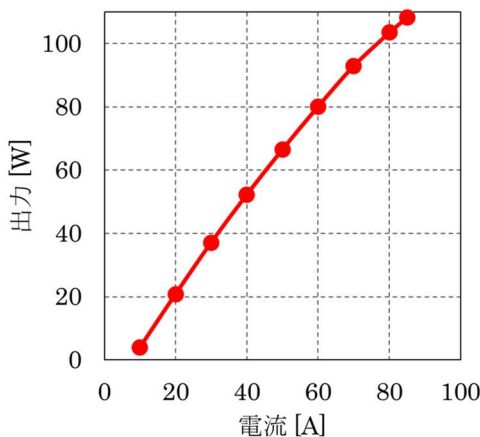
(a) ビーム結合光学系開発

複数ビームを同一光軸に重畳する光学系として、回折格子の波長分散作用を利用して、僅かずつ波長の異なる複数のビームを同軸に結合する波長ビーム結合方式 (Wavelength Beam Combining) 光学系を試作し、動作を検証した。図Ⅲ2-3-5-16 に試作した結合光学系の概念構成を示す。複数ビームを同軸上に結合する動作を確認し、結合光学系の設計法ならびに調整手法を確立した。



図Ⅲ2-3-5-16 波長ビーム結合光学系の概念構成

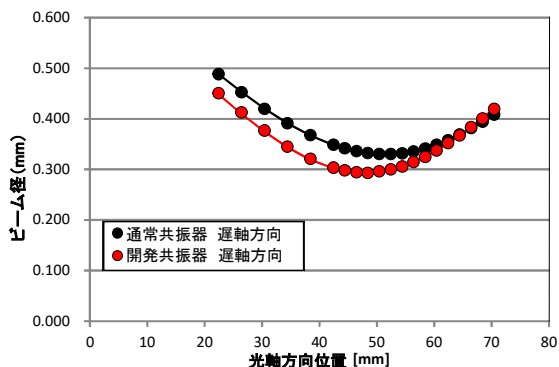
外部共振器によるビーム結合光学系を用いて第2次試作の量子ドットレーザーパッケージ3個を結合することによって集積出力 $>100\text{ W}$ を達成した。図Ⅲ2-3-5-17に入出力特性を示す。



図Ⅲ2-3-5-17 量子ドットレーザーの3パッケージ集積出力特性

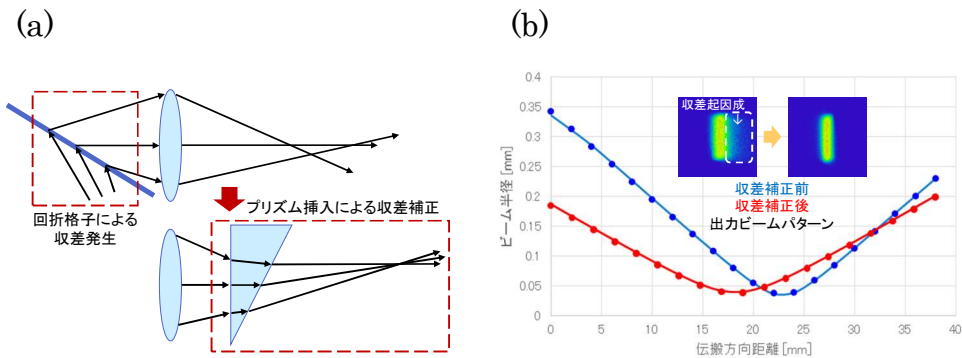
(a) 高集光外部共振器開発

単一エミッタ自体の集光性を向上させる外部共振器の構成を考案し、試作・検証を行った。図Ⅲ2-3-5-18の共振器の取り出しミラーに高品質ビーム発生用のミラーを用いることによって、平面ミラーを取り出しミラーに使用した通常の共振器と比較して約10%の半導体レーザーの遅軸方向の集光性 ($M2$ 値) 向上を確認した。また、出力についても通常共振器を約5%上回る結果を得た。



図Ⅲ2-3-5-18 従来共振器との集光性比較

波長ビーム結合光学系に用いられる回折格子によって発生する収差によって半導体レーザーの速軸方向の集光性が低下することを明らかにし、速軸方向の集光性を向上させる方式として図Ⅲ2-3-5-19に示すプリズム補正を評価した。結果として、回折格子の収差に起因するビーム裾野の乱れを低減し、最大で約1.4倍（ $M2=5.3 \rightarrow 3.9$ ）の速軸方向ビーム品質改善効果を得た。



図Ⅲ2-3-5-19 (a) プリズムによる速軸方向集光性向上方式 (b) 評価試験結果

(6) 実用化・事業化への取り組み

次世代加工用レーザーの実現に向けて、高密度量子ドット形成、高出力量子ドットレーザーの実現および周辺要素技術の研究開発を行った。結晶成長技術で InAs 量子ドットを2.5倍以上の高体積密度化し、設計・プロセス開発では量子ドットレーザーの量子井戸レーザーからの優位性を確認した。また、実装要素技術開発で商品化に向けた冷却・集光技術を確認した。

上記の成果で、プロジェクト開始時に目標とした量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm^2 および量子ドットレーザー集積出力 100 W （中間報告以降 10 W からに設定）は、十分達成された。

これらの成果は量子ドットレーザー技術が従来使われてきた量子井戸レーザーに優位性を有することを示し、将来技術としての可能性を実証したものとなる。今後の展望としては、実施者において高出力量子ドットレーザーを基軸とした実用化フェーズの開発に繋げることを想定している。実用化開発の成功の暁には、競争力のある半導体レーザーチップ、加工用レーザー光源、レーザー加工装置として事業化を図ることになる。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表・リストに記載している。

2-3-6. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）

本項目は、2018年度まで、研究開発項目③-6「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の成果の詳細は、2-5-2. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）にまとめて記載する。

2-3-7. 研究開発項目③-7「超高速利得スイッチ LD をシードとするレーザー加工用光源の開発」 (実施先：国立大学法人東京大学)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

任意のパルスレート・パルスタイミングでレーザー加工を行うためには、利得スイッチ LD シード光源が最適である。さらに、非熱加工と熱加工との境をまたぐ領域で用いるためには、パルス幅 10 ピコ秒以下の領域をカバーする超高速利得スイッチ LD の開発が必要である。1 μm 波長帯の InGaAs 系材料を用いた活性層の格子不整合歪の緩和の工夫と材料欠陥品質管理により高利得化を進め、新機構を織り込んだ超高速利得スイッチ動作を用いることで、10 ピコ秒以下の短パルス発生を達成し、小型堅牢・低電力・低コストの LD シード光源で、非熱領域と熱領域のクロスオーバー領域のレーザー加工を実現する道を拓くことが目的である。

本事業を進める際、超高速半導体レーザーのファブレス生産体制ないし分散型協創体制を企画し、そのひな形を立ち上げ、急速な発展・開発・競争への対応と、高年齢・熟練・高度専門技術者による安定的生産を両立したい。我々がファブレス中核拠点となり、各専門ファブ企業を活用して分散型生産を進める。最終的に、大学とファブレス企業とがファブレス中核拠点となる体制を築き、事業化につなげる。このファブレス開発生産方式が、内容・手段の両面で持続可能発展のビジネスモデルとして有効であり、日本の多数の熟練技術者と技術蓄積の活用や若手への継承に役立ち、世界との差別化技術を維持発展する有効打となることを証明することも本事業の目的とした。

以上の目的を達成するため、本事業では、パルス幅 10 ピコ秒以下の領域をカバーする超高速利得スイッチ LD を開発する。開発する LD は、1030nm 波長帯の InGaAs 系材料を用いた活性層の格子不整合歪の緩和の工夫と材料欠陥制御により高利得化し、超高速利得スイッチ動作を行うものとする。またこれをシード光源として、周辺要素技術を結集しつつ光増幅させ、高出力のファイバーアウト光源モジュールとする。更にこれを搭載したレーザー加工装置による加工試験を行い、諸性能を確認することまでを計画し、研究を実施した。

(2) 研究開発目標と根拠

表Ⅲ2-3-7-1. 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠
①超高速利得スイッチ LD 開発	パルス幅 10ps 以下の利得スイッチパルス発生	非熱的加工のための利得スイッチ LD シード光として、10ps 以下のパルス幅の実現が必要である。一方、市販品の最短は 15ps である。
②加工用光源の構成と試験	パルス増幅および、加工試験の実施。	シード LD の出力が弱すぎると増幅が困難となる。パルスが増幅でき、加工試験ができれば、そのことをもって、加工用光源のシード LD 光の出力が十分であると判断できる。
③分散型協創体制構築	分散型協創体制を構築・活用し、新規 LD の開発を実施	プロジェクト終了後も開発・生産能力を維持するためには、多数のファブを活用したファブレス生産（分散型構想体制）を構築し、開発を実施することが必要である。

①超高速利得スイッチ LD 開発では、開発した LD 素子に対して、利得スイッチ特性を詳細評価し、波長 1030nm 帯において、10ps 以下のパルスを計測することを最終目標とした。これまで LD を用いたレーザー加工はロングパルス領域、すなわち熱的加工領域の加工に限られていた。非熱的加工を、制御性の高い利得スイッチ LD シード光を用いて実現するためには、パルス幅 10ps 以下の利得スイッチ LD 素子が必須となるためそのように目標を設定した。

②加工用光源の構成と試験では、パルス増幅および加工試験の実施を最終目標とした。開発した利得スイッチ LD シードが弱すぎると、自然放出光ノイズに埋もれてしまうためファイバーアンプによる光増幅が困難となる。パルスが増幅できること、加工試験ができることを実証できれば、そのことをもって、加工用光源のシード LD 光の出力が十分であると判断できるので、そのような目標を設定した。開発する超高速利得スイッチ LD をシード光源として光増幅器と組み合わせ、加工用光源として構成して加工試験を行い、諸性能を明らかにすることで、利点と今後の課題を明確化することを目標とした。

③分散型協創体制構築では、将来の事業化を担うファブレスおよびファブ企業との分散型協創体制を構築すること、さらに実証のため、その体制を活用して新規 LD の開発を実施することを最終目標とした。プロジェクト終了後に成果を活かし、その開発・生産能力を維持するためには、多数のファブを活用したファブレス生産（分散型構想体制）を構築し、開発を実施することが必要なためこの目標を設定した。重要なノウハウが海外に流出してしまうことを避ける戦略を持ち、セカンドオプション、サードオプションを含めた強力な分散型協創体制の構築を目指した。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-7-2. 開発スケジュール

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
① 超高速利得スイッチ LD 開発				10ps 級～5ps 級利得スイッチ LD 素子の開発					1ps 近傍級利得スイッチ LD 素子の開発			
② 加工用光源の構成と試験				LD 性能予測・試作評価に基づく 光増幅器の設計					光増幅器の作製			加工用光源として 加工試験実施
③ 分散型協創体制構築				ファブ・ファブレス企業の調査 と協創体制協議								ファブ・ファブレス企業を用いた素子試作
												事業化を担う企業の選定

(2018 年度追加公募により 2019 年 1 月 18 日開始、2021 年 3 月 19 日終了として実施)

①超高速利得スイッチ LD 開発では、高速化のための要素技術（高利得化、短共振器化、静電容量低減など）の織り込みと作製難度の異なる 3 分類（パルス幅 10ps 級・パルス幅 5ps 級・パルス幅 1ps 近傍級と呼ぶ）の素子設計を行い、波長 1030-1070nm 帯の InGaAs 系材料を用いた活性層の格子不整合歪の緩和の工夫と材料欠陥制御をしたエピ成長、そのエピ構造にあわせた最適プロセスの選択などを行って、順次試作、評価、フィードバックを行う研究開発プランを立てた。

②加工用光源の構成と試験では、開発する超高速利得スイッチ LD の性能を予測し、実際に計測した結果に基づき光増幅器の設計を行い、作製し、項目 4 の加工装置への組み込みが可能なレベルまで光増幅を行ったうえで加工試験を行うプランを立てた。

③分散型協創体制構築では、1 年目に多数のファブおよびファブレス企業の調査・訪問と外注可能性・条件などの協議を行い、第 1、2 オプションを含めた強力な分散型協創体制を構想し、順次それらを活用した新規 LD の開発を実施し、最後に将来の事業化を担うファブ・ファブレス企業の体制を選定するプランを立てた。

研究開発の実施は、これらの当初スケジュールに従って進めたが、2020 年度がコロナ禍と非常事態宣言下の活動制限の影響を強く受けた。多数の外注先の企業の調査・訪問と協議を 2019 年度までに終えていたのが不幸中の幸いであったが、2020 年度は、外注企業の出勤制限やクリーンルーム閉鎖などにより納期が大幅に長期化し、スケジュールの遅延が生じてしまった。

(4) 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ2-3-7-3. 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
① 超高速利得スイッチ LD 開発	パルス幅 10ps 以下の利得スイッチパルス発生	テール成分のない利得スイッチパルスで最小パルス幅 8.4ps の直接発生を達成。特許出願 1 件。	◎	利得スイッチパルスの短パルス化と高強度化。
② 加工用光源の構成と試験	パルス増幅および、加工試験の実施。	自作ファイバーアンプにより平均強度 300mW まで増幅。加工試験は未実施。	△	間引き・追加増幅と、加工試験機の構築
③ 分散型協創体制構築	分散型協創体制を構築・活用し、新規 LD の開発を実施	ピコ秒利得スイッチ LD、加工用ロングパルス LD、加工用 DFB-LD のファブレス作製に成功。	◎	歩留まりの評価と向上、低コスト化。

①超高速利得スイッチ LD 開発では、作製した 1 μm 波長帯のファブリーペロー (FP) 型の LD から、最短で 8.4ps パルス幅のテール成分がほとんどない超高速利得スイッチパルスを得た。スペクトル幅は 4.6nm であり、時間帯域積は約 10 であった。ピーク出力は、LD 端面で 800mW を得た。100MHz 繰返しでの平均出力は、LD 端面で 0.65mW であった。シングルモードファイバー結合後で 0.09mW を得た。最終目標として掲げた 10ps 以下のパルス幅の利得スイッチパルス発生は達成された。超短パルス利得スイッチ用レーザーの構造に関する特許出願を 1 件行った。2020 年度に取り組んだ DFB-LD は、高速パッケージおよび利得スイッチ実験まではコロナ禍での種々の遅延によりできなかったが、1030nm でサイドモード抑制比 30dB 以上の単一モード発振の確認など重要な DFB 部分の開発試作まで成功した。開発した 8ps 台のパルスを発生する利得スイッチ素子でも、他のタイプの LD についても、短パルス発生の高速度と高強度化など発展の余地はある。しかし、市販品を超える性能がすでに達成されており、更なる研究開発は続けつつも、早期の実用化・事業化を目指したい。これらから達成度は◎と、自己評価した。

②加工用光源の構成と試験では、開発した超高速利得スイッチ LD からの出力パルスを増幅する光増幅器を設計・作製し、光増幅の実験を行うところまでは実施した。光増幅実験では、低雑音の Yb ドープファイバー・光プリアンプを作製して 1 段増幅し、パルス幅・パルス波形の劣化は殆ど無いまま、100MHz 繰返しでの平均出力 5-10mW まで増幅した。さらに、もう 1 段の Yb ドープファイバー・光プリアンプを作製して後段に用いて、トータルで 2 段増幅することにより、パルス幅・パルス波形の劣化は殆ど無いまま、100MHz 繰返しでの平均出力 300mW まで増幅するところまで実施できた。レーザー加工試験には、約 2-3 桁の低繰返し化と、約 3 桁の増幅が更に必要である。この部分の完成は、既存技術に基づき実現できる自信はあるが、本 NEDO プロジェクト期間では未実施に終わった。東京大学・秋山研究室において継続的に実施し、本事業の成果の実用

化・事業化に役立てる予定である。期間内で未実施部分が残ったので達成度は△と自己評価した。

③分散型協創体制構築は、構想通り進められ、実際にこれらを活用したピコ秒利得スイッチ LD、加工用ロングパルス LD、加工用 DFB-LD のファブレス作製など、複数の新規 LD の開発を、実施することができた。本チームがファブレス拠点となり新規半導体レーザー素子の設計・CAD 作業、製造の分業企画、仕様・工程管理、評価計測などを行い、エピ成長、加工プロセス、モジュール化などの各生産工程は、既存の中小の専門ファブ企業を有効に活用する形での分散型開発・生産を進めることができた。エピ成長では、1 μm 波長帯の LD の高利得化のために、InGaAs 系材料を GaAs 基板上に結晶成長する際に生じる格子定数不整合の存在のために厚膜や多層膜の成長の制約に対応して、歪み緩和の工夫を加え、活性層の品質評価による条件最適化を行うこともできた。プロセスに関しては、マスク設計・作製、導波路加工、素子分離加工、オーミックコンタクト電極形成、レーザーバーへき開、端面コーティング、チップへき開、ダイボンディング、ワイヤボンディング、モジュール化、など多数の工程を管理し、その各工程の終了ごとに綿密に評価計測や選別を行い、LD デバイスを仕上げることができた。ファブについて第 2・3 のオプションを準備していたおかげで、コロナ禍で、遅延は生じたものの、中断などには陥らなかった。これらから達成度は◎と、自己評価した。

(5) 成果の詳細

(1) 超高速利得スイッチ LD 開発

超高速利得スイッチ LD を開発は、まずファブリーペロー (FP-LD) 形の素子 (パルス幅 10ps 級) を先行して試作し、ファブレス型の試作、プロセス後工程開発、ファイバーアンプによるパルス増幅実験、加工用光源としての特長評価など全体が円滑に進むように計画した。並行して高速化のための要素技術 (高利得化、短共振器化、静電容量低減など) を開発し、これらを織り込んで FP-LD 型の素子 (パルス幅 5ps 級) を設計し、後発での試作開発を行った。その過程で得た知的財産について、特許出願を行った。最後に、パルス幅 5ps 以下 1ps 以上を狙いつつ分布型回折格子構造を導入した DFB-LD 型のタイプ C の設計と試作開発に取り組んだ。

これらのうち、パルス幅 5ps 級として設計し開発した FP-LD 型素子で、8.4ps パルス幅の超高速利得スイッチパルスを得た。ピーク出力は、LD 端面で 800mW を得た。スペクトル幅は 4.6nm であり、時間帯域積は約 10 であった。100MHz 繰返しでの平均出力は、LD 端面で 0.65mW、自動調芯装置を用いたシングルモードファイバー結合後で 0.09mW を得た。このパルスを、Yb ドープファイバー・光プリアンプを用いて 1 段増幅し、平均出力 5.2mW を得た。この強度は、市販の Yb ドープファイバー・光アンプで容易に増幅することができるレベルであり、レーザー加工用シード光源として利用可能である。パルス幅は設計の 5ps には届かなかったが、LD からの直接の利得スイッチパルスの幅として、10ps を明確に切るパルスを得ることができたことは、重要な成果である。

開発した LD の実験結果を以下に示す。

図Ⅲ2-3-7-1 は、最短パルスを発生した FP-LD 素子からの利得スイッチパルスのサンプリングオシロスコープ波形である。図Ⅲ2-3-7-1 下の全体図に見える最初のパルス以降の振動波形は、計測装置の装置関数を反映したものであり、光パルスの波形ではない。すなわち、光パルスはテール成分が殆ど無い、きれいなパルス波形になっていることが確かめられた。フォトダイオード・サンプリングオシロスコープ系の装置関数の時間幅 11ps を逆畳み込みにより除去した結果、パルス幅 8.4ps の評価結果が得られた。

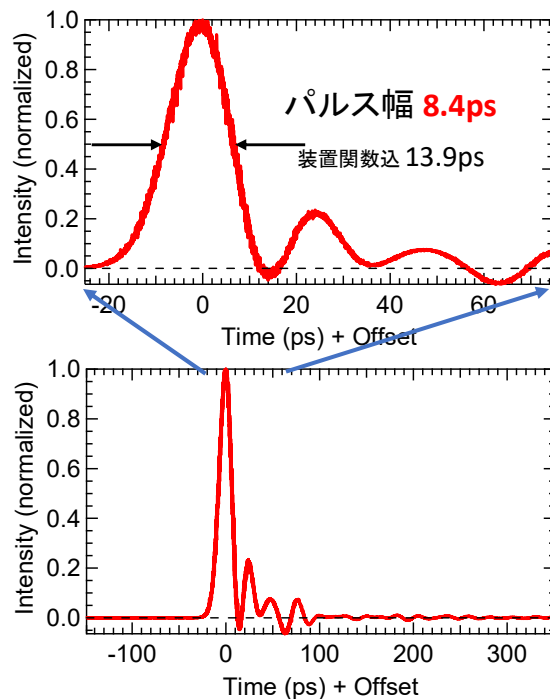
図Ⅲ2-3-7-2 は、その FP-LD 素子からの利得スイッチパルスを Yb ファイバー・プリアンプで増幅した後に測定した自己相関波形である。コヒーレントスパイクを除く包絡線の相関幅から算出して、パルス幅を 9.87ps と見積もった。アンプ時のパルス幅のわずかな増大が伺えるが、オシロスコープ計測とコンシステントな結果が確認できた。

開発した利得スイッチ素子は、市販品を超える性能を達成しているため、早期に実用化・事業化を目指したい。

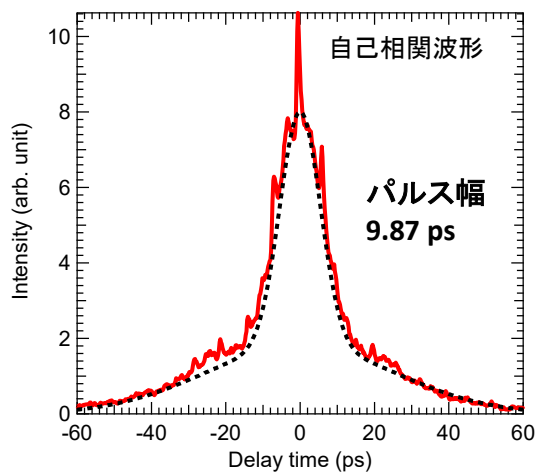
先行して開発した FP-LD 素子 (パルス幅 10ps 級) については、やや詳しく評価計測を行った。図Ⅲ2-3-7-3 は、その素子からの利得スイッチパルスのサンプリングオシロスコープ計測結果である。装置関数を除いて 17ps のパルス幅と、100ps 程度つづくテール (ペDESTAL) 成分を含んでいることがわかる。黒線は、アンプ前のパルス波形、赤線は、Yb ドープファイバー・プリアンプ

を用いてアンプした後のパルス波形である。アンプ後に、パルス幅が 18-19ps へとわずかに増大していることがわかる。

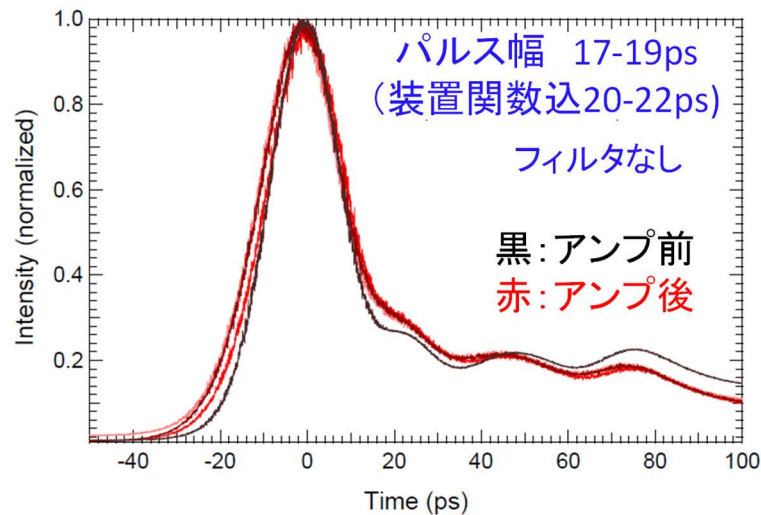
図Ⅲ2-3-7-4 は、FP-LD 素子（パルス幅 10ps 級）からの利得スイッチパルスの短波長部を、スペクトルフィルタリングにより切出してテール（ペDESTAL）成分を除去して得た出力パルスのサンプリングオシロスコープ計測結果である。生データのパルス幅は 15.0ps であり、測定系の装置関数による時間幅 11ps を逆畳み込みにより除去して、パルス幅 11ps の評価結果を得た。直接の利得スイッチパルスを、スペクトルフィルタで短パルス化できる見通しが得られた。



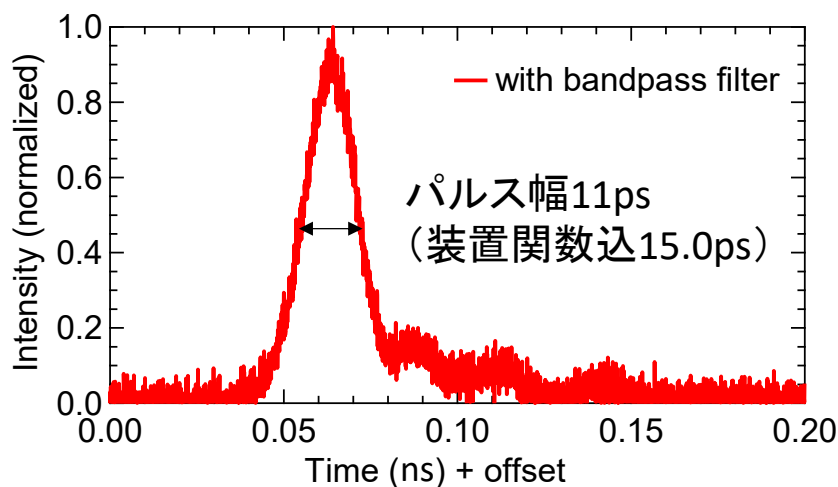
図Ⅲ2-3-7-1 FP-LD 素子からの利得スイッチパルスのサンプリングオシロスコープ波形（下：全体図。上：拡大図）。全体図に見える最初のパルス以降の振動波形は、計測装置の装置関数を反映したもの。装置関数による時間幅 11ps を逆畳み込みにより除去すると、パルス幅 8.4ps の評価結果が得られた。



図Ⅲ2-3-7-2 FP-LD 素子からの利得スイッチパルスを Yb ファイバーアンプで増幅した後に測定した自己相関波形。コヒーレントスパイクを除く包絡線の相関幅から算出して、パルス幅が 9.87ps と見積もられた。アンプ時にパルス幅がわずかに増大した。



図Ⅲ2-3-7-3 FP-LD 素子 (10ps 級) からの利得スイッチパルスのサンプリングオシロスコープ波形。黒がアンプ前、赤がアンプ後の波形。スペクトルフィルタは使っていない。

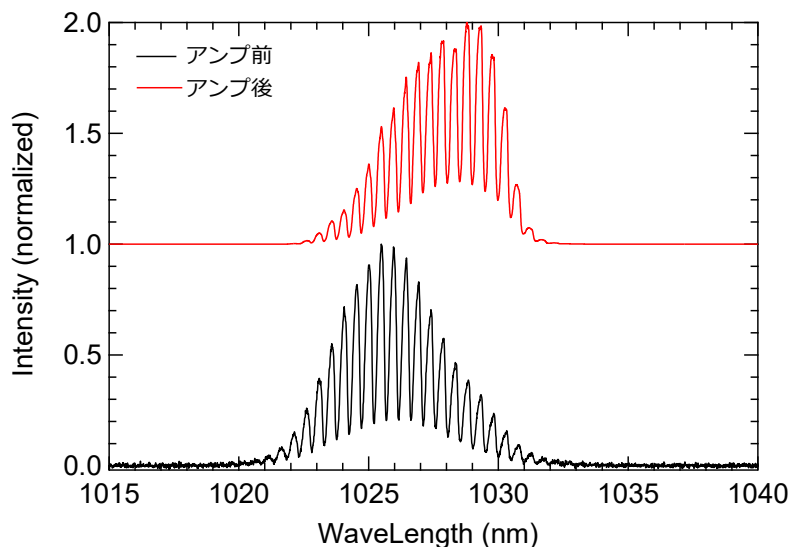


図Ⅲ2-3-7-4 FP-LD 素子 (10ps 級) からの利得スイッチパルスのサンプリングオシロスコープ波形。スペクトルフィルタにより高速成分を抽出している。

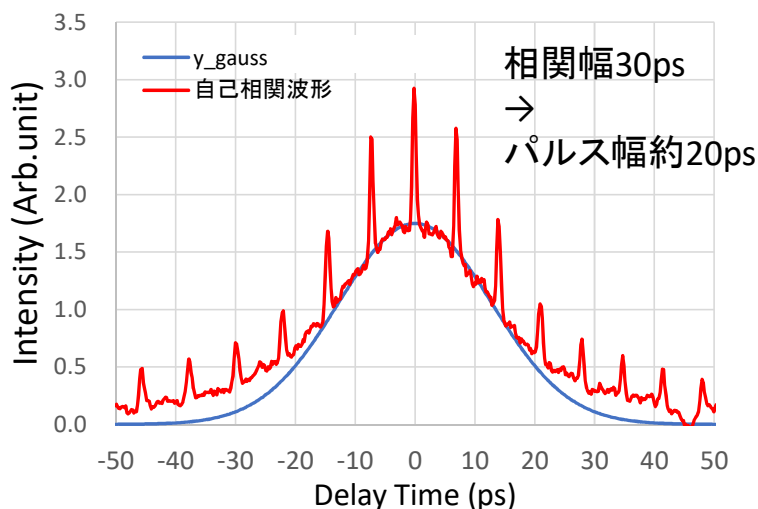
図Ⅲ2-3-7-5 は、FP-LD 素子 (10ps 級) からの利得スイッチパルスのスペクトルである。FP フリッジが明瞭に見えている。黒がアンプ前、赤がアンプ後である。

図Ⅲ2-3-7-6 は、FP-LD 素子 (10ps 級) からの利得スイッチパルスの自己相関波形である。FP-LD 特有の複数のコヒーレントスパイクが見えている。コヒーレントスパイクを除く包絡線の相関幅が 30ps であり、パルス幅が約 20ps と見積もられ、オシロスコープ測定の結果とほぼ一致した。

図Ⅲ2-3-7-7は、T0-CANパッケージしたFP-LD素子を用いて作製したファイバピグテールモジュールの写真である。



図Ⅲ2-3-7-5 FP-LD素子（10ps級）からの利得スイッチパルススペクトル。FPフリッジが見えている。黒がアンプ前、赤がアンプ後のスペクトル。



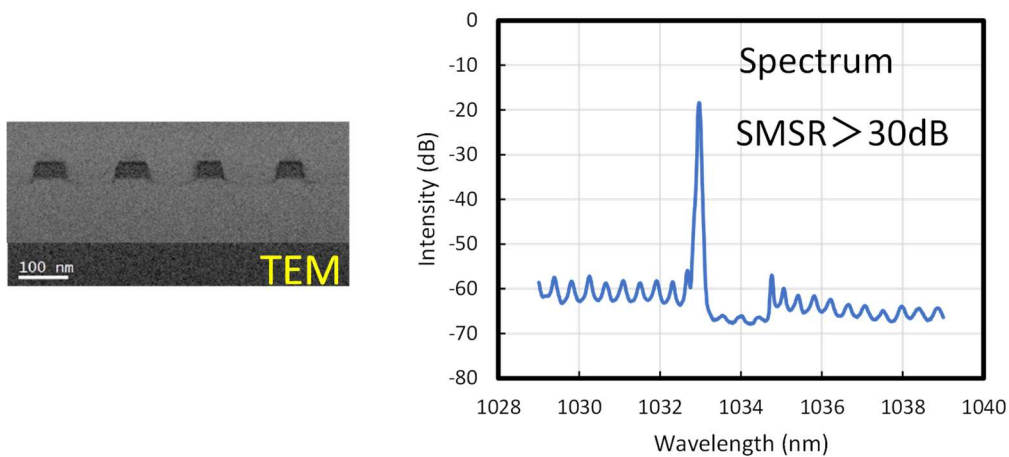
図Ⅲ2-3-7-6 FP-LD素子（10ps級）からの利得スイッチパルスの自己相関波形。FP-LD特有の複数のコヒーレントスパイクが見えている。コヒーレントスパイクを除く包絡線の相関幅から、パルス幅が約20psと見積もられた。



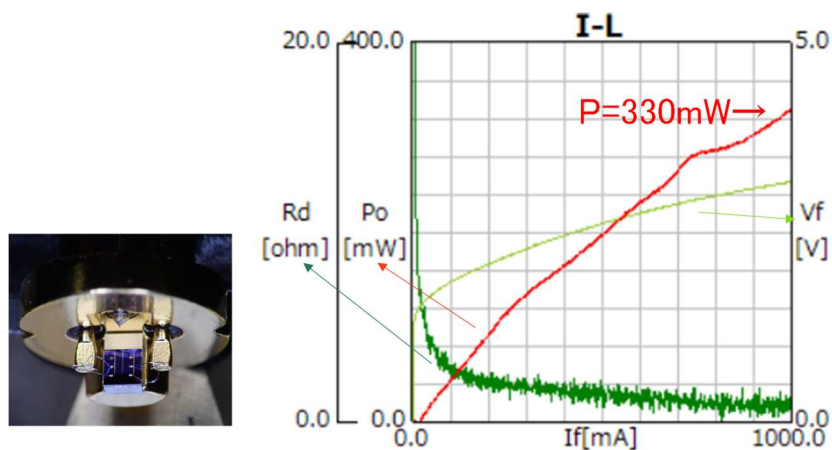
図Ⅲ2-3-7-7 TO-CAN パッケージした FP-LD 素子のファイバーピグテールモジュールの写真

DFB-LD 素子の開発は、2020 年度に行った。コロナ禍の影響で、外部のファブ企業や共用クリーンルーム施設の一時閉鎖やエンジニア出勤制限などで、著しい納期遅れを強いられることとなった。各ファブの工程の間に行う評価計測とフィードバックを大幅に削減し、実施期間内にデバイス作製の最終段階までを終えることを優先して試作を進めた。

図Ⅲ2-3-7-8 右に、作製された DFB-LD の発振スペクトルを示す。DFB-LD に特徴的なストップバンド構造や、SMSR が 35dB 以上の単一モード発振が確認できた。図Ⅲ2-3-7-8 左は、埋め込まれた回折格子構造の断面 TEM 像である。ほぼ設計通りの良好な回折格子構造が形成できている。高速パッケージおよび利得スイッチ実験までは期間内に実施できなかった。



図Ⅲ2-3-7-8 DFB-LD 素子の発振スペクトル（右）と回折格子構造評価用断面 TEM 像（左）。



図Ⅲ2-3-7-9 ロングパルス高強度 FP-LD 素子の写真 (左) と ILV 特性 (右)

項目 4 の注入同期型の加工用光源で必要とされた高強度・ロングパルスのカスタムデザインのシード LD を、本研究で開発した要素技術に基づいて作製し提供することができた。図Ⅲ2-3-7-9 は、その素子の写真と ILV 特性である。

(2) 加工用光源の構成と試験

利得スイッチレーザーパルスは強度がやや小さいので、シード光源として加工用光源を構成するためには、Yb ドープファイバー・プリアンプを用いて、平均パワー mW レベルまで光増幅することが必要である。利得スイッチレーザーパルスの強度が高いほど、プリアンプでの増幅が容易になる。開発した素子のアンプ前とアンプ後の強度の評価を行った。

表Ⅲ2-3-7-4 は、最高速の FP-LD 素子からのパルス幅 8.4ps の利得スイッチパルスの、アンプ前とアンプ後の強度、パルス幅、スペクトル幅、時間帯域積などの評価を表にまとめたものである。

表Ⅲ2-3-7-4 FP-LD 素子からの利得スイッチパルスの、アンプ前とアンプ後の、平均強度、ピーク強度、パルス幅、スペクトル幅、時間帯域積などの実験結果

光アンプ	平均強度 @100MHz	ピーク強度	パルス幅 (オシロ)	パルス幅 (自己相関)	スペクトル幅	時間帯域積
前	LD端 0.65mW (Fiber端 91uW)	800mW	8.4ps	-	4.6nm 1.2THz	10
後	5.2mW	6W	9.6ps	9.87ps	4.7nm 1.2THz	12

アンプ前のピーク出力は、LD 端面で 800mW を得た。スペクトル幅は 4.6nm であり、時間帯域積は約 10 であった。100MHz 繰返しでの平均出力は、LD 端面で 0.65mW、自動調芯装置を用いたシン

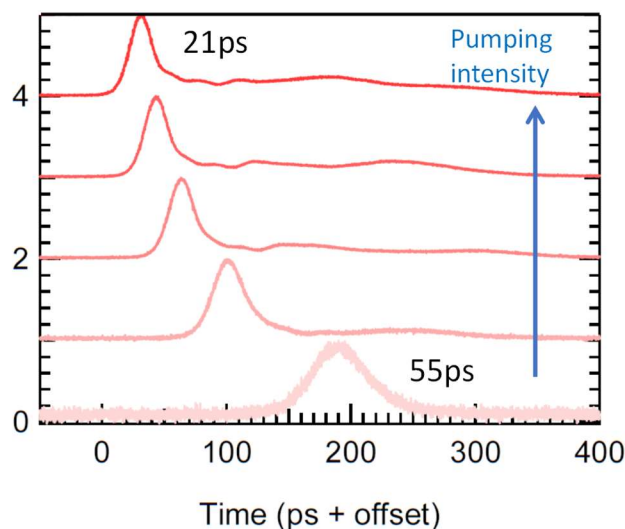
グルモードファイバー結合後で 0.09mW を得た。このパルスを、Yb ドープファイバー・プリアンプを用いて 1 段増幅し、平均出力 5.2mW を得た。この強度は、市販の Yb ドープファイバー・光アンプで容易に増幅することができるレベルであり、レーザー加工用シード光源として利用可能である。

表Ⅲ2-3-7-5 FP-LD 素子（パルス幅 10ps 級）の利得スイッチパルスの 2 段アンプ時の平均強度、パルス幅の実験結果

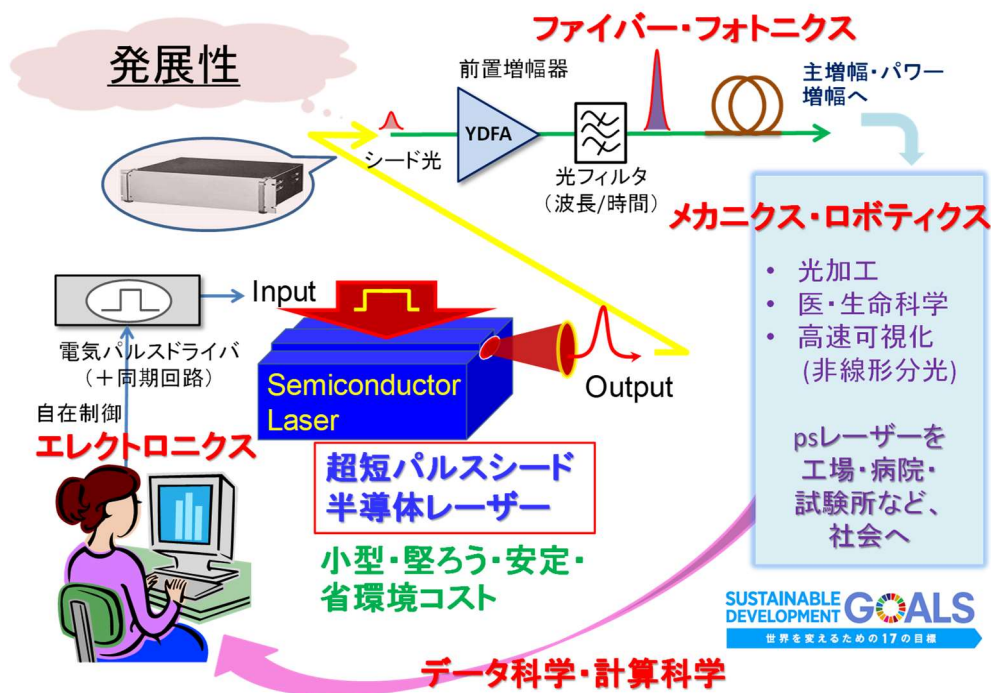
	平均強度 mW (@100MHz)	パルス幅 ps
LD出力	0.117	15.8
1段増幅後	10	15.4
2段増幅後	300	16.3

実際、もう 1 段の Yb ドープファイバー・光プリアンプを作製して後段に用いて、トータルで 2 段増幅することにより、パルス幅・パルス波形の劣化は殆ど無いまま、100MHz 繰返しでの平均出力 300mW 程度まで増幅するところまで実施できた。表Ⅲ2-3-7-5 は、先行して試作した FP-LD 素子（パルス幅 10ps 級）を用いて、2 段増幅を試した実験の結果のまとめである。

この光源に対して、A0 変調器と市販レベルの光増幅器を付加して、約 2-3 桁の低繰返し化ないしは間引きと、約 3 桁の増幅を行えば、加工試験が実施可能という見通しは立てたが、実際のレーザー加工試験は本 NEDO プロジェクト期間の中では未実施に終わった。東京大学・秋山研究室において継続的に実施し、本事業の成果の実用化・事業化に役立つ予定である。



図Ⅲ2-3-7-10 励起条件調整による利得スイッチパルスのパルス幅制御

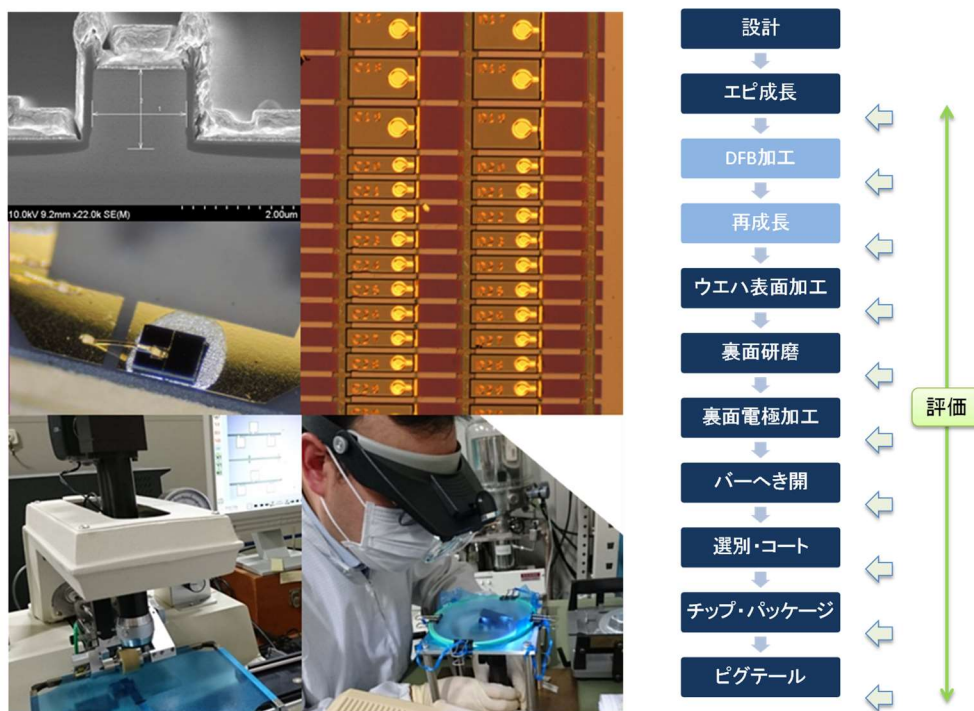


図Ⅲ2-3-7-11 利得スイッチLDを用いて、エレクトロニクス、ファイバー・フォトリクス、メカニクス・ロボティクス、データ科学・計算科学などをつないだ技術融合ループ

開発したLDの利得スイッチパルスについて、入力パルスの強度やバイアスなど条件を振って実験したところ、繰返しや遅延はもちろん、パルス幅や強度・オンオフなども電氣的に制御できることが確かめられた。図Ⅲ2-3-7-10は、励起条件の変化に応じた、利得スイッチパルスのパルス幅の制御性を示すデータである。パルス幅や強度の変化は、入力電気パルスに対して非線形で複雑ではあるが、機械的な機構を用いることなく、全て電氣的にこれらの制御が可能であることは、利得スイッチLDシード光源の利点であることが明らかになった。これらの利点は、一つのLDシード光源を用いて、熱的加工と非熱的加工を横断的に試験したり、使い分けたりするうえで、重要なポイントとなる。さらに、利得スイッチLDは、図Ⅲ2-3-7-11に示すように、エレクトロニクス、ファイバー・フォトリクス、メカニクス・ロボティクス、データ科学・計算科学などを組み合わせた技術融合ループとして、レーザー加工をプロセスインフォマティクスに展開して行く上で、キーデバイスとなる。小型堅牢化・低電力化・低コスト化の利点も重要である。

本研究では、開発したシード光源をもちいたレーザー加工用光源の利点を、上述のとおり明確化することができた。更なる研究開発課題として、いずれのタイプのLDについても、短パルス発生の高速化と高強度化を目指し、応用の範囲を広げたい。

(3) 分散型協創体制構築



図Ⅲ2-3-7-12 LDのファブレス試作開発（分散型協創）体制構築

高速の利得スイッチシード光源のニーズにこたえるためには、大量生産の市販品のLDの中から素子を選択するのでは不十分であった。また、本研究の開始以前に、いくつかの既存のLDメーカーに打診をしたが、市販品の生産ラインを特殊仕様のLDの開発や生産に使うことは不可能であると断られた。本研究を提案したのは、カスタマイズされたLDを試作・開発・生産するファブレスの体制を構築する必要があるからであった。

我々は、この方針に従って、図Ⅲ2-3-7-12右に示すようなLD作製の一連の工程を複数のファブを活用しながらつなぎ、我々自身がファブレス生産拠点となってデバイスを仕上げる体制を構築し用いた。例えば、「エピ成長」の工程では、波長1030-1070nm帯に対応するInGaAs系材料の活性層の格子不整合歪・欠陥を制御するように我々が設計したウエハ構造を、複数のエピファブや学内施設へ業務委託してテストエピ成長を行い、我々がその各種評価を行い、合格したファブへ、本番ウエハ成長を業務委託し、我々がその詳細評価を行い、次の工程に進む形である。各種評価としては、微分干渉顕微鏡像計測、PLスペクトルと強度の温度特性計測、寿命計測、絶対PL量子収率計測、ブロードコンタクトLD評価などを、場面ごとに組み合わせて行った。海外の有名なエピファブであっても、必ずしも良いウエハは得られず、要請された材料・構造のエピ成長の経験の多少が結果に強く反映した。ファブレス型の生産を行う場合、最初のエピウエハの品質確認が極めて重要であった。

本研究の実施を通じ、利得スイッチ用LDを始めとするカスタム仕様のLD開発試作を行う事業を行うための、ファブレス拠点およびファブ企業との分散型協創体制のひな形が構築された。本研究プロジェクトで開拓したファブレス型のLD開発・生産は、大型生産設備投資のハードルがなく、事業化のための体制の早期立ち上げが可能であり、また、急速発展・開発への対応と、専門・熟練・安定的生産の要素を両立する、持続可能発展社会の趣旨にも合致したものである。

(6) 実用化・事業化への取り組み

①超高速利得スイッチLD開発では、最終目標として掲げた10ps以下のパルス幅の利得スイッチパルス発生が達成され、市販品(最短15ps)を超える性能が得られた。③分散型協創体制も構築され、市場からの要望も届いているので、早期に実用化・事業化を進めることが必要と感じている。そこで、ファブレス生産を行う中核拠点となる会社を立ち上げ、実用化・事業化に必要な体制の構築を急ぐこととした。利得スイッチLDの高度化やレーザー加工の研究は、大学において引き続き実施する。

コロナ禍の影響でスケジュールが一部遅延し、期間中に実施できなかったのは、「②加工用光源の構成と試験」のうちの、加工試験の部分である。本NEDOプロジェクトで開発した利得スイッチLD素子と2段アンプからなる光源システムに対して、さらに、A0変調器と市販レベルの光増幅器を付加して、約2-3桁の低繰返し化と、約3桁の増幅を行ない、加工試験を実施する研究活動を、東京大学・秋山研究室において継続的に実施し、本事業の成果の実用化・事業化に役立つ予定である。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表・リストに記載している。

2-3-8. 研究開発項目③-8「分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発」（実施先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構一再委託先 東京理科大学、浜松ホトニクス株式会社）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

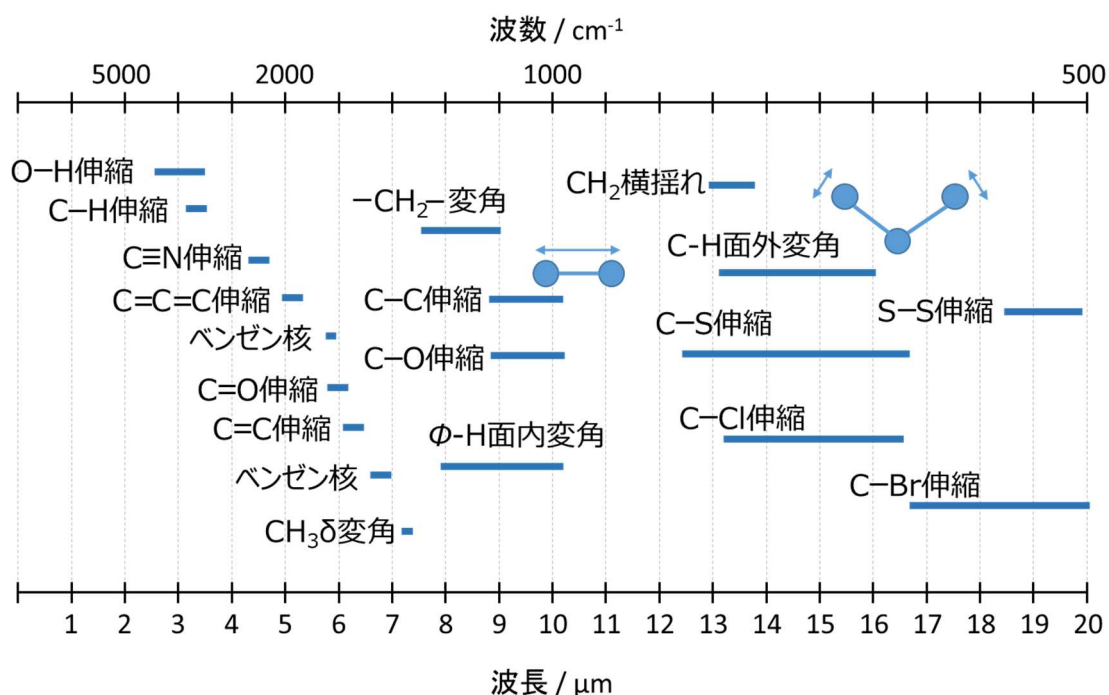
社会構造の変革に対応した技術革新を戦略的に取り入れた新産業革命推進の重要性を背景に、ものづくりの現場において、人工知能の活用等、サイバー空間との連携・強調に基づいた生産効率の向上が必要とされており、その中でデジタル制御と親和性が高いレーザー加工技術の重要性が一層増している。しかし、現状で、ものづくりの現場で活用される切断、穴開け、溶接、接合等のレーザー技術は、消費電力や加工スループット、加工精度や品位の観点から必ずしも効率の良い方法とは言えない。「高い光出力のレーザー光を照射することによって、どうして物質が壊れるのか」という原理解明とともに、多様な波長・出力・パルス幅のレーザー加工技術の応用展開や加工メカニズム解明に資する俯瞰的な知の蓄積に基づいて、加工プロセスの高効率化、高スループット化、高精度化、高品位化を達成することが求められている。

国主導の大型研究開発プロジェクトにより開発がすすめられた波長 10 ミクロン帯の高出力 CO₂ レーザーは、金属加工用、医療用などに多く用いられてきたが、現在、特に金属加工用途では波長 1 ミクロン帯のファイバーレーザー、固体レーザーへの置き換えが進んでいる。一方、近年の自動車等輸送機器の抜本的な軽量化促進要求に基づいて、軽量化のための樹脂化とともに、自動運転・EV 普及の促進に伴う各コンポーネントの樹脂化も加速され、各種樹脂材料の高効率加工ニーズが顕在化している。これら樹脂材料の高効率加工に対して、樹脂材料が吸収をもたない近赤外波長のレーザーでは対応できない。10 ミクロン帯の CO₂ レーザーが加工に用いられるが、樹脂材料の物質固有の振動吸収とレーザーの波長が必ずしも一致しないため、加工特性が樹脂種により異なり、様々利用される樹脂材料の高効率加工に対応することが出来ていないのが現状である。現行のレーザー加工では、用いられる光源が主に波長 10 ミクロン帯の CO₂ レーザー、1 ミクロン帯の YAG レーザー・ファイバーレーザー等の固体レーザーに限られており、樹脂材料等、有機系の素材が分子構造に基づいた特異な吸収を示す中赤外波長域の高出力レーザー光源が存在しないため、レーザー加工効率の材料吸収との相関等、基盤的な知見が不足している。

本事業では、レーザー加工の可能性を広げる観点から、様々な樹脂材料の高効率加工に対応可能な波長が 5~20 μm の中赤外波長域の高出力レーザー光源を開発するとともに、同波長域のレーザー光の加工プロセスに関する基盤的知見を集積し、データベース化するとともに高効率なレーザー加工プロセスを実証することを目指す。

（2）研究開発目標と根拠

中赤外領域の光は化学分析において分子構造特定に利用され、特に指紋領域と呼ばれる物質固有の振動吸収が急峻な吸収ピークとして表れる波長領域でもある。吸収波長は分子内の振動に基づいていて、個別の分子振動に対応した波長に吸収が見られる（図Ⅲ 2-3-8-1）。本来、振動吸収の光励起は分子の振動を大きくする、つまり加熱状態の形成をもたらす。一方、レーザーアブレーションに基づいた CO₂ レーザーによる基板の穴開けレーザー加工などの場合、多光子吸収による高振動励起状態からの結合切断に基づいたアブレーション過程の関与も考えられる。



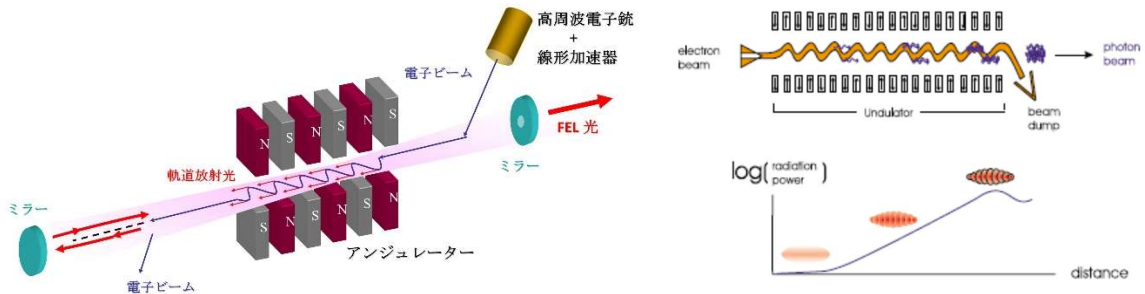
図Ⅲ 2-3-8-1 赤外領域波長の吸収波長と分子構造の関係

この分子構造に特異的な光吸収を多様な樹脂材料の高効率加工に活用するためには、加工する樹脂材料に特異的な波長に見られる吸収に合わせた波長の光を照射する必要がある。用途に応じて選択される様々な樹脂材料の高効率加工を実現するために、CO₂ レーザーに代表される波長固定のレーザー光源装置ではなく、次々世代の光源として、材料によって異なる最適な波長を利用可能とする、波長制御が可能な高出力中赤外レーザー光源の開発に取り組む。

現状でこの要件を満たす高出力発振が可能なレーザー光源は自由電子レーザー (FEL, Free Electron Laser)のみである。FELでは、線形加速器(ライナック)で加速した電子ビームを磁場により蛇行運動させた際に接線方向に放出される放射光を、繰り返し蛇行する電子ビームと相互させることで増幅してコヒーレントな光パルスを発生させる。電子銃より生成された電子ビームは線形加速器(ライナック)により最大エネルギーまで加速された後、偏向電磁石を通して挿入光源(アンジュレーター)に導入される。アンジュレーターは永久磁石(磁極には希土類磁石を使用)の薄い板を規則的に張り合わせたものを上下に配置して、正弦波的に変調された磁場を生じる放射光発生デバイスである。アンジュレーター中を加速電子が通過すると、電子は蛇行運動をして接線方向に放射光を発生する。光の強度が強い時、光によって連続的に電子ビームが加速、または連続的に減速される。これにより電子ビーム内に光の波長での密度変調(マイクロバンチ)が形成され、相互作用していた光と同じ位相を持つコヒーレントな光の放射が促進され、光の増幅が起こる。このように形成される光パルスは、電子ビームと光の相互作用領域のサイズを反映して、非熱的レーザー加工に有用とされている超短パルスに該当するピコ秒パルスとなる。

FELは増幅媒質を有さず、アンジュレーター中での電子と光の相互作用が増幅媒質の代わりとなり、増幅媒質に付随する熱損失が存在しないため、高出力な光の発生が可能となる。また、FELの波長は先の共鳴条件によりきまり、電子のエネルギーとアンジュレーターの磁場周期、磁場強

度のみの関数となる。そのため、単一波長で、かつ原理的な発振波長の制約がなく、ミリ波領域から X 線領域までの広い波長範囲でレーザー発振が可能な単色光源となる。すなわち、現状で広く使用される高出力レーザーの波長である 1 ミクロン帯、10 ミクロン帯の間の波長域のみならず、より長波長域の光も出力可能である。実際の FEL では、電子ビームのエネルギーやアンジュレーターの磁石列の間隔を制御することで発振波長を制御可能であるが、その設計に基づいて利用可能な波長領域が決まる。



図Ⅲ 2-3-8-2 共振器型自由電子レーザーの概念図（左）。単一通過型自由電子レーザーの概念図（TESLA TDR より）（右）。

電子ビームの制御技術の進展に基づいて、従来の光の増幅率が比較的低い低ゲイン領域と分類される FEL に加えて、増幅率の大きな高ゲイン領域と分類される FEL が稼働している。低ゲイン領域の FEL ではアンジュレーター外側両端に設置された一対の凹面鏡からなる光共振器内に光を蓄積し、連続的に入射する電子ビームとミラー間を往復する光の相互作用により飽和領域まで光の増幅を行う。この方式は共振器型 FEL と呼ばれ、東京理科大学の中赤外 FEL (FEL-TUS) はこの方式である (図Ⅲ 2-3-8-2 (左))。この方式では、電子ビームのエネルギー、アンジュレーターの磁場周期設計値 (制御範囲) に加え、有効な反射率を有する鏡材質の有無が波長領域を制限する。FEL-TUS ではこの形で、5~10 μm までの波長可変レーザーを実現している。これに対して高ゲイン領域に分類される FEL では、光とより有効に相互作用させることが可能な高品位な電子ビームと長尺のアンジュレーターを用いることで、同じ電子ビームが種となる光の発生から、増幅・飽和までを担う。この方式は単一通過型 FEL と呼ばれる (図Ⅲ 2-3-8-2 (右))。光共振器の鏡材質に伴う波長制限が無く、現在の X 線レーザーの主役となっている装置構造である。本計画で KEK 側が開発するより長波長領域で高平均高出力のレーザー光発振を行う FEL はこの方式に属する。それでも、FEL の場合、赤外領域での電子ビームから光へのエネルギー変換効率は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ のオーダーであり、必ずしも高いとは言えない。電子ビームの持つエネルギーのほとんどは利用されずにビームダンプに捨てられることになる。このエネルギー変換効率の改善する技術が、これまで KEK で開発してきた、“従来捨てられてきた電子ビームのエネルギーを回収して、次の電子ビームの加速に利用する” エネルギー回収技術である。KEK ではこの大強度の電子ビーム回収技術に基づき、10~20 μm で波長可変の大強度の高平均 FEL 光を新たに開発していく。さらに FEL-TUS も使い、5~20 μm での中赤外の波長可変自由電子レーザーを用いた高効率樹脂加工を実現していく。

一方で、レーザー加工分野での社会実装を考えるうえでは、堅牢性に優れた半導体レーザーをはじめとする固体化されたレーザー光源の使用が優位である。中赤外波長において波長制御した光を発振が可能な固体レーザーに素子設計により発振波長を制御することが可能な量子カスケード

ドレーザー (QCL, Quantum Cascade Laser) がある。QCL は、半導体量子井戸構造中に形成されるサブバンド間の光学遷移を利用した中赤外領域の半導体レーザーである。波長 4 μm 以上の中赤外領域は分子の指紋領域とも呼ばれ、様々な分子個別の振動に由来する強い吸収が存在する波長領域であり、この吸収特性を利用して高精度な分光計測が可能である。例えば、シングルモード発振が得られる DFB (distributed feed-back, 分布帰還) 型 QCL を光源に利用したレーザー吸収分光法を用いてガス分光計測が行なわれている。自動車排ガスのように水蒸気や二酸化炭素といった干渉成分が混在する雰囲気中でもレーザー光の優れた単色性により 1 つの吸収線の強度変化を選択的に計測することが可能であり、窒素酸化物を ppm オーダーで検出できることが実証され、自動車排ガス分析装置として製品化されている。



図 III 2-3-8-3 レンズ内蔵分光計測用 DFB 型 QCL

従来、QCL では各層が nm レベルの量子井戸層を何百層にも積層した活性層構造を高精度にエピタキシャル成長する技術が必要であり、製造レベルでの量産は不可能と考えられていた。そこで浜松ホトニクス (株) では量産性に優れる MOCVD 成長に適した新型の活性層構造 (特許第 5641667 号) を独自に考案し、室温 CW 発振に成功した。そして分光計測応用には必須であるシングルモード発振を得る DFB 構造として位相シフト回折格子をナノインプリントリソグラフィ法により高精度に作製する技術 (特許第 5771120 号) を世界に先駆けて確立し、DFB 型 QCL の量産化に成功した。図 III 2-3-8-3 に、コリメートレンズを内蔵した分光計測用 DFB 型 QCL の製品外観を示す。

加工用途への使用には高出力化と最適発振波長の特定が課題となる。また、CO₂ レーザーが 1 ミクロン帯の YAG レーザー、ファイバーレーザーに置き換わりつつある理由の 1 つに、光ファイバーによる伝送が出来ないことがある。製造現場において、ファイバー伝送ができることはロボットアームを利用したプロセス適用など、自由度が格段に高まる。ファイバー伝送の実現は高出力赤外レーザーのプロセス応用展開に必要な開発項目であり、現時点でも中赤外領域の様々なファイバーが開発されているが、一方で具体的な発光デバイスとの組み合わせで、実用的な観点からどれがよいのか定かにはなっていない。

前述のように、5~20 μm 中赤外波長領域では、高出力発振が可能なレーザー光源が、波長 10 ミクロン帯の CO₂ レーザーに限られており、異なる波長に吸収をもつ様々な樹脂材料の加工に十分に対応できておらず、レーザー加工プロセスの基盤となるレーザー光誘起現象の理解も十分に得られていない。レーザー光による材料加工プロセスには、比較的 low 出力の連続 (cw) 光によっても実施可能な樹脂溶着のプロセス、化学反応誘起などに基づいたマーキングプロセス、さらに高出力が必要であり、短パルスの適用が好ましい精密切削加工プロセス等があり、材料の種

類、照射条件の設定に基づいて様々な高効率加工プロセス実現の可能性がある。赤外レーザー光照射によって誘起される基盤的な現象について、利用する分子振動の特性による加工特性の変化、多光子過程の関与、短パルス化による非熱的加工の実現性等、現象のみならずメカニズムに踏み込んだ検討を実施して、レーザー加工のデータベースとして知見を集積することが望ましく、光源開発と並行して進める必要がある。

以上の背景に基づいて、赤外波長域の高出力レーザー光源による、様々な樹脂材料の高効率加工実現に向けて、下記3件のサブテーマを設定し、連携しつつ研究開発に取り組む。

- ①「高平均出力、短パルス自由電子レーザーの開発およびプロセス実証」
(実施先：高エネルギー加速器研究機構(KEK) (再委託先 東京理科大学(TUS))
- ②「高出力量子カスケードレーザーおよび伝送技術の開発」
(実施先：浜松ホトニクス株式会社(HPK))
- ③「樹脂材料高効率加工プロセスの開発および評価」
(実施先：産業技術総合研究所(AIST))

光源開発のみに留まる事無く、高効率プロセス開発と光源開発を並行して進める。国研および企業が参画することで、学術的側面のみならず、製品の実用化を見据えた研究・開発を実施する。

表Ⅲ2-3-8-1. 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠
①KEK 高平均出力、短パルス自由電子レーザー(FEL)の開発およびプロセス実証	①-1 10~20 μ mの波長可変W級自由電子レーザーの開発とプロセス評価(KEK) ①-2 5~10 μ mの波長可変自由電子レーザーFEL-TUSを用いたプロセス評価	5~10 μ mの波長で樹脂材料の吸収波長に合わせた波長での加工可能かをFEL-TUSでまずは実証する。また、KEKでは、10~20 μ mの中赤外領域においても狙った吸収波長での高効率加工に必要な強度を実現するためにWレベルの強度の波長可変光源実現を目指す。
②HPK 高出力量子カスケードレーザー(QCL)および中赤外波長光ファイバー伝送技術の開発	②-1 高出力QCL素子開発： 8 μ m帯で平均出力1W以上 ②-2 ファイバー伝送技術開発： ビーム径100 μ m以下、結合効率80%以上 ②-3 ビーム整形技術開発(加速予算)： DOEを用いた加工に適した整形技	樹脂材料の吸収波長にマッチした波長で高出力化を行なう。実際の加工検証実験に使用可能な光源モジュール形態を目指す。1素子当たり1W以上、100 μ m以下に集光することで1cm ² 当たりkWオーダーのパワー密度が得られ熱的加工

	術の確立	の領域に到達できる。実際の加工試験を容易に行なうために中空ファイバーを用いたファイバーアウトユニットを実現する。また、加速予算を用いて加工に適したビーム整形技術の確立を目指す。
③AIST 樹脂材料高効率加工プロセス評価とデータベース構築	③-1 5種類以上の樹脂における中赤外レーザーによるプロセス評価とその評価法の確立 ③-2 樹脂材料加工のデータベース構築	自動車輸送機器等の軽量化要求に伴い導入が予想される樹脂材料数種類において中赤外域で強い共鳴吸収を持つレーザーでのプロセス評価を行う。また、加工形状の計測、ラマン分光法などによる、プロセス評価法を確立する。得られた樹脂加工の実験結果のデータベースを公開し、技術の普及を目指す。

(3) 研究開発スケジュール

下記表Ⅲ2-3-8-2 に目標を達成するための研究開発スケジュールを表にして記載する。

表Ⅲ2-3-8-2. 開発スケジュール

事業項目	2018 年度				2019 年度				2020 年度				
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	
①高平均出力、短パルス FEL の開発とプロセス実証 ①-1 : 10~20 μ m の FEL 開発とプロセス評価 (KEK) ①-2 : 5~10 μ m の FEL でのプロセス評価 (TUS) ②高出力量子カスケードレーザーおよび伝送技術の開発 (浜松ホトニクス) ③樹脂材料高効率加工プロセス評価とデータベース構築 (産業技術総合研究所)		レーザー発振器検討		発振器製作									
			FEL装置設計	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
				→	→	→	→	→	→	→	→	→	→

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発の各項目とその目標、成果および達成状況を表Ⅲ2-3-8-3に示す。研究成果の詳細は次節(5)を参照。

表Ⅲ2-3-8-3. 研究開発項目と達成状況

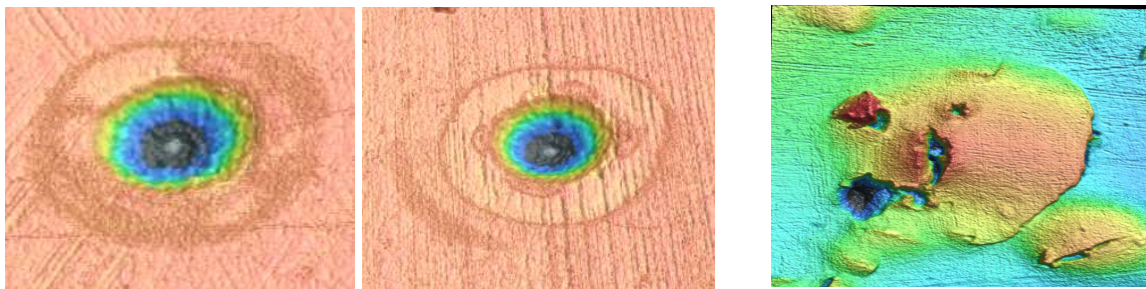
項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
①-1: 10~20 μm の波長可変 W 級自由電子レーザーの開発とプロセス評価	FEL 増幅実証。 平均出力 W 級 波長可変 10~20 μm	FEL の増幅を確認。 バーストモードによる高繰り返しビームで 0.5W 以上の平均出力確認。波長 11~20 μm の可変性確認。 PTFE 等の樹脂材料への照射を実行。	○	さらに高平均の CW モードのエネルギー回収運転での FEL の実証。それによる 10~20 μm の波長での高効率樹脂加工の実証。
①-2: 5~10 μm の自由電子レーザーでのプロセス評価	5~10 μm での波長可変 FEL によるプロセス実証	8.7 μm の吸収波長に合わせ、PTFE の高効率加工実証。	○	他の樹脂等の高効率加工の実証。
②-1: 高出力 QCL 素子開発 ②-2: ファイバー伝送技術開発 ②-3: ビーム整形技術開発 (加速予算)	平均出力 >1W ビーム径 <100 μm 結合効率 >80% 専用 DOE 設計、ビーム整形の実証	$\lambda = 8.6\mu\text{m}$ 、1.08W ビーム径 96 μm 、結合効率 81.5% 達成 ZnSe で DOE 試作、ライン形状を確認	○ ○ ○	長期信頼性試験の実施、更なる高出力化、および波長バリエーションの拡充
③-1: 5 種類以上の樹脂における中赤外レーザーによるプロセス評価とその評価法の確立	5 種類以上の樹脂における高いプロセス効率の実証	5 種類の樹脂の穴開け加工閾値の結果から吸収の大きい波長で高いプロセス効率を実証。照射前後の形状変化およびラマン分光による樹脂の結晶の変化からプロセス評価方法として有効であることを実証。	○	穴開け、切断加工以外の溶着、造形加工のプロセス効率を評価。
③-2 樹脂材料加工のデータベース構築	各種材料の照射実験の結果のデータベース登録	5 種類の樹脂の照射実験の結果をデータベース「匠コンソーシアム」に登録した。	○	

達成度 ○: 達成 △: 一部達成、達成見込み ×: 未達

(5) 成果の詳細

①「高平均出力、短パルス自由電子レーザーの開発およびプロセス実証」(高エネルギー加速器研究機構、東京理科大学(高エネルギー加速器研究機構より再委託))

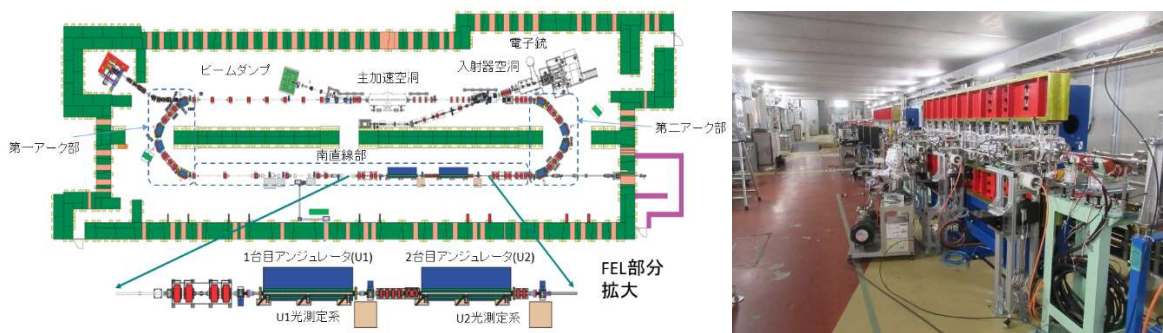
一般に高分子材料の紫外・可視領域の光吸収は微弱でブロードであるため、可視・紫外レーザーを光源とする場合表面加工の為にレーザーパワー閾値が著しく高く、また熱損傷領域(Heat Affected Zone; HAZ)が生ずるといった問題を抱えている。一方高分子材料は中赤外領域において振動遷移に基づく多くの強い吸収ピークを示す。そこで東京理科大学では、中赤外領域(5~15 μm)において周波数可変である赤外自由電子レーザーを光源とし、振動吸収ピークに共鳴する波長を選択・照射することでより効率的かつクリーンな切削加工を行い、合わせて表面におけるアブレーションメカニズムを解明することを目的とした。対象とした高分子材料はPTFE樹脂(テフロン)とABS樹脂である。これらの高分子材料について中赤外反射スペクトルを測定し照射波長を決定した。FEL照射後の表面形状を光学顕微鏡や共焦点レーザー顕微鏡で観察し、また光解離生成物をFT-IRを測定することによって同定した。PTFE樹脂においては、振動吸収に共鳴した中赤外FEL照射(8~9 μm)によって、図Ⅲ 2-3-8-4(左の2つの図)に見られるように、ほとんどHAZのない極めて効率的(図Ⅲ 2-3-8-4の右側の図の可視光に比べて圧倒的に低いレーザーパワー閾値)かつクリーンな切削が実現した。また可視レーザー照射時とは全く異なる解離生成物が特定され、波長領域の違いによるアブレーション機構の違いを明らかにした。ABS樹脂においても、中赤外FEL照射(~14 μm)によってHAZのないクリーンな切削を確認することができた。これらの結果より中赤外自由電子レーザーを用いたアブレーションによって、熱損傷を抑制した高効率かつクリーンな加工を実現した。また、これらの結果を受けて、量子カスケードレーザーでは8.7 μm あたりの波長を設定しPTFEの加工を試みることにした。



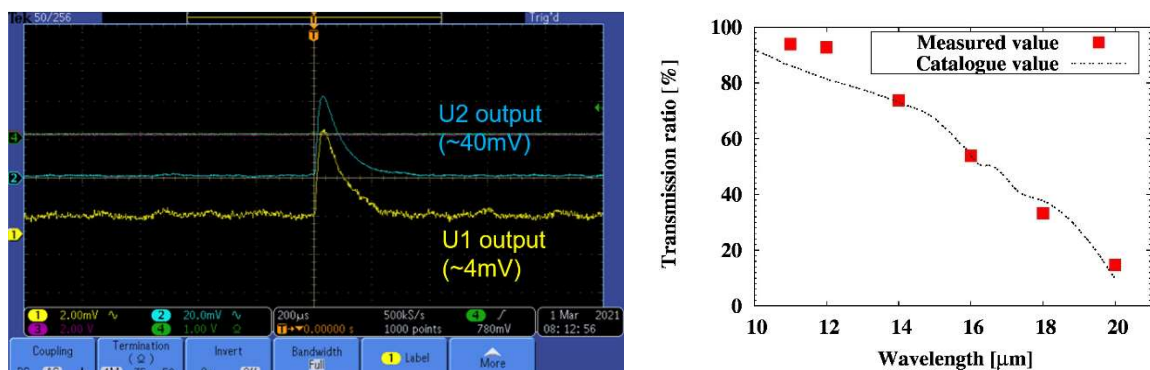
図Ⅲ 2-3-8-4 レーザーアブレーションによるテフロンの表面形状 左側より照射波長は8.3 μm 、8.7 μm (いずれも赤外自由電子レーザー)、532 nm(Nd:YAGレーザー)

一方、高エネルギー加速器研究機構ではエネルギー回収リニアック施設(cERL)による中赤外自由電子レーザー(FEL)システムの詳細設計を行った。中赤外FELシステムの光生成部となるアンジュレーターについて、1W級のFELの生成を行うべく、3mのアンジュレーター2台により、変調磁場の周期長を24 mmにすることで波長10~20 μm の波長可変性をもつ光源を設計。特に15

～20 μm 近くの強度を最適化する仕様とした。2019 年度には 1 台目のアンジュレーターを cERL のビームラインに設置し、平均ピーク強度にて、1 mW 以上の出力を達成。2020 年度には 2 台目のアンジュレーターを cERL のビームラインに無事設置が行われた（図Ⅲ 2-3-8-5 参照）。ビーム調整後の FEL の出力を測定した信号である。1 台目の信号に対し、2 台目のアンジュレーターの信号が 10 倍増幅を確認（図Ⅲ 2-3-8-6 の左）。FEL の 2 台目アンジュレーター光源からの出力に直すと、1 バンチ当たりの強度として、約 6 nJ の FEL の増幅光を得ることができた。繰り返し周波数である 81.25MHz のバースト内での平均強度に直すと約 0.5W の出力が 2 台目のアンジュレーターから発光されていることがわかった。この換算には大気中の輸送での水蒸気の吸収を換算にいれていないため、それらを考慮しても 1 W 級の光が得られていることが判明。さらに、その波長依存性を測定するために ZnSe の透過率とアンジュレーターの磁石列の位置での設計波長での透過率を測定することで比較を行った。ZnSe の波長依存性と FEL の設計波長が一致しており、この結果、アンジュレーターの磁石列を変えることで波長が 20 μm から 11 μm まで変化していることが分かった。この FEL 光を用い、PTFE 等の樹脂材料照射実験を行った。今後、更なる強度増強と照射での集光条件などを調べていく予定だが、cERL 加速器にて、10～20 μm の波長可変性と W 級の FEL 増幅を達成した。



図Ⅲ 2-3-8-5 cERL-FEL のレイアウト（左）cERL の南直線部に設置した 2 台のアンジュレーター（右）。



図Ⅲ 2-3-8-6 1 台目 (U1) と 2 台目 (U2) アンジュレーターからの FEL 光出力（左）cERL-FEL の ZnSe の透過率測定結果（右）。

②高出力量子カスケードレーザー (QCL) および中赤外波長光ファイバー伝送技術の開発
（浜松ホトニクス株式会社）

レーザー加工应用を目指して W クラスの中赤外高出力量子カスケードレーザーの開発を行なった。レーザー構造は InP 基板に格子整合する InGaAs/InAlAs 多重量子井戸構造より構成され、量子井戸構造中に形成されるサブバンドの計算および素子特性のシミュレーションには非平衡グリーン関数法を用いた。設計波長 $8.6\ \mu\text{m}$ 、活性層段数 75 段、Cu ヒートシンクにエピダウン組立、出射端面は劈開、後端面には高反射コーティングを施した QCL 素子において、室温 QCW 駆動 (1MHz/duty50%) にて 1 素子当たり 1W 以上の平均出力を達成した (図 III 2-3-8-7 参照)。エネルギーに換算して 150 meV 以下の長波長領域において室温駆動で W クラスの出力が得られたことは学術的にも意味がある。

レンズ集光により焦点位置付近でビーム径 $\sim 100\ \mu\text{m}$ を確認、中空ファイバーへの結合効率は 81.5%を達成した (図 III 2-3-8-8 左図参照)。中空ファイバーは空気をコアとし、内壁を Ag コートするなどして反射率はほぼ 100%となっており、極めて低損失な伝送が可能である。しかしながらマルチモードファイバーであるためビーム形状における空間的な不均一性は避けられない。そこでモードスクランブル機構を検討した。中空ファイバーの途中の 2 点で固定し、その間の 2 ヶ所でファイバーの導光方向に対して水平方向および垂直方向の振動を加えた。数 100Hz 程度の振動を加えることで空間的に不均一に分布していた光がコアモードに集中し、動的にスペックルノイズを平滑化することに成功した (図 III 2-3-8-8 右図参照)。また、加速予算を利用して回折光学素子 (Diffractive Optical Element, DOE) を用いたビーム整形技術に関して検討を行なった。ZnSe で DOE を QCL の出射パターンを考慮した専用設計で試作し、ライン形状のビームプロファイルを得た (図 III 2-3-8-9 参照)。設計値は波長 $8.6\ \mu\text{m}$ 、スーパーガウシアン (次数 20) を仮定、平行光入射の条件で長軸方向 10mm、短軸方向 0.2mm である。例えば 500mW 入射時で平均出力密度は約 $40\text{W}/\text{cm}^2$ 、DOE 後段のレンズとの組合せにより焦点距離を変えることでライン形状を調整することが可能である。このようなライン形状の 1 次元ビームは樹脂材料への溝加工、溶着、表面改質などに有用であると考えられる。

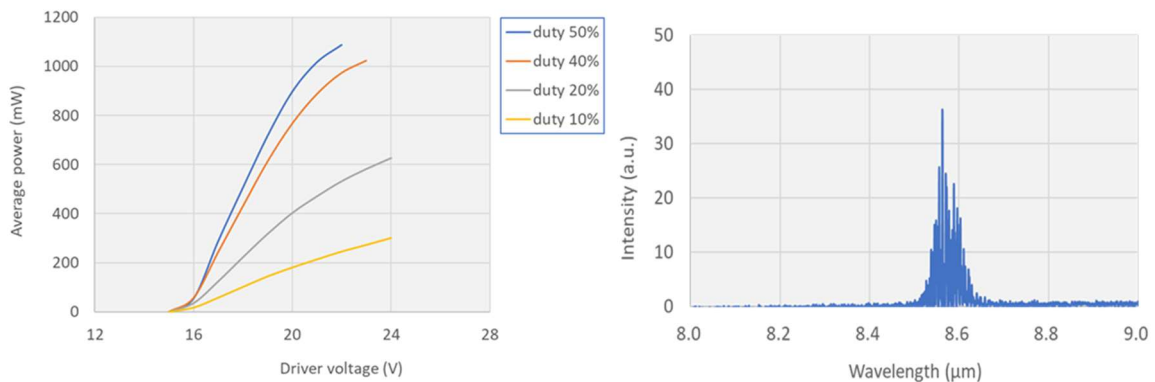
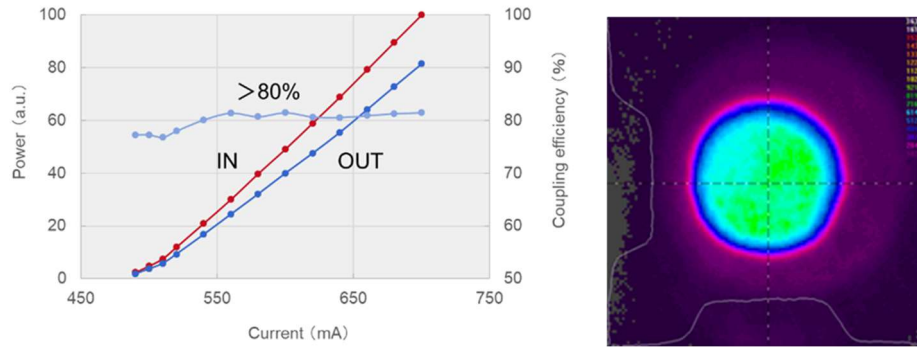
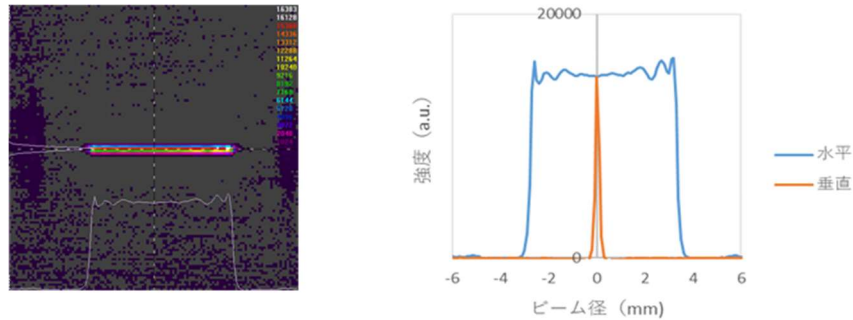


図 III 2-3-8-7 $8.6\ \mu\text{m}$ の QCL の電圧-光出力特性 (左) レーザー発振スペクトル (右)



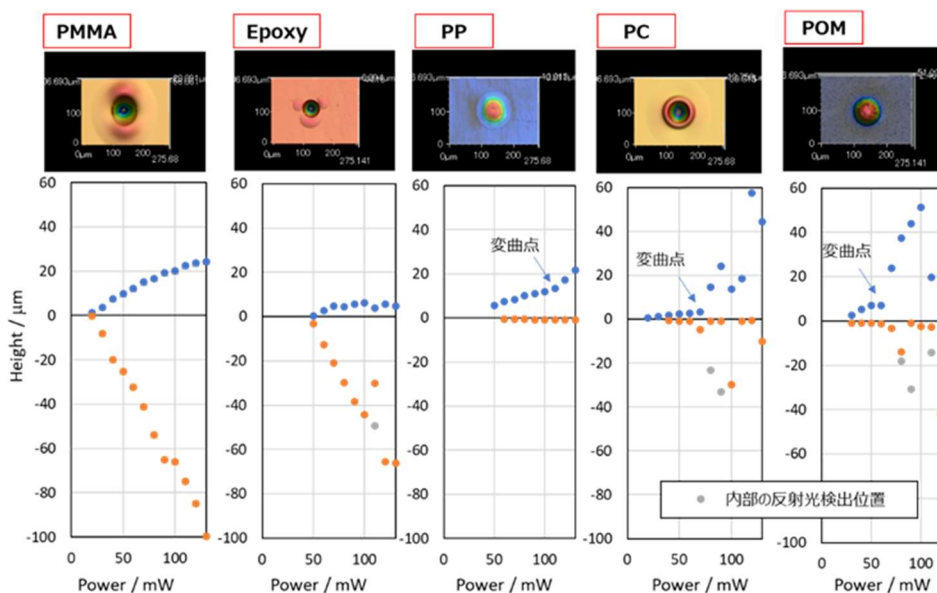
図Ⅲ 2-3-8-8 中空ファイバーの入出力特性（中空ファイバーφ1500μm）（左）モードスクランブル技術による2軸振動に周回応力を加えた際のファイバー端ビームプロファイル平滑化（右）



図Ⅲ 2-3-8-9 ライン形状 DOE によるビーム整形

③ 「樹脂材料高効率加工プロセス評価とデータベース構築」（産業技術総合研究所）

中赤外域に発振波長を持ち比較的多くの樹脂に強い吸収を持つ量子カスケードレーザーで PMMA（アクリル樹脂）、POM（ポリアセタール）、PA66（ポリアミド）、PC、PP（ポリプロピレン）、PTFE などの樹脂に対し穴開け加工、切断加工を行った。図Ⅲ 2-3-8-10 は波長 7.7 μm の QCL で 40 ms 照射時の穴開け加工での中心の穴深さと周辺部の盛り上がり高さの照射パワー依存性の結果である。集光中心部では閾値以上では穴が掘れて行くが、同時に周辺部では熱伝導により膨張している様子が分かる。共鳴吸収の効果を検証するために、吸収の効果の小さい CO₂ レーザーで同様に測定した。QCL 及び CO₂ レーザーにおける加工閾値、並びに 7.7、10.6 μm の波長における 100 μm 厚の試料の吸光度を表Ⅲ2-3-8-4 に示す。すべての樹脂において吸収長の短い波長で加工した方が加工閾値が低くなる結果が得られた。



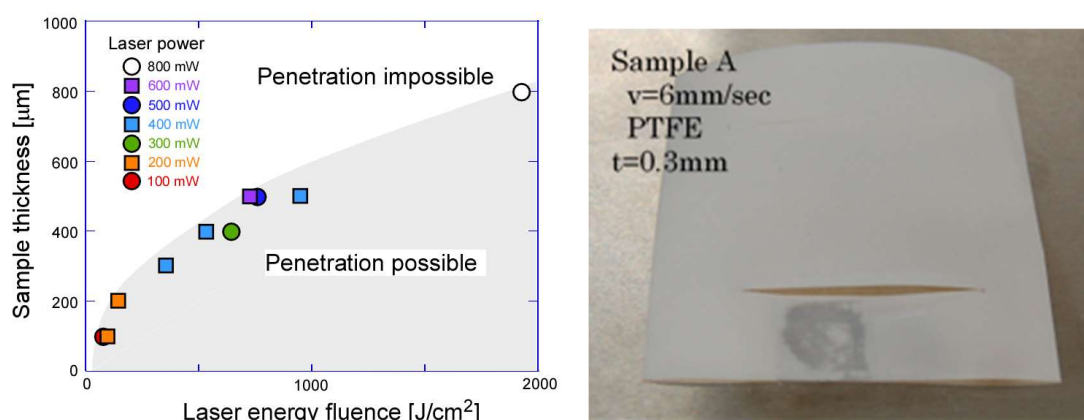
図Ⅲ 2-3-8-10 5種の樹脂材料に対するQCL光（波長 $7.7\mu\text{m}$ ）40ms照射により表面に形成される加工穴深さ及び周辺部の隆起高さの照射パワー依存性

表Ⅲ2-3-8-4. 各種樹脂材料のQCL（波長 $7.7\mu\text{m}$ ）および CO_2 （ $10.6\mu\text{m}$ ）レーザーによる照射結果

Polymeric Materials	Crystallinity	Tg (K)	Tm (K)	n	Abs. (QCL)	Abs. (CO ₂ L)	Fluence (QCL)	Fluence (CO ₂ L)	Phenomena
PMMA	Amorphous	363		1.49	0.046	0.043	3.37	4.84	Threshold for etching
POM	Crystalline	223	453	1.495	0.018	0.175	10.3	7.35	Threshold for etching
							18.5 (10.1)	8.5	Appearance of melted polymer
PA66	Crystalline	323	538	1.53	0.151	0.077	5.48	26.4	Threshold for etching
							10.1	21.2 (18.3)	Obs. of hollow structure
PC	Amorphous	423		1.59	0.045	0.045	11.8	22.6	Rapid increase in structural height
PP	Crystalline	273	433	1.48	0.011	0.005	6.7	19.8	Threshold for swelling
PTFE	Crystalline	399		1.35	0.015	0.007	14.7	28.2	Threshold for swelling

次に中赤外域以外で吸収を持たず既存のレーザーによる加工が困難なPTFEに対して吸収波長に一致させたQCL（波長 $8.7\mu\text{m}$ ）を用いて穴開け、切断加工を試みた。QCLの照射エネルギーは

シャッター開閉時間、出力の2つを制御してPTFEシートの貫通穴が開く最小出力、その時のシャッター時間を調べた。十分なシャッター時間を設定して照射エネルギーを増加しても貫通できず、板厚に対して必要最低の出力があることが分かった。これは照射表面から内部、周辺部へ熱伝導により放熱するためである。図Ⅲ 2-3-8-10 左図にはPTFE試料の厚さに対して貫通可能な100 mW刻みの最低のQCLの必要な出力及び照射フルエンスを示してある。本光学系では800 mWの照射パワーにおいて最大800 μm まで貫通できることが確かめられた。同様に0.3 mm厚さのPTFE板をステージで掃引することで直線の切断加工を行った。図Ⅲ 2-3-8-11 右図はその切断加工結果を示す。ステージの掃引速度は6 mm/sで行った。図の様にQCLを用いることでPTFEシートが切断可能なことが確かめられた。これらの結果より、通常、切断加工にはファイバーレーザー、CO₂レーザーのように数100 W以上の高出力レーザーが用いられるが、樹脂加工においては1 W出力のQCLで穴開け加工、切断加工に用いることが可能なことを示した。



図Ⅲ 2-3-8-11 (左) 貫通可能なPTFE板厚のレーザー照射フルエンス依存性、(右) PTFE板の切断加工

以上の4機関による取り組みの中で、特に、機関間の連携した取り組みとして、先行して稼働しているFEL-TUS施設を高エネ研、産総研の研究者が訪問し、実験実施のための自由電子レーザーの装置構成やその照射実験について意見交換を実施した。加工試験については東京理科大学でFEL施設を利用した予備的な加工試験、産総研でCO₂レーザーを利用した予備的な加工試験結果に基づいてデータベース構築に向けた検討事項の共通化について協議を実施した。また、現行QCL装置の導入・設置～照射試験を浜松ホトニクス社の研究者が相互に訪問し、協力して実施した。さらに高エネ研の自由電子レーザー設置後は、産総研の研究者で協力し、材料照射実験を行うと共に、データの評価についての協議を実施した。

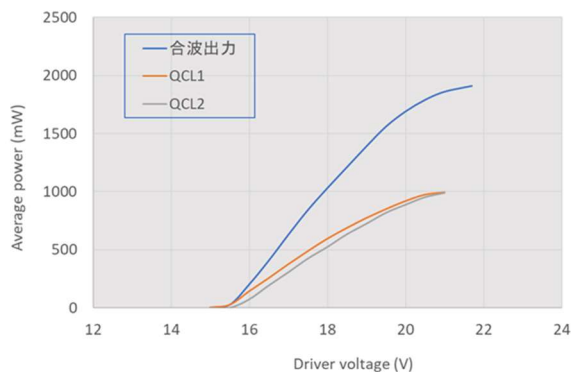
(6) 実用化・事業化への取り組み

更なる高出力化への試みとして複数のQCLを用いた合波技術の検討を行なった。2つの直交する直線偏光を1つの光軸上に重ねるビームコンバイナーを新たに設計した。反射側をs偏光、透過側はp偏光としてブルースター角入射とした。2つのQCL素子を偏光合波させることで光源出力として約2 Wを達成した(図Ⅲ 2-3-8-12 左図参照)。この偏光合波光学系および駆動電源

ボード、冷却システムを1つの筐体に組み込んだ光源モジュールおよび2軸振動によるモードスクランブル機構を搭載したファイバーアウトユニットを試作し、「高出力 QCL 光源モジュール開発」を NEDO 委託事業の成果としてプレス発表（2021/2/25）を行なった（図Ⅲ 2-3-8-12 右図参照）。

一方、中赤外域に存在する樹脂の共鳴吸収に一致させた発振波長をもつ量子カスケードレーザーを用いてレーザー加工を行うことで1 W 程度の出力で穴開け、切断などのレーザープロセスができることが確認された。一般的に加工用レーザーはファイバーレーザーに代表されるように高出力が要求されレーザー自体も非常に大きくなり、加工部へのレーザー光のビームデリバリーと加工のロボットアームの駆動が大きな開発項目となる。しかし、QCL の場合、モジュールの大きさは手のひらサイズであるためアーム先端に光学系とともに設置し、動かすだけで加工ができる利点がある。NEDO プロジェクト中では穴開け、切断加工を中心に行ったが、溶着加工も可能であった。（一部の樹脂で実施）例えば、建設資材としての樹脂シートの現場での溶着、食品等の樹脂パックの真空シーリング、印刷およびレーザーマーキングができなかったフッ素系樹脂への印字、従来のレーザーでは吸収長が長く不可能であったフッ素系樹脂の微小サイズの3次元造形など様々な用途への可能性を示す実験結果が得られた。現在、樹脂メーカー、レーザーメーカーに成果を示し産業応用への展開を模索中である。

このように中赤外領域での高効率加工の可能性が示された。FEL においては、強度増強をすすめて、波長毎にさらなる材料の加工データの蓄積を目指す。そのデータ特性から、小型で高出力な量子カスケードレーザーの特定波長に焼き直し、材料波長の狙い撃ちしたレーザー加工、更なる産業応用展開が可能である。特に、今後、大学、公的研究機関、加工関連企業や素材関連企業等との連携が期待される。



図Ⅲ 2-3-8-12 偏光合波出力測定結果（左）QCL 光源モジュール、QCL 素子単体およびファイバーアウトユニット（右）

（7）知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表・リストに記載している。

2-4. 研究開発項目④「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

2-4-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」（実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学－共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所）

（2018年度までは、実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学－共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所で実施。

2019年度よりギガフォトン株式会社担当部分を研究開発項目⑤-3「短波長レーザーによる加工技術の開発／極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」および大阪大学－共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所担当部分を研究開発項目⑤-4「短波長レーザーによる加工技術の開発／高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」として実施）

本研究開発テーマでは、レーザー加工学理を解明し被加工材料の特性に合った高品位かつ高効率な加工を実現するために、最適な加工パラメータを抽出するレーザー加工テストプラットフォームの構築を行う。最終的には、最適レーザー加工探索と加工データベース構築を行う体制を構築し、産業界に最適レーザー加工レシピの提供を目指す。

2-4-1-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「時間制御型レーザー加工テスト加工装置の開発、波長制御型レーザー加工テスト装置の開発、プラットフォームの整備と運営、データベースの構築」（実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

（a）時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

これまでのレーザー加工では、連続（CW）光あるいは、ナノ秒よりも長いパルス幅のレーザー光が用いられてきた。これは、レーザー光を熱に変換し被加工材料の切断、融着などを行う、いわゆる熱加工を基本としていたため、kW級以上の大出力化が実現されているCO₂レーザー、ファイバレーザーが主として用いられてきた。しかしながら、2000年以降、フェムト秒からピコ秒領域の極短パルスを用いると、従来とは異なり、溶融痕がなく、良好な加工痕が実現できるとの報告があり、世界の研究開発機関や企業で、短パルスレーザー光を用いた“非熱的加工”の研究開発が加速している。この極短パルスのレーザー光を用いたレーザー加工技術を確立することは、レーザー加工技術における日本の産業競争力の優位性を確保する上で不可欠である。

本技術開発を進めるにあたり、時間制御型レーザー加工テスト装置の開発を進めている。これは、レーザー加工テストプラットフォーム構築に必要なパルス幅、繰り返し周期、パワーを広範に制御できるレーザー装置を開発する。特に、省エネ加工に向けた非熱的加工の探索をはかるためには、材料における多様な熱拡散現象等の影響を制御する必要があり、従来になく広範な時間域にわたるパルス幅可変性と、産業用途の条件出しを目的とする試験加工に必要な高出力の両立を目標とする。

レーザー加工のパルス幅依存性に関する学理の理解も深めつつ、被加工材料の特性に最適なパルス幅等の時間領域加工条件を探索するため、パルス幅を連続可変（サブピコ秒～マイクロ秒）しながら、産業用途で求められる高出力（100W 以上）照射での加工データの蓄積が可能な装置を構築する。そのために、(i) チャープパルス増幅方式のファイバーレーザーシステム、また、これのシードレーザーとして使用できる(ii) 時間波形制御可能な半導体レーザー（LD）システム、等の技術を組み合わせる。

これらの装置群は、レーザー加工プラットフォームに提供し、主に時間領域におけるレーザー加工学理の解明及び加工データベースの構築を行う。

(b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発

前述のように、これまでのレーザー加工では、CO₂あるいはファイバレーザーとその第 2 高調波等が用いられてきた。その結果、レーザー加工に提供されているレーザー波長は、10 μm 帯、1 μm 帯、あるいは、その高調波と限定されている。しかし、レーザー加工において重要なのは、被加工材料の光学特性を考慮に入れたレーザー波長を選択することである。しかしながら、レーザー光を熱に変換することに注視してきたため、大出力化が実現されているレーザーが用いられてきた。このような「レーザー装置主体のレーザー加工」を、被加工材料の光学特性を考慮し、個々の被加工材料に最適な波長を用いる「被加工材料主体のレーザー加工」に変換することができれば、その生産性の向上、CO₂ 排出の低減等の経済効果が期待でき、日本の産業競争力向上に大きな効果が期待できる。

一方、被レーザー加工材料の光特性は、レーザーと物質との相互作用の学理そのものである。また、加工というプロセスは、固体から液体、気体、プラズマへの相変化であり、さらには、原子間結合の切断という物理である。これは、非平衡、非線形、開放系という非常に難しい物理領域であり、単に、静的な光学特性に関する情報が得られていたとしても、加工中には、その特性そのものが大きく変動しているはずで、動的特性に関しては、ほとんど理解が行われていない。そのため、現在のレーザー加工技術は、勘と経験に基づいた製造技術ということができ、学理の裏付けという観点では、不十分である。このようなレーザー加工技術を、再現性、制御性の高いものにし、さらには、新規材料に対するレーザー加工条件の最適化に要する時間を短縮するために、レーザーと物質の相互作用について、その解明が求められる。そして、その知見は、レーザー波長の最適化だけでなく、パルス幅の最適化にも貢献することができる。

波長制御型レーザー加工テスト装置については、被加工材料の特性に最適な波長の探索とともにレーザー加工のパルス波長依存性に関する学理解明を目的とした研究開発を行う。そのために、赤外から深紫外域までの波長を選択して出力し、加工及び観察を行うことが可能な波長制御型レーザー加工装置を構築する。また、加工プロセス及び加工結果を評価するために有用な観察方法を提案・構築する。これらの装置によってレーザー加工プラットフォームを構築し、主に波長領域におけるレーザー加工学理の解明及び加工データベースの構築を行う。

(c) レーザー加工プラットフォームの整備と運営、レーザー加工データベースの構築

多種多様な材料に対するレーザー加工の最適レシピを創るためには、レーザー加工技術者の経験と勘に頼った膨大な試行錯誤が必要とされる。そこで、レーザー加工の最適条件を迅速に導き

出すためのレーザー加工プラットフォームの構築を行う。本レーザー加工プラットフォームでは条件可変の多種試験用レーザー加工装置、計測評価装置、加工学理の解明及びレーザー加工データベースを一体的に開発することによって、産業界へのレーザー加工レシピの提供を目指す。

(2) 研究開発目標と根拠

パルスレーザー加工においては、超短パルス化による熱負荷の低減効果は多くの事例で確認されており、変成を最小化した高品位加工が原理的には可能であることも認められているが、一方で、産業的に求められる高速加工を求めて高繰返しや高強度での照射を行うと、品質上の優位性が失われる、割れなどの思わぬ欠点が発生するなど、限界があることも知られている。すなわち、実用的な加工条件を想定した高出力での広範囲なパラメータ可変が、真に最適な加工条件出しのために極めて重要である。

多様な時間領域での現象を考慮する上で、サブピコ秒からサブナノ秒の可変域によって、電子-格子緩和時間、中性分子やイオン種の放出、プラズマの生成などマイクロからマクロへ繋がる加工関連現象をカバーできる。さらに、サブナノ秒からマイクロ秒では、加工対象物スケールでのエネルギー流入と散逸、熱拡散が制御できる。ファイバレーザーによるチャープパルス増幅と時間波形制御されたLDシードの技術を組み合わせることで、従来のレーザー加工に例を見ない、サブピコ秒からマイクロ秒の極めて広範囲なパルス幅における条件出しの実現を最終目標に設定した。また、パルスエネルギーは、実際の加工で主流であるガルバノスキャナーとf-θレンズの組み合わせで扱える集光条件（焦点距離>10cm）において、アブレーション加工条件出しに必要なフルエンス（J/cm²）を確保出来る100μJを中間目標とし、長パルス域や高速加工の為にはさらなるフルエンスや瞬間強度（W/cm²）の増加が求められることから、最終目標では、mJ級に向けた高エネルギー化も図ることとした。さらに平均出力については、金属、セラミクス、ガラス等の薄板切断、穴あけなどの高品位加工機としてのユーザーに対応できる100Wを中間目標とし、最終目標では、さらに高速加工や厚物等へ発展させるための高出力化を図る。

また、レーザー加工に用いる波長に関しては、ガラスや誘電体結晶（サファイア等）では、光吸収が大きくなるUV領域でのレーザー加工が注目されており、一方、樹脂、プラスチックのレーザー加工では、近赤外（特に波長2μm以上）でのレーザー光が候補と上げられている。このような状況から、波長可変型としては、UVから3μmに渡る波長領域で、30フェムト秒および100フェムト秒の時間領域での光学特性評価を実現することを目標と設定した。

表Ⅲ2-4-1-1-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
④-1-1(a) 時間制御型レーザー加工テスト加工装置 (i) ファイバレーザー (ii) 半導体レーザー	高パワーのパルス幅可変レーザー出力による試作加工・その場計測への適用。 (i) 高パワーのパルス幅可変レーザー出力による試作加工 (ii) 半導体レーザーシード光源装置	パルスレーザー加工の主な対象をカバーする。	(i) サブピコ秒-サブナノ秒、100μJ、100W。試験加工に着手。 (ii) 増幅器シード用レーザー発振器。	(i) パルスレーザーアブレーション加工の条件出しに必要な性能。 (ii) サブナノ秒以上の長時間領域に対応。
④-1-1(b)	深紫外から中赤外までの波長可変レーザー加工システムおよび取得データのレーザー加工プラットフォームへの供給と、それを用いた試作加工及びその場観察技術と組み合わせた学理解明。	CFRP、ガラス材料はUV、DUV領域で、プラスチックは赤外領域に吸収があるため。	波長制御型レーザープラットフォーム構築 レーザー加工における波長依存性の探索開始。	CFRP、ガラス材料はUV、DUV領域で、プラスチックは赤外領域での光学特性の把握が必要なため。
④-1-1(c)	開発成果によるレーザー加工プラットフォームの運用及びデータベースの構築。	協調領域の構築に有用な加工プラットフォームおよび加工データベースが存在していない。産業界に大きな力となると予想。	レーザー加工プラットフォームの運用及びデータベースの構築開始。	最終目標と同じ

(3) 研究開発スケジュール

下記表Ⅲ2-4-1-2 に目標を達成するための研究開発スケジュールを表にして記載する。

表Ⅲ2-4-1-1-2 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
④-1-1 (a) (i) ファイバレーザー	時間制御型レーザー加工装置の設計・開発		100W 動作	高輝度・高出力化		レーザー加工プラットフォームの構築および、加工データベースの整備
			条件出し加工試験	その場観察加工試験		
(ii) 半導体レーザー	LD 設計・試作・評価 10ps-1μs		改良型 LD 試作 数 ps-1μs 制御性	改良型 LD 試作 1ps 制御性	光源加工応用 機能評価	
	10ps-1μs 駆動技術 中間増幅		LD 発振器製作 数 W 級出力	光源プロトタイプ試作	柏サイトで 加工応用試験	
④-1-1 (b)	環境整備・装置開発 加工試験開始		プラットフォームの構築・運用 シミュレーション		加工テスト運用 推進	
④-1-1 (c)	運用検討	環境整備 小型評価装置 導入	運用開始 データベース 構築開始	UV テスト加工 装置導入 データベース パラメータ検討	システム 構築	

(4) 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ2-4-1-1-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
④-1-1(a) -(i) -(ii)	高パワーのパルス幅可変レーザー出力による試作加工・その場計測への適用。 (i) 高パワーのパルス幅可変レーザー出力による試作加工 (ii) 半導体レーザーシード光源装置	(i) パルス幅可変、400 fs~400 ps、最大出力：300 μJ、300 W。試験加工実施。 半導体レーザーシステムによるサブ ns~サブ μs の可変動作と試験加工の実施。 (ii) 1030nm 帯半導体レーザーシード光源装置構築。サブ ns~サブ μs パルス発生と波形制御。シード LD 素子のファブレス製造。	◎	なし
④-1-1(b)	深紫外から中赤外までの波長可変レーザー加工システムおよび取得データのプラットフォームへの供給と、それを用いた試作加工及びその場観察技術と組み合わせた学理解明。	・超短パルス波長可変レーザー加工システムの構築と加工実験の実施。 ・高精度な誘電体破壊閾値波長依存性データの取得。 ・開発した加工システムを用いた電磁波無反射モスアイ構造の実現。	◎	
④-1-1(c)	開発成果によるレーザー加工プラットフォームの運用及びデータベースの構築。	・他項目含むプロジェクト開発品7装置を要する柏 II プラットフォーム設立 ・データベースプログラムのユーザー利用開始。	◎	なし

時間制御型レーザー加工テスト装置の開発において、(i)ファイバレーザー関連技術では、300W、300 μ J を超える出力を達成し、試験加工にも着手できており、最終目標を達成した。(ii)半導体レーザー関連技術では、小型高安定な 1030nm 帯の時間幅可変パルス光源を開発し、この光源をシード光源に用いて銅、SUS 等の材料でレーザー加工試験を実施し、加工痕の形状測定と観察を実施した。

波長制御型レーザープラットフォームは光源の整備は中間目標を 1 年前倒して完了しプラットフォームへの提供済みで最終目標を達成している。加工の波長依存の実験も始まっている。

レーザー加工プラットフォームの構築はユーザー利用を開始し、無償・有償の利用実績がある。さらに、本プロジェクト開発品の一部を集約した柏 II プラットフォームを設立し、プロジェクト開発品の効率的なユーザー利用環境を構築した。

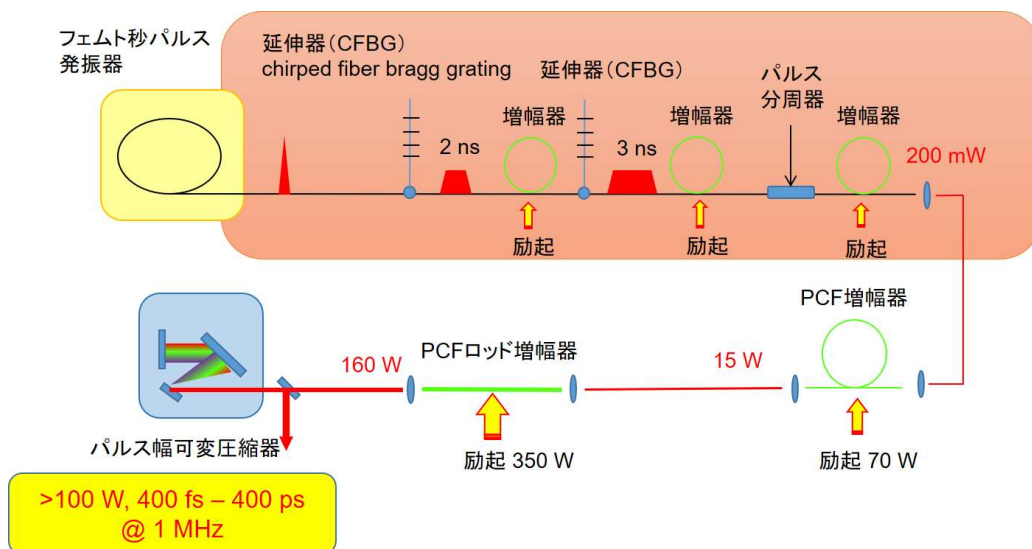
加工データベースはプロジェクト実施者内でのテストユースを踏まえ改良の後、加工プラットフォーム利用者等一部ユーザーへの提供を開始した。

(5) 成果の詳細

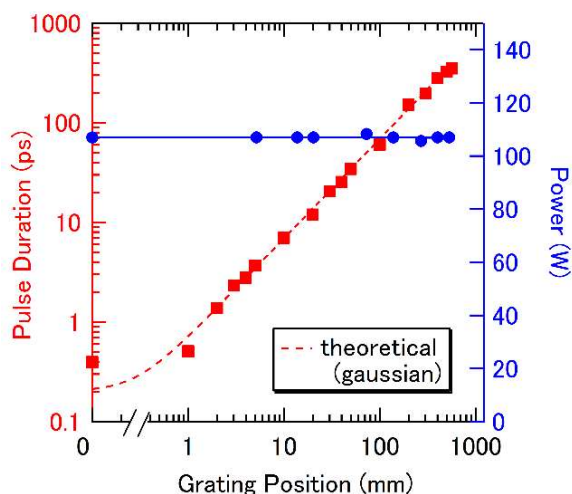
(a) 時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

(担当：東京大学、東京大学再委託：東北大学、産業技術総合研究所)

産総研と東大は協力してファイバレーザー発振器ベースの 100 W (サブピコ秒—サブナノ秒) 時間幅高速可変レーザー、統一的に制御された加工ヘッド、加工結果の高速計測・解析技術からなる加工システムを開発した。加工テストプラットフォームの一部として多様な材料の加工試験に適用し、計測結果とともにデータベース化を行った。また当該レーザーの 300 W、0.3 mJ までの高輝度化高出力化技術を開発した。東大は東北大学とともに半導体レーザーベースの (ピコ秒—マイクロ秒) 時間幅可変レーザーについて、素子作製技術、レーザーダイオード制御技術を開発し、さらに産総研と連携して加工試験を行った。



図Ⅲ2-4-1-1-1 サブピコ秒-サブナノ秒レーザーシステムの基本設計

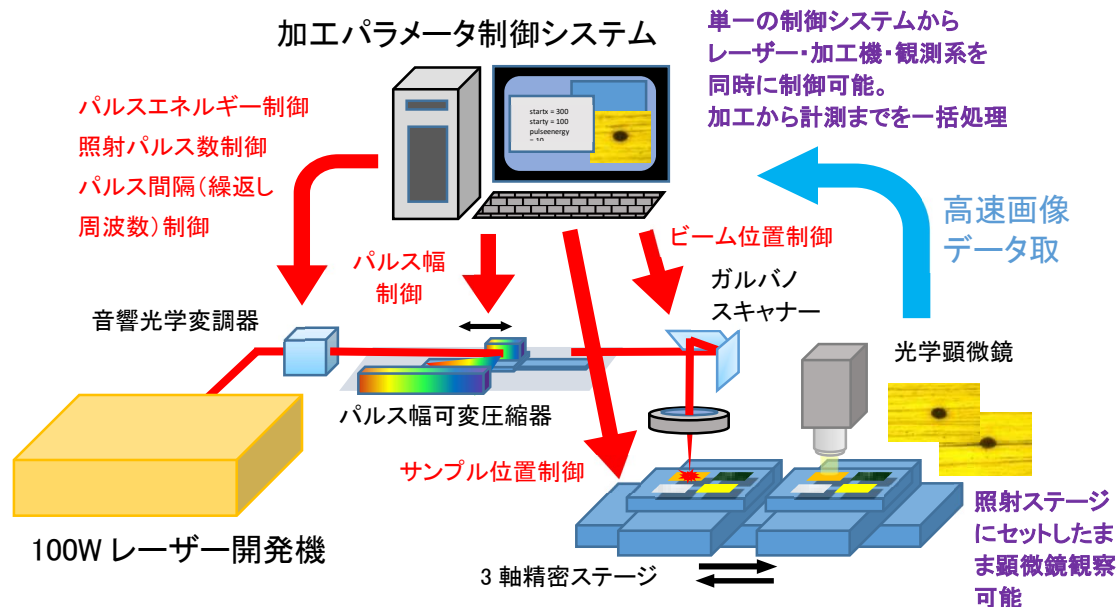


図Ⅲ2-4-1-1-3 加工ヘッドの外観

図Ⅲ2-4-1-1-2 分散調整に対するレーザーパルス幅の実測と計算値。高次分散等の影響で最短到達パルス幅にずれが生じているが、3桁の可変性が確認できる。

開発したサブピコ秒—サブナノ秒領域での時間幅（パルス幅）高速可変レーザーは、モード同期 Yb イオンドープファイバーレーザー発振器により発生させたフェムト秒領域の超短パルス出力をシード光に用い、同じく Yb イオンドープファイバーによる増幅で高出力化している。（図Ⅲ2-4-1-1-1）高分散媒体を透過させることで、光スペクトルは変えずにパルス幅のみを拡大して約 3ns のチャープパルス（パルスの継続中に光周波数に変化している光波）に整形し、多段のファイバー増幅器で 160W まで、光品質を保って増幅できる。増幅された高出力のチャープパルスを、回折格子対によって再圧縮する際に、分散の補償量を変えることで、高速のパルス幅可変を実現している。超短パルスレーザーのパルス幅は、可変性をうたった機器でも 0.4ps~20ps 程度が限界で、本開発機の 3 桁 (0.4ps~400ps) にわたる可変域（図Ⅲ2-4-1-1-2）は他にない特長となっている。また、A O 光変調器を用いた強度変調によって、パルス繰り返し (DC~1MHz) と照射パルス数（任意）、パルス光強度の各パラメータについて、パルス毎に任意の高速設定が可能である。パルス再圧縮も含め、これらのパルス特性操作後の出力で、最大 107W (107μJ, 1MHz 繰返し) を達成した。

この 100W レーザー開発機の出力光は、図Ⅲ2-4-1-1-3 の加工ヘッドに導入され、多軸制御のガルバノスキャナーを経て試験加工サンプルに照射される。サンプルホルダーは最長移動量が 600mm の大型高精度加工ステージ上に設置され、加工を行うレーザー照射部と、光学顕微鏡等を備えた加工状態観察部に対応している。このシステムの主要な特長は、1) 極めて広いパルス幅可変域を

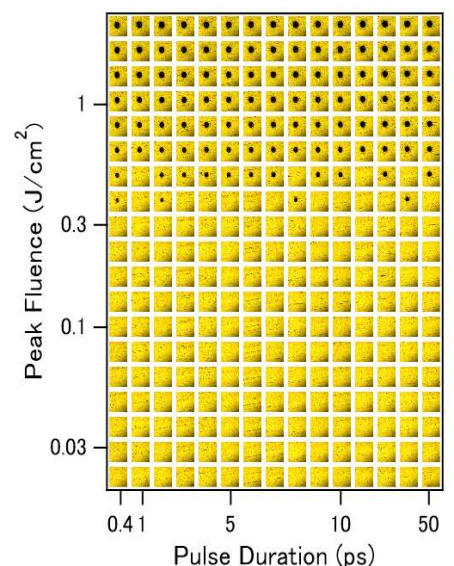


図Ⅲ2-4-1-1-4 時間制御型レーザー加工テスト装置の全体構成

はじめとする高速の時間域パラメータ調整機能、2)加工ヘッドにおいて対象物の加工と観察を速やかに切り換えることが可能、3)レーザーパラメータの制御、加工ヘッドにおけるビーム操作、光学顕微鏡等による観察、までを一つのPCから統一的に制御できる、といった点で、図Ⅲ2-4-1-1-4に概要を示した。これによって、多様なレーザー照射条件での加工データを高速に収集することが可能になった。

本加工システムは、加工プラットフォーム構築活動の一環として、装置開発の進行中から多様な条件での試験加工への適用をすすめた。加工結果を集積し、解析を進めるとともに、データベースの開発チームと協力して、ユーザーへの提供を念頭に置いての試験加工結果のデータベース化をすすめた。

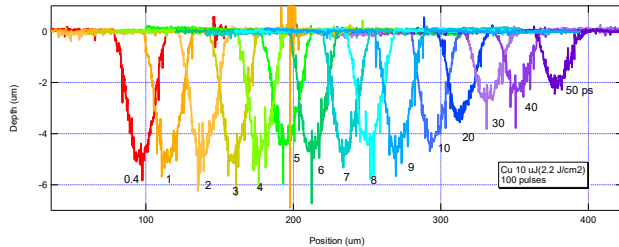
試験加工の事例として、パルス幅/フルエンスに対する光学顕微鏡画像のCuにおける取得例が図Ⅲ2-4-1-1-5である。照射ビーム径は $42\mu\text{m}$ ($1/e^2$)。照射パルス数が10000のパーカッション加工である。パラメータ可変加工と顕微鏡計測の自動化により、このようなデータを数十分で得ることができる。さらに、加工結果の解析においては、例えばレーザー共焦点顕微鏡等を用いた加工痕の3次元的形状計測(図Ⅲ2-4-1-1-6)と、それを元に計算した材料の除去量に基づいて、加工条件と加工速度の整理を行っている。この手順も自動化して高速処理を実現しており、パラメータのマトリックスで加工量を表現し



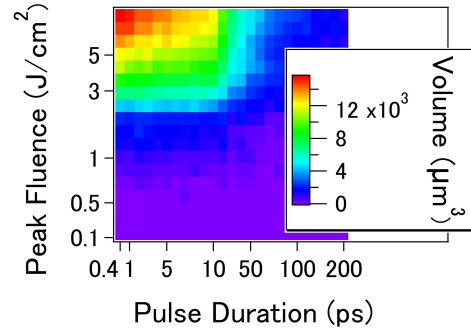
図Ⅲ2-4-1-1-5 銅の加工痕画像。パルス幅とパルスエネルギーについてマトリックス表示。

たデータ（図Ⅲ2-4-1-1-7）を一日程度の作業時間で取得できる。

この他、SUS や Al といった金属、半導体、絶縁体等の典型的な材料について、加工の時間領域パラメータ依存性を調べた結果について④-1-(6) サブテーマと協力して、データベースに登録した。



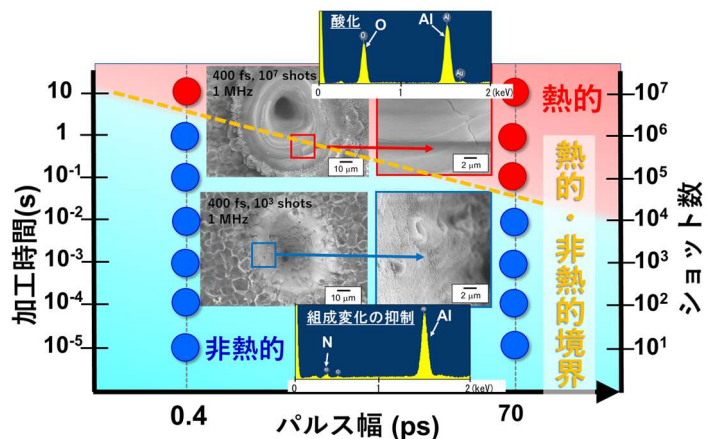
図Ⅲ2-4-1-1-6 銅の加工痕における、形状のプロファイルの計測例（但し、中心断面について表示）。



図Ⅲ2-4-1-1-7 銅の加工形状プロファイルから加工量（除去量）を計算しプロット

パルスレーザー加工の用途では、単純な切断、切削速度よりは、溶融の抑制や、HAZ (Heat affected zone) を最小化するなど、熱等による影響を避けた高品位な加工を求めるケースが多く、加工の品質評価は極めて重要な観点である。開発したパルス幅可変レーザー加工装置は、レーザーの照射条件を、例えば熱影響の観点から検討する上で最適なシステムと言える。ここで、高い熱伝導度が特長のファインセラミックスである窒化アルミニウム (AlN) について、時間領域のパラメータ可変性を活用した加工品質評価の一事例を報告する。照射パルスエネルギーは $30 \mu\text{J}$ (ピークフルーエンス 6.6 J/cm^2) に固定し、パルス幅は 400 fs、70 ps の 2 値に設定したパーカッション加工である。各加工点への照射繰返しを 1 MHz~10 kHz、照射パルス数を 10^n ($n=0\sim7$)、の範囲の可変量として設定し、多数の加工点の状態を比較検討した。

1 MHz の高繰返し条件では、照射パルス数の増大に伴い、加工穴表面の状況はレーザー誘起周期表面構造 (LIPSS) から溶融・再固化による平滑表面に変化した (図Ⅲ2-4-1-1-8)。典型的な SEM 画像を図中に示すと共に、LIPSS を青丸、平滑化を赤丸で図示した。この変化の閾値ショット数は、400 fs で $10^6\sim10^7$ ショット、70 ps で $10^4\sim10^5$ ショットであった。LIPSS は、極めて高速な加熱によって熱負荷が最小となる、いわゆる非熱的超短パルス加工の指標と考えら



図Ⅲ2-4-1-1-8 窒化アルミニウムにおける熱的/非熱的加工境界とパルス幅依存性

れているもので、マルチショット照射による熱蓄積の効果がパルス幅伸長に伴い顕著になり、非熱的加工から熱的加工へ変わっているものと考えられる。また、図中に、LIPSS 部位の EDX スペクトルを示すが、未照射材料に比べ大きな変化がなく、酸化等の顕著な組成変化を抑制できる非熱的加工の可能性が確認できたと考えている。なお、AIN の場合、10 kHz の繰返しでは、同じパラメータ域で平滑化への移行が確認できず、高い熱伝導度の所以と考えられる。一方、他種のセラミックスでは、はるかに溶融の顕著な領域が支配的であった。

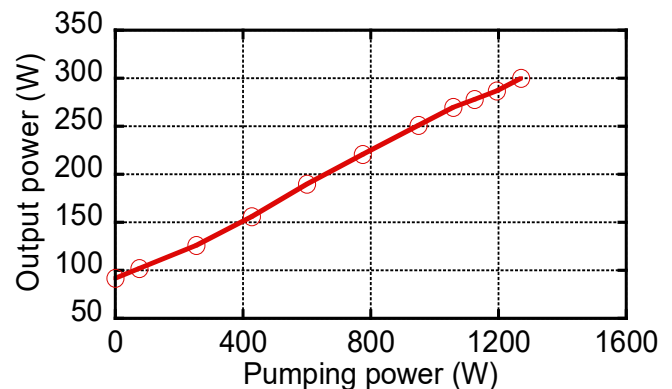
ここで開発したパルス幅可変レーザー加工装置のパルス出力 100W, 100 μ J は、当面に想定される多くの高品位加工に対応できる出力と考えられたが、将来の産業ニーズに答える為には、さらなる高輝度化・高出力化の可能性実証は重要である。本項目では、100W レーザー開発機の出力を、パラメータ可変のポテンシャルは維持しつつ3倍に増幅するモジュールの開発を目指した。光学系構成の複雑さと、ビーム品質の向上という、パルスレーザーでは一般的に相反してしまう要素に対して、加工応用想定での適度なバランスが期待できることから、我々は細型ロッドを用いる SCF (Single Crystal Fiber) 方式を採用した。

開発した増幅モジュールは、媒体に Yb イオンをドープした YAG セラミックスを用いた、直接水冷式である。励起用 LD 光源は、

レーザー媒体の温度上昇を最小化できるゼロフォノン波長 969 nm で定格出力 1200W のもので、増幅モジュール近傍までファイバー伝送して、SCF ロッドを軸方向励起している。パルス増幅実験の結果が、図Ⅲ2-4-1-1-9 である。このとき、入力レーザー光は平均出力 135 W の 3ns のチャープパルスである。励起パワー1270 W において、出力パワー300W (パルスエネルギー0.3mJ、繰返し周波数 1MHz) が得られ、本モジュールの設計目標値 300W 出力を達成することができた。

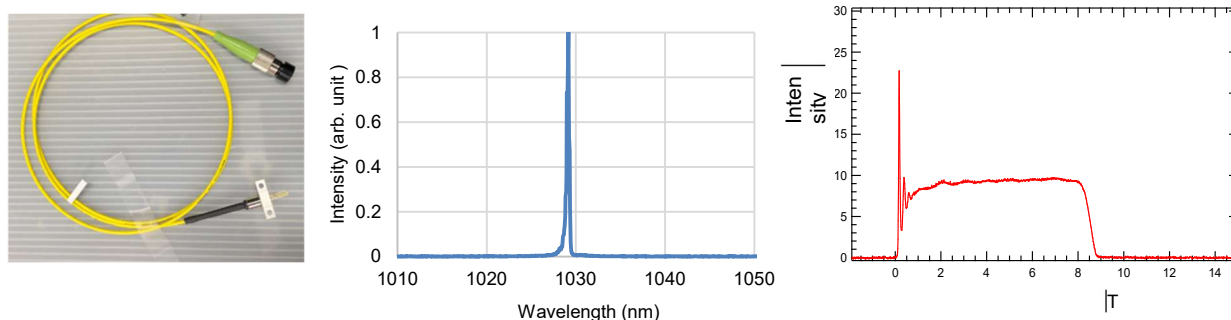
この母材 YAG セラミックスではファイバー (ガラス) の場合に比べ利得帯域が狭いことから、パラメータ可変域がある程度制限されると予測された。300W 増幅出力光のスペクトル (実測) と分散補償モデルから推計したところ、短パルス側限界が 0.8ps 程度まで上昇するとみられるが、その他の機能では同様な性能が期待できる。

加工用の時間制御型シードパルスのパルス幅の長い領域で、制御性良く生成するには半導体レーザー (LD) のシード光源が適していると考えられるが、1030nm 帯の市販 LD は種類・仕様が限られており、特殊仕様の LD は入手が困難な状況があった。そこで、東北大学の協力を得て東京大学にファブレス型の開発・評価拠点を設け、LD の内製に着手した。期間前半では、エピファブとプロセスファブを1社ずつ使って、エピ膜構造や共振器構造などを振りつつ、試作を行った。初回試作は1年以上を要しかつ発振閾値電流が高く不合格だったが、第2回試作では 20mA 以下の発振閾値電流、30-50ps 程度利得スイッチパルス幅が得られ、結果は合格と判断した。期間後半には、追加募集の研究項目 3-7 が独立に立ちあがったので、そちらの成果を取り入れながら、0.1ns 以上のロングパルス用のシード LD として、0.5-1.0mm 共振器長の素子の試作を進めた。東北大からの助言により、シード LD として 100mW 超ピーク出力を目標にした。共振器 1.0mm 長で活



図Ⅲ2-4-1-1-9 Yb:YAG セラミックス SCF 増幅器。励起に対する増幅出力

性層体積を大きいFP型LDを設計・作製し、LD端面に90%高反射および5%減反射コーティングを行った。1 μ sパルス駆動によるILV測定の結果、レーザー発振閾値は17mAであり、1A電流駆動時に最大光出力330mWを得ることができた。この成果をもとに、最終年度に、後述する東北大開発の光注入同期GS-LD光源に組み込むためのLDの内製を行った。反射配置での光注入同期に用いる必要性から、LD端面コーティングは90%高反射および1%減反射とし、TO-CANパッケージ・レンズ結合方式の偏波保持ファイバーピグテールモジュールとして仕上げた。図Ⅲ2-4-1-1-10は完成したモジュールの概観、発振スペクトル、10nsパルス駆動での出力光時間波形である。

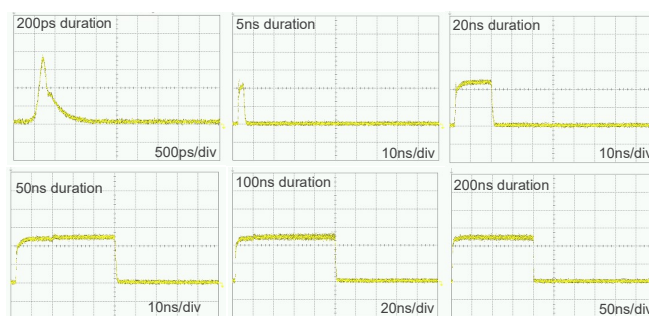


図Ⅲ2-4-1-1-10 作製したFP型LDのTO-CANパッケージ・偏波保持ファイバーピグテールモジュールの(左)概観、(中央)発振スペクトル、(右)10ns電気パルス駆動での出力光時間波形

0.1ns~1 μ sの領域で時間幅可変の光パルスを発生させる技術の実現を目的として、東北大学では、半導体レーザー(LD)の動作制御の研究開発に以下のように取り組んだ。

LDの利得スイッチング(GS)動作時に、緩和発振に起因する数十ps以下の時間幅のスパイク状光パルスの発生をなくして、サブns以上の時間幅を持つスムーズな形状の光パルスを発生させるための1つの方策は、共振器の光子寿命を長くすることである。この指針のもとで、外部共振器型LDの設計・製作を進めてそのGS動作特性を調べた。その結果、LDの発振帯域幅を制限しないときには期待通りのサブns~マルチns時間幅の光パルスを発生させることができた。しかし、共振器内に狭帯域フィルタを入れて、発振帯域幅を制限すると時間ジッタや強度ゆらぎが非常に大きくなることが判明した。考察検討を進めた結果、この振る舞いは光の自然放出過程のランダム性に起因していることがわかり、すぐには解決の方策が得られないと判断して研究開発を中止した。

そこで、並行して進めていた光注入同期GS-LD(ILGS-LD)の技術開発を集中的に進めた。その技術の核心は、ファブリー・ペロー型LD(FP-LD)をGS動作させて、それに単一モードレーザー光を注入することで、矩形波状の時間幅可変光パルスを発生させることにある。理論と実験の両面から研究開発を進めた結果、動作条件によってはカオス的および準周



図Ⅲ2-4-1-1-11 ILGS-LDによる0.2ns-0.2 μ sでの時間幅可変光パルス発生動作を示すオシロスコープ測定結果。このとき、光パルスのピークパワーは10mWに設定した。

期的なレーザー発振が誘起されるが、ILGS動作が最終的な安定状態であることがわかった。そして、ILGS-LDの系を筐体実装して温度と電流の制御を行なった結果、数日間にわたる長時間安定動作を得ることができた。LDの駆動条件に応じて数mW～数百mWのピークパワーを持つ矩形波状の時間幅可変光パルスを発生させることができた。さらに、0.2ns～0.2μsの3桁に及ぶ時間領域で制御性に優れた時間幅可変のILGS動作を確認した(図Ⅲ2-4-1-1-11参照)。

また、ILGS動作の1030nm帯FP-LD素子は、当初は東北大が以前に開発した低出力のものを用いたが、その後ILGS動作の高出力化のためにドイツ製の高出力型素子を用いた。そして、本プロジェクトにおいて東京大学で開発を進めてきた素子でのILGS動作も実現するに至った。

さらに産総研では、東京大学、東北大学開発の半導体レーザー技術の成果、特に、安定な矩形波状光パルスを発生できる筐体実装したILGS-LD(ILGS方式を用いたピーク出力1Wのレーザー装置)をシード光源として使用し、ファイバーレーザーを用いた2段増幅によって、サブナノ秒以上の時間領域パルスを出力できる平均出力10W級増幅器を構築した。これを用いて、銅、SUS等の典型材料で10nsパルスによる加工試験を実施し、加工痕の3D形状測定、SEMによる観察などで、短パルス領域の加工痕との比較等の解析を行った。

(b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発 (担当：東京大学、産業技術総合研究所)

東大は波長制御型の加工テスト装置、及び加工状態の観察技術を開発し、レーザー加工テストの運用を推進した。産総研は東大と協力し、波長を中心とする加工のパラメータ依存性のデータを取得し、シミュレーション手法による探査に有用なパラメータを収集しつつ、加工条件と加工結果を対応付けるデータベース化を進めた。

【波長制御型レーザー加工テスト装置の開発とレーザー加工データ収集】

東京大学本郷キャンパスにおいて、紫外から赤外の広い任意の波長において超短パルス光を発生可能なフェムト秒レーザー光源を用いて、レーザー加工が可能なテスト装置を開発した。パルス幅の異なる2種類の波長可変レーザー加工システムを構築した(図Ⅲ2-4-1-1-12)。

1. パルス幅50fs波長可変レーザー加工システム
波長可変領域：190nm～2.8μm
繰り返し周波数：1kHz
パルスエネルギー：10μJ以上(>235nm)、1μJ以上(>190nm)
2. パルス幅190fs波長可変レーザー加工システム
波長可変領域：210nm～5μm
繰り返し周波数：6kHz
パルスエネルギー：10μJ以上(>300nm)、1μJ以上(<300nm)



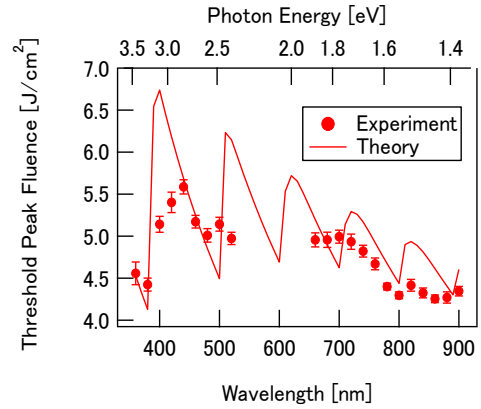
図Ⅲ2-4-1-1-12 波長制御型レーザー加工テスト装置の外観図 (左)パルス幅50fs (右)パルス幅190fs

このレーザー加工テスト装置を用いて、さまざまな物質を対象として、レーザー加工現象の波長依存性を実際に測定することが可能となった。図Ⅲ2-4-1-1-13は、サファイアに対してフェムト秒レーザー光のシングルパルス照射した場合のレーザー破壊閾値を、パルス幅 190fs 波長制御型レーザー加工テスト装置を用いて実際に求めた結果である。理論から予測されるレーザー破壊閾値と比較的良好な一致を示すとともに、多光子吸収の次数の切り替わり波長における破壊閾値の飛びに相当する現象も観測されていると考えられる。

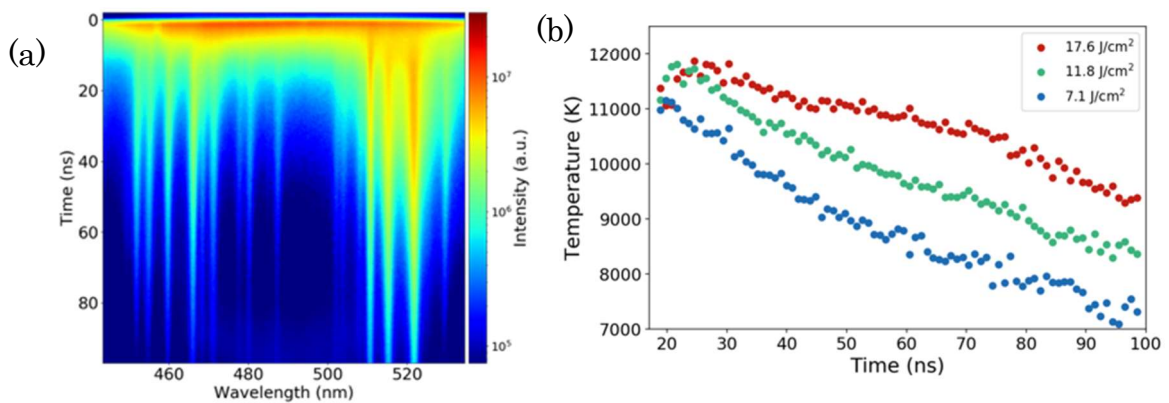
【レーザー加工発光スペクトルの超高速時間分解観察システムの構築】

2ピコ秒の最小時間分解能を有するストリークカメラによる観察系を波長可変レーザー加工システムに導入し、レーザー加工時における発光現象の時間変化を観察可能なシステムを構築することに成功した。これによって、レーザー加工ダイナミクスに関する情報を、発光スペクトルの時間変化から抽出することが可能になった。

図Ⅲ2-4-1-1-14 (a)は、銅に対して、波長 800 nm、パルス幅 35 fs、フルエンス 17.8 J/cm² のフェムト秒レーザーを照射した場合に観測される時間分解発光スペクトルを 100ns の領域まで示したものである。10ns 以降に観測される輝線の相対強度から、アブレーション時に生じるプラズマの温度を定量的に見積もることができる。プラズマ温度の時間変化のフルエンス依存性を示したものが図Ⅲ2-4-1-1-14 (b)であり、フルエンスが増大するにしたがってプラズマの温度も上昇していることが明らかになった。



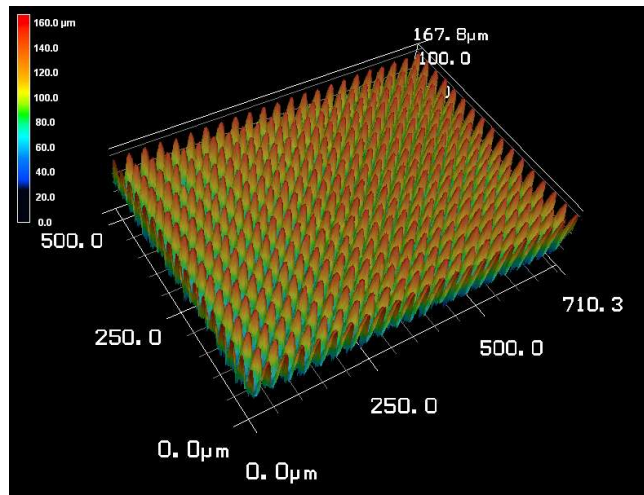
図Ⅲ2-4-1-1-13 パルス幅 190fs 波長制御型レーザー加工テスト装置を用いて測定した、サファイアに対するフェムト秒レーザーシングルパルス照射のレーザー破壊閾値の波長依存性



図Ⅲ2-4-1-1-14 (a)銅に対するフェムト秒レーザー加工における時間分解発光スペクトル (b)時間分解発光スペクトルより求めたアブレーションプラズマ温度の時間変化のフルエンス依存性

【フェムト秒レーザー加工を用いた微細三次元構造作製技術の開発】

開発した波長制御型レーザー加工テスト装置を用いて、他の加工技術では作製が難しい微細 3 次元構造を作製する技術の開発を進めた。適切なフルエンスのフェムト秒レーザー光を、シリコン基板表面に対して走査することにより、高さ約 100 ミクロン、周期約 30 ミクロンの微細周期ピラミッド構造(モスアイ構造、図Ⅲ2-4-1-1-15)を作製することに成功した。この構造は、ミリ波やテラヘルツ波に対する無反射構造として機能するため、電波天文学や beyond 5G の無線通信技術への応用が期待される。

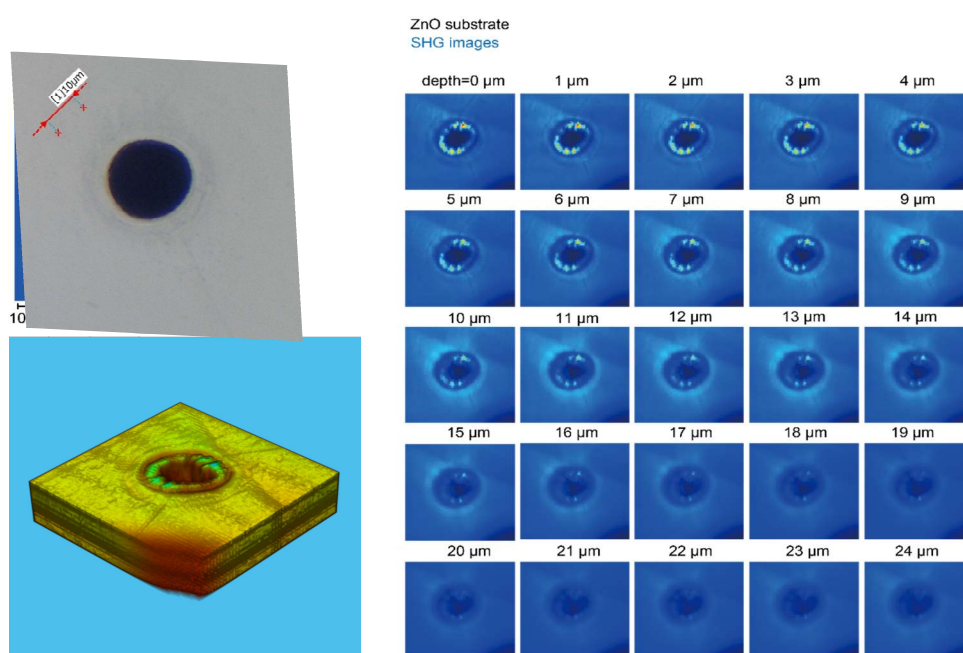


図Ⅲ2-4-1-1-15 フェムト秒レーザー加工で作製したシリコンモスアイ構造

【フェムト秒パルス光を用いたマルチフォトンマルチモーダル顕微鏡の開発と加工痕の観察】

レーザー加工の質を検査するためには、一般的に、光学顕微画像や電子顕微画像が用いられるが、これらはいずれも加工痕の表面形状を計測するものであり、加工試料内部の状態を観察することはできない。本開発項目では、加工試料内部の状態を3次元観察することが可能なマルチフォトンマルチモーダル顕微鏡を開発した。光での観察であり、対象物が可視光領域で透明な材料に限られるが、加工のその場観察にも比較的容易に適用可能な方法である。

75 MHzの高繰り返しチタンサファイアモードロックレーザーから出力された10 fsの超短パルス光源を用いた3次元レーザー走査型顕微鏡を構築し、試料の置かれた焦点部で生じる種々の非線形光学効果（第二次高調波（SHG）、第3次高調波（THG）、コヒーレントラマン散乱、2光子蛍光、3光子蛍光）により発生する光をカラーフィルタで選別して複数の光検出器で計測できるようにした。開発した顕微鏡で種々の加工試料を計測した結果、SHGおよびTHG信号による3次元画像により、微小なクラックなどの試料内部の状態の定量が可能であることが分かった（図Ⅲ2-4-1-1-16）。



図Ⅲ2-4-1-1-16 ZnO 基板の加工痕近傍の3次元SHG画像。左上：加工痕の明視野像。左下：加工痕の3次元SHG画像。右：加工痕の深さ分解SHG画像。

(c) レーザー加工プラットフォームの整備と運営、レーザー加工データベースの構築

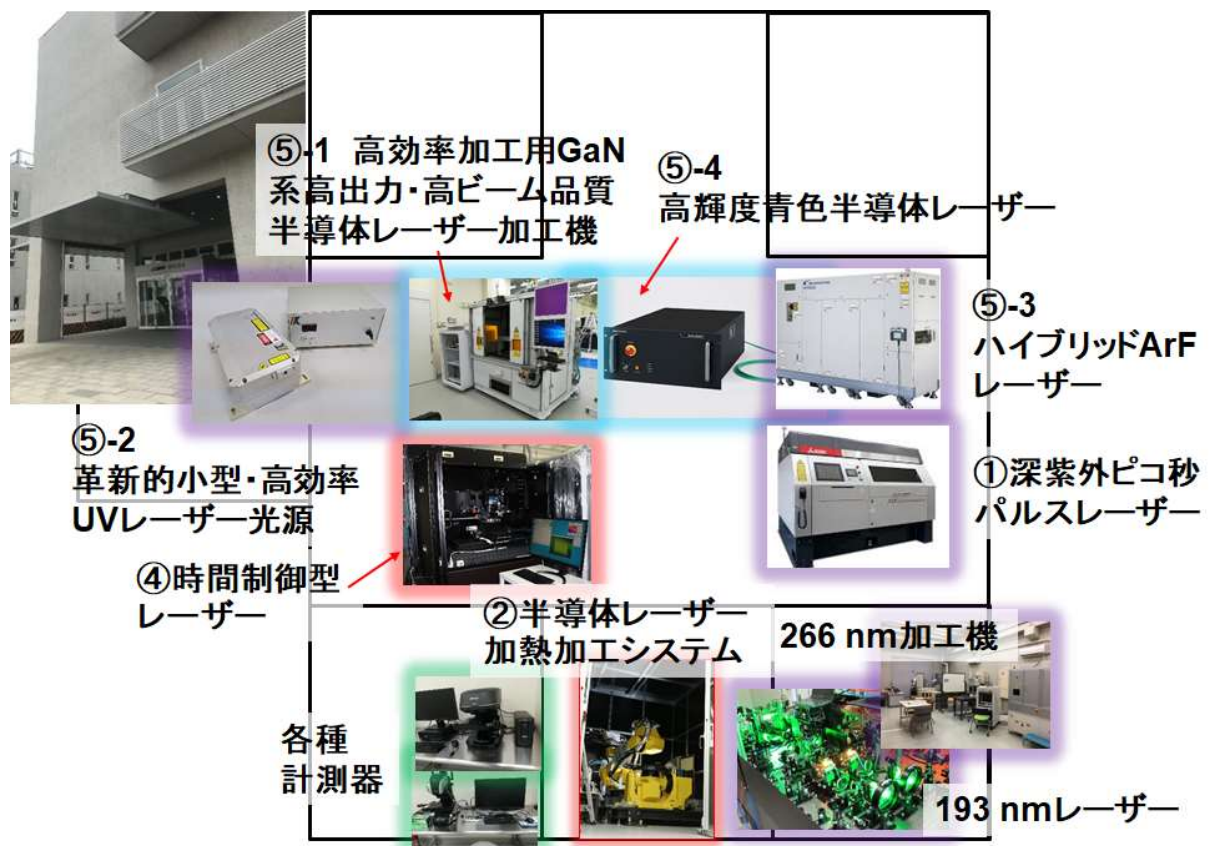
(i) レーザー加工プラットフォームの整備と運営

（担当：東京大学、産業技術総合研究所）

プラットフォーム整備においては、ユーザー企業のニーズを装置開発へフィードバックするために、プロジェクト開発品の試作ができることを設計方針としてレーザー加工プラットフォームのあり方を検討した。開発効率とユーザーの利便性の両立を実現するため、集中研方式を採用し、つくば（産業総合技術研究所）・柏（東京大学）・本郷（東京大学）・吹田（大阪大学）の4サイトと小山（ギガフォトン）・浜松（浜松ホトニクス）・尼崎（三菱電機）の3サテライトを設定した。これらのサイト・サテライト間で連携を図りながら、全体をレーザー加工プラット

フォームとしてユーザーに供し、ユーザーからのフィードバックを受けることを目指した。また、本プロジェクトの研究開発成果物を活用し、オープンイノベーション拠点等（産総研・東大先端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ等）との連携も実施した。

東京大学柏 II サイトにある 2019 年 11 月竣工の産業総合技術研究所柏センターに設置した柏 II プラットフォームにプロジェクト開発装置を集約することで、プラットフォーム全体の中心的役割を担うこととした。当初計画として、時間制御型レーザー（研究開発項目④—（1））、20 W ピコ秒深紫外レーザー加工機（研究開発項目①）、ハイブリッド ArF エキシマレーザー加工機（研究開発項目⑤—（3））を先行導入した。さらに、半導体加熱加工装置（研究開発項目②）や、高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザー加工機（研究開発項目⑤—（1））、高輝度青色半導体レーザー加工機（研究開発項目⑤—（4））、革新的・高効率 UV レーザー光源（波長 320nm）（研究開発項目⑤—（2））を整備し、当初計画を超え本プロジェクトでの開発装置 7 台を含む 9 台の加工機・光源を集約した。この集約により、短波長・短パルスレーザーの強みが活かせる高品位・高精細な微細加工から表面改質、溶接まで本プロジェクトで研究開発対象とした加工分野をほぼ網羅した一大拠点を整備した（図Ⅲ2-4-1-1-17）。



図Ⅲ2-4-1-1-17 産総研柏センター前景と柏 II プラットフォームのレーザー加工機・計測器

サイト・サテライトの整備と開発装置の集約といったハード面の準備に続き、2018 年 6 月ごろからレーザー加工プラットフォームの利用制度というソフト面の整備も開始した。利用制度の設計にあたっては開発効率と利便性の両立を重視した。そこで、ワンストップでユーザーとプロ

プロジェクト実施者・開発装置を結びつけ、プラットフォーム利用サービスを提供できる利用制度を目指し、制度設計を進めた。他のプロジェクト実施者との協議を繰り返し、プラットフォーム利用制度が完成し、2018年12月よりユーザーによる試験利用を開始し、現時点までに20件を超えるユーザー利用を実施した。

プロジェクト終了後も、TACMI コンソーシアム (<http://www.utripl.u-tokyo.ac.jp/tacmi/>) が受け皿となり、柏 II プラットフォームを中心に開発装置のユーザー利用を実施する予定である。

(iv) レーザー加工データベースの構築

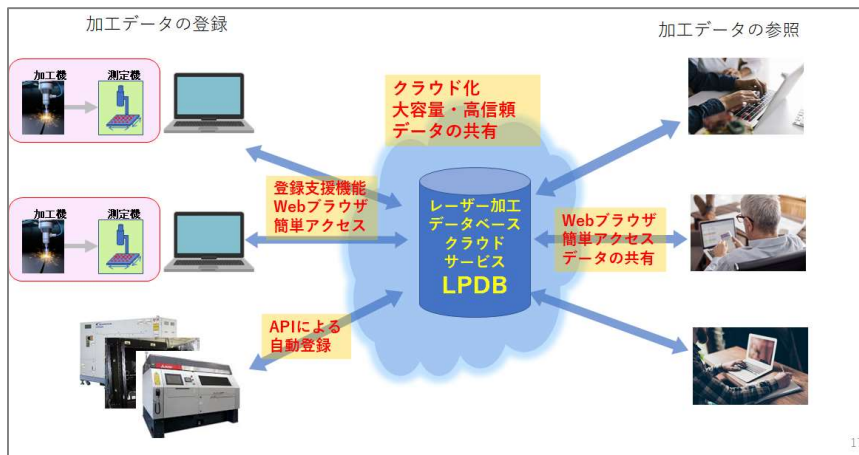
(担当：産業技術総合研究所、東京大学)

レーザー加工の結果を加工パラメータと対応付けてビジュアルに提供できるレーザー加工データベースを開発し、運用を開始した。

(1) レーザー加工データベースの開発にあたっては、ユーザーからのニーズに基づき、データベースの要求条件を抽出し、次のような機能の実現を目指した。

- ① レーザーを用いた加工の実現性を事前に判断したいというニーズに対して、大量に蓄積された加工データを基に、所望の加工の実現性を提示できる
- ② 技術開発に必要な試行錯誤の時間を短縮したいというニーズに対して、加工時間短縮を可能とするパラメータを提示できる
- ③ 加工実施前に最適パラメータを推定したいというニーズに対して、登録したデータ（加工結果・物性値・計算値等）によって実現されるシミュレーターやAIを活用し、加工品質、形状、加工時間等を予測できる

これらの条件を目指すデータベースとして、加工パラメータと加工結果の対応をビジュアルに表示できるユーザーインターフェース、クラウド型で容易に利用できるサービス、大量のデータを蓄積・提供できるプログラムインターフェースを実現した。(図Ⅲ2-4-1-1-18 参照)



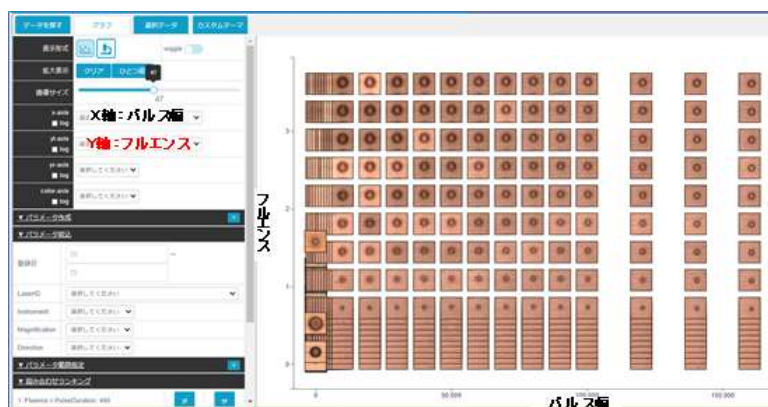
図Ⅲ2-4-1-1-18 データベースの特徴

(2) ビジュアルな表示の実現

データベースに登録した加工結果を加工パラメータや測定値を軸にグラフィカルに表示する事が出来る。

- ・ 多量のデータを任意のパラメータ空間に観測画像と共に表示

- 直感的な理解が容易
- 全体の傾向を把握し易いパラメータを表示軸として推薦する機能を提供
具体的なグラフ表示例を図Ⅲ2-4-1-1-19、図Ⅲ2-4-1-1-20 に示す。



図Ⅲ2-4-1-1-19 フルエンスとパルス幅を変化させた大量の加工結果を蓄積しビジュアルに表示



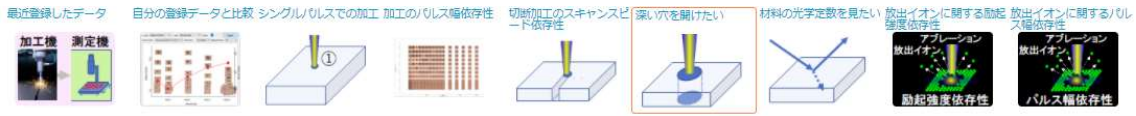
図Ⅲ2-4-1-1-20 フルエンスとパルス幅を変化させた大量の加工結果を蓄積しビジュアルに表示

(3) 必要なデータを簡単に表示できる

データベース利用者の引き出したい情報・実施したい加工などのニーズをグラフの「テーマ」として選択しデータ検索できるようにすることで、約1万件の登録加工データ（2021年3月現在）と多種のレーザー加工パラメータから少ないクリック数で利用者が必要とする加工結果等を抽出して、グラフとして表示する機能を提供している。図Ⅲ2-4-1-1-21 に操作例、図Ⅲ2-4-1-1-22 に現在実装されている「テーマ」の例を示す。



図Ⅲ2-4-1-1-21 テーマ選択からグラフ表示



図Ⅲ2-4-1-1-22 実装している「テーマ」

(6) 実用化・事業化への取り組み

上記のように、時間制御型レーザー加工テスト装置および波長制御型レーザー加工テスト装置ともに開発を完了し、これらの装置や他項目の開発装置を供するレーザー加工プラットフォームを構築した。TACMIを通じプロジェクト実施者以外の一般ユーザーへの供用をすでに開始し、無償・有償を含む利用実績がある。プロジェクト終了後もレーザー加工プラットフォーム・レーザー加工データベースの運営はTACMIが継承する。ユーザーによる利用を積み重ねることで、装置開発者へのニーズのフィードバック、加工データの蓄積による機械学習の援用等による最適条件探索の効率化を目指す。一部の材料・加工ではすでに実現している加工・計測・加工データ活用のループによる最適加工条件探索支援を様々な材料・加工へ展開を図り最適加工条件の提供へ発展させ自立・持続可能なレーザー加工プラットフォーム・レーザー加工データベースの構築を実現する。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-4-1-2. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）

本項目は、2018年度まで、研究開発項目④-1-2「レーザー加工プラットフォームの構築」／「極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の成果の詳細は、2-5-3. 「極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）にまとめて記載する。

2-4-1-3. 「レーザー加工プラットフォームの構築／「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社)

本項目は、2018年度まで、研究開発項目④-1-3「レーザー加工プラットフォームの構築／「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社)として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の成果の詳細は、2-5-4. 「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社)にまとめて記載する。

2-4-2. 「レーザー加工の計測評価基盤技術の開発」

(実施先：東京大学、産業技術総合研究所一再委託先 早稲田大学)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

レーザー加工の計測評価基盤技術の開発については、レーザー加工の学理解明や加工条件の最適化を探索する上で必要不可欠である、レーザー切断・穴あけ加工、レーザーピーニング部位等のレーザー加工計測評価技術を開発する。加工において制御すべきパラメータの種類は、パワー・波長・パルス幅・繰り返し周期と膨大である。そこで、光と物質の相互作用や反応過程の計測診断技術、加工中及び加工後の各種材料の特性変化を調べるための先端計測技術を構築する。これにより最適な加工条件を、研究開発項目①、②のレーザー開発、及び研究開発テーマ④-1の加工プラットフォームにフィードバックする。この時、加工パラメータだけでなく、加工手法も多様であるので、各々の加工手法に対応できる多種多様な計測評価技術を開発する。④-1をはじめとする他のテーマ・サブテーマと有機的に連携し、また、現有設備の活用や、関連する拠点やプロジェクトなども密に連携することにより効率的に実施する。

(a) 計測評価基盤技術、および、(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築、のサブテーマで取り組んでいる。

(a) 計測評価基盤技術では、レーザー加工の初期過程で物質がどのように応答しているのかについて、レーザー加工の際に生ずるイオン計測の手段を用いて探る。物質が切断や接合をするときには原子核が動くわけであるが、物質から放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することにより重要な知見が得られるはずである。また、10fs級の超短パルスを用いることにより非常に短い時間領域を探ることができればシミュレーションとの対応がつくことが期待される。これはエネルギー散逸の起きない時間領域だからである。これは、エネルギーの拡散の影響を排除してエネルギーを受け取る部分のみを議論できることに結び付く。時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーションでは、数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域の連続的な解析や、高強度レーザーパルスによって与えられた高密度エネルギー散逸過程の原子レベルでの追跡が可能で、非熱的レーザーアブレーション加工への指針が期待できる。また、極短光パルス照射下の固体表面からの、放出イオンの運動量エネルギーおよび放出角度分布の測定技術は、レーザー加工過程の新しい計測手法や解析の実験的検証への応用が期待できる。学理と加工シミュレーション、それらと連動したフラグメントイオン分析などの計測技術の統合によって、実加工に資する基盤技術を開発する。

(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築では、レーザー加工条件の最適化やレーザー加工の学理・メカニズム解明のために必要な情報である各種レーザー加工材料の光物性評価(吸光係数・屈折率等)を実施し、それら測定結果のデータベース化を行う。またその評価のための測定装置の開発と整備を必要に応じて行う。物質と光との吸光係数等をまとめたデータベースとして、ACADEMIC PRESS社のハンドブック「Optical constants of Solids」が有名である。しかしCFRPのような近年重要視されるようになった高分子材料や多岐にわたるガラス材料などは掲載されていないという問題点がある。

(2) 研究開発目標と根拠

研究開発目標と根拠を下表に示す。

表Ⅲ2-4-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
2-4-2(全体目標) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発	(i) 加工結果の評価と加工レシピの設計に資する物性評価・計測技術の提示。 (ii) 深紫外領域等の物性データベース構築。 (iii) 物性評価技術、物性データベース、計測技術の連携により加工結果と予測し、必要な加工レシピを提示する新しい設計手法の体系化にむけた課題の提言。	下段に記載	・加工状態の分析、加工の計測評価手法等の提案。 ・加工状態を表す物理パラメータの定義に関する指針を提示。	下段に記載
2-4-2-(a) 計測評価基盤技術	(i) 熱影響の少ない高精度なレーザー加工への指針を得る。 (ii) 高精度、高効率レーザー加工条件のシミュレーションによる検証。	(i) 高精度レーザー加工において、熱影響の低減は必須。 (ii) 熱的に平衡状態に達しない短時間の運動の記述、摂動論では扱えない高強度の光励起状態の記述に優れている。	(i) フラグメントイオン計測装置の完成。熱的/非熱的加工の判定法の確立。 (ii) 熱的・非熱的格子ダイナミクスのシミュレーションによる検証。	(i/ii) 熱影響を調査するために必要。
2-4-2-(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築	真空紫外～赤外領域における光物性データベースをニーズの高い材料を中心に構築し、公開する。	実用性の高いものとするため、ニーズ調査結果を基に構築する必要がある。	光物性計測用の真空紫外エリプソメトリ装置を開発し、併せて光物性データベースの構築に着手する。	真空紫外域での計測装置は限られているためこの波長領域での装置開発をまず行う必要がある。

(a) 計測評価基盤技術

ナノ秒パルスによるレーザーアブレーションの場合、レーザーが照射されるとまず電子が励起されエネルギーを吸収し、そのエネルギーが格子振動に移り高温のプラズマが発生して固体表面から粒子が放出される。レーザーの持続時間内で熱が周囲に伝わり、レーザービームの外側でも

溶融が起こるため、加工痕は熱による影響を受ける。高温のレーザープラズマから粒子が放出されるため、粒子放出の運動エネルギー分布は熱統計的分布することが知られている。

ピコ秒パルスによるレーザーアブレーションの場合、レーザーからもらった電子のエネルギーが格子振動へ緩和する時間が数ピコ秒であるため、レーザーの持続時間内に高温のプラズマが発生して、粒子放出が起こると考えられる。数ピコ秒の時間領域でレーザービームの外側に熱が伝わる前に粒子放出が起こるため、加工痕が熱による影響が少ないと言われており、高精度な加工が可能となる。ピコ秒の場合でも、高温のプラズマから粒子が放出されるため、粒子放出の運動エネルギーは熱統計的分布すると考えられる。

さらにフェムト秒パルスによるレーザーアブレーションの場合、電子励起やクーロン爆発によって、電子系のエネルギーが格子振動のエネルギーに転換されずに、並進運動に転換される粒子の現れ始めると指摘されており、非熱的なレーザーアブレーションとなる。加工痕は熱影響を受けなければならず、熱エネルギーとしてエネルギーが散逸しないため、高効率な加工の可能性が期待される。

レーザーアブレーションのすべて非熱的レーザーアブレーションに代わることはなく、一部が非熱的なレーザーアブレーションとなって現れはじめるというのが現実的だと考えられるが、熱的レーザーアブレーションと非熱的なレーザーアブレーションの境界は、材料やレーザー照射条件によって異なるため不明確であり、実験的にも整理されていないのが現状である。

そこで、本サブテーマにおいて、開発目標は以下のように定めた。

(i) 数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域において、高強度レーザーパルスによって与えられた高密度エネルギー散逸過程を原子レベルで追跡することのできる計測技術を開発する。レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することのできるフラグメントイオン計測装置を整備する。この計測装置の特徴は、フラグメントイオンの運動状態は、光吸収分光や加工痕の画像観測などでは得られない、フェムト秒領域における熱的/非熱的イオン放出に関する直接的情報を含んでいるところである。またイオンカウンティングのため原子レベルでの情報を得ることができる。放出イオンの運動エネルギー分布のレーザーパラメータ依存性（レーザーパワー依存性、レーザーフルエンス依存性、レーザーパルス幅依存性 など）を測定する。得られた実験データから、非熱的なアブレーションが現れるのはどの時間領域なのか、熱的アブレーションと非熱的アブレーションが共存する場合、その割合を実験的に明らかにする。フラグメントイオン計測装置と 10 フェムト秒クラスの位相制御レーザー光源を組み合わせることによって、より直接的な熱的/非熱的レーザーアブレーションに関する独自性の高い判定法になるため、上記の目標設定とした。

(ii) 時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーションを行い実験結果との比較を行う。この手法を採用した根拠は、電子励起に伴う電子と原子核の運動を近似的に取り扱うことができることが特徴であり、熱的に平衡状態に達しない短時間の運動の記述、摂動論では扱えない高強度の光励起状態の記述に優れているところである。数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域の連続的な解析結果から、固体表面からの粒子放出のメカニズムを明らかにし、熱影響の少ない高精度、高効率なレーザー加工への指針を得る。

(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築

レーザー加工の産業応用を促進するためには、レーザー加工に対する産業ニーズが高い試料に対する光物性評価、さらには評価結果等を基にした加工条件の最適化が重要である。本サブテーマでは、4-3等とも連携して、レーザー加工に対する産業ニーズが高い試料を中心に光物性評価を行うことで、実用性の高いデータベースを構築する。また深紫外光照射や高強度レーザーによる多光子励起による加工の最適化を検討する際に重要である紫外から真空紫外といった短波長領域においても光物性データベースを構築する必要がある。特に真空紫外域では測定装置は一般的ではないことから、この波長領域においても光物性評価が可能な装置として、真空紫外エリプソメトリ装置の開発も併せて行う。

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを下表に示す。

表Ⅲ2-4-2-2 「レーザー加工の計測評価基盤技術の開発」開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
2-4-2 (a) 計測評価基盤技術						
(i) フラグメントイオン計測	基本性能の確認		非熱的レーザーアブレーション加工の検証	評価装置（及び技術）の他レーザー加工機への適応		熱影響の少ない高精度なレーザー加工への指針を得る。
(ii) 時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーション	熱的・非熱的格子ダイナミクスシミュレーションによる検証		材料に依存したレーザー照射後の構造変化のシミュレーションによる検証	高効率材料可変条件のシミュレーションによる検証		高精度、高効率レーザー加工条件のシミュレーションによる検証。
2-4-2 (b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築	真空紫外エリプソメトリ装置開発		光物性データベースの構築			<ul style="list-style-type: none"> 最短波長域130nm程度まで測定可能な装置を開発 ニーズの高い材料を中心に構築し、公開する

(4) 研究開発目標と達成状況

(a)計測評価基盤技術に関しては、レーザーアブレーションによって固体表面から放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測できるフラグメントイオン計測装置を開発し、金属をはじめとする固体材料を対象として、強度等の照射レーザー条件を変化させた放出イオンの運動エネルギー分布スペクトルの計測とデータベース化を行った。また第一原理シミュレーションに関して、レーザーパルス幅等を変えた照射シミュレーションを行い、例えば α クォーツ結晶ではパルス幅 50 fs 以下で非熱的な格子運動が起きることが示唆された。(b)レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築に関しては、ガラス等様々な被レーザー加工材料の可視～真空紫外領域における屈折率・消衰係数スペクトル等の計測・データベース化を行うとともに、そのための計測装置として最短波長 130 nm まで測定可能な真空紫外エリプソメトリ装置の開発等を行った。これら成果を統合・比較して、加工結果の予測等における課題として、レーザー照射条件の忠実に再現するモデルの構築や、レーザー照射中などの光学特性計測が必要であることを明らかにした。このように最終目標を達成した。これらの詳細は(5)に記した。

研究開発目標とその達成状況に関して、下記の表Ⅲ2-4-2-3にまとめる。

表Ⅲ2-4-2-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
2-4-2(全体目標) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発	(i) 加工結果の評価と加工レシピの設計に資する物性評価・計測技術の提示。 (ii) 深紫外領域等の物性データベース構築。 (iii) 物性評価技術、物性データベース、計測技術の連携により加工結果と予測し、必要な加工レシピを提示する新しい設計手法の体系化にむけた課題の提言。	(i) 下段 2-4-2-(a)に記載。 (ii) 下段 2-4-2-(b)に記載。 (iii) 開発した物性評価技術とレーザー加工シミュレーションとの連携による比較より、加工結果の予測や加工レシピの提示における課題として、レーザー照射条件の忠実に再現するモデル（レーザー偏光条件、表面モデル、大気等の周辺環境など）の構築や、レーザー照射中などの光学特性計測が必要であることを明らかにした。	◎	なし
2-4-2-(a) 計測評価基盤技術	(i) 熱影響の少ない高精度なレーザー加工への指針を得る。 (ii) 高精度、高効率レーザー加工条件のシミュレーションによる検証。	(i) 典型的な金属、半導体、絶縁体、セラミックスなど 19 種類の固体材料を対象として、レーザー強度、パルス幅、波長を変化させた約 750 条件で測定を行い、データベース化した。 (ii) パルス幅 50fs を境に熱的・非熱的プロセスの境界が存在しより狭いパルス幅では非熱的現象が起きることを α クォーツの薄膜モデルで検証した	◎	なし
2-4-2-(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築	真空紫外～赤外領域における光物性データベースをニーズの高い材料を中心に構築し、公開する。	セラミックス、金属、ガラス、樹脂等の被レーザー加工材料の、可視～真空紫外領域における屈折率・消衰係数スペクトル、赤外～真空紫外領域における透過吸収係数スペクトルといった光物性を計測し、公開用にデータベース化した。またそのため計測装置として真空紫外エリブソメトリ装置などの開発や整備を行った。	◎	なし

(5) 成果の詳細

(a) 計測評価基盤技術

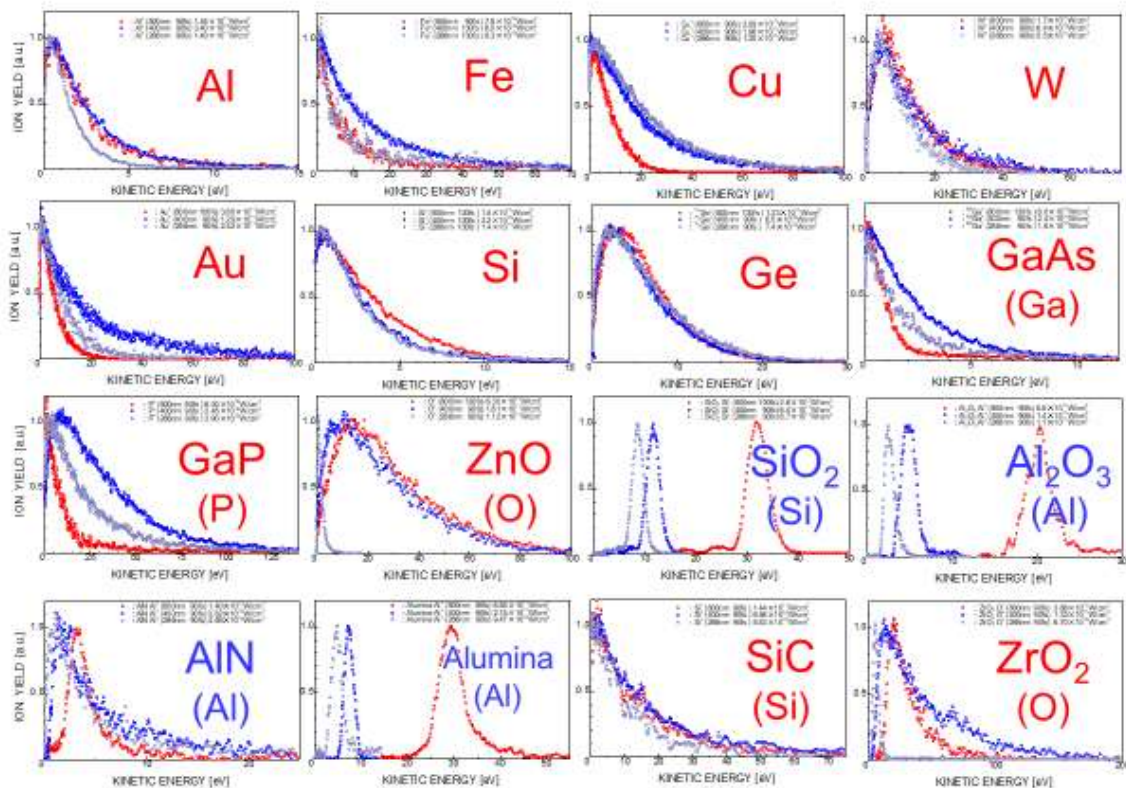
(担当：東京大学、産業技術総合研究所、産総研再委託：早稲田大学)

東大、産総研及び早大は、レーザー加工プラットフォームと連携し、加工テストにおける加工結果と加工対象の計測評価及びデータのアーカイブ化を行った。

特に、レーザー加工部位の特性を計測するフラグメントイオン計測では、典型的な金属、半導体、絶縁体、などの固体材料を対象として、レーザー照射条件を変化させて計測データを取得し、④-1-(6)と協力してデータベース化した。

レーザーアブレーションは、固体表面への高強度レーザーパルス照射で作出された高密度エネルギーによって固体を構成する原子分子が蒸散する現象であり、様々なレーザー加工に共通の初期過程に位置付けられる。高密度エネルギーが高温状態を作り出し粒子が放出される熱過程と、熱に変換されずに直接粒子の結合を切り、粒子の運動エネルギーに変換されて放出される非熱過程とに分類される。非熱的なレーザーアブレーションのメカニズムは、熱影響のない高効率、高精度な次世代レーザー加工技術につながるために特に重要であるが、様々な固体材料について、どのようなレーザー照射条件で熱的、非熱的レーザーアブレーションが生じるのかの統一的、系統的な調査は不十分であった。レーザーアブレーション閾値のレーザーパラメータ依存性や、レーザーアブレーションによって生ずる固体表面からの放出粒子の形態や運動状態を計測すれば、レーザーアブレーションのメカニズムに関する情報を得ることができる。そこで、高強度レーザーパルスによって与えられた高密度エネルギー散逸過程を原子レベルで追跡することのできるフラグメントイオン計測技術の開発を行った。計測装置の基本構造は、固体表面から放出されたフラグメントイオンの運動エネルギーを、その飛行時間から求めることが可能な飛行時間型質量分析装置とした。様々な固体材料に対応できるように試料交換が迅速かつ容易に行うことができ、また移動が不可なレーザー光源にも対応できるように可搬型の計測装置を作製した。

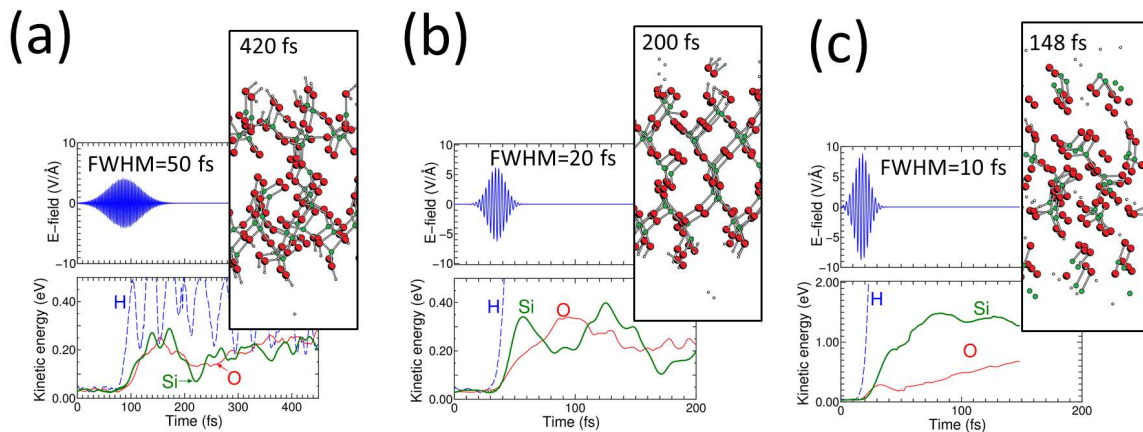
作製したフラグメントイオン計測装置によって、典型的な金属、半導体、絶縁体、セラミックなど 19 種類の固体材料を対象として、レーザー強度、パルス幅、波長を変化させた約 750 条件で測定を行った。図Ⅲ2-4-2-1 は約 100 フェムト秒の時間幅のレーザーパルスによって生じた様々な固体材料からのフラグメントイオンの運動エネルギーのレーザー波長依存性（波長 800nm、400nm、266nm の 3 種類）である。全体的な傾向として、金属、半導体では運動エネルギーが大きくなるにしたがって、イオン収量が減少していく連続的な運動エネルギー分布を示し、熱的なフラグメントイオン放出過程が示唆される。一方、石英やサファイアに代表されるワイドギャップ誘電体では、連続的な分布ではなく特定のエネルギーに集中した運動エネルギースペクトルを示し、非熱的なフラグメントイオン放出であることが分かった。さらに、レーザー強度、パルス幅（100 フェムト秒から 1 ピコ秒）を系統的に変えて測定を行い、約 750 条件の運動エネルギースペクトルをデータベース化した。



図Ⅲ2-4-2-1 フラグメントイオンの運動エネルギーのレーザー波長依存性。
照射光波長 800nm(赤)、400nm(青)、266nm(青灰)

また、第一原理計算によって、金属・絶縁体を対象に、レーザーパルス幅・強度を変えた照射シミュレーションを行った。計算は時間依存密度汎関数理論に基づく電子・格子ダイナミクスの計算方法である。絶縁体においては α クォーツ結晶を模擬し、レーザー照射後の体積変化を見るべく厚さ 1 nm の薄膜モデルを仮定し、基本波長 800 nm、フルエンス一定のままパルス幅を 100 fs から 10 fs まで圧縮させ、レーザー照射によって誘起されるイオン運動を解析した。レーザーパルス幅 50 fs 以下の条件では α クォーツを構成する元素ごとに異なる運動エネルギー分配が起き非熱的な格子運動を引き起こすが、50 fs 以上のパルス幅では元素によらずイオンの運動エネルギーは等分配され熱的な格子運動を引き起こすことが見出された。図Ⅲ2-4-2-2 は、パルス幅

50 fs、20 fs、10 fs とだんだん短くした場合、 α クォーツ薄膜に誘起されるイオンの運動エネルギーの時間変化とシミュレーション中の格子構造を示す。



図Ⅱ-4-2-2 α クォーツ薄膜に誘起されるイオンの運動エネルギーの時間変化と格子構造のシミュレーション結果。(a) レーザーパルス幅 50 fs、(b) 20 fs、(c) 10 fs。

金属におけるシミュレーションでも厚さ 1nm のスラブモデルを採用した。アルミニウムにおいてはレーザー光による電子プラズモン誘起にともない格子運動速度にプラズモン周波数による変調がかかっていることを見出した。一方銅においては基本波長 800 nm、パルス幅 50 fs の照射条件でアブレーション閾値がおよそ 0.1 J/cm^2 と実験的に報告されている値に近いオーダーの閾値を示せたものの、放出されるイオン運動エネルギーがフラグメントイオン化で計測された運動エネルギーに達しないことや、金属加工で有効と思える電子温度モデルを再現しない問題点を残した。本プロジェクトで行ったこれらのシミュレーションでは、完全な結晶構造の仮定ではなくモデル構造をより実際の試料の条件に近づけることや計算手法の改善の必要性を見出した。

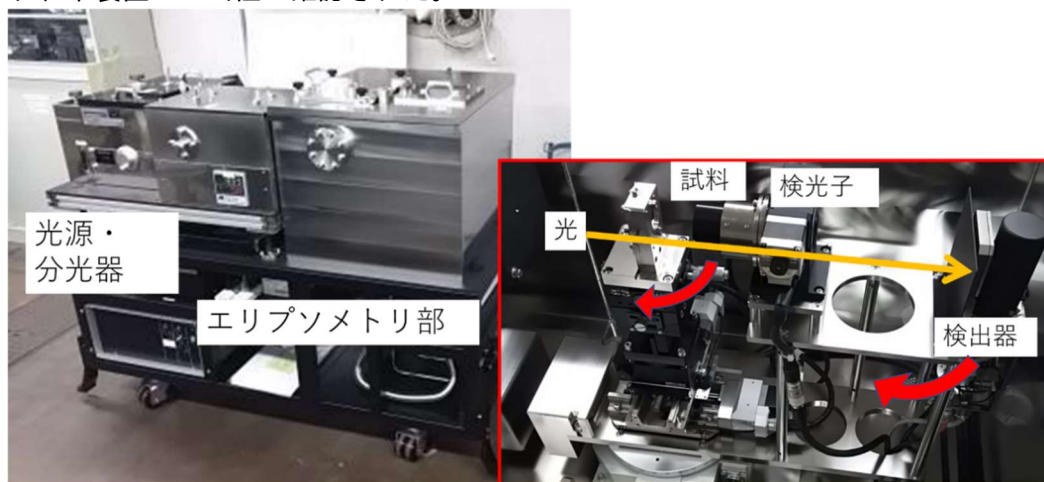
以上のように、第 1 原理計算はミクロな物性と電子やイオンの放出やアブレーション加工とを直接的に繋ぎうるものであって、加工プロセスや計測データの予測や理解に多くの示唆を与える方法と言えるが、実際的な材料加工と比較するには、現状の計算パワーでは、いまだ多くの限界がある。多量のシミュレーション実行が可能となる将来には、多様なレーザー照射条件におけるシミュレーション結果と、加工実験データとのズレを系統的に蓄積することで、レーザー加工の予測にさらに貢献できると考えており、本開発でその可能性は示せたと考えている。

(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築

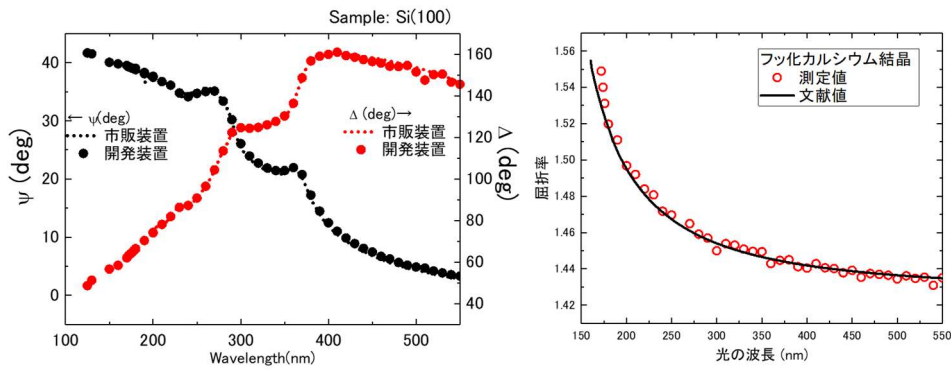
(担当：産業技術総合研究所、産総研再委託：早稲田大学)

消衰係数や透過吸収係数等の光学特性スペクトルは、材料と光との相互作用の強さを表すものであり、レーザー加工に有効な光の波長の検討等に有用である。多くの工業用材料におけるこれら光学特性スペクトルを測定・収集・データベース化し、共通の知見とすることで、各ユーザーにおける測定の負担を軽減するとともに、レーザー加工前におけるレーザー条件の推定にも有用と考えられる。本サブテーマでは、まず屈折率・消衰係数スペクトルの計測手法の一つであるエリプソメトリ装置として、可視～真空紫外領域における計測が可能なものを構築した。他の分光装置とも併せて、可視～真空紫外域の屈折率・消衰係数スペクトル、赤外～真空紫外域の透過吸収係数・透過率スペクトルを様々な工業材料等において計測し、レーザー加工プラットフォームと連携する形で、これら計測スペクトルのデータベース化を行った。

図Ⅲ2-4-2-3に構築した可視～真空紫外領域におけるエリプソメトリ装置の写真（外観と試料部の内部）を示す。本装置は光源として、重水素ランプ、キセノンランプ、He-Ne レーザーを選択して利用でき、分光器や偏光子等の光学素子等により、最短波長 130nm の真空紫外域までの計測が可能である。反射角 45° 以上の試料反射光ならびに試料透過光を検出することができる。図Ⅲ2-4-2-4(左)に、Si (100) 試料の振幅比 Ψ と位相差 Δ スペクトルの開発装置と市販装置（可視紫外測定用）での結果を示す。市販装置と波長 200nm 付近まで良い一致を示すとともに、本装置では波長 130nm 付近までの計測が可能であることがわかった。また図Ⅲ2-4-2-4 (右)に、フッ化カルシウム結晶の屈折率スペクトルの結果を示す。真空紫外域においても既報の値と良い一致が得られ、本装置の正当性が確認された。



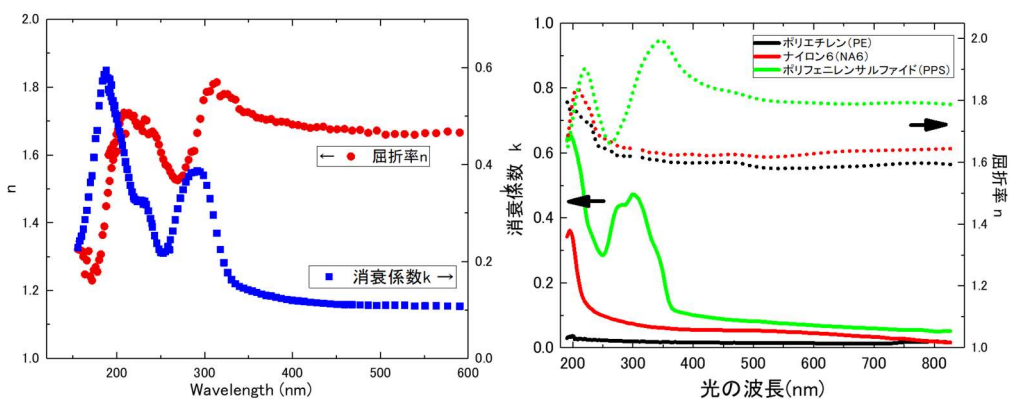
図Ⅲ2-4-2-3 構築した可視～真空紫外エリプソメトリ装置の写真(左:外観、右:試料部の内部)



図Ⅲ2-4-2-4 左: Si(100)の振幅比 Ψ (黒)と位相差 Δ (赤)スペクトル。●は開発装置、点線は市販装置での結果を示す。右: フッ化カルシウム結晶の屈折率スペクトルの結果。

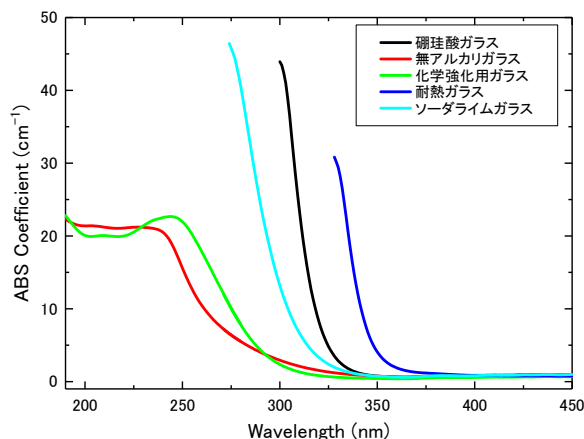
本装置や既存の装置等を駆使して、特にレーザー加工にニーズのある工業材料やすでにレーザー加工データベースに登録のある材料を中心に 50 種類以上の材料の各種光学スペクトル計測を行った。

図Ⅲ2-4-2-5 に、各種樹脂材料における測定結果の一例として、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリエチレン (PE)、ナイロン 6 (NA6)、ポリフェニレンサルファイド (PPS) 樹脂の屈折率と消衰係数スペクトルを示す。これらは CFRP にも使われているエンジニアリングプラスチックである。このように樹脂によって大きくスペクトルが異なることが見て取れる。PE は波長 200nm までに明確な消衰係数のピークを示さない。これは PE が C-C、C-H の一重結合のみで構成されており、可視紫外域に吸収を示す二重結合等を持たないためである。NA6 では波長 200nm 付近に C=O の二重結合由来と考えられるピークが、PPS や PEEK にはベンゼン環由来と考えられるピークが波長 300nm 付近に観察された。また PEEK に関しては、レーザー照射後の試料の測定も行った。



図Ⅲ2-4-2-5 各種樹脂材料の光学特性スペクトルの例、左: ポリエーテルエーテルケトンの屈折率(赤)と消衰係数(青)スペクトル、右: ポリエチレン(黒)、ナイロン 6(赤)、ポリフェニレンサルファイド(緑)の屈折率(点線)と消衰係数(実線)スペクトル

図Ⅲ2-4-2-6 に、無アルカリガラスなどの工業ガラスの光学特性スペクトルとして、可視紫外域の透過吸収係数スペクトルの一例を示す。このように透明なガラスでも、その吸収端の波長は大きく異なることがわかる。ガラス材料に関しては、石英ガラスの不純物（SiOH）量によって、真空紫外域の吸収スペクトルが変化することなども明らかにした。



図Ⅲ2-4-2-6 各種工業ガラスの透過吸収係数スペクトルの例

上記で示した以外にも、セラミクス、金属、ガラス、樹脂等の様々な材料の光学特性スペクトルの屈折率・消衰係数・透過吸収係数・透過率スペクトル測定を行い、データベース化を行った。他にもポリ乳酸樹脂等に関しては、光学特性スペクトルの計測だけでなく、時間依存密度汎関数法等による透過吸収スペクトルの理論計算を行い、得られたピークの帰属等を行うとともに、何量体までの計算で実験結果を再現できるかなどを明らかにした。

(6) 実用化・事業化への取り組み

上述のようにレーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することのできるフラグメントイオン計測装置や真空紫外エリプソメトリ装置の開発などに成功し、これら装置等を用いてフラグメントイオンや各種光物性スペクトルの様々な材料に関するデータベース化を行い、実用化のためにレーザー加工データベース (LPDB) へ搭載した。フラグメントイオンに関しては、典型的な金属、半導体、絶縁体、セラミックスなど 19 種類の固体材料に対して、レーザー強度、パルス幅、波長を変化させた約 750 条件での測定結果を蓄積した。光物性スペクトルに関しては、セラミクス、金属、ガラス、樹脂等の被レーザー加工材料の、可視～真空紫外領域における屈折率・消衰係数スペクトル、赤外～真空紫外領域における透過吸収係数スペクトルといった光物性スペクトルを計測した。測定材料の選定に関して、項目 4-3 のニーズ調査の結果を活用した。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-4-3. 「レーザー加工技術の標準化・調査研究」（実施先：産業技術総合研究所、東京大学）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

本開発においては、国内の知を産業に持っていくまでの障壁をいかに乗り越え解決する新しい仕組みが構築されることが求められており、常にモノ作り産業のニーズを把握し、市場動向の調査研究を進めながら行う必要がある。

ここで、加工特性を系統的に評価するにあたっては、評価結果どうしを正しく比較できるよう、試料の形状・純度・前処理・加工環境等に関する基準サンプルや標準作業も重要な課題である。これらの在り方について検討し、日本が主導して標準化を進めるとともに、戦略的にこれを活用する枠組みを構築する。また、ものづくり産業（材料、部品、自動車や航空機など）の企業や加工技術を横断的に見渡せる有識者等へのヒアリング、内外の技術動向や政策・標準化・安全性に関する調査研究など、本研究開発の方向性検討に必要な活動を積極的に進めると同時に、研究開発計画へ適宜反映させることにより、高輝度・高効率次世代レーザー技術開発の効果的な推進に繋げる。産学官が連携したこれらの活動を通じて、次世代技術開発・産業界への技術成果移転・人材育成に努める。

本項目の、「レーザー加工技術の標準化・調査研究」については、次世代レーザー加工における顕在・潜在ニーズ探索及び標準化に関する具体的な調査を行う。

（２）研究開発目標と根拠

本調査では、次世代レーザー加工の顕在ニーズだけでなく、今後成長が期待されるレーザー加工応用分野や、各種業界の潜在的なニーズ、レーザー加工を含めた加工システムの市場動向、既存のデータベースや業界標準等を踏まえ、次世代レーザー加工プラットフォームで取り扱うべき材料や加工方法を、データベース化の優先順位を含め選定するとともに、真に必要な加工基準サンプルや加工標準の策定を目指している。

表Ⅲ2-4-3-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
4-3 レーザー加工技術の標準化・調査研究	加工ニーズデータベースを整備し、産業に必要なプロセスモニタリング技術に関する指針を取り纏める。	ニーズに応じた加工のその場観察を低コストで行うことにより、サイバーフィジカルシステムに適合した加工エコシステムが構築可能となる。	i) 基準サンプルや標準作業に関する指針の提示 ii) 技術ロードマップの策定。	複雑な加工プロセスにおいて、ニーズに基づく基準を抽出することが重要。

加工データベースと連動した、加工ニーズデータベースを構築することで、データベースの価値を高め、幅広い運用を目指している。

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを下表に示す。

表Ⅲ2-4-3-2 「レーザー加工技術の標準化・調査研究」開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
4-3 レーザー加工技術の標準化・調査研究		ロードマップ策定 標準作業の指針		レーザー加工技術戦略 モニタリング技術の指針		加工ニーズデータベースを整備し、産業に必要なプロセスモニタリング技術に関する指針を取り纏める

(4) 研究開発目標と達成状況

レーザー加工プラットフォームで統一的に扱うべき材料や加工法について、および加工装置における基準サンプルや加工標準のニーズについてユーザー調査を実施した。また、レーザー加工技術ロードマップの原案を策定するとともに次世代加工機への搭載により生産性向上が期待されるプロセスモニタリング技術の調査を行った。

表Ⅲ2-4-3-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
4-3 レーザー加工技術の標準化・調査研究	加工ニーズデータベースを整備し、産業に必要なプロセスモニタリング技術に関する指針を取り纏める。	顕在・潜在加工ニーズおよびモニタリング技術のデータ整備を実施し、次世代プロセスモニタリング技術に関する指針を纏めた。	◎	なし

(5) 成果の詳細

(担当：産業技術総合研究所、東京大学)

a) 技術ロードマップの調査研究

次世代レーザー加工における顕在・潜在ニーズ探索及び標準化に関する調査を行った。まず、レーザー加工に係る顕在ニーズについて、産業分野毎に公開情報をベースに調査した。公開情報(IR情報、特許情報、展示会資料等)について、加工事例は30件以上、顕在ニーズは50件程度の

情報を収集した。主な調査対象事例は、1) レーザー切断・穴あけ、2) レーザー溶接・ブレイジング、3) 医療機器製造および生体材料である。

これらの技術動向調査に加え、レーザー加工の潜在的なニーズを掘り起こすためのヒアリング調査を行った。ヒアリング対象の企業の業種は、自動車、航空機、医療機器、材料・部品メーカーおよびレーザー加工機、受託加工メーカー等であり、総数 40 社以上に実施した。ヒアリングでは、レーザー加工の利用対象や他加工手法との比較によるメリット/デメリット等の状況を調査し、現時点での技術動向の整理をするとともに、加工対象や加工内容などの具体的な顕在・潜在ニーズを調査し、個社で抱えている課題やレーザー加工に対する期待について情報を得た。

さらに標準化ニーズについて調査し、レーザー加工装置における基準サンプルや加工標準のニーズに関するヒアリングも行った。加工評価の基準は、主に自社や顧客の独自方針で設定されているため、業種により意見に相違があったが、全体の意見の7割は標準化について関心があった。そのうち半数程度は、レーザー加工の評価基準・手法の標準化に高いニーズを持っており、その基準の前提となるデータベースへの期待が高いことが分かった。

表Ⅲ2-4-3-4: 技術ロードマップ項目リスト

1	CFRP切断	11	電池材料穴あけ
2	CFRP穴あけ	12	電池材料溶接（負極材）
3	CFRTP加工	13	電子機器用セラミックス切断
4	CMC穴あけ	14	セラミック基板切断（SiC）
5	自動車用合金切削	15	セラミック穴あけ（薄板）
6	超薄板ガラス切断	16	セラミック穴あけ（厚板）
7	耐損傷性ガラス穴あけ	17	ダイヤモンド工具加工
8	インターポーザー（ガラス）	18	スーパーエンブラ加工（PEEK）
9	フレキシブル基板切断	19	ステント加工（ニチノール）
10	モーター用銅の溶接	20	ステント加工（ポリ乳酸）

上記の調査結果を踏まえて、レーザー加工プラットフォームで统一的に扱うべき材料や加工法等について、優先順位を付けて対象材料リスト化をするとともに、レーザー加工技術ロードマップの策定へと展開した。ロードマップ作成の基礎となる関連市場（被加工対象、最終製品等）の現状の市場規模、将来市場規模および年平均成長率（CAGR）を材料・用途別に40件以上を調査した。その成長率が見込まれる材料の中から、先の調査結果で得られた次世代レーザー加工のニーズが高い材料を抽出し、2019年に8件、2020年に12件の計20項目のロードマップ原案を策定した。策定したロードマップの項目リストを表Ⅲ2-4-3-4に示す。

ロードマップは、調査により得られた情報を分析することで2030年までの市場動向を推測し、2020年（プロジェクト終了時）から5年毎の市場予測および加工目標値とその加工を実現するためのレーザー仕様を記載している。比較のため既存の代表的な加工技術を用いた場合の加工仕様値も併記している。例えばCFRP切断では、既存の加工技術として、ウォータージェットおよびエンドミルと比較を行い、レーザー加工目標値（加工速度、材料厚さ、加工粗さ等）をプロジェクト内で議論を重ねて設定している。

対象材料に関してレーザー加工プラットフォームでラウンドロビンのテストユースを実施し、その加工データをプロジェクトで開発したレーザー加工データベースに蓄積するとともに、ロードマップの目標値の策定材料として利用している。このように研究テーマ④-1とは、加工目標値の設定においても連携を行っている。

上記で策定したロードマップは、産業界の動向やレーザー加工分野の技術レベルの進展等の時代の変化に合わせて更新されていくべきと考えられる。今後も TACMI コンソーシアム等を活用したユーザー企業との議論を進め、最新のデータやニーズに基づき継続的なブラッシュアップを行うことで、当該分野・業界を牽引することが期待される。

b) プロセスモニタリング技術の調査研究

次世代レーザー加工機の品質や生産性向上の効果が期待される加工中のリアルタイム検出技術、フィードバックシステム等の調査を行うため、上述の企業ヒアリングにおいてプロセスモニタリング技術の動向およびニーズについて調査するとともに展示会、国際学会、論文等の最新情報を収集した。

プロセスモニタリング技術の調査内容は、モニタリング対象、センサ種類、検出方法、フィードバックシステム等について実施し、下記の3項目に対し調査した。（調査対象のプロセスモニタリングの要素技術例を図Ⅲ2-4-3-1に示す。）

- ・レーザー切断・穴あけ加工のプロセスモニタリング技術
- ・レーザー溶接・溶着のプロセスモニタリング技術
- ・レーザー加工機消耗部品のモニタリング技術



図Ⅲ2-4-3-1: 調査したプロセスモニタリングの要素技術例

最新のレーザー溶接モニタリング技術では、プロセス中の表面形状、温度情報等に加えプロセス前後の形状をシームレスにモニタリングすることにより、レーザー照射の最適制御による複雑形状の溶接や不良率の最小化等が可能になっている。また、レーザー切断・穴あけ加工では、プロセス中のレーザー出力フィードバック制御や加工終了時を検出し、即座に次の加工プロセスへと制御することで、品質の向上と加工時間短縮の実現が一部で行われている。

一方、レーザー加工によって加工部周辺に生成される内部欠陥・クラック等のリアルタイムモニタリングによる動的制御は、ニーズはあるものの、取り組みが散見されるが実現に至っていない。これらの次世代レーザー加工機への搭載による生産性向上への期待が高いプロセスモニタリング技術開発は、個別に取り組むには困難なテーマであり、国として実施すべき次の協調領域のテーマとして当課題は適していると考えられる。

(6) 実用化・事業化への取り組み

レーザー加工の顕在・潜在ニーズの調査および市場規模と成長率の拡大が予想される加工対象材料の調査を実施した。これらの調査により蓄積したデータを研究開発項目 4-1, 4-2 と連携を図り、レーザー加工プラットフォームで取り扱うべき材料の選定やデータベース化の優先順位付け等に活用し、データベースの実用化に向けた取り組みを行った。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-5. 研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」

2-5-1. 「高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）

（2018年度まで、研究開発項目③-1「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）として実施）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

近年、電気自動車（EV）の開発が盛んに行われ、一部のメーカーからは EV が市場投入されている。EV のキー技術のひとつは、リチウムイオン電池である。リチウムイオン電池は、長距離走行を可能にする大容量性を確保するため、数百～数千個も EV に搭載される。このリチウムイオン電池の需要に対応し、高い生産性を有する工程が重要であり、レーザー加工が望まれている。

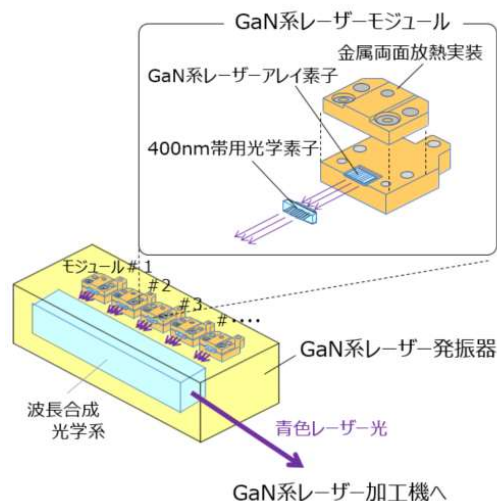
一方、効率や波長選択自由度などの点から半導体レーザー光を直接レーザー加工に用いる工法が注目されている。特に、ほとんどの金属は短波長ほど光吸収が大きくなるので、高効率加工には短波長レーザー光が望ましい。そこで 400nm 帯発光が可能な GaN 系半導体レーザーを用いたレーザー加工装置の製品化が始まった。しかし、半導体レーザーの共振器は他のレーザー装置に比べて数桁も小さく、単一の素子で加工に必要な出力を得ることは困難である。このため、従来の加工用半導体レーザー装置はレーザー光線（ビーム）の品質を犠牲にして、素子の高出力化、および、多数素子からのレーザービームの合成によって、光出力の増大を図ってきた。このため、これまでの半導体レーザー加工装置は良好な加工が困難であった。

以上を背景に、本研究開発項目では、短波長帯で加工に適した、高光出力性と高ビーム品質性を有する GaN 系レーザー装置を実現することを目的とする。これにより、高効率な EV 製造を可能とし、次々世代ものづくり技術の構築に貢献する。

（2）研究開発目標と根拠

本開発の構成を図Ⅲ2-5-1-1 に示す。GaN 系レーザーアレイ素子（発光点を複数有する素子）からの複数レーザービームは、400nm 帯用光学素子でビーム形状が後段の光学系用に最適化され、GaN 系レーザー発振器の内部の波長合成光学系で 1 本のビームに纏められる。研究開発項目⑤の全体目標を満たすため、

テーマ目標を表Ⅲ2-5-1-1 のように定めた。ここで、BPP とは Beam Parameter Product の略であり、レーザービーム品質の指標である。BPP は集光時のスポット半径と広がり半角の積で、値が小さいほど高ビーム品質であることを示す。また輝度＝出力/ $(\pi^2 \cdot BPP^2)$ なる関係がある。



図Ⅲ2-5-1-1 本研究開発の構成

表Ⅲ2-5-1-1 目標値と設定根拠

研究開発目標⑤ 全体目標		研究開発項目⑤-1 テーマ目標		設定根拠
高輝度短波長レーザー装置の開発	出力が2018年度既存技術と比較し10倍以上	発振器	出力 $\geq 300\text{W}$ BPP $\leq 1\text{mm} \cdot \text{mrad}$	輝度目標を出力目標とBPP目標に分解。 2018年既存GaNレーザー発振器における輝度 $0.01\text{GW}/\text{cm}^2\text{sr}$ に比べ、桁で向上。
	2023年度中の事業化に向け、残課題を明確化		GaN系レーザーモジュール	
高輝度短波長レーザーによる加工基盤技術の開発	既存技術ではできない加工を実証	潜在応用の明確化		高出力/高ビーム品質GaN系レーザー加工ポテンシャルは広範囲に応用可能。
	応用先を探り、実現可能性を示す。また実現化に向け残課題を明確化	TACMI コンソーシアム加工プラットフォームへの設置により、加工分野の応用先を探索		本研究開発項目実施者以外にも広く利用いただく仕組みとして左記プラットフォームを活用。
コア技術	-	アレイ素子	出力 $\geq 80\text{W}$	発振器出力から、波長合成効率/合成可能数、光学素子効率などを考慮し算出。 システム全体のビーム品質は素子のビーム品質が上限になるため、素子自体のビーム品質を向上。
			Slow軸 BPP $\leq 0.2\text{mm} \cdot \text{mrad}$	

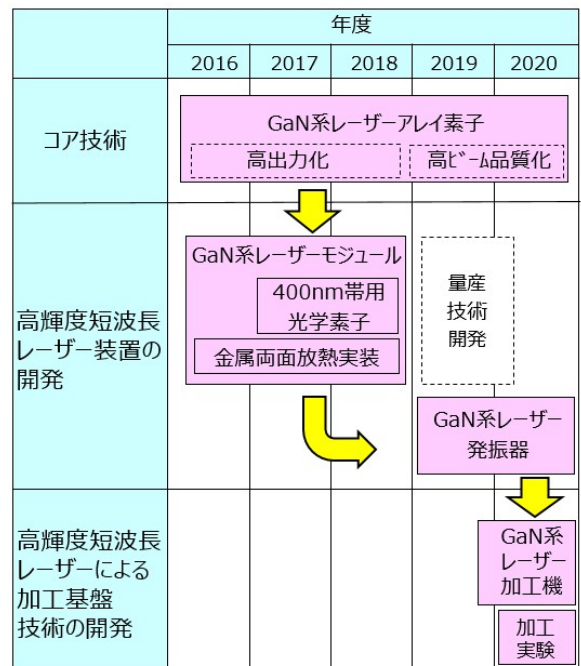
(3) 研究開発スケジュール

目標設定に対するスケジュールを図Ⅲ2-5-1-2に示す。2016～2018年度は、GaN系レーザーアレイ素子、400nm帯用光学素子、金属両面放熱実装などGaN系レーザーモジュールに必要な要素技術の開発を行う。2019～2020年度は各要素技術を統合し、GaN系レーザー発振器として完成させる。またモジュールや光学素子のn増し試作/評価を通じて量産技術開発を行う。更に発振器を加工機に組み込み、加工基盤技術の開発を行う。これにより高ビーム品質GaN系レーザー加工の潜在力を明確化させる。

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-5-1-2に示す。研究開発項目⑤の全体目標、および、それに対応したテーマ目標は全て達成することができた。

また、本研究開発のコアになるGaN系レーザーアレイ素子に関しては、1チップとして世界最高



図Ⅲ2-5-1-2 研究開発スケジュール

出力（150W）を達成した。一方、ビーム品質は低出力域ではBPP目標を達成したが高出力域では未達であり、今後の課題である。

表Ⅲ2-5-1-2 研究開発項目と達成状況

研究開発目標⑤ 全体目標			研究開発項目⑤-1 テーマ目標			根拠
達成目標		結果	達成目標		結果	
高輝度短波長レーザー装置の開発	出力が2018年度既存技術と比較し10倍以上	○	発振器	出力 $\geq 300W$	○	最大 309W
				BPP $\leq 1mm \cdot mrad$	○	最小 0.24 mm \cdot mrad@18.2W 0.99 mm \cdot mrad@300W
	2023年度中の事業化に向け残課題を明確化	○	GaN系レーザーモジュール	量産技術の確立	○	事業化プロジェクト開始。光学素子、モジュール量産化に向けた作製条件最適化等を完了。
高輝度短波長レーザーによる加工基盤技術の開発	既存技術ではできない加工を実証	○	潜在応用の明確化		○	高ビーム品質加工により、5倍以上、高速切断可能を実証。
	応用先を探り、実現可能性を示す。また実現化に向け残課題を明確化	○	加工プラットフォームへの設置により、加工分野の応用先を探索		○	TACMI コンソーシアム加工プラットフォームにGaNレーザー加工機を設置完了。 21年度以降も継続設置し対応。コロナ禍での活用が課題。
コア技術	-	-	アレイ素子	出力 $\geq 80W$	◎	最大 150W
				Slow軸 BPP $\leq 0.2mm \cdot mrad$	△	最小 0.19 mm \cdot mrad @22W 0.47mm \cdot mrad @80W

◎：目標を大きく上回って達成している、または、前倒しで達成できている

○：達成している、または、ほぼ達成している

△：部分達成している、または、主要な部分で進展があったため、達成見込みがある、

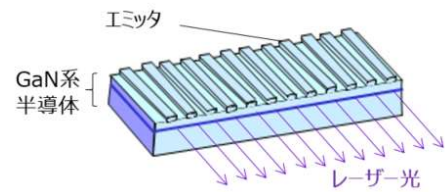
×：未達である、または、不十分である

(5) 成果の詳細

(a) GaN系レーザーアレイ素子

a-1) 高出力化の取り組み

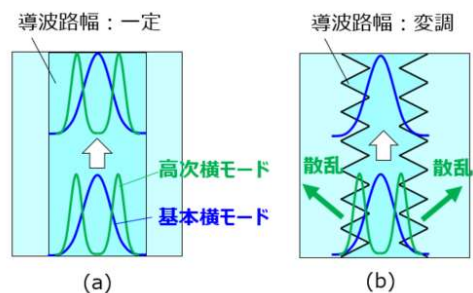
今回、GaN系半導体からなる発光領域（エミッタ）を多数同一基板に集積したアレイ素子を用いる（図Ⅲ2-5-1-4）。ワット級出力動作における端面破壊を防ぐため、エミッタ幅は $10\mu\text{m}$ 以上と大きく、エミッタを構成する導波路には高次横モード（複峰性光分布）が存在する。このエミッタの最大出力は、エミッタ内発熱が起因の接合温度上昇による熱飽和で律速される。この熱飽和は、投入電力→光出力/無効電力発生→熱抵抗による発熱→利得減少→光出力低下/無効電力増加なる正帰還に起因する。この帰還では下記3つの構造パラメータが影響する。



図Ⅲ2-5-1-4
GaN系レーザーアレイ素子構造

①エミッタ長（＝共振器長）・・・光出力（レーザー閾値、発光効率）、熱抵抗に影響
②エミッタ間隔/数・・・各エミッタ間の熱干渉に影響
③エミッタ幅・・・光出力（光密度）、熱抵抗に影響

これらを考慮し設計した結果、エミッタ長 $2000\mu\text{m}$ 、エミッタ間隔 $225\mu\text{m}$ 、エミッタ数38本、エミッタ幅 $16\mu\text{m}$ で作製したGaN系レーザーアレイ素子において、1素子としては世界最高の 150W を得ることに成功した。また本研究開発で用いる波長合成方式では、各エミッタの発振波長が互いに僅かに異なる。このために、GaN系レーザーアレイ素子としても複数波長帯への対応が必要である。そこで、窒化物半導体の屈折率波長分散を考慮した設計、および、発光波長の面内均一性を向上させるレーザーアレイ素子結晶成長装置改造を行い、 $410\sim 440\text{nm}$ の波長帯で 100W 以上の高出力を得ることに成功した。これらの特性は「(c) GaN系レーザーモジュール」で示す。

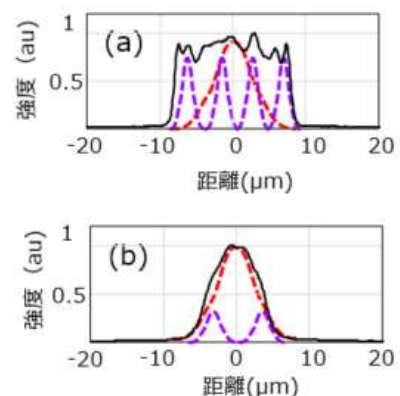


図Ⅲ2-5-1-5
LCWGのコンセプト。1エミッタ内の導波路を表示。導波路幅が(a)一定、(b)変調を示す。

a-2) 高ビーム品質化の取り組み

①横モード制御

上記高出力GaN系レーザーアレイ素子の導波路は高次横モードが許容されるためビーム品質が低いという課題がある。この課題に対し、高次横モードは導波路の外側近傍に強度ピークを持つ事に着目し、導波路幅を共振器方向に周期的に変調した導波路（Lateral Corrugated Waveguide：LCWG）を開発した。このコンセプトを図Ⅲ2-5-1-5に示す。LCWGでは、基本横モード（単峰性光分布）は導波路中央部に強度のピークを持つため低損失に伝搬するが、高次横モードは導波路幅が狭くなる領域において散乱され伝搬が抑制される。図Ⅲ2-5-1-6はLCWGによる高次横モード抑制を示す実験結果である。LCWGで

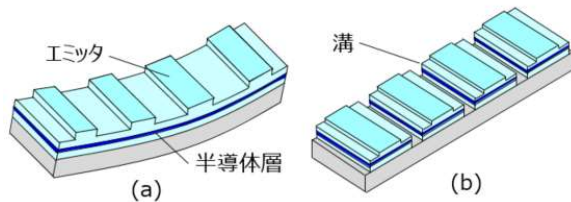


図Ⅲ2-5-1-6
近視野の比較。(a)従来、(b)LCWG
黒線：実験、赤/紫線（基本/高次横モード説明用）

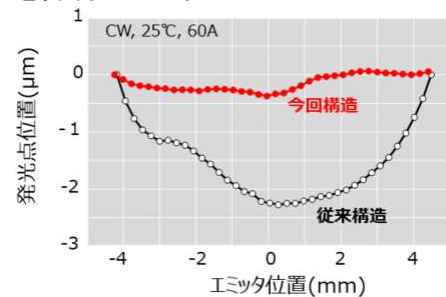
ほぼ単峰性光分布を得られていることがわかる。また GaN 系レーザーアレイ素子において 80W 動作時 BPP(全エミッタ平均値)は、従来導波路で $1.16\text{mm} \cdot \text{mrad}$ に対し、LCWG を用いることで $0.47\text{mm} \cdot \text{mrad}$ にまで向上することを実験で示した。さらに低出力域 (22W) では、 $0.19\text{mm} \cdot \text{mrad}$ までビーム品質が高まる事を確認した。

②発光点位置湾曲 (スマイル) 抑制

GaN 系レーザーアレイ素子は前述のように GaN 系半導体の多層膜で構成されるが、各層の格子定数差により応力が内部に発生する。この応力により、素子は反り、発光点が湾曲 (位置ずれ) してしまう (この現象はスマイルと呼ばれる)。そこで本開発では、図Ⅲ2-5-1-7 に示すように、GaN 系半導体を一部除去する溝をエミッタ間に形成し、内部応力を低減させた。またこの溝は、エミッタ周辺の GaN 系半導体結晶状態を変化させ結晶内の歪を緩和させる効果もある事を明らかにした。図Ⅲ2-5-1-8 は発光点湾曲抑制の実験結果である。従来の発光点位置湾曲が $2.3\mu\text{m}$ に対し今回は $0.4\mu\text{m}$ となり、湾曲を約 1/6 に低減させることができた。この結果、ビーム合成時の集光位置ずれも抑えられ、合成に伴うビーム品質劣化を抑制できた。



図Ⅲ2-5-1-7 従来構造 (a) と発光点位置湾曲抑制構造 (b)



図Ⅲ2-5-1-8 発光点位置湾曲抑制の効果

(b) 400nm 帯用光学素子

本光学素子はビームツイスターユニット (BTU) とよばれ Fast 軸コリメートレンズ (FAC) とビームツイスターレンズ (BT) で構成される。レーザーアレイ素子からのビームの合成は、通常、ビーム品質が悪い Slow 軸でなされるが、本光学素子を用いることで、ビーム品質が良好な



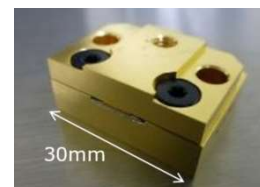
図Ⅲ2-5-1-9 400nm 帯用光学素子の構成

Fast 軸で行うことが可能になる。この結果、合成時のビーム品質劣化を抑制することができる。400nm帯で低損失とさせる基本設計に基づき、面形状、厚さ、各種調整誤差等の公差解析、硝材検討ならびに金型加工の高精度化を行い、素子を完成させた (図Ⅲ2-5-1-9)。GaN 系レーザーアレイ素子と 400nm 用光学素子の結合効率は 90%以上である。更に、上記 a-2) で示す高ビーム品質化アレイ素子に対し、温度含めた課題検証を行い問題が無いことを確認した。

また n 増し試作を行い、型寿命、成形不良 (外観不良、エア残り) などの課題抽出/対策を実施した。これらに加え、新規金型における BT 表裏ズレ検証、BT/FAC と BT を固定する接着ブロックの形状、各パーツ間接着剤の最適化を行い、量産化技術を構築した。

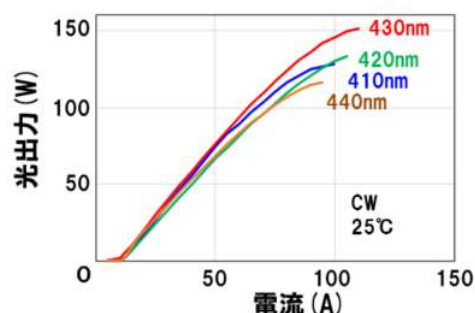
(c) GaN 系レーザーモジュール

本モジュールは、GaN 系レーザーアレイ素子の上下両面を金属（電極ブロック）で挟み込み、素子で発生した熱を上下から放熱させる構造である（図Ⅲ2-5-1-1）。完成品の外観写真を図Ⅲ2-5-1-10 に示す。本研究開発の実施者は、近赤外 GaAs 系レーザーアレイ素子の金属両面放熱実装技術を有しているが、GaAs に比べて GaN の熱伝導率が大きいこと、今回、GaN レーザーアレイ素子に適した金属両面放熱実装プロセスを新たに開発した。特に効率よく放熱されるためには、隙間無く、上下の金属とアレイ素子が密着していることが重要である。本研究開発で導入した CoS (Chip on Submount) 実装機を用い、上記密着性を向上させ、熱抵抗 0.46K/W を得た。



図Ⅲ2-5-1-10
GaN 系レーザーモジュールの外観写真

このモジュールの電流光出力特性を図Ⅲ2-5-1-11 に示す。目標(80W)を超え直線性の良い光出力が得られている。前述のように世界最高光出力 150W、および、発振波長 410~440nm 帯で 100W 以上の高出力動作が可能であることがわかる。



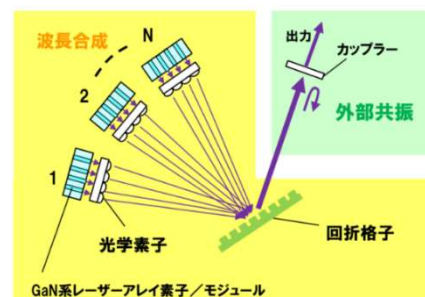
図Ⅲ2-5-1-11
GaN 系レーザーモジュールの電流光出力特性（パラメータは発振波長）

一方、量産化に向けた検討も実施した。モジュール作製数量が増加した場合、各構成部品のばらつきなどに

よっても発光点位置湾曲は影響を受ける。そこで、チップ、実装材料の実装前後の形状測定を高速化させ、また、遠視野による発光点反り測定を高精度化させた。これらにより、量産を視野に入れた発光点位置湾曲目標を満たすための部品精度／実装条件範囲を絞り込んだ。また実装に用いる半田がモジュール外に出る不良を抑制するため、実装条件の最適化などを行った。

(d) GaN 系レーザー発振器

一般に、多数ビームの合成において、レンズを用いる空間合成方式ではビーム合成数の平方根に比例してビーム品質が劣化する。一方、波長合成方式は、回折現象を用いた合成であるため原理上ビーム品質の低下が起らず、ビーム品質を維持したまま 1 本の高出力ビームを実現することが可能である。本 GaN 系レーザー発振器に組み込まれる波長合成光学系の概要を図Ⅲ2-5-1-12 に示す。

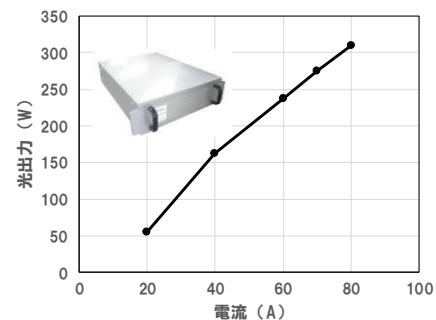


図Ⅲ2-5-1-12 波長合成光学系の概要

す。波長合成用光路と外部共振用光路が組み合わさっていることが特徴である。波長合成用光路の回折格子で 1 本

に合成されたレーザービームは、一部が外部共振用光路のカップラーを透過し、発振器出力となる。一方、カップラーで反射した一部のビームは、波長合成用光路を経由して、GaN レーザーアレイ素子のエミッタに戻り、外部共振器を形成する。各エミッタ、回折格子、カップラーの位置関係から決まる回折条件を満たす波長で回折損失が最小になるため、各エミッタはその波長で自動的に発振する。このため容易に数百本のビーム合成が可能となる。今回開発した GaN 系レー

レーザー発振器の外観と出力特性を図Ⅲ2-5-1-13に示す。動作電流 80A において 309W のレーザー出力を得た。BPP は $0.99\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、輝度 $3.1\text{GW}/\text{cm}^2\text{sr}$ であり目標を達成した。また、LCWG を有するエミッタで構成された GaN 系レーザーモジュール 1 個を発振器に組み込み、全エミッタのビームを 1 本に合成しても BPP $0.24\text{mm} \cdot \text{mrad}$ が得られ、高ビーム品質性が維持されることを確認した。



図Ⅲ2-5-1-13
GaN 系レーザー発振器の電流光出力特性（挿入図：外観写真）

(e) 加工応用

高ビーム品質 GaN 系レーザー発振器の加工特性を調べる為、GaN 系レーザー加工機を製作した(図Ⅲ2-5-1-14)。内部に加工ヘッドや XY ステージを有する箱状本体、および、GaN 系レーザー発振器、チラー、集塵機などから構成される。本レーザー加工機は最大出力 125W、スポット径 $50\mu\text{m}$ 、BPP= $1.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ なる性能を有する。

この GaN 系レーザー加工機を用い、空間合成方式を用いる低ビーム品質装置と比較実験を行った。厚さ 0.1mm の銅箔を用いた。波長合成を用いた高ビーム品質加工では、ステージ速度 $5\text{mm}/\text{s}$ では幅約 $200\mu\text{m}$ で切断できた。一方、空間合成を用いた低ビーム品質加工では、同じステージ速度において、溶融幅が $400\mu\text{m}$ に広がり、かつ、切断に至らなかった。低ビーム品質加工で同程度の切断を得るためには、ステージ速度を $1\text{mm}/\text{s}$ に下げる必要があった。これは、高ビーム品質を用いることで、約 5 倍の加工速度アップができ、その優位性を実証するものである。



図Ⅲ2-5-1-14
GaN 系レーザー加工機の外観

(6) 実用化・事業化への取り組み

実用化（社会的利用）に向け、上記 GaN 系レーザー加工機を TACMI 加工プラットフォーム（PF）に設置し、自動車、半導体/FPD、電子/電気機器などの業界へのユーザー拡大を進める。同時に PF での CPS（Cyber Physical System）連携を推進させ、利便性を向上させる。また系統立った加工実験により、適用範囲を明確化させる基礎データを蓄積する。

一方、本研究開発における中間成果（高出力 GaN 系レーザーモジュール）を用いて、本研究開発の実施者による事業化プロジェクトを 2019 年度からスタートさせ、企業活動貢献を目論む。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料に記載している。

2-5-2. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」(実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所)

(2018年度まで、研究開発項目③-6「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」(実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所)として実施)

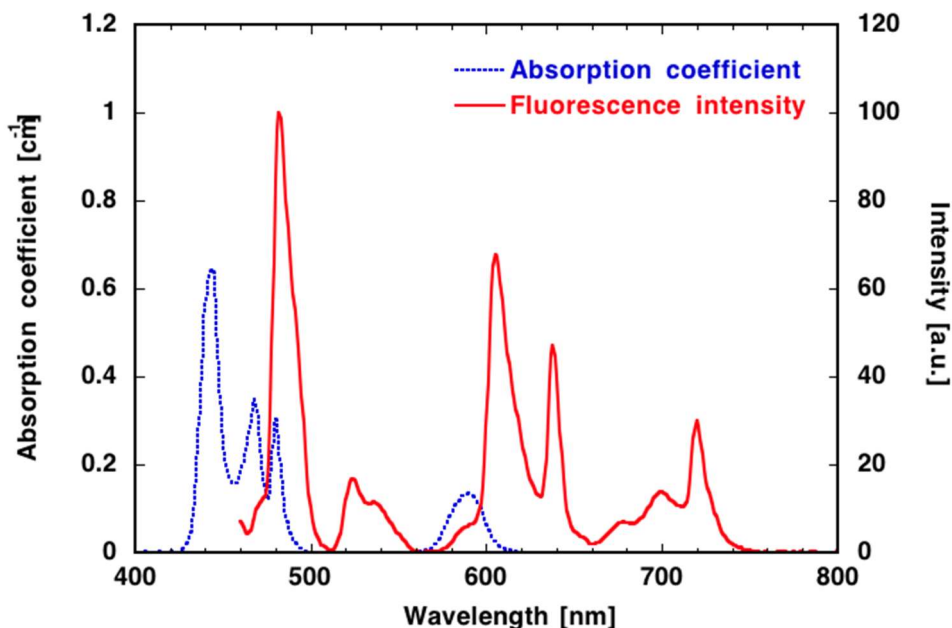
(1) 事業の背景・意義(目的・概要)

我々の研究開発グループは、可視光ファイバーレーザーを基本波とし、1回の波長変換により紫外(UV)光を発生し、従来にない高効率・高ビーム品位の連続光出力0.5W以上を有する固体UVレーザー光源を開発することを目的とした。この開発により、レーザー加工における省エネルギー化を進め、燃料消費、温室効果ガスの削減を図ると共に、日本のものづくり産業の競争力強化を図ることが期待できる。その成果である小型・高効率UVレーザー光源は、例えば3Dプリンタ、直接描画装置、光計測装置、露光装置、半導体検査装置、金属薄膜加工機等のへの応用が可能である。

現在市販されている連続波UVレーザーの問題点は下記の通りである。

- ① 近赤外からの波長変換はレーザー波長が離散的である。
- ② 266、355nmいずれも非線形結晶を用いた波長変換が2回必要である。
- ③ He-Cdレーザーの高出力化は困難であり、固体化が必要である。

連続波の波長変換過程は高効率動作が難しく、従来の固体UVレーザー装置はその動作を2回要求されている。また、325nm(He-Cdレーザー)付近で数多くの産業用途が既に存在していることから、この波長域のUVレーザー光源は既存応用装置との整合性にも優れている。



図Ⅲ2-5-2-1 Prドープ耐候性フッ化物ガラスの吸収・蛍光スペクトル

従って、より多くの波長をUV光領域に提供することで、UV光応用は飛躍的に向上することが期待される。図Ⅲ2-5-2-1にPrドープ耐候性フッ化物ガラスの吸収・蛍光スペクトルを示す。Prドープ耐候性フッ化物ガラスの蛍光はほぼ全ての可視域を網羅しており、またその蛍光効率も高く、高効率の基本波可視光レーザーが様々な波長において実現できる。

この様に、多波長のUV光を与える手段として、我々は青色半導体レーザー励起によるPrドープ耐候性フッ化物可視光ファイバーレーザーを基本波とし、1回の波長変換による高効率・高出力CW-UVレーザーの開発を行った。波長変換過程は非線形光学効果であり、その数を減らすことで高効率化が期待できる。

ここで使用する青色半導体レーザー及び、耐候性フッ化物ガラス・ファイバは日本オリジナルの技術である。従来のフッ化物ガラス（ZBLANガラス）は潮解性が強かったが、それに比べ500倍高い耐水性を持つ耐候性フッ化物ガラスは（株）住田光学ガラスにて開発された次世代の国産素材である。

以上を鑑み、可視光ファイバーレーザーを基本波とし、波長変換技術を使って、最終的に波長320nm帯で0.5W（最終年度）のUVレーザー出力を達成し、それに係る技術要素の設計及び検証の後、プロトタイプ的设计、製作、及び評価と製品化を行う。またUVレーザーはビーム品質がTEM₀₀（M²<1.2）、低コスト化、コンパクト化、長寿命化を設計のコンセプトとする。

（2）研究開発目標と根拠

我々の開発する革新的小型・高効率UVレーザー光源における目標値は、以下の通りである。

表Ⅲ2-5-2-1 研究開発UVレーザーの目標値

項目	目標値	設定根拠
レーザー波長	320nm帯	既存ユーザーの取り込み 既存市場へのインパクト
レーザー出力	>0.5W	
発振横モード	TEM ₀₀ (M ² <1.2)	アプリケーションからの要請
ウォールプラグ効率	>2%	省エネ効果
寿命	>8700時間(1年)	メンテナンスサイクルより

レーザー出力は0.5Wを開発目標とした。また、波長選定は既存He-Cdレーザーユーザーの取り込みを考慮し320nmとした。その他の目標値はエンドユーザーからのニーズ「高出力、高ビーム品質、長寿命、コンパクト、低コスト化（含むランニングコスト）」の聞き取り調査等により、発振横モードTEM₀₀（M²<1.2）、寿命8700時間、コンパクト（He-Cdレーザーの1/6）、ウォールプラグ効率2%以上とした。

また、最終目標UV光0.5Wに絞り込み、基本波の出力及び励起光出力を表Ⅲ2に示すように決定した。2019年度時点で中間及び最終の目標値はクリアした。

表Ⅲ2-5-2-2 目標値と設定根拠

項目	最終目標	中間目標	設定根拠
UV出力	0.5W以上	0.5W以上	ユーザーニーズ及び現状の連続波UVレーザーアプリケーション調査
基本波出力	2W以上	2W以上	目標UV出力と波長変換効率（25%）より概算見積
励起光出力	5W以上	5W以上	目標基本波出力とレーザースロープ効率（40%）より概算見積

(3) 研究開発スケジュール

以下に研究開発スケジュールを示す。

表Ⅲ2-5-2-3 革新的小型化・高効率UVレーザー光源の開発スケジュール

項目	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	最終目標値
① 0.1WUVレーザーの開発	0.1W UVレーザープロト機完成			プロト機出荷	改良	0.1W レーザープロト機の完成・出荷
② 0.5W機の開発	0.5W プロト設計試作				0.5W プロト機完成	0.5W プロトの完成
③ 信頼性評価試験				信頼性評価試験		各仕様の評価・確認
④ 高品位化と問題改善				顧客要望実現と高品位化実証 熱的不安定性、光学損傷問題改善		高品位化と問題改善
⑤ 次世代機要素技術の開発(多波長によるUV、及び10W級超出力)	LDパワー向上 ダブルクダッドファイバ UVコーティング技術		MOPA 設計検討 多波長化検討			要素技術の確立

研究課題である「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」において、スムーズかつ、課題の明確化を計るため、開発要素を次の3つのパッケージに分類した。そして、その各パッケージの目標値を以下に示す。中間における目標見直しで、0.1W機の製品化及び0.5W試作機の製作に切り替え、目標を絞ることで製品の上市時期を早め、事業化に確実に結びつけることに変更した。

① 励起光学パッケージ

中間目標値：5W以上

最終目標値：6W以上

② シングルモードファイバーレーザーパッケージ

中間目標値：2W以上

最終目標値：2W以上

直線偏光(1:100)

シングルモード(TEM₀₀、M²<1.2)

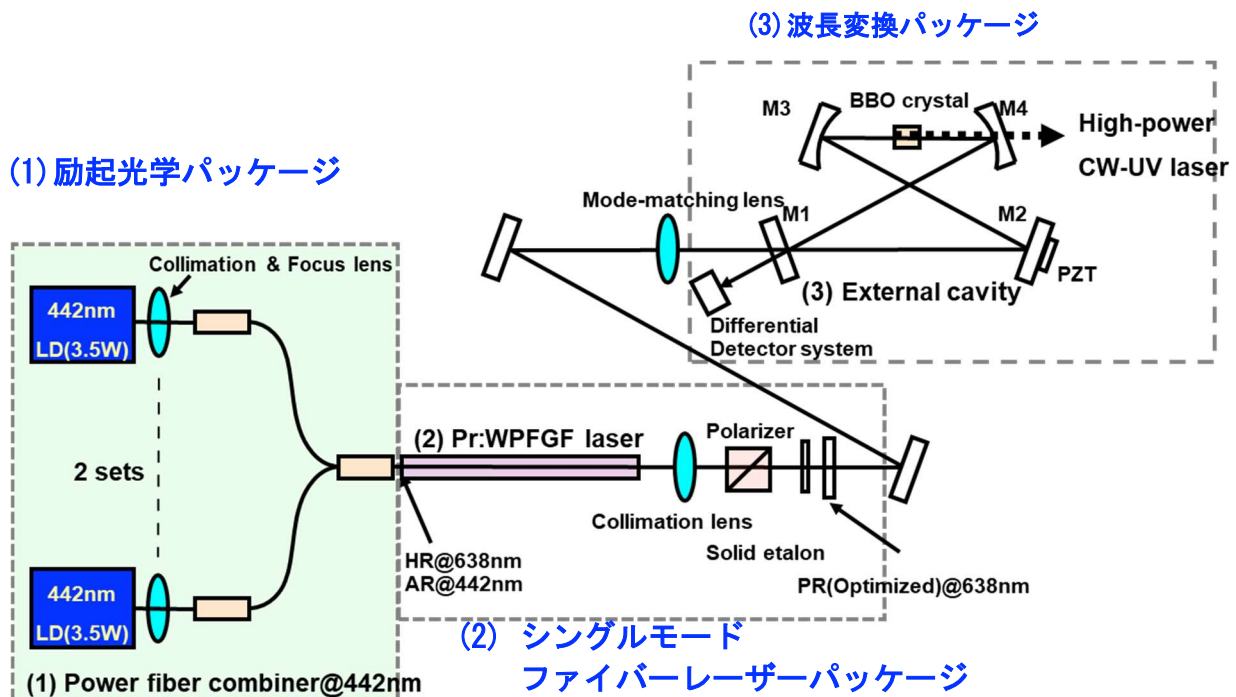
③ 波長変換パッケージ

中間目標値：0.5W以上

最終目標値：UV出力0.5W以上

直線偏光(1:100)

シングルモード(TEM₀₀、M²<1.2)



図Ⅲ2-5-2-2 開発3要素パッケージ

(4) 研究開発目標と達成状況

最終目標の達成状況を表Ⅲ2-5-2-4にまとめる。

表Ⅲ2-5-2-4 研究開発項目と達成状況

項目	UV出力／効率	基本波出力	励起光出力
最終目標	0.5W／25%	2W以上	5W以上
成果	0.515W／30%	2.01W	6.0W
達成度	○ (達成)	○ (達成)	○ (達成)

- ・基本波出力については2.01Wの結果が得られた。励起光学系の再設計により励起入力が向上した。また、出力ミラー反射率の最適値の決定により、スロープ効率の向上したことから基本波2Wが達成できた。
- ・UV出力は最終目標0.5W以上の結果が得られた。

(5) 成果の詳細

(a) サブテーマ① 0.5WプロトタイプUVレーザーの設計、製作、及び評価

・基本波レーザー特性の向上

○励起光学パッケージ

- 1) 励起LD冷却効率の向上→励起波長変動及び、励起光出力飽和が抑制された。
- 2) 励起LD光学系の光学計算による設計と評価→集光スポット位置の最適化及び、集光NAの最適化によるファイバー結合効率が向上した。
- 3) 各光学素子の透過効率の評価→より良い透過率を持つ部品へ交換する事で、励起LDの伝送効率を向上した。

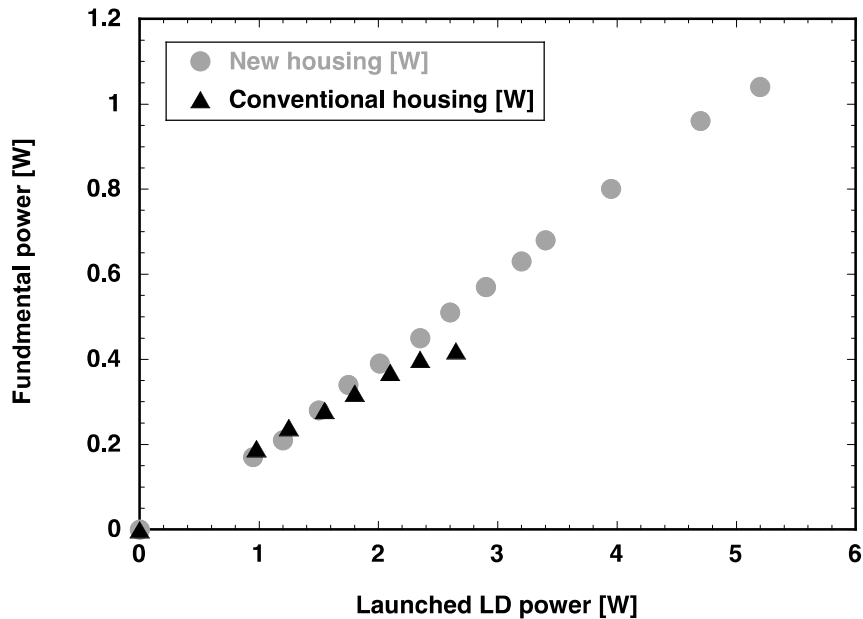
○シングルモードファイバーレーザーパッケージ

共振器ロス及びフッ化物ファイバーの熱蓄積の低減に向け次の取り組みを行った。

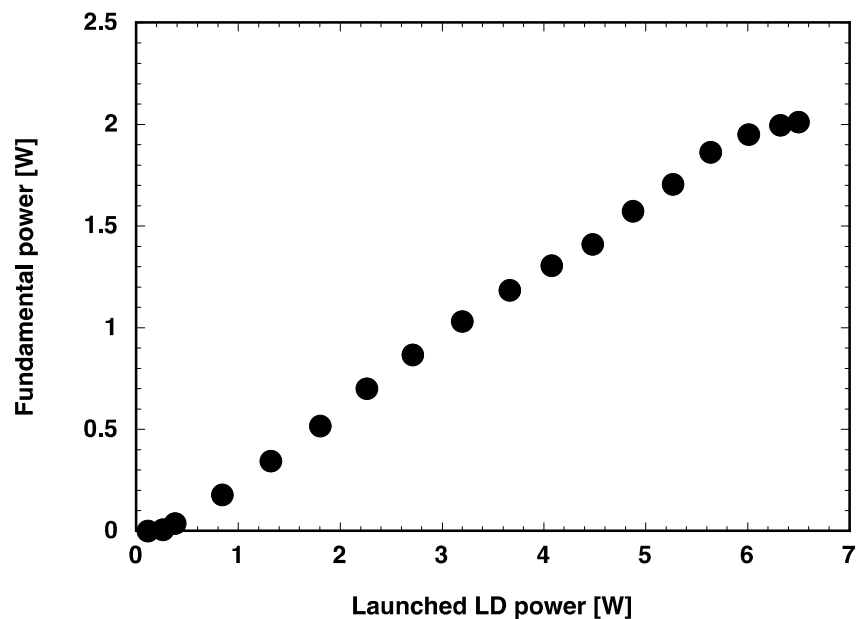
- 1) ファイバー端面への直接コーティングのテスト
- 2) 回折格子狭線化からエタロン狭線化へ→共振器ロスの低減により基本波出力の向上を達成した。
- 3) フッ化物ファイバーの熱蓄積を低減しレーザー出力の飽和を避けるため、ハウジング材料に熱伝導率が高く放熱効果の高い構造を採用した。(特許取得)

上記開発事項によって得られたシングルモードファイバーレーザーの出力特性を図Ⅲ2-5-2-4に示す。比較のために冷却対策が十分でない従来のハウジング構造の結果を同時に示す。従来構造では2W以上の励起で基本波出力が飽和し、0.4W程度しか得られなかったのに対し、新構

造では5 W以上の励起入力でも出力飽和せず1 Wの基本波が得られた。これは、新構造によりフッ化物ファイバーの放熱効率が向上し、温度上昇による出力飽和が大幅に軽減されたためである。最終的に図Ⅲ2-5-2-5に示すように、励起入力6.5 Wに対して基本波レーザー出力2.04 Wが得られ、目標が達成した。このハウジングの最適放熱構造開発は、本開発において大きなブレークスルーの一つである。開発当初は、水冷構造のハウジングを用いていたが、空冷においても十分冷却が可能であることが確認され、装置の小型化が飛躍的に進んだ。このフッ化物ファイバーの冷却構造については、特許申請し2021年特許登録された。



図Ⅲ2-5-2-4 ハウジング材料・構造の違いによる基本波の入出力特性



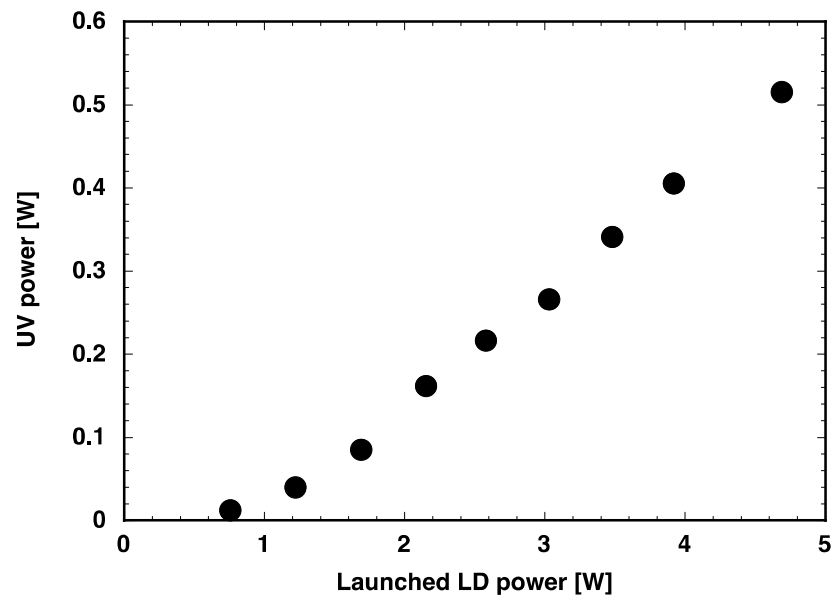
図Ⅲ2-5-2-5 基本波レーザーの入出力特性

・波長変換光学系構築

○波長変換パッケージ

- 1) 外部共振器のアライメント手法の最適化
- 2) 基本波と外部共振器のモードマッチング最適化
- 3) 位相共役波を利用した共振器構造。(特許取得)

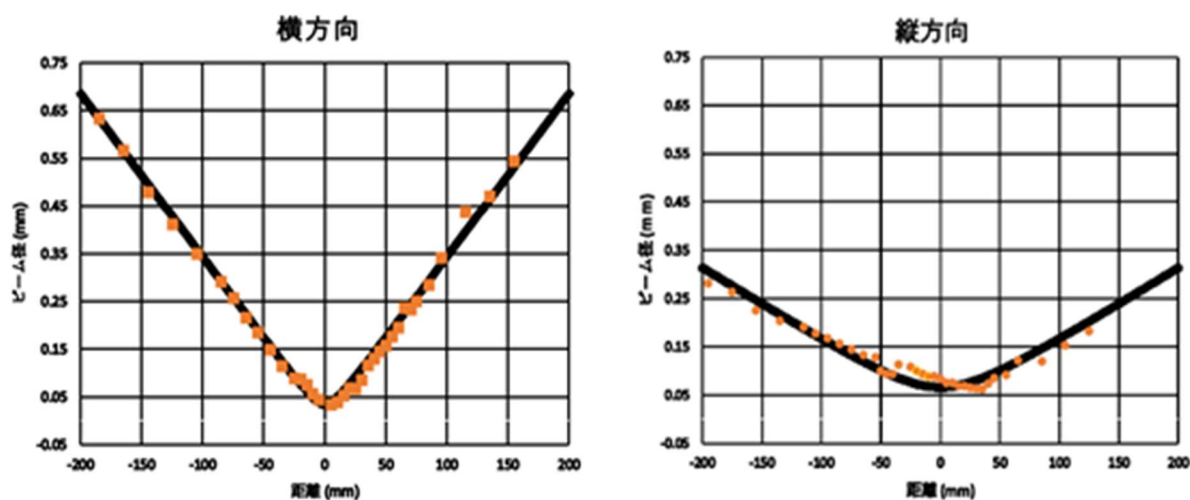
CW-UV ファイバーレーザーの入出力特性を図Ⅲ2-5-2-7に示す。636 nmの基本波出力の波長変換結晶にはBBO (Type-I: 位相整合角 $\theta_m = 37.65^\circ$)を用いた。この時、横軸の入力は青色半導体レーザーの励起入力である。4.8 Wの青色半導体レーザー励起入力に対し、0.52 Wの波長変換(318 nm)出力が得られた。励起青色半導体レーザーと波長変換(318 nm)出力における光-光変換効率は11%となり、非常に高い効率でCW-UV レーザー光源が得られており、これは波長変換1回のアドバンテージである。



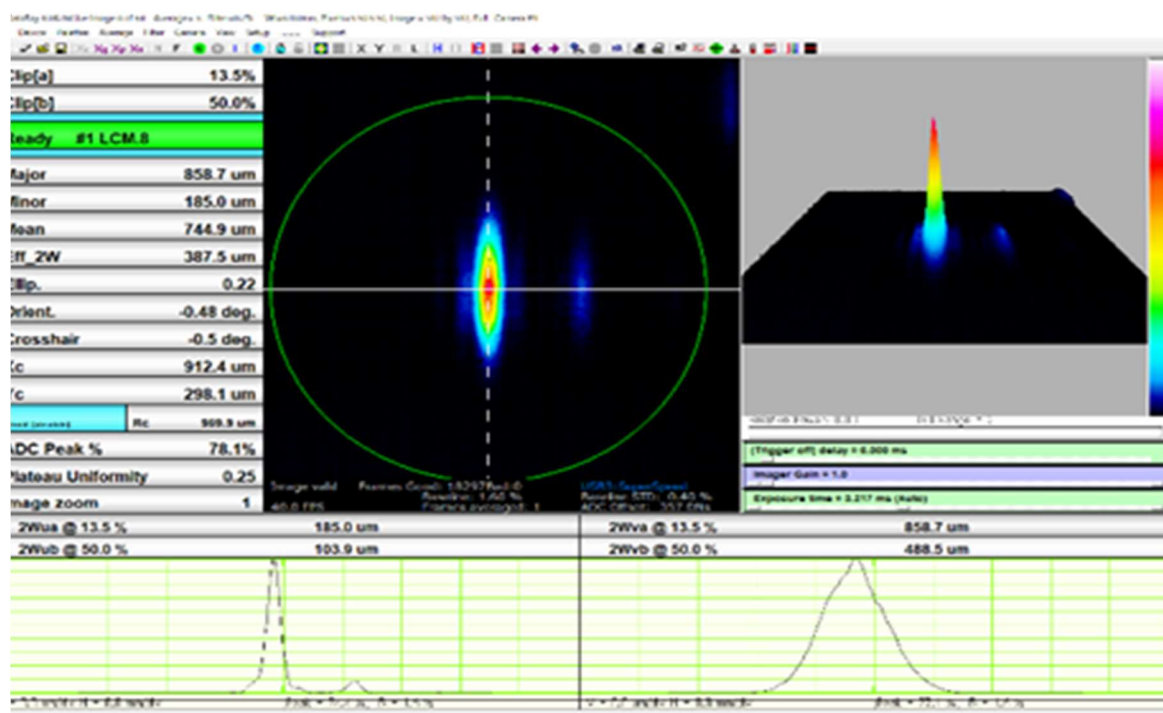
図Ⅲ2-5-2-7 CW-UV ファイバーレーザーの入出力特性 (入力は青色半導体レーザー)

波長変換結晶 (BBO) の複屈折の影響が強く、波長変換後のUV光のビーム品質が悪化する傾向が見られ、 M^2 は片方の軸が1.2前後に対し、直交する軸の M^2 は2.5から3.0になった。ビーム品質の改善を、基本波のビーム品質の向上 (コア径及びアライメントの最適化)、ポウタイ共振器、マッチングレンズ及び波長変換結晶の最適化を進め、図Ⅲ2-5-2-8の通りビーム品質 M^2 を両軸共に1.2以下にすることに成功した。

ビーム形状は、図Ⅲ2-5-2-9に示す通り射出口より215mm点にて、 $X=185\mu\text{m}$ 、 $Y=858\mu\text{m}$ のビームであった。



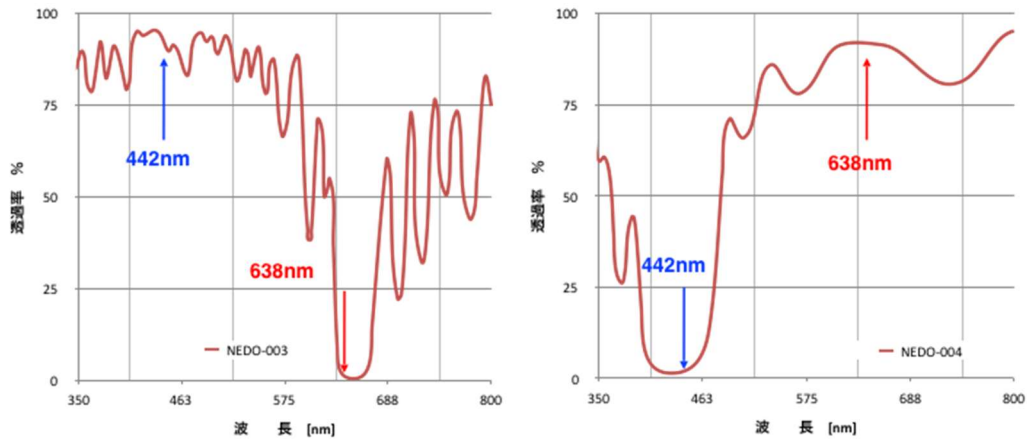
図Ⅲ2-5-2-8 ビーム品質



図Ⅲ2-5-2-9 射出口より215mm点のビーム形状 ($X=185\mu\text{m}$ 、 $Y=858\mu\text{m}$)

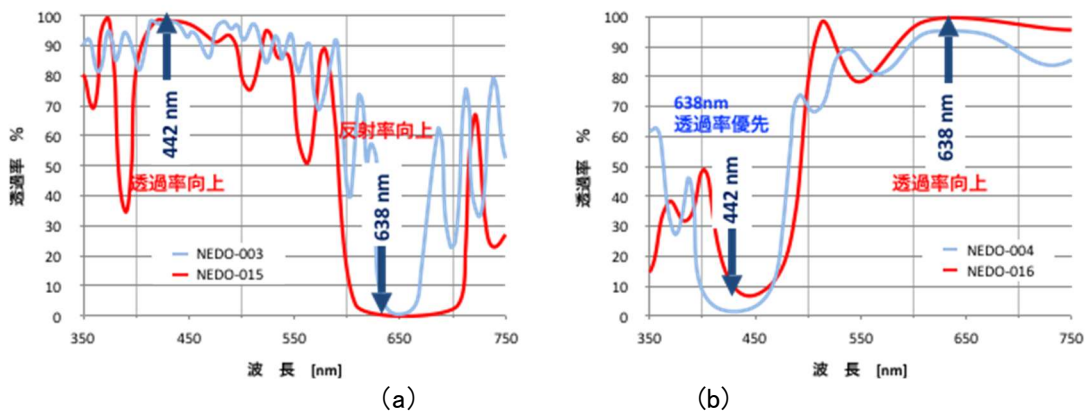
・基本波ファイバの端面コーティング及びUVレーザーミラーの高レーザー光耐性を持つコーティング技術の開発

レーザー総研は2W高品質UVレーザー光源プロトタイプ及び次世代機に要求される高レーザー光耐性をもつ可視、UV域特殊ミラー（コーティング）の設計及び試作を行った。ファイバ端面への直接コーティングが可能となるように、コーティングチャンバー、温度履歴の最適化の準備も行った。



図Ⅲ2-5-2-10 基本波レーザー用誘電体多層膜ミラーコーティング（右）励起側高反射ミラー、（左）出射側ARコーティング

基本波レーザーの高効率動作を実現する上で、ファイバー端面への直接コーティング技術の向上は必須の技術開発である。基本波出力を効率よく取り出すための誘電体コーティングの最適設計を行い、それを達成した。図Ⅲ2-5-2-11はそのコーティングスペクトルを示しており、励起LD波長442nm、ファイバー発振波長638nmに対して、光学特性を改善（赤線改善後）した。ファイバーレーザー構成要求に合わせたカスタム仕様を実現した。



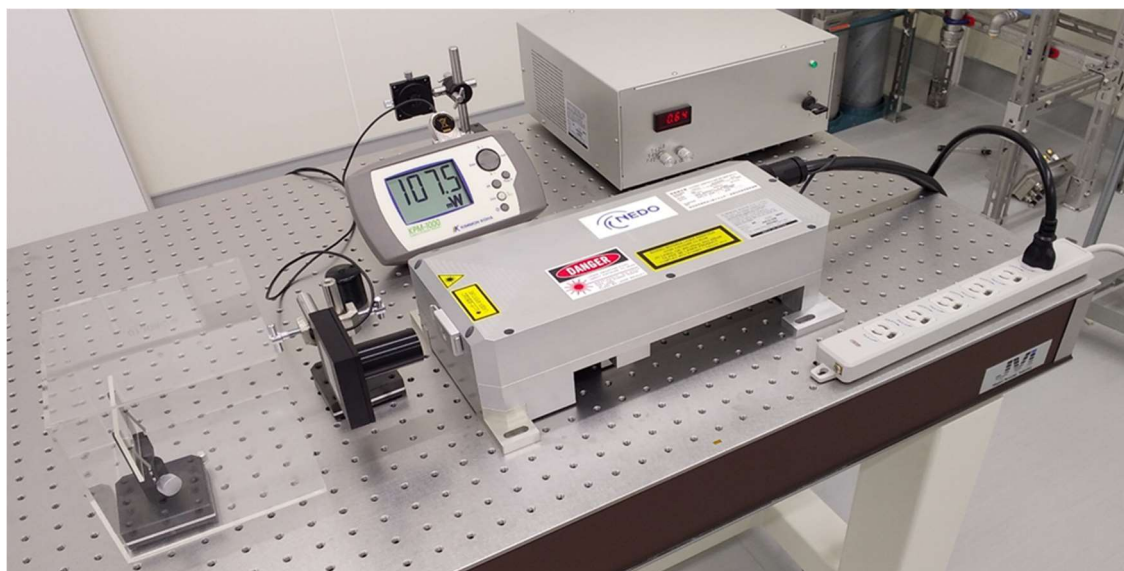
図Ⅲ2-5-2-11 ファイバー端面コーティングの設計と試作。
 (a) 励起側ファイバー端面、(b)出射側ファイバー端面

・0.1W プロトタイプUVレーザーの設計、製作、及び評価

0.1W機を実用化すべく、0.1W機のプロト機を設計・製作・評価を行った。研究開発結果を基に、ファイバーの冷却系及び共振器構成の2つの特許をプロト機の盛り込むことで、0.1Wの出力を得ることができ、出力安定化のためのPZTを付加しプロト機を完成させた。

レーザー装置として、寿命の項目を除き目標値を達成していることを確認した。寿命については、現在改善対策を実施し検証を行っている。

展示会への出展履歴でも分かるように、これまで13回の展示会出展を行い、積極的な製品紹介とともに、カスタマーの要望を聴取している。金門光波の既存のHe-Cdレーザーの顧客及び新規の顧客へのアピールを日本、アメリカ、ドイツ、中国で行ってきた。0.1Wのプロト機を2020年に完成させた。図Ⅲ2-5-2-12は2020年度に東大の柏サイトへ納入したプロトタイプレーザーである。



図Ⅲ2-5-2-12 2020年度柏サイトへ納入した0.1W試作UVレーザー装置

・0.5W出力プロトタイプUVレーザー設計、製作、及び評価

0.1Wプロト機の延長線上に0.5W機が存在する。0.1W機ではLDの電流を上げることで、レーザー出力は0.3W前後出力する。現状、励起用のLDが5Wに性能向上しており、フッ化物ファイバーの励起入力を40%増加することができる。LDの形状は同じ大きさで、レーザーヘッドの大きさは、そのまま使えることが期待できる。今後、5Wの励起用レーザーを組み込み基本波出力及びUVレーザーの出力特性を確認し、0.5W出力のプロトタイプレーザーの基礎として、製作評価を2021年、2022年度に行う。

(b) サブテーマ② 次世代機に関する要素技術の開発

・ UV 10Wのための基本波レーザー出力の向上

UV 10Wのための基本波レーザー出力を得るために以下の事項の検討及び設計を行った。

- ①複数のLD光を1つにまとめてファイバーを励起するための、空間光学型のパワーコンバイナーの設計を行った。
- ②フッ化物ファイバーの大口径の第二クラッドを(株)住田光学の協力で試作開発をすすめ、現状第二クラッド径サイズは25 μ mまで実現化できている。

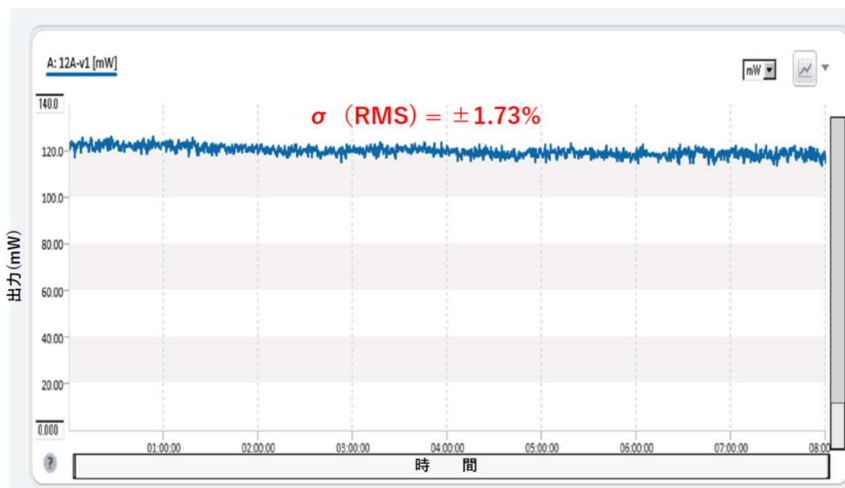
(6) 実用化・事業化への取り組み

前述したように、UV出力0.1Wのプロトタイプは完成したが、実用化（製品）に向けて、以下の点を評価、改善をする必要がある。

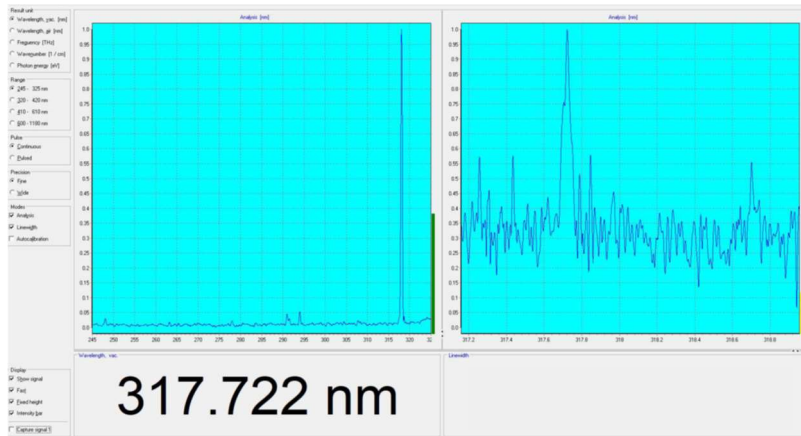
- ①出力特性の安定性
- ②長期間動作（装置寿命 8700 時間以上の実証）
- ③ユーザー評価

(1) 出力特性の安定性

UV出力0.1Wプロトタイプ機を用いて、レーザー出力、出力波長、ビーム品質の安定性について評価した。図Ⅲ2-5-2-13に8時間のレーザー出力の変動を示す。RMSで $\pm 1.73\%$ の安定度が得られた。また出力波長は図Ⅲ2-5-2-14に示すように、波長317.7nm、スペクトル幅約0.6nmで安定であることが確認できた。



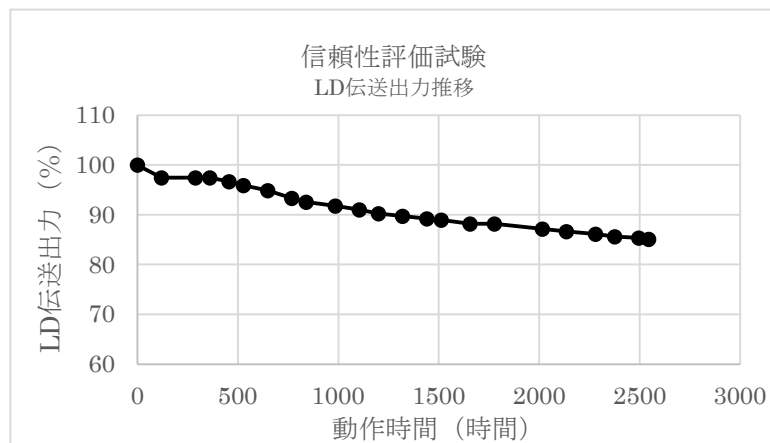
図Ⅲ2-5-2-13 0.1Wプロト機 の8時間の出力変動



図Ⅲ2-5-2-14 O. 1Wプロト機の出光波長

(2) 長時間動作

UV出力0.1Wプロトタイプ機を用いて、長時間動作試験を行っている。基本波出力以前のファイバーを励起するLD光の減衰が見られ、それを伝送するファイバーの劣化が確認できた。LDからフッ化物ファイバーまで、LD光を伝送するため石英製のファイバーを使用しており、その出力光の推移を測定したデータを図Ⅲ2-5-2-15に示す。LD光(442nm)により、ファイバーの劣化に対して、石英ファイバーの材質の見直し、LD光の入力部分の形状変更等を行い、減衰率の低減を確認中である。



図Ⅲ2-5-2-15 O. 1Wプロト機のLD光伝送ファイバーの伝送出力推移

(3) ユーザー評価

UV出力0.1Wプロトタイプ機をHe-Cdレーザーユーザー等に提供し、ユーザー側からの課題等の情を取集することを計画している。そのために必要な装置の提供先の調査およびコンタクトを行った。また、He-Cdレーザーユーザーへの提供に先立ち、TACMIコンソーシアムで利用促進するために、東京大学柏IIキャンパスに、同プロトタイプ機を設置した。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-5-3. 「極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）

（2018年度まで、研究開発項目④-1-2「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発／レーザー加工プラットフォームの構築／極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）として実施）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

波長 200nm 以下の領域は材料の結合エネルギー以上の 1 光子プロセスによる画期的な非熱加工に発展するポテンシャルを有する。この領域では先駆的な学術的研究はあるものの、実用性を含めた検討は世界的にも手付かず状態である。そこで、波長 193nm により本格的非熱加工技術開発を世界に先駆けて取組む。具体的には、ハイブリッド ArF レーザー加工技術の開発を 1) 193nm ハイブリッド ArF レーザーの開発、2) 193nm 加工評価装置の製作、3) 193nm 加工技術の開発の 3 項目によって実施する。

（2）研究開発目標と根拠

193nm ハイブリッド ArF レーザーについては、NEDO 省エネルギープロジェクトで開発したハイブリッド ArF レーザーのプロト装置を用いて開発を実施し、世界に存在しない短パルス高パルスエネルギー、高い集光特性を持つ 193nm 光源を開発するとした。また、項目⑤-3において光源の加工優位性を実証する加工プロセス実証も合わせて実施すると変更した。

以上を受けて、光源開発の最終目標は加工実証に必要な出力として「10W 以上の平均パワー」とすると共に、固体レーザーで実現が困難な高エネルギーと短パルスの両立として「パルス幅を 0.5ns 級、ピークパワーを 3.3MW 以上」と設定した。また、集光性については産業応用で使われている 1 μ m 帯における理想光源の BPP（ビームパラメータ積）より高い目標である「0.3mm \cdot mrad 以下の BPP」と設定した。加工プロセス開発の最終目標は本光源を使った加工システムの将来性を示すため、「将来的に増幅技術と組み合わせることで既存技術比 10 倍以上のスループット実現可能性実証」と設定した。

表Ⅲ2-5-3-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠
光源開発	<ul style="list-style-type: none"> ● パルス幅：0.5ns 級 ● 平均パワー：≥ 10W ● ピークパワー：≥ 3.3MW ● BPP：≤ 0.3mm\cdot mrad 	加工実証に必要な出力として 10W 以上、固体レーザーで実現が困難な高エネルギーと短パルスの両立として、パルス幅を 0.5ns 級、ピークパワーを 3.3MW 以上、高い集光性としては 1 μ m 帯光源の理論限界である 0.34mm \cdot mrad を超える 0.3mm \cdot mrad を設定した。
加工プロセス開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 将来的に増幅技術と組み合わせることで既存技術比 10 倍以上のスループット実現可能性の実証 	本光源の加工優位性の実証として、「既存技術の 10 倍以上のスループット」とした。ただし、2019 年の項目⑤-3 へのテーマ移動において、光源開発から加工プロセス実証に目標を変更したため、加工実証における出力条件を「将来的に増幅技術と組み合わせること」とした。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-5-3-2 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	2021	最終目標値
光源開発							<ul style="list-style-type: none"> ● パルス幅: 0.5ns 級 ● 平均出力: $\geq 10W$ ● ピーク出力: $\geq 3.3MW$ ● BPP: $\leq 0.3mm \cdot mrad$
加工評価装置の構築							
加工プロセス開発 193nm 加工評価							<ul style="list-style-type: none"> ● 将来的に増幅技術と組み合わせることで既存技術比 10 倍以上のスループット実現可能性の実証
加工ニーズ調査							
加工プロセス評価							

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。光源開発は、BPP を除く 3 項目について目標を超える性能を達成すると共に、BPP は最終目標には届かなかったが $1\mu m$ 帯の理想光源と同等の性能を達成し、加工プロセス実証を行うために十分な性能を持つ光源を開発することができた。加工プロセス開発は、CMC 材料を用いた加工で現行のレーザー光源で最終目標を超える加工を実証し、ガラスの加工においても自社光源との比較で 16 倍の加工速度を実証し、既存技術に対し優位性を持つことを実証した。さらに、CMC の加工ではユーザーサンプルを使った評価も開始しており、十分な成果を得ることができた。

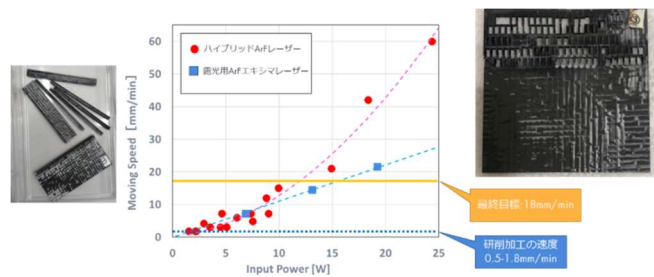
表Ⅲ2-5-3-3 研究開発項目と達成状況

項目	最終目標	成果	達成度
光源開発	<ul style="list-style-type: none"> ● パルス幅: 0.5ns 級 ● 平均パワー: $\geq 10W$ ● ピークパワー: $\geq 3.3MW$ ● BPP: $\leq 0.3mm \cdot mrad$ 	<ul style="list-style-type: none"> ● パルス幅: 0.46ns ● 平均パワー: 14W ● ピークパワー: 3.7MW ● BPP: 0.35 	○
加工プロセス開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 将来的に増幅技術と組み合わせることで既存技術比 10 倍以上のスループットの実現可能性を実証 	<ul style="list-style-type: none"> ● CMC 材料の切断で、機械切削に比べ 33 倍の切断速度を実証 ● 機械加工で対応困難な 30° 以下の斜め穴加工を実証、ユーザーサンプルの加工評価を開始 ● ガラスの加工において、16 穴の一括加工を 1 穴加工と同じ時間で達成 	◎

(5) 成果の詳細

CMC とガラスを用いた加工プロセス開発について報告する。

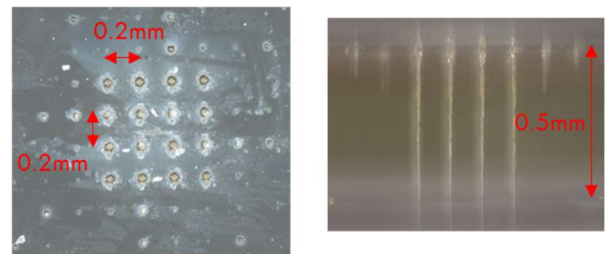
CMC は航空機エンジン等への応用が期待されており開発が進んでいる新材料である。しかし、強度が高く耐熱性も高いため加工が難しいという課題を抱えている。CMC のトリミング加工速度の評価結果を図Ⅲ2-5-3-1に示す。ハイブリッド



図Ⅲ2-5-3-1:1mm厚 CMC のトリミング加工の速度評価

ArF レーザーによるトリミング加工は 60mm/min. の速度で行えることを確認した。この速度は機械切削に比べ 30 倍以上速く、従来加工に比べ高速に加工が行えることを実証した。また、加工速度はパワーを増やすほど指数関数的に増加しており、増幅技術を確認することで本加工の生産性を大きく向上できることも確認した。

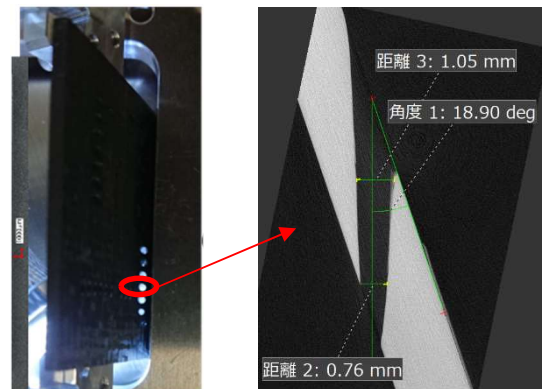
ガラスの加工では次世代のインターポーザとして有力視されている微細穴加工に対し評価した。評価の結果、ハイブリッド ArF レーザーを使った場合、加工端面が滑らかで高品質な加工が行えるが、加工速度は入力エネルギーの上昇に対し緩やかであり、0.5mJ 程度以上を入力すると加工端面にクラックが発生することがわかり、1穴毎の穴加工でスループットを向上させることは難しいことが分かった。そのため、多穴を同時に加工するマルチスポット光学系を開発し評価を行った。図Ⅲ2-5-2に16穴の多点一括加工を行った結果を示す。1.5mJの入力により、Φ20μm 穴を4行4列の合計16穴、0.2mmの間隔加工できており、マルチスポット光学系のデザイン通りに加工できることを確認した。またその加工速度は1穴で加工した場合とほぼ同じ時間であった。以上の結果により、マルチスポット光学系を用いることで16穴の加工速度を16倍向上できることを実証した。



図Ⅲ2-5-3-2:0.5mm厚ガラスへの16穴一括加工の結果

(6) 実用化・事業化への取り組み

実用化・事業化への取り組みとして、斜め穴加工について示す。上記 CMC の加工実証結果を用い、エンドユーザーに対しヒアリング調査を行った結果、「航空機エンジンの燃焼系応用において 30° 以下の斜め穴加工が困難」というニーズを得ることができた。そのニーズに従い斜め穴加工実現に向けたプロセス開発を行うことで、図Ⅲ2-5-3で示すような 30° 以下の斜め穴加工の方法を確立した。また、レーザー加工プラットフォームを通じて同加工プロセスを



図Ⅲ2-5-3-3:CMC の 20° 斜め穴加工結果

使った Ni 合金の斜め穴加工の評価を別のエンドユーザーと現在進めている。今後も同様の活動を進め、ハイブリッド ArF レーザーの実用化・事業化に向け活動を進めていく。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-5-4. 「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」（実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社）

（2018年度まで、研究開発項目④-1-3「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発／レーザー加工プラットフォームの構築／高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」（実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社）として実施）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

【背景と意義】

レーザーは、世界的に次世代ものづくり産業技術の中核として期待されており、今後も市場の拡大が見込まれる。しかし、様々な加工条件に合わせて効率良く、また付加価値の高い加工を実現するためには、現在のレーザーは、波長や輝度（出力とビーム品質）、効率等の多くの点で技術的な課題を有する。我が国が世界的トップランナーとして、これまでにない高効率かつ高輝度（高出力・高ビーム品質）なレーザー技術を開発することにより、わが国のものづくり産業の競争力強化を推進し、Society 5.0の実現を図る。

【目的と技術課題】

「次世代加工」である高機能かつ難加工材料の接合・3Dプリンタ等の高品質加工技術開発には、加工材料に対し光吸収率の高い青色半導体レーザーを用いることが有効である。日本の強みである高性能青色半導体レーザー素子から出力される「光」を光ファイバに結合（コンバイン）することで「束ね」、高輝度光源化技術を開発する。これらを実現するために以下の3つの研究開発項目を実施している。

- (a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発
（大阪大学、島津製作所、ヤマザキマザック（大阪大学共同実施先））
- (b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発
（島津製作所、大阪大学）
- (c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発
（ヤマザキマザック（大阪大学共同実施先）、大阪大学）

・解決する社会課題と目指すマーケット

今後予想される労働人口の減少、高齢化に対応するため、生産性向上が望まれる。レーザー技術はIoT(Internet of Things)への高い親和性を持ち、また3Dプリンタに代表されるように高い柔軟性を併せ持つため、より効率的な生産技術の確立や小ロット生産での採算性向上の実現が期待される。特に、青色半導体レーザー光源は、従来技術では使用が困難であった金属材料を用いた高品質・高付加価値な新製品開発を可能とするので、産業界に普及するとともに産業界全体に大きな波及効果がある。まずは、急速に電動化の要求が高まる自動車産業や多種の精密樹脂成型を必要とする電気機器産業を中心とした産業界への貢献を目指す。青色半導体レーザー光源は、国内だけではなく、産業用レーザーの世界地図を大きく書き換える可能性を秘めている。

(2) 研究開発目標と根拠

本テーマでは先に示した3つの開発項目を実施し各々開発目標を以下の表のように定めた。

表Ⅲ2-5-4-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発	1 kW 級マルチビーム加工ユニットの開発	集光光強度 1×10^6 W/cm ² を得るためには集光スポット径 300 μm にした場合、500 W × 3 本重畳して得られる 1 kW 級出力が必要となるため。	高輝度青色半導体レーザーを用いた 600 W 級マルチビームユニット光源の開発	銅の溶接を実現するためには集光光強度 1×10^5 W/cm ² 以上が要求される。これを得るためには、スポット径を 300 μm とした場合、600 W が必要のため
(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンパニング技術の開発	ファイバ 1 本当たりの出力 1.5 kW 以上(波長: 400 nm ~ 530 nm) 200 W 機を柏サイトに整備 200 W 機 2 台を(a)のために整備	青色レーザーによる加工技術開発で世界に先行するため最終目標を 500 W から 1.5 kW に修正。 1×10^6 W/cm ² を得るためには 1.5 kW が必要となるため。	ファイバ 1 本当たりの出力 200 W 以上 波長: 400 nm ~ 530 nm ファイバコア径 200 μm 以下	2×10^6 W/cm ² 以上を得るためには 200 W が必要のため。
(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発	レーザーユニット搭載型工作機械の溶接加工において、溶融池の挙動から最適な加工条件をフィードバック制御できるシステムの構築	複合加工機(工作機械+マルチビーム集光ユニット)による高品質な加工の自動化のため。	青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットの工作機械への搭載 溶融池挙動のモニタリング	工作機械(複合加工機)において溶接品質に影響をあたえるパラメータを明らかにするために、溶接プロセス特に溶融地の挙動を明らかにするため。

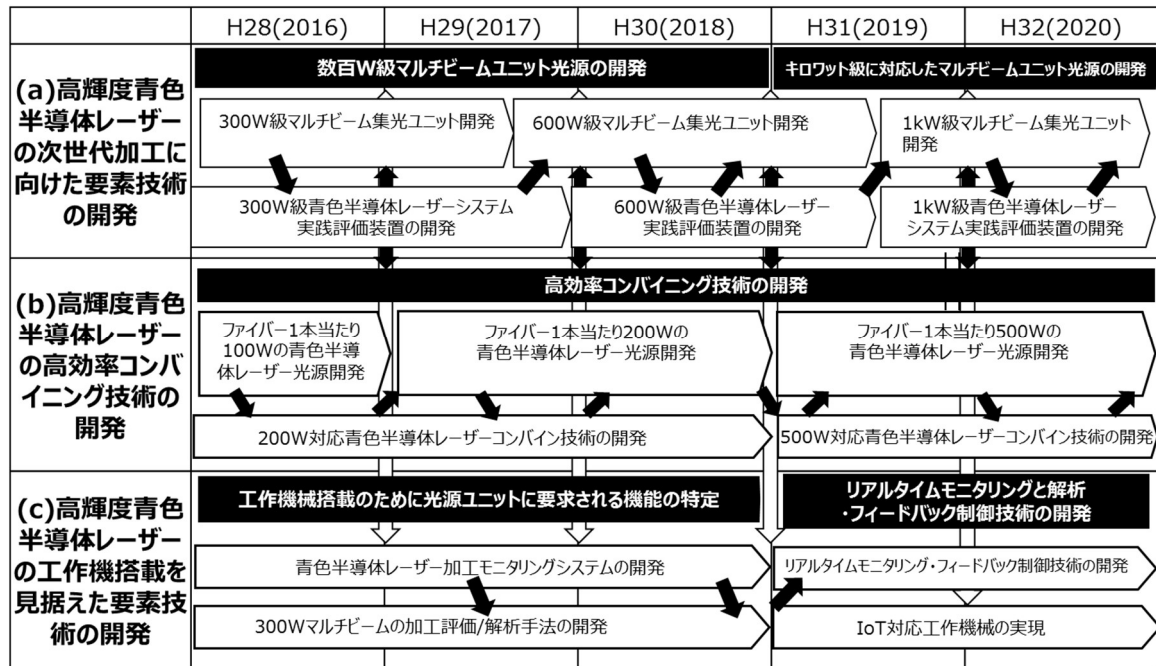
【根拠】上記目標根拠は以下のように求める。

- (a) 青色半導体レーザーによって銅の溶接を実現するためには 1×10^5 W/cm² 以上のパワー密度が要求される。このパワー密度を達成するには、集光スポット径が 300 μm のとき 600 W 以上の出力が必要となるため、1 本当たりの出力が 100 W の青色半導体レーザー光源を 6 本並べて 1 点に集光したときの出力 600 W 級を中間目標値とした。また、集光光強度 1×10^6 W/cm² を達成するには、集光スポット径 300 μm のとき、1 kW 以上の出力が必要となるため、1 本当たりの出力が 500 W の青色半導体レーザー光源を 3 本並べて 1 点に集光したときの出力 1 kW 級を最終目標値とした。
- (b) 集光スポット径が 100 μm の時、 2×10^6 W/cm² を達成するためには 200 W が必要となるため上記目標値を中間目標値として設定した。また、集光スポット径が 400 μm の時、 1×10^6 W/cm² を得るためには 1.5 kW が必要となるため最終目標として設定した。

- (c) 溶接品質に影響をあたえるパラメータを明らかにするためには溶接プロセス、特に溶融地の挙動を明らかにすることが重要と考え、中間目標では溶融地の観察装置（モニタリング）を構築することとした。また複合加工機（工作機械＋マルチビーム集光ユニット）による高品質な加工の自動化に向け、最終目標では溶融池モニタリング装置並びに自動フィードバックシステムの構築を行うこととした。

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを下図に示す。



図Ⅲ2-5-4-1 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術開発スケジュール

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発については本プロジェクトで開発した出力 200 W 青色半導体レーザーを 3 台重畳する 600 W 級マルチビーム集光ユニットを開発した。さらに、出力 500 W 青色半導体レーザー 3 台を加工点で重畳する 1.5 kW マルチビーム集光ユニットを開発した。また(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発については最終目標であるファイバ 1 本当たりの出力 1.5 kW 以上(波長: 400 nm ~ 530 nm)を達成した。また、200W 機 1 台を柏サイトに整備し、200W 機 2 台を大阪大学に整備した。(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発では、マルチビーム集光ユニットを工作機械に搭載済みである。今後は工作機械内で使用する事を考慮したフィードバックシステムの取付の設計、並びに工作機械側でのシーケンスの改良商品化に向けた評価の実施、結果を元にした改良案の作成が課題である。

表Ⅲ2-5-4-2 研究開発項目と達成状況

項目	中間目標	成果	達成度	最終目標へ向けた課題	達成度
(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発	高輝度青色半導体レーザーを用いた 600 W 級マルチビーム集光ユニットの開発	現在 3 ビームで 300 W 級達成 6 ビーム化により達成	○	高輝度青色半導体レーザーを用いた次世代加工技術開発を推進し、マルチビーム集光ユニットからの集光強度 1×10^6 W/cm ² 達成するマルチビーム化が課題	○
(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発	ファイバ 1 本当たりの出力 200 W 以上 波長 : 400 nm ~ 530 nm ファイバコア径 200 μm 以下	現在、100 W 達成 波長多重結合のベンチトップ試験では 200 W 達成 今年度、波長多重結合技術により 200 W モジュールを開発	○	複数の半導体レーザー素子からの光を損失なく多重合成するビームコンバイニング技術の確立が課題	◎
(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発	青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットの工作機械への搭載 溶融池挙動のモニタリング	マルチビーム集光ヘッドの工作機械への搭載済み モニタリング機能搭載済み	○	工作機械内で使用する事を考慮したフィードバックシステム設計、並びに工作機械側でのシーケンスの改良複合加工機としての評価の実施、結果を元にした改良案の作成が課題	○

(5) 成果の詳細

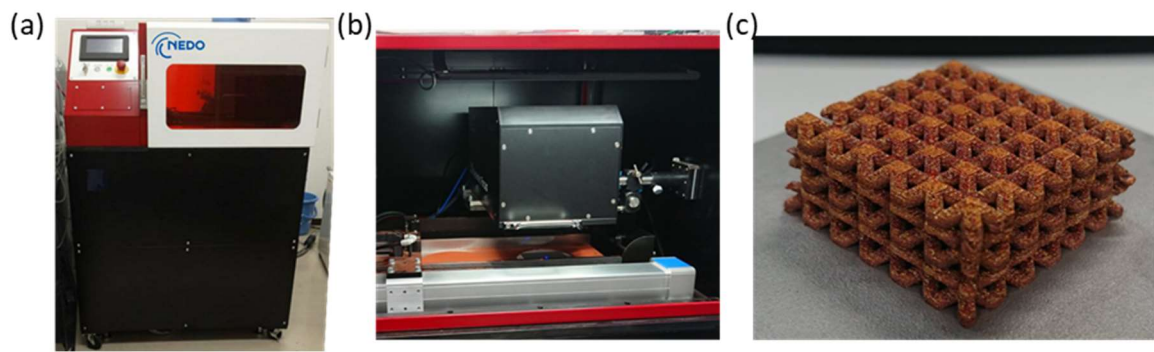
(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発

本プロジェクトで開発した出力 200 W 青色半導体レーザーを 3 台重畳する 600 W 級マルチビーム集光ユニットを開発した。さらに、出力 500 W 青色半導体レーザー 3 台を加工点で重畳する 1.5 kW マルチビーム集光ユニットを開発した。3 台の 500 W 青色半導体レーザーを 1 本のファイバから出射し、総出力 1.5 kW の青色半導体レーザーを用いて純銅板の溶接試験を行った。その結果、厚さ 1 mm の純銅板の貫通溶接をすることができた。

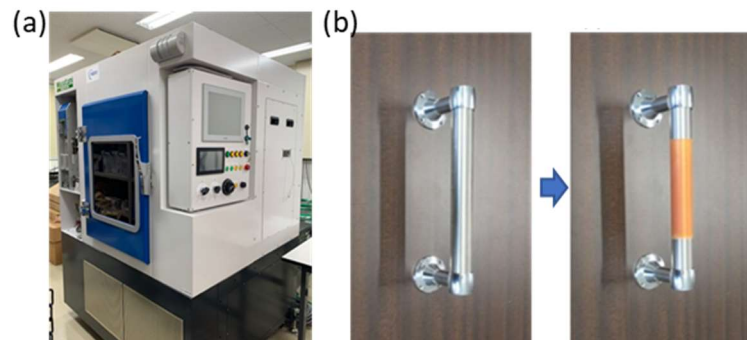
さらに、出力 200 W の青色半導体レーザー光源を用いたガルバノスキャナ方式の SLM 型 3D プリントを設計製作し、これまで難しかった純銅の積層造形を可能にした (図Ⅲ2-5-4-2)。

また、出力 100 W、200 W、500 W の青色半導体レーザーをそれぞれ 6 台まで装着できる加工ヘッドを搭載可能な高速かつ精密クラディングを可能にする精密アディティブ加工機を開発した (図Ⅲ2-5-4-3)。

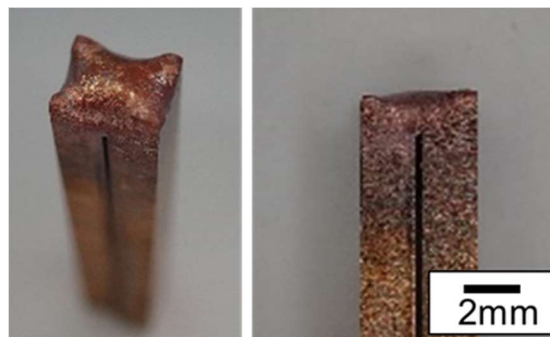
純銅の厚板溶接を実現するために青色半導体レーザーと近赤外線レーザーを同軸に重畳したハイブリッドレーザーシステムを構築し、当システムによって電気自動車用モーターコイルに使用されている平角銅線の高速度溶接が可能となった (図Ⅲ2-5-4-4)。



図Ⅲ2-5-4-2 開発した3Dプリンターの
(a) 外観写真及び(b) 内部写真(c) 造形した純銅のラティス構造



図Ⅲ2-5-4-3 青色半導体レーザー搭載高速・精密アディティブ加工機
(a) 外観写真および (b) ステンレス製バー状取手への純銅クラッディング



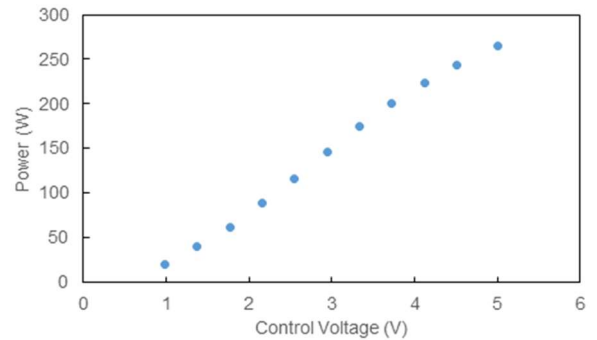
図Ⅲ2-5-4-4 青色半導体レーザーと近赤外線ファイバーレーザーを組み合わせたハイブリッドレーザーシステムを用いた純銅角線の高速溶接

(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発

半導体レーザー素子の出力を1本の光ファイバに高効率コンバイニングする技術を開発し、2016年にコア径:100 μm 、NA:0.2のファイバから100 Wの出力が得られるレーザー光源を開発し、2018年には同100 W機を製品化した。また、ダイクロミックフィルタを用いた波長コンバイニング(Wavelength Beam Combining; WBC)に取り組み、2018年にはコア径100 μm で200 Wに高出力化し、パワー密度 $2.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ を実現した。さらに200 W機5台をコア径400 μm のファイバにコンバイニングし、出力1 kWの高輝度青色半導体レーザー光源を開発した。



図Ⅲ2-5-4-5 200W 級高輝度青色半導体レーザー光源の外観

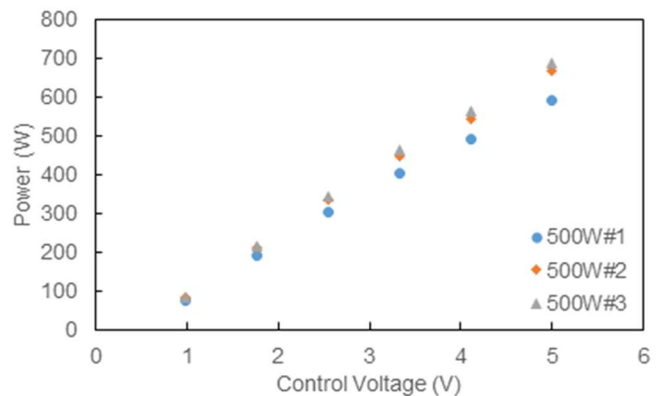


図Ⅲ2-5-4-6 200W 級高輝度青色半導体レーザー出力特性

2019年にはコア径を200 μm とし、レーザー1台の出力から500Wを達成した。新設計により、200W機と比較して2倍以上の数のLDを1本のファイバへ結合しているため、大幅に増加したLDの発熱や偏光コンバイニングおよび波長コンバイニングでの損失による発熱を効率的に処理するために、ヒートパイプを用いた新しい冷却システムの開発も合わせて行った。2020年には厚さ1mm級の実践的な銅加工の実現に必要な $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 以上の輝度と1kWを超える高出力の両立を実現するために、500W機3台をコア径400 μm のファイバにコンバイニングするためのビームコンバイナを開発した。結果として、出力1.5kW、パワー密度 $1.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ を実現し、最終目標を達成した。



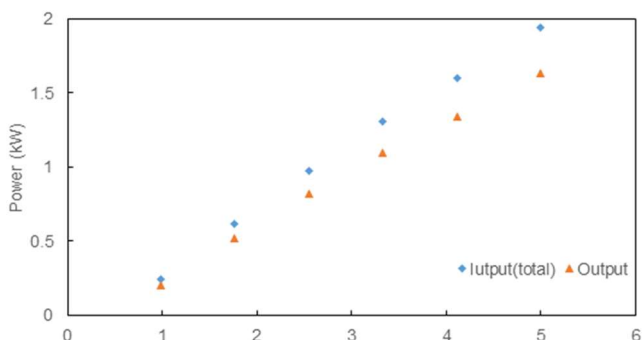
図Ⅲ2-5-4-7 500W 級高輝度青色半導体レーザー光源の外観



図Ⅲ2-5-4-8 500W 級高輝度青色半導体レーザー出力特性



図Ⅲ2-5-4-9 1.5 kW 光源用コンバイナの外観



図Ⅲ2-5-4-10 1.5 kW 光源用コンバイナの入出力特性

また、アウトリーチ活動として2018年は Photonics west で100 W 青色半導体レーザー光源を展示、2019年は OPIE で100 W 青色半導体レーザー光源を紹介し、光とレーザーの科学技術フェアで200 W 青色半導体レーザー光源と、それらを複数台組み合わせたコア径400 μm の1 kW 光源について技術紹介を行った。

2020年度にはレーザー加工プラットフォーム（TACMI コンソーシアム）と連携し、加工データ取得のために200 W 青色半導体レーザー光源1台を柏サイトに設置した。さらに、大阪大学において、ガルバノスキャナ方式のSLM型3Dプリンタによる加工特性評価や青色半導体レーザーとIRレーザーを重畳したハイブリッドレーザーシステムの評価を同時並行で実施するために、200 Wの青色半導体レーザー光源2台を設置した。

(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発

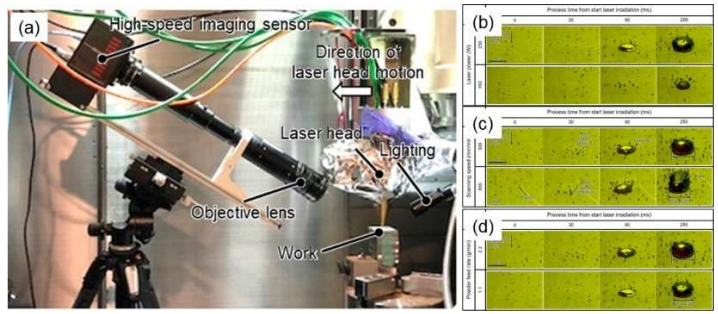
溶融池挙動を観察するための高速度撮影システムを工作機械に搭載した。レーザークラディングの加工現象観察を実施し、加工に影響するパラメータを明らかにした（図Ⅲ2-5-4-11）。

溶融池温度をリアルタイム計測し、レーザー出力にフィードバック（F/B）するシステムを構築して溶接加工への有効性を薄板のビードオンテストにて確認した。（図Ⅲ2-5-4-12）。

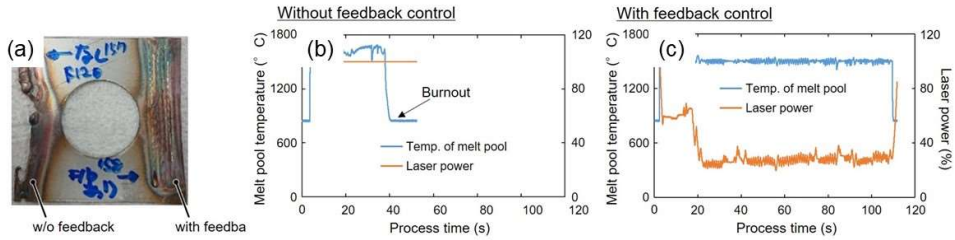
開発した300 W級青色半導体レーザー加工ヘッドを搭載した複合加工機“VARIAXIX j-600/5X”を日本国際工作機械見本市に出展した（図Ⅲ2-5-4-13）。

600W級青色半導体レーザー加工ヘッドを工作機械に搭載し、IoT対応工作機械の足がかりとなる純銅粉末を使った基礎的なクラディング加工データの収集を実施した（図Ⅲ2-5-4-14）。

IoT対応型工作機械の検討を行い、加工中のデータをリアルタイムに取得しデータベース化するシステムのテスト運用を開始した（図Ⅲ2-5-4-15）。AIを使った機械学習は引き続きの開発案件である。



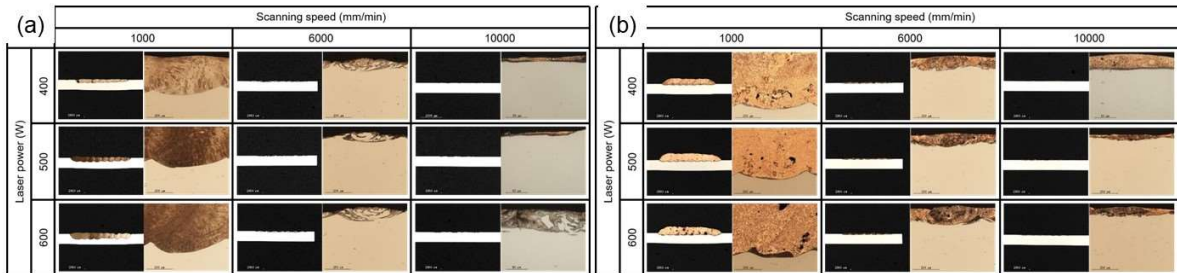
図Ⅲ2-5-4-11 (a) 高速度撮影システム、(b) (c) (d) 観察結果



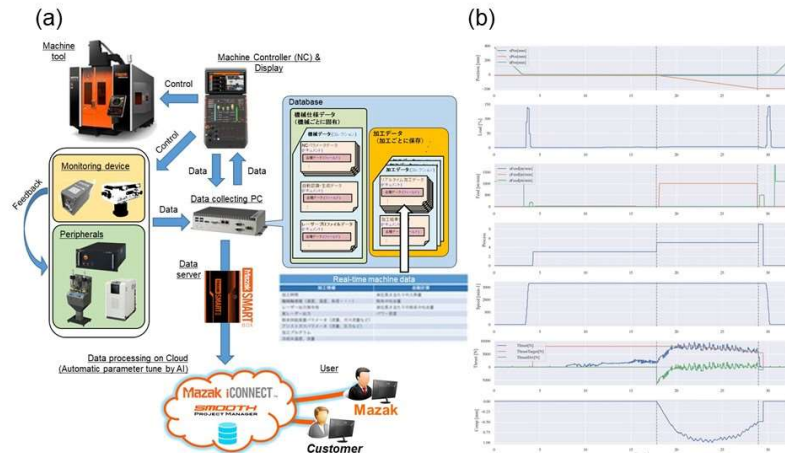
図Ⅲ2-5-4-12 (a) 加工結果、(b) 溶融池温度 (F/B なし)、(c) 溶融池温度 (F/B あり)



図Ⅲ2-5-4-13 (a) 展示会の様子、(b) 展示サンプルワーク



図Ⅲ2-5-4-14 加工結果 粉末供給量 (a) 0.6 g/min、(b) 6 g/min



図Ⅲ2-5-4-15 (a) IoT 対応工作機械、(b) 取得したデータの見える化

(6) 実用化・事業化への取り組み

①青色半導体レーザー開発の事業化への取り組み（島津製作所）

すでに 100 W クラスの青色半導体レーザー光源を製品化しており、より高出力な青色半導体レーザーへの展開を図る予定である。本プロジェクトで開発した 200 W、500 W クラスの青色半導体レーザー光源の信頼性評価を行うとともに、事業部への移管、事業化を行う。200 W 機は 2023 年度、500 W は 2024 年度の製品化を目指す。

②青色半導体レーザーの工作機械搭載に向けた事業化への取り組み（ヤマザキマザック）

青色半導体レーザーを使って、開発過程で得た加工データから加工条件と加工結果を関連付けたデータベースを構築する。構築したデータベースから、適切な加工条件を提案する AI 技術を開発し、工作機械の制御装置（NC）に搭載する。同時に、データベースを拡充するための加工状態やパラメータを取得・監視する技術を工作機械に搭載する。工作機械間、工場間をセキュアなゲートウェイでつなぎ、取得したデータベースや解析データを世界中の生産現場で共有できるシステムを開発する。

（7）知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

最初に、本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方を示す。

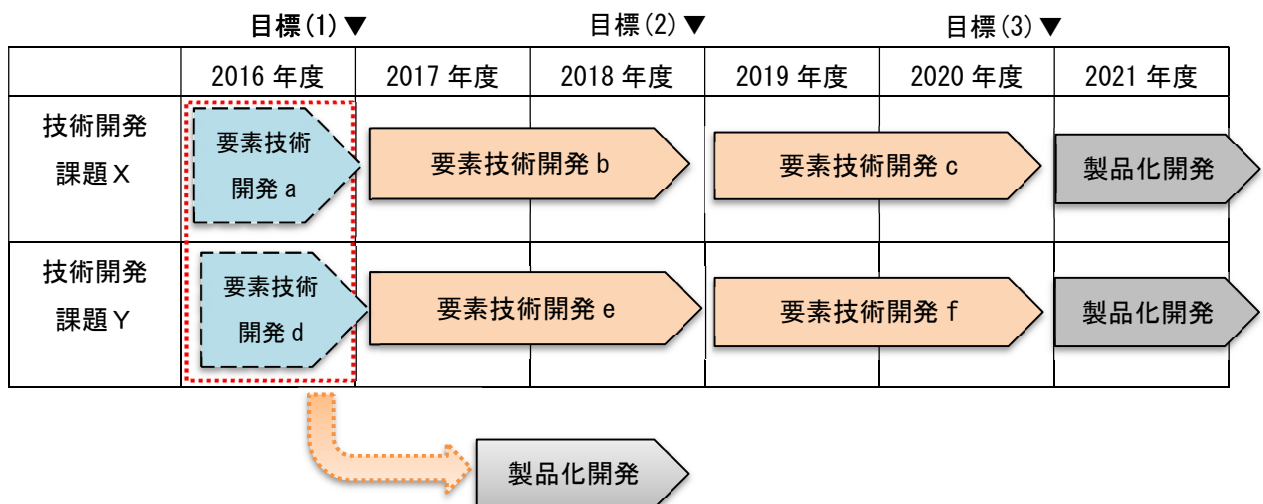
- ・「実用化」とは、当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることをいう。
- ・「事業化」とは、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。

1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

1-1. 実用化・事業化に向けた戦略

本プロジェクトにはレーザーダイオード、光学結晶、レーザー光源、レーザー加工機など、上流から下流までの技術が含まれており相互の交流とアライアンス活動が活発化することが望まれる。また、多種多様なユーザーの期待に迅速に応え、早期の製品化により市場からのフィードバックを得ることが望ましい。このことから、本プロジェクトにおける実用化・事業化に向けた戦略を次のように定めた。尚、実用化、事業化の詳細は項目毎に記載する。

- 1) 垂直統合モデルではなく光源や加工機など各レイヤーで事業化を推進する。
- 2) 研究開発が終了した技術をプロジェクトから切り出しプロジェクト期間中から製品化を後押しする。



図IV1-1-1 製品化の切り出しモデル

2. 研究開発項目毎の実用化の見通しについて

2-1. 研究開発項目①「高品位レーザー加工技術の開発」

2-1-1. 「高品質・大口径波長変換素子の開発」（実施先：大阪大学）

（１）実用化・事業化の見通し

本事業終了後、実施先である大阪大学の関係者が創業した大学発ベンチャー（株）創晶超光にて実用化を進めている。CLBO 結晶は次世代のレーザー加工応用に加え、半導体製造に用いるフォトマスクやウエハ検査光源にも需要があり、深紫外レーザーの高出力化の要求を満たすには高品質（高レーザー損傷耐性）結晶を使用することが装置の安定化につながる。そのため、開発成果を事業化した際の採算性は現時点でも十分見込めると考えている。また、CLBO 素子は消耗品として 1 年で交換することが一般的であり、レーザー加工機、半導体検査装置の台数増加に伴って素子販売量が純増するビジネスモデルとなっている。

（２）事業化までのシナリオ

2016 年に創業した（株）創晶超光では、高品質 CLBO 結晶の製品販売を手掛けており、高品質 CLBO の市場での優位性を示している。現在は重量 400g 級の CLBO 結晶を生産しているが、ユーザーからの高レーザー損傷耐性化への強い要望があることから、共同研究の下で高品質化に寄与する結晶成長の要素技術の導入を進めている。大型化技術についてはコスト・生産性の点で適した重量 1kg 級の結晶成長が行える量産機的设计・導入を進めて実用化検証を行っており、数年後に事業化ができるよう計画している。

（３）波及効果

本事業は次世代レーザー加工（主に半導体後工程）をターゲットとしているが、CLBO 素子で発生する高輝度深紫外レーザー光はシリコンウエハの残留微粒子検査を行う際の散乱観察用照明として前工程でも必要とされている。そのため、研究成果はシングルナノサイズの先端半導体素子を作製する前工程、それらを搭載した革新的パッケージ（後工程）に用いるレーザー加工機への普及も見込めるため、情報通信分野のみならず、自動車や航空機といった半導体を使うあらゆる産業分野、社会生活に影響を与え、2050 年を目標としたカーボンニュートラルに大きく貢献する。

2-1-2. 「短波長・短パルスレーザー装置の開発」（実施先：スペクトロニクス株式会社）

（１）実用化・事業化の見通し

以下のマーケットに向けて実施先において事業化を目指す。

- 半導体・電子機器製造用深紫外ピコ秒レーザー発振器（出力 10W、20W）
- EV 部品（電池、電磁鋼板等）製造用深紫外ピコ秒レーザー発振器（出力 50W）

様々な電子機器の小型化、薄型化、高密度化が進む中で、10 μ m以下の微細加工の需要が急増している。微細加工を実現するための手段として超短パルスレーザーが注目されており、中でも、セラミック、GFRP、GaN等の難加工先端材料や、各種基板への超微細穴開けにおいては、波長300nm以下のレーザー（深紫外レーザー）が求められている。本研究開発に係る深紫外ピコ秒パルスレーザー装置は、短波長（波長266nm帯）、短パルス（パルス幅100ピコ秒未満）、高出力（出力10W以上）という特徴を持ち、上述した市場ニーズに対して、加工品質、及び生産性（加工速度）ともにユーザーの要求に適切に応えるものである。さらに、本レーザー装置のシード光源にはゲインスイッチング方式で駆動するDFB半導体レーザー（以下GS-LD）を採用しており、競合する短パルスレーザーメーカーが採用するモード同期レーザー光源とは異なる。GS-LDの最大の特徴は任意のタイミングで100ps以下の短パルスを発生させられることであり、従来のモード同期レーザーにはない特徴である。モード同期レーザーは数十MHzの固有の周波数で動作しており、加工装置のスキヤナ等と同期した場合数十nsから数百nsの時間ジッタが生じる。一方、GS-LDは固有の周波数をもたないため、時間ジッタは0.05nsと小さくできる。これにより高度化する加工方法への要求を満たす唯一の光源であり、次世代の高速レーザー加工や、多種多様な形状の加工に対して最適な加工を実現できる。半導体・電子機器産業では、特に半導体後工程において高速かつ微細なレーザー加工への期待が高まっている。また、EV関連部品ではモータ内で使用される電磁鋼板を本レーザーで加工すると他の工法と比較して磁気特性の劣化が少ないことを明らかにした。このようにしてレーザー微細加工の新規産業分野への適用拡大を目指す。

（２）事業化までのシナリオ

実施先のスペクトロニクス社においては、平均出力2Wのレーザー装置の販売やデモ機運用に加えて、展示会等の普及活動の結果、ユーザー企業から求められるレーザー仕様などの情報が得られている。用途別に10W級、20W級、50W級と大別し、それぞれについて実用化開発を行い、早期にユーザーへの供給を開始する。また、同社内にテスト加工が可能な環境を構築するとともにユーザーサイトでもテスト加工ができるようデモ機を準備する。これらの活動を通じて高出力深紫外ピコ秒レーザーによるプロセス革新の可能性を示すことによって早期の市場立ち上げを図る。同社はユーザーからのフィードバックを得て最終製品設計に反映し、ユーザーが求める光源仕様を協議し事業化を行う。

（３）波及効果

高出力深紫外ピコ秒レーザーによって加工品質と生産性の両立を実現し、スマート社会の構築に不可欠な半導体デバイスの製造に貢献できるものとする。また、本光源を利用した新プロセスを実現することで半導体・電子機器やEV関連部品の製造能力の向上が期待できグローバルで高い競争力をもつ装置・システムが構築可能となるものとする。

2-1-3. 「短波長・短パルスレーザー加工技術の開発」(実施先：三菱電機株式会社)

(1) 実用化・事業化の見通し

以下のマーケットに向けて実施先において事業化を目指す。

- 半導体・電子機器製造用 DUV・ピコ秒レーザー加工機(出力 20W)
- EV 部品(電池等)製造用 DUV・ピコ秒レーザー加工機(出力 50W)

Ⅲ章の背景・目的に記載のとおり、上記市場の変革期にあたって新たな工法の確立が模索されており、レーザー加工によるブレイクスルーが期待される状況にある。本研究開発の高出力 DUV・ピコ秒レーザーによって既存レーザーでは困難なシングルマイクロメータ領域の微細加工品質と生産性を両立させることによってブレイクスルー技術の生産現場への導入が達成できるものとする。半導体・電子機器産業では、特に半導体後工程において高速かつ微細なレーザー加工への期待が高まっている。

また、レーザー微細加工の多用化が進んでいる半導体・電子機器産業に加えて、これまでマクロなレーザー加工が主体であった産業分野においてもレーザー微細加工への期待が高まっている。急拡大が予想される EV 関連部品を中心に、要求仕様の微細加工技術を開発することによってレーザー微細加工の新規産業分野への適用拡大を目指す。

事業化の体制としては、実施先である三菱電機(株)のFAシステム事業本部での事業家を想定する。半導体・電子機器産業向けのプリント基板穴あけ用レーザー加工機で世界トップシェアを占めており、十分な事業化能力を有する。

開発に関しては、同社の研究所が担当し、大阪大学(創晶超光)、スペクトロニクス株式会社との連携継続を想定するとともに、本プロジェクトと関連するTACMIの活用も想定する。

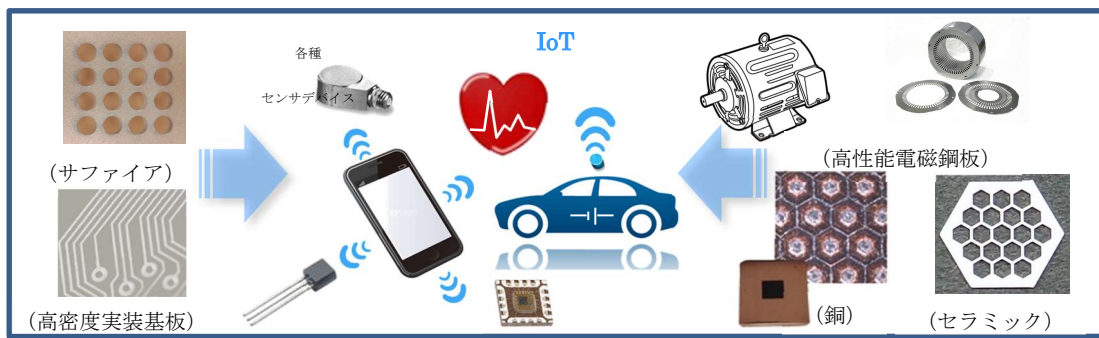
(2) 事業化までのシナリオ

実施先においては、本プロジェクト中からのユーザー連携を含めた活動を通じて高出力 DUV・ピコ秒レーザーによるプロセス革新の可能性を示すことによって早期の市場立ち上げを図る。

プロジェクト期間中の活動を含めて市場要求仕様を早期に絞り込み、加工機システムの設計を行う。想定連携先が供給する高出力 DUV・ピコ秒レーザー光源を試作加工機に搭載してユーザーとも連携した加工評価を実施し、ユーザーメリット明確化の成否によって事業化を判断する。事業化判断に従って製造設備等の生産体制を整え、生産、販売を開始する。

(3) 波及効果

高出力 DUV・ピコ秒レーザーによって加工品質と生産性を両立する新プロセスを実現することによって半導体・電子機器や EV 関連部品の製造能力向上が期待できる。製造技術の革新によって当該産業分野を活性化するとともに、最終製品である電子機器や車の高度化によってスマート社会の構築にも寄与できるものとする。



図IV2-1-3-1 社会実装の波及効果イメージ

2-2. 研究開発項目②「高出力レーザーによる加工技術の開発」

2-2-1. 「高輝度・高効率レーザー装置の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学）

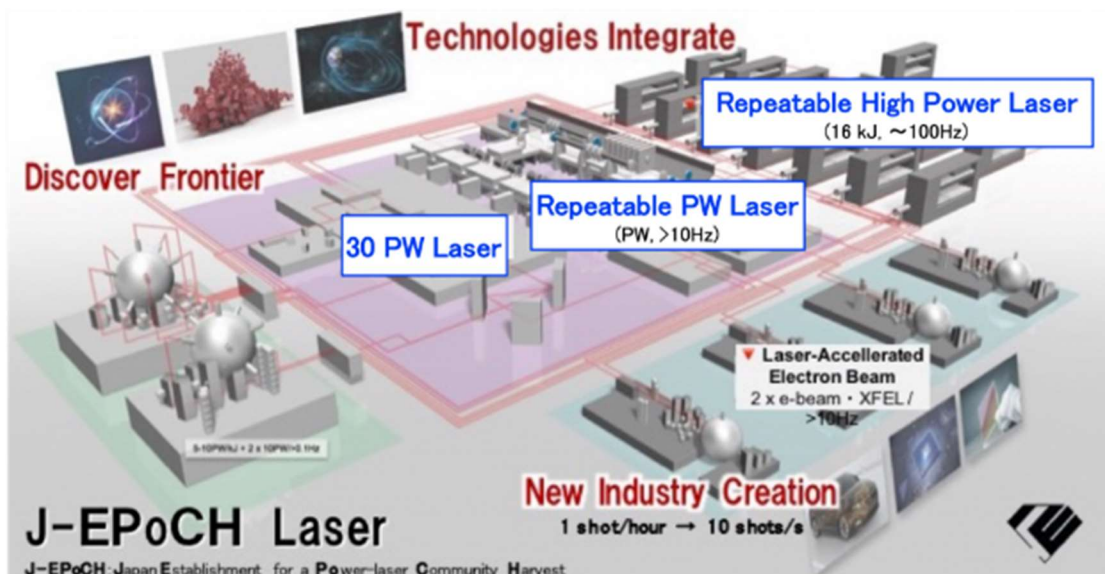
（1）実用化・事業化の見通し

本事業より確立した高出力パルスレーザー技術について、事業後も実用化に向けた開発を継続して行うことで、独自性があり国内外に対して競争力の高い製品を開発することができる。本事業の研究開発項目②-2 で進めていたレーザーピーニング加工技術の開発では、高エネルギーのレーザーパルスの有効性を示すデータが得られつつあり、今後ユーザー評価へ進むことが期待される。また、本事業にて高エネルギーレーザーの波長を 1 μ m 帯から 500nm 帯（グリーン光）へ変換する技術が確立され、レーザーピーニングではグリーン光への要望も強いことなどから、今後更なるニーズの拡大が予想される。本事業にて励起用を開発した LD ユニットについては、現在主流である連続波(CW)出力の LD の直接加工とは一線を画し、更なる高機能な加工が可能なパルス出力の LD として、既存の装置の置き換えのみならず新たな市場の開拓が期待される。

本事業で開発したレーザー技術を実用化・事業化していくためには、ユーザーからの要望を広く集めることができる TACMI コンソーシアムとの連携が重要である。そこで得られた様々なニーズや項目④で作成したロードマップなどを基に製品開発を行うことにより実用化・事業化を進めることができる。

（2）事業化までのシナリオ

表IV2-2-1-1に事業化計画を示す。事業終了後3年度目から市場動向を見極めつつ準じ高エネルギーレーザーの製品化を進める計画である。それに向け、まずレーザー加工の高スループット化において重要となるレーザーの繰り返し周波数を 10Hz 以上に増加させる技術開発を 2021 年度に行う。本事業で開発したレーザーシステムは、レーザーの出力エネルギーに応じた複数のレーザー増幅器を有しており、低出力のレーザーエネルギーから段階的に実用化を進めることで効率的な製品開発が可能となっている。そこで事業後 2 年度目に 10J 級レーザー装置の実用化開発を行い、3 年度目に製品化を行なう。ここでは、並行して進めるレーザー加工技術開発にて連携するユーザーおよびシステムインテグレータと協働してレーザー加工機へ搭載することを念頭に置いて設計を行う。その後、10J 級レーザー装置の製品化と並行し 100J 級レーザー装置の実用化開発を継続して行う。100J 級レーザー装置の製品化に先駆け 4 年度目には 5 倍の加工スループットを実現する 50J 級レーザー装置を製品化し 5 年度目の 100J 級レーザー装置の製品化を目指す。



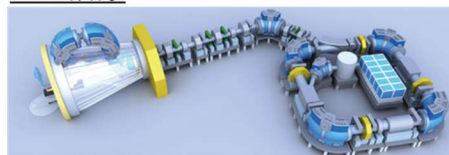
図IV2-2-1-1 大阪大学大型レーザー施設（J-EPoCH）建設計画

アト秒科学



出展：ALFA HP

ガン治療



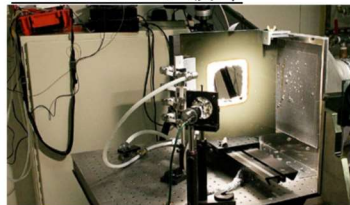
出展：量子科学技術研究開発機構 HP

新材料



出展：理化学研究所HP

コンクリート破碎



出展：LLNL報告書（2006）

図IV2-2-1-2 その他のレーザー関連事業

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度
10J レーザー装置	高繰り返し化	実用化開発	製品化		
50J レーザー装置		実用化開発		製品化	
100J レーザー装置		実用化開発			製品化

(3) 波及効果

100J を超える高エネルギーレーザーは世界的にニーズが高まっており、特に材料分析を行う放射光施設やX線コヒーレント光施設（X線自由電子レーザー施設など）で、次世代の材料開発を行う研究に用いられている。海外では、既に 1kJ 級レーザーによる研究が計画されている。国内でも、理化学研究所播磨事業所にて X線自由電子レーザー-SACLA を用いた研究で 100J 級レーザーが用いられており、材料科学の研究では高エネルギーレーザーの実用化の期待は高い。また大阪大学では、日本の強みを生かした LD 励起レーザー技術をベースとした大型レーザー施設 J-EPoCH の建設が計画されており、本事業で確立したレーザー技術が広く波及することが期待される。更に、重粒子線ガン治療への応用を目指したレーザー加速に関する研究が世界中で行われており、特に日、独、米で資金を投じて研究を進めている。これらの研究では、10~100J 級の高繰り返しレーザーが必要とされており将来的な発展が期待される。

2-2-2. 「高出力レーザーによる加工基盤技術の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学、産業技術総合研究所）

（１）実用化・事業化の見通し

高パルスエネルギーを特長とした高出力レーザー加工技術について、本委託事業ではレーザー誘起の衝撃波に起因するレーザーピーニング加工技術、およびLD モジュールによるレーザー焼入加工技術をユーザー機関が提供するサンプルへ適用することにより実用化した。ユーザー機関との性能評価試験を進めることで、事業化への見通しは中間評価時点に比べて更に高まった。

（２）事業化までのシナリオ

表IV2-2-2-2 にレーザー焼入れおよびレーザーピーニングの実用化・事業化のスケジュールを示す。事業化までのシナリオとして、レーザー装置の製品化とシステムインテグレータと連携してシステム化することで事業化を進めていく。

表IV2-2-2-2 実用化・事業化のスケジュール

	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
レーザー焼入れ	性能評価		システムインテグレータ(SI)との協業		
レーザーピーニング	サンプル評価		実部品にて耐久性		実装試験
				SIとの連携	

（３）波及効果

高出力レーザー加工の実用化が進めば、学理を活用したサイバー空間での加工設計・加工予測とレーザー高い制御性を組み合わせることで、ものづくりの現場にける生産性の効率化が一段と高まり、競争力強化につながることを期待できる。

2-3. 研究開発項目③「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

2-3-1. 「フォトリック結晶レーザーの短パルス化・短波長化」(実施先：京都大学、スタンレー電気株式会社)

(1) 実用化・事業化の見通し

本テーマ研究は、実施者において(A)近赤外波長域のフォトリック結晶レーザーの高ビーム品質・高出力・短パルス動作(パルス幅：10~100 ps、ピーク出力：100W級(当初目標の10倍))を実証すること、(B)青紫色波長域のフォトリック結晶レーザーの高ビーム品質・ワット級動作を実証すること、の2つを目標(POC)に据えて開発を進め、前述した通り、5年間のプロジェクトを通じて、全ての目標を達成した。開発した短パルスおよび短波長フォトリック結晶レーザーは、いずれも既存の半導体レーザー光源と比較して10~100倍の輝度を達成しており、その特長を活かすことで、加工分野のみにとどまらず、それ以外の分野においても、様々な応用への展開が期待される。以下では、各サブテーマの実用化・事業化の見通しを記載する。

(A) フォトリック結晶レーザーの短パルス化

(A-1) 実用化・事業化の戦略および競合技術に対する優位性

本プロジェクトで開発した短パルスフォトリック結晶レーザーは、高ビーム品質動作(=レンズフリーでの狭発散角ビーム射出)を維持しながら、パルス幅：数10 ps以下、ピーク出力：100 W級の短パルス・高ピーク出力動作が可能である。これらの特性は、既存の半導体レーザーの10~100倍のピーク出力に相当し、従来の半導体レーザーには無い圧倒的な性能の優位性を有しているといえる。この優位性を活用することで、短パルスフォトリック結晶レーザーは図IV2-3-1-1に示す様々な分野への実用化が期待される。例えば、自動運転等で必須のLiDAR技術に代表されるセンシング分野においては、アイセーフ条件を満たしつつ、長距離測距(>100 m)・高分解能(<数 cm)な測距を実現することが出来るため、短パルスフォトリック結晶レーザーは、リモートセンシング用の次世代光源として最適な光源であるといえる。LiDAR市場は、自動運転の普及やモバイル機器への搭載に伴い、爆発的に拡大することが予想され、2030年には4.5兆円に達すると見込まれるため、本プロジェクトで開発した短パルスフォトリック結晶レーザーを同分野へと展開出来れば、大きな波及効果が期待される。また、光源のピーク出力を今後さらに増大し、kW級のピーク出力が実現出来れば、レーザーのエネルギー密度が $0.2\sim 2\text{J}/\text{cm}^2$ に達し、多くの材料の加工閾値を超えるため、半導体レーザー単体での直接微細加工・マーキングも実現可能になると期待される。レーザー加工機市場は、レーザー発振器のみで2030年に1兆円に達する見込みであり、フォトリック結晶レーザーの加工分野への展開により、スマート製造の核となる精密レーザー加工装置の大幅な小型化・低コスト化の実現が期待され、我が国発のフォトリック結晶レーザー技術により、加工用レーザーの市場を奪還出来ることが期待される。その他、短パルス・高ピーク出力という特長を活かすことで、バイオイメージング等の研究用光源としての活用も期待される。

(A-2) 実用化・事業化に向けた今後の取り組み・量産化技術を確認する見通し

以上の展開に向けて、現在、複数の光源製造企業との連携を開始しており、レーザーの設計手法や作製技術についての技術移転を進めている段階である。また、将来の量産化に向けて、上記の光源製造企業と連携して、ナノインプリント技術等によるフォトニック結晶の量産化技術の確立や、歩留まり評価等の信頼性評価に着手している。今後は、京都大学において、さらなる高ピーク出力化 (>kW) のための研究開発を継続して行うとともに、光源製造企業への技術移転および量産化技術の確立に対する取り組みを加速化していく。さらに、LiDAR メーカーや加工機メーカー等のユーザー企業との連携も強化し、短パルスフォトニック結晶レーザーの提供（実用化）を通してシステム開発を並行して進めていく。以上の取り組みを通じて、まずは 100 W 級のピーク出力が要求されるセンシング分野において短パルスフォトニック結晶レーザーの事業化を行い、次に、kW 級のピーク出力のレーザーを加工分野へと展開していくことを目指す。

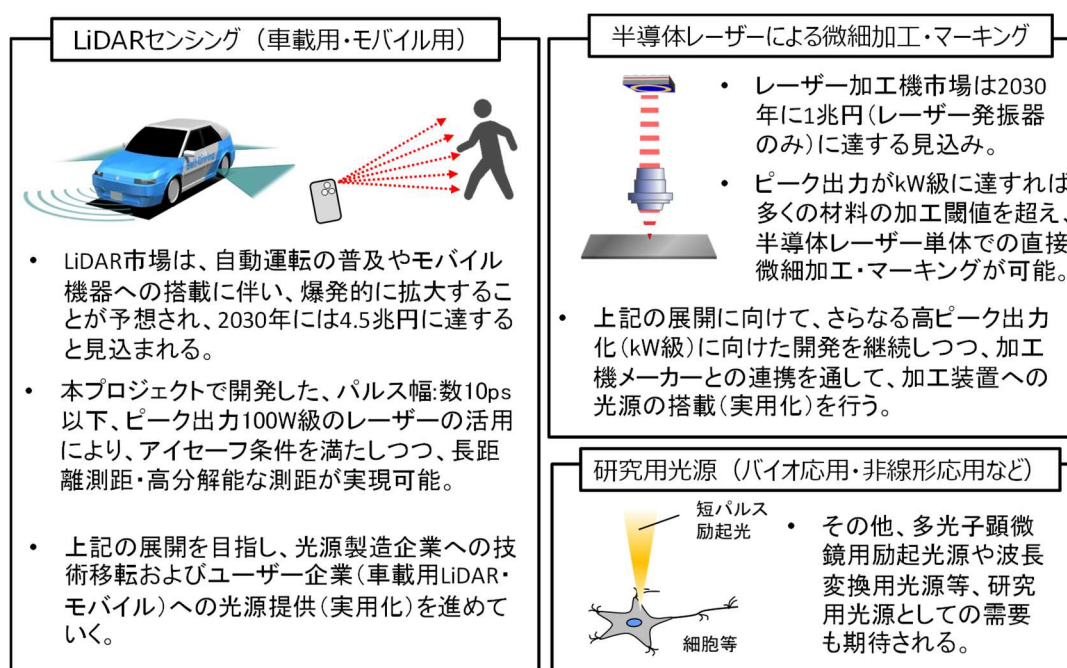


図 IV2-3-1-1. 短パルスフォトニック結晶レーザーの実用化・事業化の見通し

(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化

(B-1) 実用化・事業化の戦略および競争技術に対する優位性

本プロジェクトで開発した短波長フォトニック結晶レーザーは、青色帯域において、回折限界に近い高ビーム品質動作 ($M^2 \sim 1$) を維持しながら、ワット級の出力で動作可能である。これは、既存の GaN 系面発光半導体レーザーの 10~100 倍の輝度に相当し、従来の青色面発光半導体レーザーには無い圧倒的な性能の優位性を有している。これらの特長を活かすことで、短波長フォトニック結晶レーザーは図 IV2-3-1-2 に示す様々な分野への展開が期待される。例えば、青色帯域のレーザー光源の有力な応用の 1 つとして、水中センシングが挙げられる。水中センシングは、国内では特に建築業界からの要望（橋脚検査等）が大きく、そこでは水中での吸収が少ない青色波長の狭角レーザーが必要とされる。本プロジェクトで開発した GaN 系フォトニック結晶レー

レーザーを利用することで、センサユニットの大幅な小型化が実現可能となり、防水シーリング面積の減少による大幅なコストメリットが期待される。また、別の展開として、スタンレー電気が得意とする、車載用光源への展開、特に、配光制御ヘッドランプ（ADB ヘッドランプ）への展開も期待される。国内市場規模は 2025 年に 6700 億円に達すると予想されており、フォトニック結晶レーザーの高輝度動作を利用することで、製品の大幅な高解像度化・高効率化・小型化が実現出来ると期待される。さらに、加工分野への展開においては、今後レーザーのさらなる出力向上が実現すれば、ファイバーレーザーが存在しない青色帯域において、最適な加工用光源として利用出来ることが期待される。具体的には、W 級～10W 級の青色光源は、レーザーはんだ・マーキング・レーザーアニーリング等の応用への展開が可能であり、さらなる高出力化（100W～kW 級）が実現すれば、難加工材料（銅・CFRP）の加工や金属 3D プリンターへの展開が期待される。

(B-2) 実用化・事業化に向けた今後の取り組み・量産化技術を確認する見通し

上記の戦略に従い、今後は GaN 系フォトニック結晶レーザーの特長を活用して、開発レベル（出力、輝度）に合わせた応用に、順次展開していく。既に、上記のセンシング分野への展開に向けては、国内関連企業との打ち合わせを開始しており、今後は、各応用分野において、短波長光源のサンプル提供（実用化）を進めていく予定である。その際、想定している各用途で共通で必要となる信頼性確立、量産性技術確立を進めたいうで、用途に合わせて製品をリリースしていく。具体的には、京大の持つフォトニック結晶技術を、スタンレー電気に順次移管し、必要な装置導入を行うとともに、高スループット・ロバスト性に優れたリソグラフィ技術について開発を進めていく。また、スタンレー電気にて、他の窒化物デバイスで培った信頼性改善ノウハウを本研究にも投入しつつ、市場の要求に見合う信頼性を確立する。さらに、本プロジェクトで得られた知見をさらに深化させ、素子単体で 10 W 級あるいはそれ以上の出力を実現しつつ、アレイ化により 100 W～kW 級の出力を実現し、上述の様々な加工応用へと展開していくことを目指す。

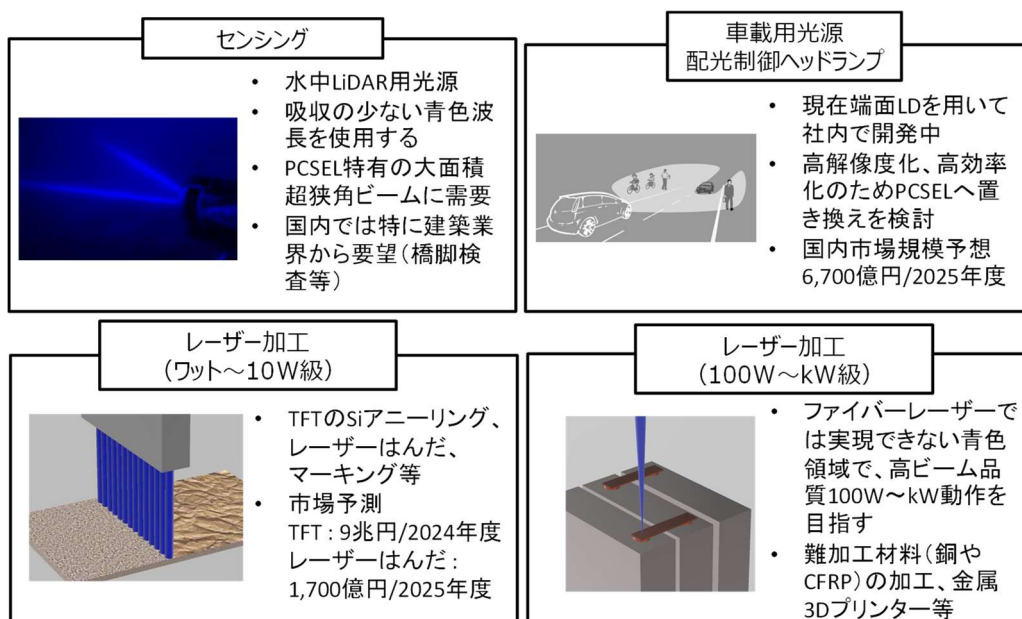
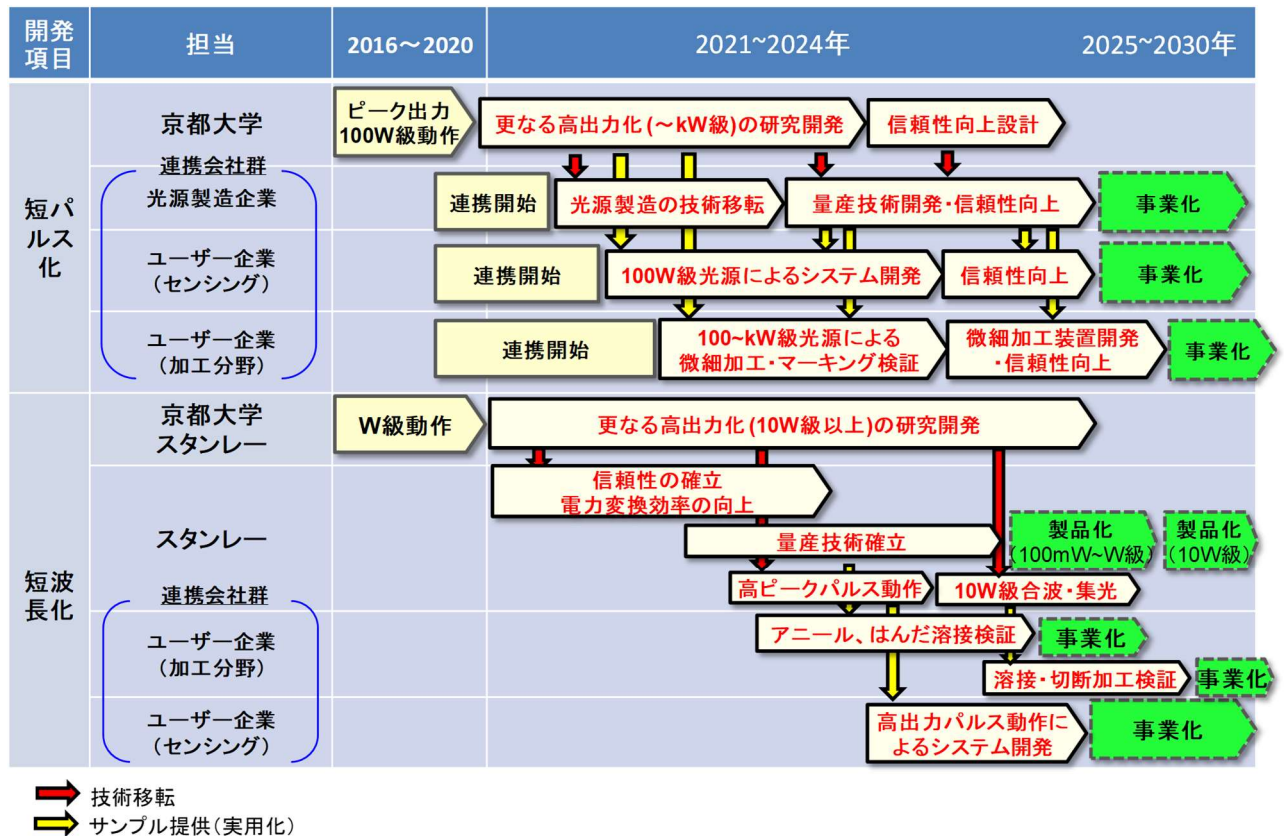


図 IV2-3-1-2. 短波長フォトニック結晶レーザーの実用化・事業化の見通し

(2) 事業化までのシナリオ

前項で記載のように、短パルス・短波長フォトニック結晶レーザーは、加工分野およびそれ以外の分野への展開が期待される。表 IV2-3-1-1 に、短パルス・短波長フォトニック結晶レーザーの実用化・事業化のスケジュールを示す。表に記載した通り、各項目について、光源製造企業やユーザー企業と密に連携しながら、技術移転および量産化体制の確立を行い、2025~2030年での事業化を目指していく。

表 IV2-3-1-1. 短パルス・短波長フォトニック結晶レーザーの実用化・事業化スケジュール



(3) 波及効果

本テーマで開発した短パルス・短波長フォトニック結晶レーザーは、上に記載した加工応用・センシング応用の他にも、様々な産業への波及効果が期待される(図 IV2-3-1-3)。例えば、短パルス・高ピーク出力なフォトニック結晶レーザーは、通常のフォトニック結晶レーザーと比較して、波長変換等の非線形効果の大幅な増大が可能となるため、生命科学分野で必須となる2光子励起顕微鏡用の小型光源をはじめとして、様々な研究用光源として魅力的である。また、青色帯域の短波長フォトニック結晶レーザーについては、1回の波長変換で紫外光の発生が可能となり、殺菌等の医療分野への応用も期待される。以上のように、短パルス・短波長フォトニック結晶レーザーは、レーザー微細加工・マーキング・リモートセンシング(LiDAR)・照明・医療・美

容・イメージング等の非常に多岐に亘る分野において、大きな波及効果をもたらすことが期待される。



図 IV2-3-1-3. 短パルス・短波長フォトニック結晶レーザーの波及効果

2-3-2. 「高品質 AIN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LD の研究開発」 (実施先：理化学研究所、山口大学)

(1) 実用化・事業化の見通し

深紫外 LD、ならびに、深紫外 LED は、レーザー加工機、殺菌・浄水、医療、樹脂硬化加工、印刷、塗装、コーティング、高密度光記録、バイオ産業、農業用途などの応用分野で実用化が期待される。具体的には、レンズ集光系と組み合わせたレーザー加工機用深紫外 LD、冷蔵庫、浄水器、エアコン、ポットなどに搭載する殺菌用 LED、樹脂硬化加工機器、3D プリンター、深紫外 DVD プレーヤー、ナローバンド UVB 免疫治療（皮膚治療）用深紫外 LD、イチゴ栽培病害防止ランプ（植物免疫作用機器）などが候補としてあげられる。深紫外 LD・LED チップとしての製品は、すでに UVCLD の販売実績のある半導体素子メーカーに理研の技術を移転し、事業化することで販売が可能となる見通しである。また、深紫外 LD・LED を用いた上記の家電製品等は、国内国外の家電製品メーカーからの製品出荷が想定される。

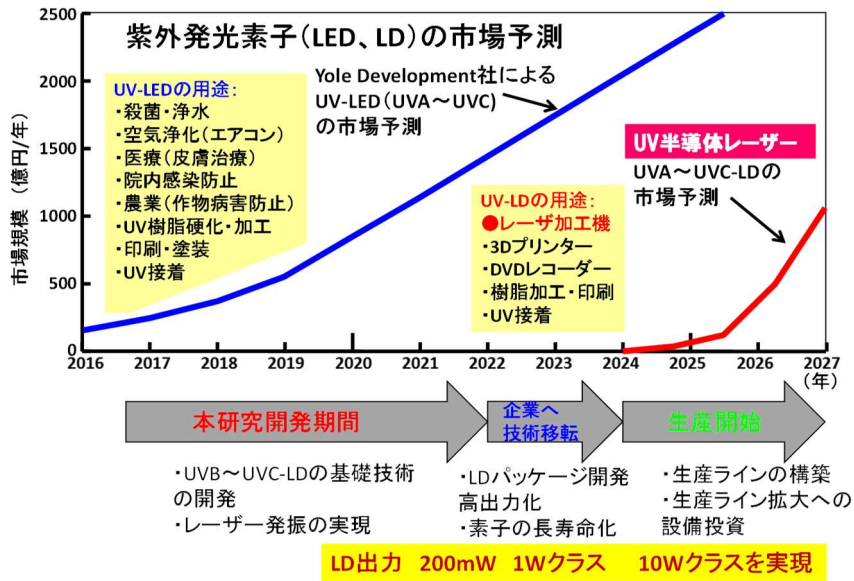
(2) 事業化までのシナリオ

本テーマ研究で開発した、高品質 AIN、AlGaIn 結晶成長技術ならびに、UVB-UVC 深紫外 LD・LED の基盤技術を、実施者から半導体素子開発関連の企業に技術移管することにより、実用化・事業化が考えられる。事業化するにあたって、窒化物半導体を用いた高出力 LD、深紫外 LED をすでに事業化している企業が、技術移転・事業化までの時間と費用を考慮すると好ましいと考えられる。

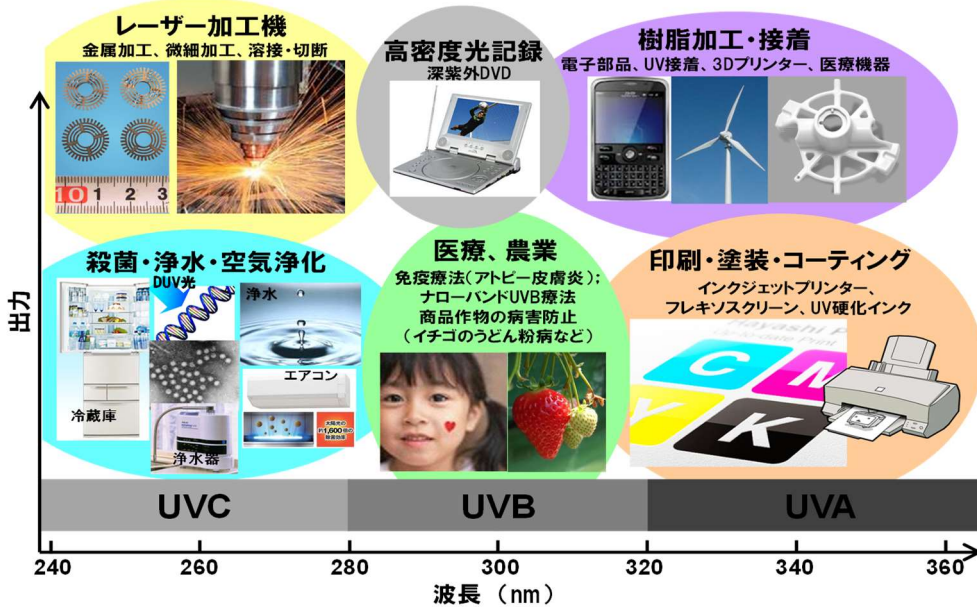
本開発期間中に、高品質 AIN、AlGaIn 結晶成長技術ならびに、UVB-UVC 深紫外 LD・LED の基盤技術を開発し、研究を延長してレーザー発振を達成する。その後、2年程度の間には 1W 程度の深紫外 LD を開発すると共に、企業へ技術移転を経て事業化が可能になると想定される。企業への技術移転では、事業化の準備として、LD パッケージ開発と放熱の最適化による高出力化、素子寿命 10000 時間を達成する必要がある。また、アレイ化により高出力化を行う。それらの開発を経て 2025 年頃に 10W クラスの深紫外 LD の生産出荷が可能になると考えられる。

(3) 波及効果

深紫外 LD、ならびに開発途上で実現される深紫外 LED は、レーザー加工機、殺菌・浄水、医療、樹脂硬化加工、印刷、塗装、コーティング、高密度光記録、バイオ産業、農業用途などの応用分野で実用化が期待され、深紫外 LED までを含めると年間 2000 億円（2025 年）を超える市場規模が期待できる。



図IV2-3-2-1 深紫外LDの実用化・事業化へのシナリオの概略



図IV2-3-2-2 成果の波及効果：深紫外LD、LEDの応用分野の広がり

2-3-3. 「高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）

本項目は、2018年度まで、研究開発項目③-3「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の実用化の見通しの詳細は、2-5-1. 「高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）にまとめて記載する。

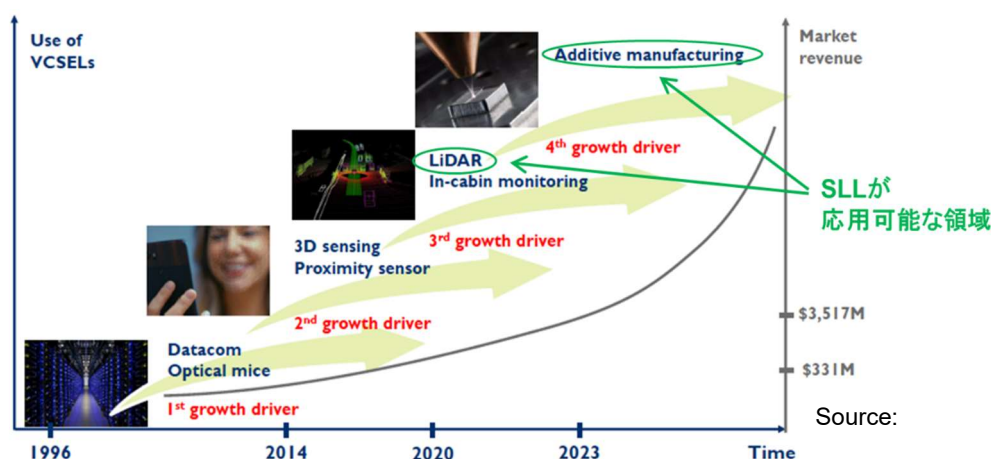
2-3-4. 「高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発」（実施先：東京工業大学、富士フイルムビジネスイノベーション株式会社(旧富士ゼロックス)－再委託先 産業技術総合研究所)

(1) 実用化・事業化の見通し

レーザー加工用光源は既に世の中に広く流布しているが、低消費電力で、小型で可搬性があり、かつ信頼性の高い光源はまだ世の中に普及していない。水道管など老朽化による設備の破損のニュースも頻繁に目にするようになっており、今後既存設備の保守・補修の必要性がますます高まっていくと予想される。本研究テーマで

は、この課題解決に向けて、従来技術では困難だった高ビーム品質と高出力とを両立した光源を、標準的な面発光レーザーの構造をベースに比較的シンプルな方法で実現するものである。他の面発光型の光源と比較しても煩雑なプロセス工程を必要とせず、比較的安価に製造できる利点もある。本事業研究で試作した光源モジュールの光出力密度は、1本のレーザー素子と集光光学系を搭載したもので、75kW/cm²まで到達したが、加工分野に普及させるためには、さらに光出力密度の改善を図る必要がある。引き続き大学の協力を得ながら、W級の光出力が得られるSLLを種光源として集積した増幅光源の開発も進め、出力向上を図っていく予定である。

図IV2-3-4-1に面発光レーザーの産業応用例を示す。本新型光源は現状の光出力であっても、LiDARなどセンシング領域向けの光源として展開が期待できる。本新型光源に特有の1次元状のラインビームを1次元スキャンすることで、測距動作の長距離化と高速化を両立したLiDARが実現可能となる。1次元スキャン方式はFlash方式よりも長距離、かつ2次元スキャン方式よりも高速という利点があり、さらに、ビーム掃引機能を生かせば、非機械式のLiDAR光源も実現可能と考えられる。よって、加工分野への展開の前から、本事業研究で試作した光源の光出力レベルでも適用可能となるLiDAR用光源として実用化に向けた検討を進めていく。



図IV2-3-4-1 VCSELの産業応用と市場

(2) 事業化までのシナリオ

本新型光源は、加工応用にむけては、1チップあたりの光出力の改善が必要な状況にあるが、前章で述べたとおり、他の市場へも展開できるため、段階的に商品化していくことを考えている(図IV2-3-4-2)。これまで世の中になかった新型光源であり、比較的low出力(～2W、現行の面発光レーザーの光出力に比較すれば約1000倍)の分野でのモジュール単体の商品化を実施し、市場への認知を高めることが必要である。まずLiDAR用光源モジュールとして商品化をすすめるながら、SLLチップの大出力化を行い、加工用大出力モジュールへ展開する。加工領域の展開については、図IV2-3-4-3に示す応用用途を参考にしながら進めていく。

SLLチップモジュール(LiDAR市場 ～2000億円)：

中距離向けLiDAR光源としての展開を図る。本研究テーマで、駆動モジュール設計を実施済みであり、nsecオーダーで駆動できるドライバ設計を終え、矩形の良好な波形が得られていることを確認済みである。試作した駆動ドライバの集積化を進め、カメラに搭載可能な極小型モジュールへと仕上げていく。

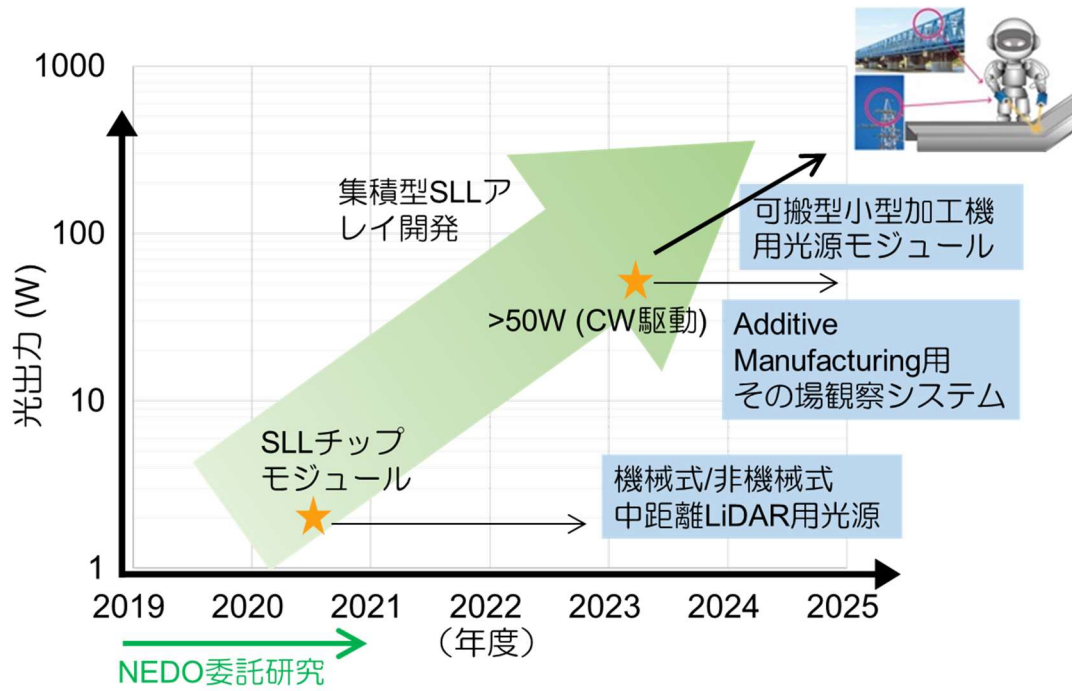
MEMS等を用いた機械式LiDAR用光源モジュールの商品化を行いつつ、非機械式光源モジュールのモジュール設計等実施していく。2023年ごろの市場導入を目指す。また、本新規光源モジュールを使った産総研との加工実験で、樹脂材料の加工部周囲が土手のように盛り上がった結果から、産総研に示唆された凹凸知覚特性を用いるマーキング手法についても検討していきたい。

Additive Manufacturing用その場観察システム：

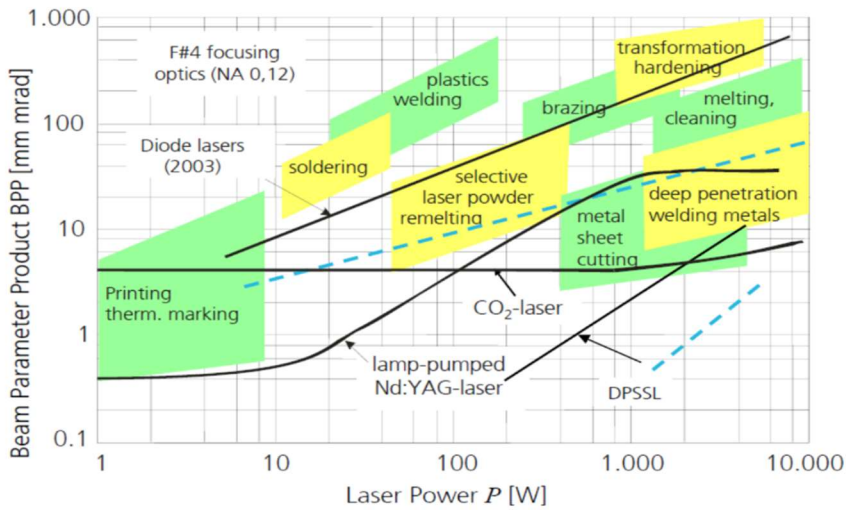
加工工程においては、材料へのダイレクトな加工品質を高めることだけでなく、より精密な加工においては、品質をその場観察で確認できるようなモニタリング機能も必要になると考えられる。安価で大出力が得られる新型光源を使った、その場観察システムの実現性を検討し、2025年ごろの実用化を目指す。

可搬型小型加工機用光源モジュール(スポット溶接市場 ～1000億円)：

主に屋外の建築物の補修・保守を目的に、持ち運びができる小型の加工用光源モジュールを実用化する。本新型光源は、シリンドリカルレンズアレイと集光レンズといった、より簡便な光学系で良好なビーム品質を保ちながら集光させることができることは既の実証済みである。また、複数の面発光レーザー素子を面状に間隔をあけて配置でき、端面型のようにスタック構造にする必要がないので、冷却機構を1台で補えると予想している。これらは価格と総体積の低減につながる。2023年をめぐりに、SLL集積化光源の光出力を向上させるとともに、数本のアレイ化実装が可能なモジュール設計を進め、100W～数kWオーダーの小型可搬型の加工用モジュール揃えていく。



図IV2-3-4-2 実用化・事業化に向けた商品化イメージ



(出典)
 “Laser Sources Solid State Lasers – Overview” P.11
 Dieter Hoffmann
 Workshop: Laser technology and optics design
 Fraunhofer ILT Aachen, 4 – 6 November 2013

図IV2-3-4-3 光出力・BPP と加工応用例の関係

(3) 波及効果

レーザー加工装置の光源部が小型になることで、加工装置設置のための十分な面積を確保できなかった事業所や工場等での屋内への導入も見込まれる。安価な加工用光源の登場は、加工装置組み立ての技術を有していながら、光源モジュールが高価すぎるために導入をためらっていた中小企業へのハードルも下げる。これによって、小型レーザー加工装置の開発が加速し、携帯型レーザー加工装置の実現へ繋がれば、欧米が主力とする据え置き型のファーマーレーザー加工装置が導入できない領域、本研究で最も効果を発揮すると思われる橋梁や高速道路の補修などの新領域への展開が加速される。

本新規光源には、従来製法で、高ビーム品質と大出力が両立するだけでなく、ライン状ビームを出射するという他光源にない特徴を有している。図IV2-3-4-1に示した通り、加工分野だけでなく新たな市場への展開が期待できる。

2-3-5. 「高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発」（実施先：東京大学―再委託先 株式会社QDレーザ、三菱電機株式会社）

（1） 実用化・事業化の見通し

高出力量子ドットレーザーの市場、利用の形態として、実施者では以下を想定している。

（ア）金属の切断・溶接・積層加工（レーザーマクロ加工）

想定ユーザー：自動車・自動車関連部品メーカー、ジョブショップ等

（イ）光励起レーザーの励起用光源

想定ユーザー：電子部品メーカー他

レーザーを用いた生産装置市場は年率 8% 程度で成長し、産業装置としてのレーザーの重要度が増している。今後さらにレーザー加工の利用は伸長すると予測され、産業用エネルギー削減の観点からもレーザー装置の消費エネルギー低減が求められている。特に消費電力の大きい金属切断・溶接を代表とするマクロ加工市場においては、効率 10% 程度の CO₂ レーザーや固体レーザーに替えて、効率 30% 程度のファイバザーの導入が進行している現状にある。さらに 2030 年に向けた次なる技術シフトを考えると、全レーザー光源の中で最も効率の高い半導体レーザーの活用が予測され、各国で高効率・高出力半導体レーザー活用技術の開発が進められている。

本研究開発から高密度量子ドット形成、高出力量子ドットレーザーの実現および周辺要素技術の研究開発を行うことで、結晶成長技術で InAs 量子ドットを 2.5 倍以上の高体積密度化し、設計・プロセス開発では量子ドットレーザーの量子井戸レーザーからの優位性を確認した一方実装要素技術開発で商品化に向けた冷却・集光技術を確認した。上記の成果で、プロジェクト開始時に目標とした量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm²、量子ドットレーザー集積出力 100 W（中間報告以降 10 W からに設定）、電流-光出力変換効率 60% を達成した。

これらの成果で高出力かつ従来の半導体レーザーと比較しても高効率の特徴を有する量子ドットレーザーが実証されたため、社会のスマートエコシステム化を目指す世界的な動きの中で、究極の省エネルギー性能を有する加工用高出力レーザー光源として事業化可能と考える。

（2） 事業化までのシナリオ

本研究開発において従来技術との明確な差別化、将来技術としての可能性が実証されたため、次のステップとして、実施者において高出力量子ドットレーザーを基軸とした実用化フェイズの開発（期間 3 年程度）に繋げることを想定している。実用化開発の成功の暁には、競争力のある半導体レーザーチップ、加工用レーザー光源、レーザー加工装置として事業化を図ることになる。

（3） 波及効果

(1)の項にも記載したように、本テーマは次世代のものづくりの基盤技術となることによってスマート社会システムの構築に寄与する技術となる。具体的には、下図に示すように、次世代ものづくりにおいて重要な役割を担うレーザー加工の消費電力を 1/2 に低減することが期待される。



図IV2-3-5-1 量子ドットレーザーの普及による省エネ効果

2-3-6. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）

本項目は、2018年度まで、研究開発項目③-6「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の実用化の見通しの詳細は、2-5-2. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）にまとめて記載する。

2-3-7. 研究開発項目③-7「超高速利得スイッチ LD をシードとするレーザー加工用光源の開発」 (実施先：国立大学法人東京大学)

(1) 実用化・事業化の見通し

超高速利得スイッチ LD 開発では、最終目標として掲げた 10ps 以下のパルス幅の利得スイッチパルス発生が達成され、最短で 15ps までの市販品を超える性能が得られた。市場からの早期実用化の要望も届いている。本事業において分散型協創体制も構築されているので、早期に実用化・事業化を進めることが必要と感じている。

(2) 事業化までのシナリオ

ファブレス生産を行う中核拠点となる会社を立ち上げ、そこで実用化・事業化に必要な体制の構築を進めることとした。

ただし利得スイッチ LD の高度化については、まだまだ伸びしろが大きい。大学において研究を継続する必要がある。

超高速利得スイッチ LD は、核心は LD 素子部分の性能であるが、その素子だけの状態だと極めて使い難く、電源やプリアンプを組み合わせたモジュール化までを行わなければ、製品として普及しづらい。NEDO プロジェクトでは、素子の開発試作は進展したが、実用的なモジュールを設計し、実際に試作するところまで到達しなければならない。モジュール化を進めるためには、そのための資金調達が必要である。巨大設備投資を行わないファブレス生産とはいえ、半導体レーザー光源装置の開発なので、資金調達が必要である。

(3) 波及効果

本 NEDO プロジェクトでは、レーザー加工用シード光源としての開発を進めてきたが、利得スイッチ LD のターゲット市場としては、バイオメディカル分野市場がある。利得スイッチ型ピコ秒半導体レーザーシード光源を、レーザー多光子顕微鏡・超解像顕微鏡に応用すれば、3次元高分解能観察や治療ツールとしてバイオメディカル分野に役立つ。この他に、利得スイッチ型ピコ秒半導体レーザーシード光源は、新しい光科学技術や分光分析技術の一つとして、新市場を生み出す期待がある。これまでの超高速レーザー光技術は、光源がモード同期固体レーザー技術に強く依存していて、現状では社会に出ていないが、大学研究室には、長年の超高速光科学技術の蓄積がある。膨大な数の研究者や論文もある。超短パルスレーザーの半導体化が達成されれば、大学内に蓄積された潜在技術を社会へ送り出し、新規市場を生み出すことができると期待される。利得スイッチ半導体レーザー技術は、エレクトロニクス制御電気パルスに応じて光パルスを出力してファイバー・フォトンクスへ橋渡し・融合する重要な技術である。それをメカニクス・ロボティクスと融合すれば光加工・バイオメディカル・分光分析装置システムが生まれ、そこから得

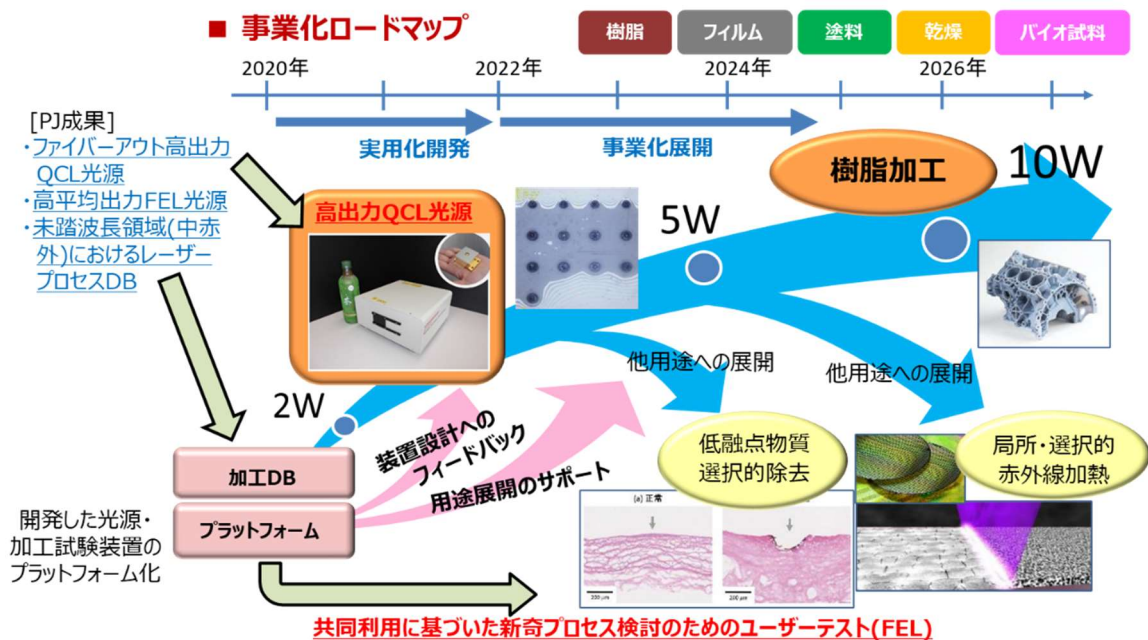
られるデータをデータ科学・AI 技術と融合して、エレクトロニクスへフィードバックすれば、知識集約型社会の先進技術融合のループが完成する。新規市場が生まれ成長することの期待は、このような視点にも基づいている。

2-3-8. 研究開発項目③-8「分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発」（実施先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構—再委託先 東京理科大学、浜松ホトニクス株式会社）

(1) 実用化・事業化の見通し

本委託事業の取り組みで開発した高出力 QCL 光源モジュールは出力 2W 級で実用化開発を進め、市場ニーズに合わせて更なる高出力化、波長バリエーションの拡充を進める。加えて、中赤外領域でのレーザー光誘起現象の理解はまだ十分とは言えないことから、QCL や FEL によるレーザー加工プロセスに関する知見や技術を集積しデータベース化していくことも並行して進めていく。加工プラットフォームやデータベースを通じて、中赤外の新しいレーザー光源による加工技術の普及推進に貢献し、実用化・事業展開を図る。

(2) 事業化までのシナリオ



図IV2-3-8-1 事業化に向けたイメージ

まずは波長 $8.6\mu\text{m}$ 、出力 2W 級の光源モジュールで実証試験を進め、加工プロセスデータを収集する。加工対象としては難加工性材料として知られる PTFE などのフッ素系樹脂が考えられる。フッ素系樹脂は化学的に安定であることから自動車・航空・宇宙といった輸送系分野から電子部品、医療関連部品など幅広い分野で使用されており、フッ素系樹脂市場は 2019 年の 77 億ドルから 2027 年までに 117 億ドル、CAGR6.5% (出典：<https://prtimes.jp>) に達すると予測されている。加工プロセスデータを素材メーカーや部品メーカーと共有し、実用化・事業化を進める。また、並行して大学、公的研究機関において分子振動の特性による加工特性の変化や反応生成物の分析などを進め、中赤外領域でのレーザー光誘起現象の理論的バックグラウンドを構築する。

(3) 波及効果

これまでのレーザー加工機ではカバーされていない中赤外領域のワット級高出力レーザー光源の誕生により、物質の分子振動を利用した高効率レーザー加工という新たな加工手段が加わったということで、今後様々な分野で利用が見込まれる樹脂材料への加工応用が期待される。また、加工以外の展開としては、血栓や下肢静脈瘤の溶解といったレーザー治療や環境計測、空間光通信など様々な分野への応用も可能になると考えられる。特定の分子振動による光熱効果を選択的に効率よく励起できるようになったことから、フォトサーマル顕微鏡やイメージング用の励起用レーザー光源として、樹脂などの材料加工のみならず、生命科学、医療・診断応用、材料解析、美容健康などへの分野への適用が期待できる。

2-4. 研究開発項目④「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

2-4-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」（実施先：東京大学―再委託先 東北大学、産業技術総合研究所）

（2018年度までは、実施先：東京大学―再委託先 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学―共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所で実施。

2019年度よりギガフォトン株式会社担当部分を研究開発項目⑤-3「短波長レーザーによる加工技術の開発／極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」および大阪大学―共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所担当部分を研究開発項目⑤-4「短波長レーザーによる加工技術の開発／高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」として実施）

2-4-1-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「時間制御型レーザー加工テスト加工装置の開発、波長制御型レーザー加工テスト加工装置の開発、プラットフォームの整備と運営、データベースの構築」（実施先：東京大学―再委託先 東北大学、産業技術総合研究所）

（1）実用化・事業化の見通し

2018年10月に本項目で開発した時間制御型レーザー加工テスト装置や波長制御型レーザー加工テスト装置、他項目での開発装置を含む市場投入前の優れた加工機を試用可能なレーザー加工プラットフォームの運用を開始した。2021年3月までのプロジェクト期間内に、無償でのプラットフォームテスト利用のほか、TACMI コンソーシアムの枠組みを活用した有償での利用も利用実績を上げており、レーザー加工プラットフォーム事業による協調領域形成サービスの有用性を示すことに成功した。本プロジェクト終了後も、引き続きTACMI コンソーシアムが運営を継承するため、協調領域形成事業の拡大および、開発技術の実用化・事業化にむけた継続的な活動基盤の構築も完了している。

OPIE' 21にてレーザー加工プラットフォームやレーザー加工データベースの紹介を行ったところ、利用要望や問い合わせを多数受けた。展示会終了後には、TACMI への入会やプラットフォーム利用の希望が増加し、レーザー加工プラットフォーム・レーザー加工データベースの需要がさらに高まっていることが明らかになり、実用化・事業化の見込みは十分あると考える。事業化をさらに確実なものとするべく、引き続きTACMI を通じてニーズの把握に努める。

（2）事業化までのシナリオ

事業化として、本プロジェクトで開発した加工機・計測器を活用し、加工・計測、その結果得られる加工データの活用のループによる最適加工条件提供の実現を目指す。本プロジェクトで開発した市場投入前の優れたレーザー加工機を試用できるレーザー加工プラットフォームとそのユーザー利用の開始により、ニーズに基づいた良質な加工データを取得する環境はすでに整っている。得られる加工データを活用し最適加工条件探索のループを廻すことを実証できれば、このループを様々な材料・加工へ展開することで事業化が実現する。

すでにTACMI サジェストと呼ばれる最適加工条件探索支援システムの提供を開始しており、経験と勘に頼らず加工データに基づく最適加工条件探索の原理実証は完了している。様々なユー

レーザーのニーズに対応できるところまで汎用性を高めるため、レーザー加工プラットフォームおよびレーザー加工データベースの運営を継承した TACMI コンソーシアムを通じて、産業界のニーズとシーズをマッチングする機会提供を目指す。TACMI コンソーシアムでは、会員数の拡大を図るとともに、より多くの研究機関、企業にレーザー加工プラットフォームの装置、レーザー加工データベースを活用してもらうため、プロジェクト期間内に実施したレーザー加工プラットフォーム利用の結果を踏まえた利用制度の改良・整備を進めており、単に技術開発のその普及だけでなく、TACMI を活用した市場のニーズの取り込みと、その後の研究開発テーマ企画への発展、データ活用法の検討を進めている。

レーザー加工データベースはクリティカルボリュームを超えることで、産業界において求心力を発揮するとともに、ビジネスとしての価値も増大することから、今後はその価値を社会実装する上で、TACMI の法人化やベンチャー企業の設立も視野にいれ、グローバル企業へのトランスファーを検討していく。

(3) 波及効果

レーザー加工プラットフォーム及び TACMI コンソーシアムの運営において、レーザー発振器、レーザー加工、レーザー加工シミュレーション、レーザー加工学理等における産官学の研究者、技術者の協働・融合が実践されることにより、レーザー加工産業、レーザー産業、レーザー加工機産業、レーザー科学の人材交流が活発化し関連企業、研究機関の連携構築が活性化する。

公的機関を中心に構築しユーザー企業も巻き込んだ協調領域の活動は、協調—競争ラインを押し上げることで、本分野における日本の製造業の国際競争力が高まり、加工データベースが十分に共有されると、データ活用型の新しいものづくりエコシステムが実現される。これにより、将来の超スマート社会の実現に寄与することとなる。

2-4-1-2. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）

本項目は、2018年度まで、研究開発項目④-1-2「レーザー加工プラットフォームの構築」／「極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の実用化の見通しの詳細は、2-5-3. 「極短波長領域のハイブリッドA r Fレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）にまとめて記載する。

2-4-1-3. 「レーザー加工プラットフォームの構築／「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学ー共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所)

本項目は、2018年度まで、研究開発項目④-1-3「レーザー加工プラットフォームの構築／「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社)として実施した。

中間評価を受け、研究開発項目を再編し、本研究開発内容は研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」の中で実施した。

研究開発項目の実用化の見通しの詳細は、2-5-4. 「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社)にまとめて記載する。

2-4-2. 「レーザー加工の計測評価基盤技術の開発」(実施先：東京大学、産業技術総合研究所一再委託先 早稲田大学)

(1) 実用化・事業化の見通し

本テーマで開発したフラグメントイオン計測装置は、レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することができるが、以下のような特徴を有する。(1) 小型で可搬(重量約15kg)。(2) 超高真空が必要とせず、短時間で準備ができ試料も容易に交換できる。したがって、各拠点に設置されているレーザー加工プラットフォームに供給することができる。

また、レーザー加工などに用いられる実用材料の光物性を系統的に網羅したデータベースは少なく、特に真空紫外域は測定装置に限られることもあり、データ自体が希少なケースが多い。このことなどからも、ユーザーが実際に必要とする希少な情報にアクセスしやすいデータベースを構築することで、利用価値の高いデータベースとして実用化できると考えられる。

(2) 事業化までのシナリオ

実施者においては、フラグメントイオン計測とシミュレーション技術について、項目4-1等と連携することで産業界への最適レーザー加工レシピの提供を図ると共に、産業界のニーズとシーズをマッチングする直接的な機会提供も目指す。また、項目4-3等と連携して産業界のニーズの高い試料群に関するデータベースの構築を行った。光物性スペクトルのデータベースとして、実用材料を中心にセラミクス、金属、ガラス、樹脂等の被レーザー加工材料を項目4-3等での調査結果を参考に選定して、可視～真空紫外領域における屈折率・消衰係数スペクトルや赤外～真空紫外領域における透過吸収係数スペクトルを測定した。フラグメントイオンに関しても、典型的な金属、半導体、絶縁体、セラミックスなど19種類の固体材料に対して、レーザー強度、パルス幅、波長を変化させた約750条件にて計測を行い、データベースを構築した。データベースの外部公開は、レーザー加工データベース(LPDB)やTACMIコンソーシアムとも連携して、公開手法や公開範囲(コンソーシアム内、日本国内、全世界など)を議論したうえで進めていくことになる。

(3) 波及効果

本テーマの成果は、拠点の利用やデータベースを通じてユーザーに提供される。産業界が必要とする各材料の加工レシピ、光物性情報を簡便に入手することで、レーザー加工条件の最適化、シミュレーション等による加工メカニズムの理解が深まり、製造産業における時間・コストの縮小化が期待される。イオン計測技術は、汚染検出などの多様な応用の可能性も期待されている。

2-4-3. 「レーザー加工技術の標準化・調査研究」（実施先：産業技術総合研究所、東京大学）

（1）実用化・事業化の見通し

加工ニーズの調査データおよび技術ロードマップは加工データベースとともに、TACMI を通して利用方法の検討をしながら実用化を行う。現在すでに、実施者内における引き合いが多くあり、情報の使い方を慎重に検討した上で、さらに、ユーザー企業の意見も聞きながら事業化の方法を継続して検討する。モニタリングについては、研究開発項目4のすべての情報をもとに、その場観察に適した経済的な方法を抽出し、実施者内で実用化した上で事業化検討を進める。

（2）事業化までのシナリオ

実施者において、事業期間内にコンソーシアムを通じて利用料とデータ収集とのバランスを学習した知見に基づき、自律的に運用できる運用方法を見極めたのち、事業化に結び付けていく。

（3）波及効果

今後、データベースは非常に大きな求心力となることから、データベースをもとに加工シミュレータが構築され、サイバー空間でものづくりのサプライチェーンが構築される。優れたサイバーフィジカルの加工システムを持つところにユーザーのニーズが集中すると予想されることから、優れた加工データベースを持つことは価値が大きく、高い波及効果が期待できる。さらに、技術ロードマップは、TACMI コンソーシアム等を活用したユーザー企業と議論を行い、最新のデータやニーズに基づいて継続的にブラッシュアップすることにより、レーザー加工技術開発・業界を牽引する役割を担うと期待される。

2-5. 研究開発項目⑤「短波長レーザーによる加工技術の開発」

2-5-1. 「高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）

（2018 年度まで、研究開発項目③-1「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）として実施）

（1）実用化・事業化の見通し

GaN 系半導体レーザーを用いたレーザー加工は、2025 年には DDL 方式（Direct Diode Laser:半導体レーザー光を直接加工に用いる工法）の約 3 割を占めると予想している。このような市場環境の中、実施者は赤外レーザー加工機ならびにそれとロボットを融合させたレーザー溶接ロボットシステムを製品化しており（図IV2-5-1-1）、レーザー溶接システムやレーザー切断機などの用途で市場導入を図っている。そこで、GaN 系レーザー加工機は、本システムの次世代版として位置付けて展開することを想定している。



図IV2-5-1-1

既存の赤外レーザー溶接ロボットシステム

（2）事業化までのシナリオ

「Ⅲ. 研究開発成果 2-5-1（6）実用化・事業化への取り組み」で述べたように、2019 年から実施者企業において、事業化プロジェクトを開始した。GaN 系レーザー加工事業化については実施者の WEB でも予告している。

（3）波及効果

本研究開発成果により、金属に対するレーザー加工性能を大幅に向上させることができる。リチウムイオン電池の生産性を高め、車の電動化を加速させることが期待される。

2-5-2. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）

（2018年度まで、研究開発項目③-6「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）として実施）

（1） 実用化・事業化の見通し

〔実用化・事業化を行う製品の概要〕

現状製品化されている300nm帯のUVレーザーをもとに、本テーマ開発により実用化を目指す製品は、320nm帯の発振波長でかつ高出力（100mW）、また高ビーム品質（TEM₀₀、 $M^2 < 1.2$ ）で、装置寿命は8700時間（1年）以上とする。

UVレーザー光源は以下のアドバンテージがあり、UV光源を搭載する加工機、検査装置、測定装置メーカーに提供できるよう実施者において事業化を進めている。実用化の面では既存レーザーの置き換えが可能など大きな優位点を持っていると考えている。

- ・加工対象の寸法精度向上（発振波長、高ビーム品位）
- ・加工スピード向上（高出力）
- ・加工コストの低減（長寿命、高出力、高効率）

〔用途〕

実施者の（株）金門光波は、既存のHe-Cdレーザー（波長325nm、3～100mW）の事業で高いシェアを持ち、多くのUVレーザーを使う顧客と長年の関係を構築している。この波長帯域（320nm）における高出力なレーザー光源の有効な代替手段は現在のところ他に無く、用途開発や製品の展開としては非常に有利な条件の下にある。開発するUVレーザーの特徴から、同社においては、以下に例示される装置等に搭載されることを想定し、顧客に情報提供など働きかけを行っている。

a) レーザー励起蛍光観測用励起光源

ブルーLEDの結晶評価用の励起光源として、320nm帯の紫外レーザーの役割は大きいものがある。結晶評価用の励起光源は、フォトンエネルギーの関係で波長340nm以下の波長で励起できるので、320nm帯のレーザー光での励起は最適である。世界の85%ほどのシェアを持つ、国内の3社については、既存のレーザーが24時間稼働で使用されている。開発したレーザーの出力は、100mWと高いため、レーザー光を2分岐することで作業スピードが2倍に上がり、検査スピードの向上が期待できる。またUV光源が小型化することにより検査装置全体の小型化が可能である。

b) 半導体ウエハの表面検査

レーザーを用いた半導体ウエハの表面検査用光源として、レーザーの発振波長は検出分解能を決める大きなファクターである。使われるレーザーは、200nm及び300nm帯が主流である。ミドルエンドの装置用として、320nm帯のレーザー光源は非常に魅力的なレーザーである。200nm帯のレーザーと比較し、レーザーの大きさ、使い勝手、価格等メリットが大きい。ハイエンドの装置を必要としない、半導体製造ラインのウエハの検査用光源として装置に搭載されることが期待できる。

その他想定される用途は以下になる。

- c) 直接描画装置用の光源
- d) 干渉露光用のUV光源
- e) 局所露光用光源

(2) 事業化までのシナリオ

実施者（株）金門光波）による事業化までのスケジュールを下表に示す。事業化については一般顧客向けに2022年度の9月に市場販売を計画している。実施者は、販売開始までに製造設備の整備、製造者の教育を行う。販売開始後の売上の推移によって、生産ラインの増強等臨機応変に対応し、製造及び営業の人材補強にも力を入れていくことを考えている。

表IV2-5-2-1 実用化・事業化スケジュール

年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
試作機設計・試作・評価	試作機設計・製作・評価	試作機設計・製作・評価	試作機評価	
試作器市場評価		市場評価品投入	市場評価品投入	
量産機ライン構築設計・試作・評価市場投入		特定顧客へ投入開始(20年11月)	ライン構築 量産設計・試作	量産機製作・評価市場投入(22年9月予定)

(3) 波及効果

① CO₂削減

既存He-CdレーザーがUVレーザーへ置き換えることにより、ウォールプラグ効率が0.01%から3.0%に改善され、CO₂削減効果が図られる。

② 生産性の向上・ランニングコストの軽減

装置に使用するUVレーザーの性能（出力、ビーム品質、寿命、サイズ）が向上す

ることで、生産性の向上、高精細加工、ランニングコストの削減、搭載装置の小型化が可能と予想される。

③ UV光応用分野の拡大

小型・安価・高効率のUV光源が容易に入手可能になることにより、これまでUVランプを使用していた応用分野での利用が進み、更に応用分野の拡大に繋がる。

2-5-3. 「極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）

（2018年度まで、研究開発項目④-1-2「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発／レーザー加工プラットフォームの構築／極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）として実施）

（１）実用化・事業化の見通し

プロジェクト期間においてCMCの低角度斜め穴加工についてハイブリッドArFレーザー加工優位性を実証し、2030年の実用化を目指してジェットエンジン部品メーカーであるユーザとの加工性評価を進めている。品質仕様や生産性仕様を達成する目途が得られるところまで来ているが、品質が低いが安価で高速に加工できる競合技術の進捗が判明したことから実用化を議論するためのハードルが上昇している状況にある。その一方で、TACMIコンソーシアム等を活用してプロジェクト完了後から2つのユーザからの加工依頼を開始しており、このような活動を通じて事業化に結びつく加工応用をさらに開拓していきたい。

（２）事業化までのシナリオ

事業化を議論するには、①優位性のある加工応用分野の開拓と②レーザー装置のシステム化が必要になる。①については引き続きプロジェクトで開拓したユーザやTACMIコンソーシアム等を通じてユーザ評価を進め、高い評価が得られる応用先を探索していく。さらに、これまで実現困難と考えられていたCMCの微細加工技術については学会発表などで普及活動を実施していく。②については、露光用と加工用の両光源の基幹部は共通であるため、主力事業である露光機用光源としてハイブリッドArFレーザーの製品化開発を進める。以上の活動を地道に進めることで具体的な応用先を見つけた際に量産先行機を短期間で製作できる環境を整え、事業化を図っていくことを考えている。

（３）波及効果

加工性評価のひとつとして実施したエキシマレーザーでの樹脂加工において、インターポージャー用樹脂材の微細穴あけ加工ではKrFエキシマレーザーが波長355nmの固体UVレーザーによる加工に比べ優位であることが判明した。現在、加工装置メーカーが弊社の光源を搭載した製造装置を製品化し、エンドユーザーにて市場導入前の最終評価を進めている。

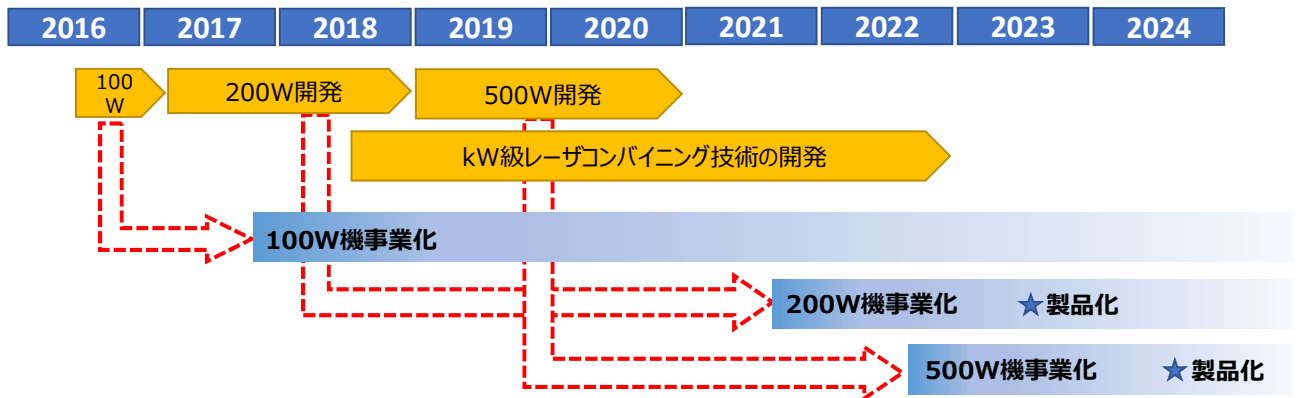
また、本事業で実施した回折光学素子（DOE）を用いたガラスの多点同時微細穴加工技術については、次世代のガラスインターポージャー製造技術として、「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業／先導研究」に提案し採択に至り、実用化に向けた研究開発を実施中である。

2-5-4. 「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」（実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社）

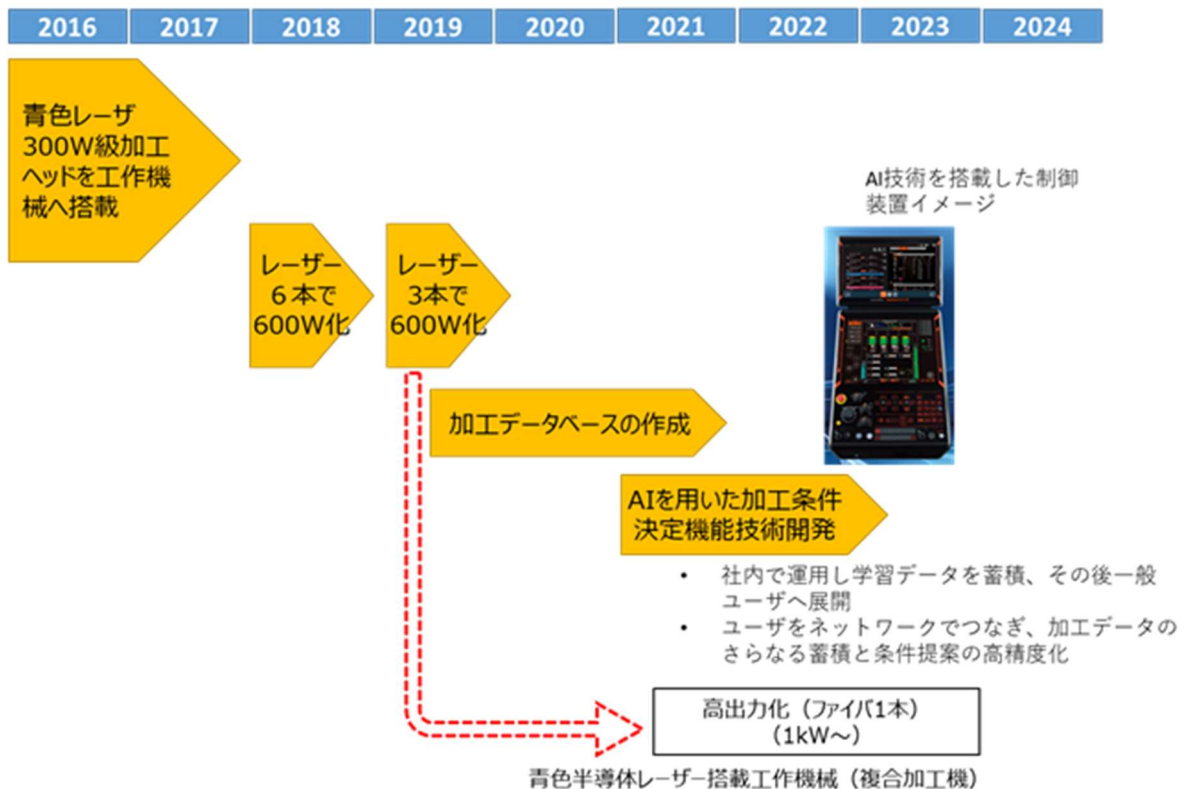
（2018年度まで、研究開発項目④-1-3「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発／レーザー加工プラットフォームの構築／高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」（実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社）として実施）

（1）実用化・事業化の見通し

実施者において、次図IV2-5-4-1、IV2-5-4-2のように事業化に取り組んでいく。



図IV2-5-4-1 高輝度青色半導体レーザー事業化の計画



図IV2-5-4-2 青色半導体レーザー搭載工作機械事業化の計画

(2) 事業化までのシナリオ

実施者における事業化シナリオを以下に記す。

①100 W、200 W、500 W 青色半導体レーザー単体の製品化（島津製作所）

2018年には100 W機の販売を開始した。現在開発中の200 W機を2023年の製品化を目標とする。また500 W機については2024年の製品化を目標とする。

協力先企業において半導体レーザーチップの量産体勢に入り価格の低下が見込まれている。

②高輝度青色半導体レーザーの普及（大阪大学）

青色半導体レーザー・装置・システムの社会実装を加速していくために産学共創コンソーシアム「青色半導体レーザー接合加工研究会」を2020年12月に大阪大学内に創設し、産学連携し青色半導体レーザーの普及活動を推進していく。

③マルチビーム集光ユニットを搭載した複合加工機の製品化（ヤマザキマザック）

青色半導体レーザーを使って、開発過程で得た加工データから加工条件と加工結果を関連付けたデータベースを構築する。構築したデータベースから、適切な加工条件を提案するAI技術を開発し、工作機械の制御装置（NC）に搭載する。同時に、データベースを拡充するための加工状態やパラメータを取得・監視する技術を工作機械に搭載する。工作機械間、工場間をセキュアなゲートウェイでつなぎ、取得したデータベースや解析データを世界中の生産現場で共有できるシステムを開発する。

(3) 波及効果

レーザー加工において、青色半導体レーザーは現在主流の近赤外半導体レーザーを凌駕出来ると考えられ、また、本テーマで開発する技術は、周辺光学要素部品の技術の開発にも繋がり、日本独自技術の結集体となる。さらに、青色半導体レーザーを導入すると、これまで困難であった加工を実現できるため、工作機械などへの搭載など潜在市場への適用が増加するため、高い波及効果が見込まれる。世界中で加工条件を共有することで、未知の材料やレーザーソースを使った仕事へ迅速な対応が可能となる。機械間、工場間をセキュアなネットワークを構築することで、競合他社あるいは悪質なアクセスから営業秘密を守ることができる。

添付資料

●特許論文等リスト（2021年11月15日時による）

【特許】（Patent Cooperation Treaty：特許協力条約による出願を含む）

◆項目① 高品位レーザー加工技術

出願 4件

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

出願 20件

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

出願 24件

◆項目③-2 高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LDの研究開発

出願 5件

◆項目③-4 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発

出願 18件

◆項目③-5 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発

出願 6件

◆項目③-7 超高速利得スイッチLDをシードとするレーザー加工用光源の開発

出願 1件

◆項目③-8 分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発

出願 6件

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

出願 12件

◆項目⑤-1 高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザー

出願 142件

◆項目⑤-2 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

出願 3件

◆項目⑤-3 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術

出願 10件

◆項目⑤-4 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発
出願 3件

【論文】

◆項目① 高品位レーザー加工技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
Kentaro Ueda, Yosuke Orii, Yoshinori Takahashi, George Okada, Yusuke, Mori, and Masashi Yoshimura	Osaka University, Spectronix	Picosecond high-power 355-nm UV generation in CsLiB ₆ O ₁₀ crystal	Optics Express	2016/12
吉村政志	大阪大学	UV 向け非線形波長変換素子の現状	オプトロニクス	2017/ 1
吉村政志、高橋義典、安達宏昭、森勇介	大阪大学、創晶、創晶超光	紫外レーザー応用拡大に寄与する CLBO 結晶	光アライアンス	2017/ 3
西前順一、吉村政志、森 勇介、折井庸亮	三菱電機、大阪大学、スペクトロニクス	深紫外ピコ秒レーザーによる高品位レーザー加工技術の開発	レーザー学会誌レーザー研究	2017/ 9
折井庸亮、澤田久、奥山大輔、山垣美恵子、泉英男、渋谷公彦、岡田穰治	スペクトロニクス	高出力深紫外ピコ秒レーザー	レーザー学会誌レーザー研究	2017/ 9
吉村政志、森勇介	大阪大学	非線形光学結晶の開発と紫外光発生応用	セラミックス	2018 /12
吉村政志	大阪大学	深紫外レーザー用非線形光学結晶の開発	応用物理	2019 / 5
R. Murai, T. Fukuhara, G. Ando, Y. Tanaka, Y. Takahashi, K. Matsumoto, H. Adachi, M. Maruyama, M. Imanishi, K. Kato, M. Nakajima, Y. Mori, and M. Yoshimura	Osaka University,	Growth of large and high quality CsLiB ₆ O ₁₀ crystals from self-flux solutions for high resistance against UV laser-induced degradation	Applied Physics Express	2019 / 6
吉村政志、森勇介	大阪大学	紫外レーザー用非線形光学材料	光技術コンタクト	2020 / 2
折井庸亮、河野健太	スペクトロニクス	世界最高出力の高繰り返し深紫外ピコ秒パルスレーザー	日本工業出版社光アライアンス	2019 /10
折井庸亮、田中宏基	スペクトロニクス	高出力深紫外ピコ秒レーザーの開発	光産業技術振興協会オプトニクス,	2020 / 3

Kenta Kohno, Yosuke Orii, Hisashi Sawada, Daisuke Okuyama, Shibuya Kimihiko, Seiji Shimizu, Masashi Yoshimura, Yusuke Mori, Junichi Nishimae, and George Okada	Spectronix, Osaka University, Mitsubishi Electric	High-power DUV picosecond pulse laser with gain-switched-LD-seeded MOPA and large CLBO crystal	Optics Letters	2020 / 3
Y. Tanaka, R. Murai, Y. Takahashi, T. Sugita, D. Toh, K. Yamauchi, S. Aikawa, H. Marui, Y. Umeda, Y. Funamoto, T. Kamimura, M. J. F. Empizo, M. Imanishi, Y. Mori, and M. Yoshimura	Osaka University, Nikon, Osaka Institute of Technology, Soshochon	High surface laser-induced damage threshold of SrB ₄ O ₇ single crystals under 266-nm (DUV) laser irradiation	Optics Express	2020 / 9
吉村政志、森勇介	大阪大学	紫外レーザー用非線形光学材料	光アライアンス	2021 / 1
吉村政志、森勇介	大阪大学	非線形光学結晶による深紫外光発生	オプトロニクス	2021 / 3
岡田穰治	スペクトロニクス	高出力 266nm ピコ秒パルスレーザーの開発及び事業化	オプトロニクス	2021 / 3
折井庸亮、河野健太、田中宏基、乙津聡夫	スペクトロニクス	産業用深紫外ピコ秒レーザーの開発と事業化	日本工業出版社光アライアンス	2021 / 4

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

執筆者	所属	掲載誌	掲載タイトル	発表年月
川嶋利幸、他	浜松ホトニクス	レーザー研究 第 45 巻(レーザー学会)	次世代加工技術のための LD 励起高出力パルスレーザー開発	2017/9
弘中陽一郎、他	大阪大学	米国物理学会誌	A New Method Control Laserinduced Shockwave and New Target Design to Measure the Residual Stress Distribution in Metal	2018/10
栗田隆史、他	浜松ホトニクス	月刊トライボロジー誌	レーザーピーニングを用いた 表面改質技術	2019/1
川嶋利幸、他	浜松ホトニクス	光アライアンス誌(日本工業出版 社)	産業用高エネルギーパルス レーザー装置＝新たな レーザー加工技術の開発 に向けて＝	2020/1
弘中陽一郎	大阪大学	High Energy Density Physics	Generation of residual stress field in metal by an interference shock wave	2020/10
壁谷悠希	浜松ホトニクス	レーザー研究 第 49 巻(レーザー学会)	レーザーピーニングにおける 圧縮残留応力分布の解析的 予測手法	2021/1
弘中陽一郎	大阪大学、浜 松ホトニクス、 産業技術総合 研究所	レーザー研究 第 49 巻 (レーザー学会)	ナノ秒レーザー駆動衝撃波 の制御と加工への応用	2021/1
関根尊史、他	浜松ホトニクス	レーザー研究 第 49 巻 (レーザー学会)	材料加工データベース創出 のための100J 級半導体 レーザー励起 Yb:YAG セ ラミクスレーザーの進展	2021/ 1
宮西宏併	大阪大学 (理化学研究所)	レーザー研究 第 49 巻(レーザー学会)	X 線自由電子レーザーを用いた レーザーピーニング における相変態の観察	2021/ 1
川嶋利幸、他	浜松ホトニクス	月刊オプトロニクス誌(オプ トロニクス社)	100J 級高出力パルス固体 レーザーと応用展開	2021/ 3
関根尊史、他	浜松ホトニクス	フォトニクスニュース誌 (応用物理学会 フォトニ クス分科会)	産業応用に向けた半導体 レーザー励起 100 J 級パワ ーレーザー技術の発展	2021/ 5
川嶋利幸、他	浜松ホトニクス	レーザー加工学会誌(レー ザ加工学会)	高出力レーザーによるレーザ ピーニング加工技術の 開発	2021/ 10

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

発表者	所属	タイトル	発表媒体	発表年月
R. Morita, T. Inoue, M. DeZoysa, K. Ishizaki and S. Noda	Kyoto University	Photonic-crystal lasers with two-dimensionally arranged gain and loss sections for high-peak-power short-pulse operation	Nature Photonics	2021/3
M. Yoshida, M. DeZoysa, K. Ishizaki, W. Kunishi, T. Inoue, K. Izumi, R. Hatsuda, and S. Noda	Kyoto University	Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR	Journal of Physics: Photonics	2021/3
M. De Zoysa, M. Yoshida, B. Song, K. Ishizaki, T. Inoue, S. Katsuno, K. Izumi, Y. Tanaka, R. Hatsuda, J. Gellella and S. Noda	Kyoto University	Thermal management for CW operation of large-area double-lattice photonic-crystal lasers	Journal of Optical Society of America B	2020/12
T. Inoue, M. Yoshida, M. D. Zoysa, K. Ishizaki and S. Noda	Kyoto University	Design of photonic-crystal surface-emitting lasers with enhanced in-plane optical feedback for high-speed operation	Optics Express	2020/1
Masahiro Yoshida, Masato Kawasaki, Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, Takuya Inoue, Yoshinori Tanaka, Ranko Hatsuda, Susumu Noda	Kyoto University	Experimental investigation of lasing modes in double-lattice photonic-crystal resonators and introduction of in-plane heterostructures	PROCEEDINGS OF THE IEEE	2019/9

Kenji Ishizaki, Menaka De Zoysa and Susumu Noda	KyotoUniversity	Progress in Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers	Photonics	2019/8
De Zoysa Menaka, 吉田昌宏, 石崎賢司, 田中良典, 井上卓也, 野田進	京都大学	高ビーム品質・高出力フォトニック結晶レーザーの進展	レーザー学会誌	2019/4
M. Yoshida, M. D. Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, M. Kawasaki, R. Hattada, B. S. Song, J. Gellella and S. Noda	KyotoUniversity	Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams	Nature Materials	2019/2
T. Inoue, R. Morita, M. Yoshida, M. De Zoysa, Y. Tanaka, and S. Noda	KyotoUniversity	Comprehensive analysis of photonic-crystal surface-emitting lasers via time-dependent three-dimensional coupled-wave theory	Physical ReviewB	2019/1
X. Guo, S. Tokita, K Hirose, T. Sugiyama, A. Watanabe, K. Ishizaki, S. Noda, N. Miyanaga, and J. Kawana ka	KyotoUniversity and Osaka University	PCSEL pumpedcoupling optics free Yb:YAG/Cr:YAG microchip laser	Applied Optics	2018/6
小泉 朋朗, 江本 溪, 石崎 賢司, デ ゾイサメーナカ, 田中良典, 園田 純一, 野田進	京都大学、スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザー実現のためのMOVPE 空孔形成法の検討	電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会	2018/11

◆項目③-2 高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LEDの研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
M. Jo, N. Maeda, N. Okada, Y. Itokazu, N. Kamata, K. Tadatomo and H. Hirayama	理化学研究所	Impact of thermal treatment on the growth of semipolar AlN on m-plane sapphire	AIP Advances	2018/10
平山秀樹、前田哲利、M. Ajmal Khan、只友一行、岡田成仁、山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaN深紫外LEDの実現へ向けた最近の進展	レーザー研究	2019/4
M. Jo, Y. Itokazu, S. Kuwaba, and H. Hirayama	理化学研究所	Controlled crystal orientations of semipolar AlN grown on an m-plane sapphire by MOCVD	Japanese Journal of Applied Physics	2019/5
Y. Itokazu, S. Kuwaba, M. Jo, N. Kamata, and H. Hirayama	理化学研究所	Influence of the nucleation conditions on the quality of AlN layers with high temperature annealing and regrowth processes	Japanese Journal of Applied Physics	2019/5
H. Murotani, R. Tanabe, K. Hisanaga, A. Hamada, K. Beppu, N. Maeda, M. A. Khan, M. Jo, H. Hirayama and Y. Yamada	RIKEN, Nara Institute of Science and Technology, Kyusyu University	High internal quantum efficiency and optically pumped stimulated emission in AlGaN-based UV-C multiple quantum wells	Applied Physics Letters	2020/10

M. Ajmal Khan, Juan. P. Bermundo, Y. Ishikawa, H. Ikenoue, S. Fujikawa, E. Matsura, Y. Kashima, N. Maeda, M. Jo, and H. Hirayama	RIKEN, Yamaguchi University	Impact of Mg-level on Lattice-Relaxation in p-AlGaIn Hole Source Layer (HSL) and Attempting Excimer Laser Annealing on p-AlGaIn HSL of UVB emitters	Nanotechnology	2020/11
H. Murotani, H. Miyoshi, R. Takeda, H. Nakao, M. A. Khan, N. Maeda, M. Jo, H. Hirayama and Y. Yamada	RIKEN, Yamaguchi University	Correlation between excitons recombination dynamics and internal quantum efficiency of AlGaIn-based UV-A multiple quantum wells	Journal of Applied Physics	2020/9

◆項目③-4 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発

発表者	所属	発表タイトル	発表媒体	発表年月
Shanting Hu, Masashi Takanohashi, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	Lateral Integration of VCSEL and Amplifier with Resonant Wavelength Detuning Design	IEICE Electronics Express	2020/1
Ahmed M. A. Hassan, Moustafa Ahmed, Masanori Nakahama, Fumio Koyama	東京工業大学	High-power, quasi-single-mode vertical-cavity surface-emitting laser with near-diffraction-limited and low-divergence beam	Japanese Journal of Applied Physics	2020/8

Shanting Hu, Ahmed Hassan, Xiaodong. Gu, Masanori Nakahama, and Satoshi Shinada, Fumio Koyama	東京工業大学	Surface Grating VCSEL- Integrated Amplifier/Beam Scanner with High Power and Single Mode Operation	Applied Physics Express	2021/6
Shanting Hu, Ahmed Hassan, Xiaodong. Gu, Masanori Nakahama, and Satoshi Shinada, Fumio Koyama	東京工業大学	Surface Grating Loaded VCSEL with Single Mode Power of over 80 mW	IEICE Electronics Express	2021/6

◆項目③-5 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・ イベント名等	発表年月
荒川 泰彦, 岩本 敏, 西前 順一, 菅原 充	東京大学 (株)三菱電機 (株)QD レー ザ	高効率・高出力化に向けた 量子ドッ トレーザーの進展	レーザー研究 47, 210 214 (2019).	2019/4
RC. Tao, Y. Arakawa	東京大学	Impact of quantum dots on III-nitride lasers: a theoretical calculation of threshold current densities	Jpn. J. Appl. Phys. 58, C, SCCC31-1 SCCC31-5 (2019).	2019/6

◆項目③-8 分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発

発表者	所属	発表タイトル	発表媒体	発表年月
Feng Qiu, e t. al.	KEK	Application of disturba nce observer-based cont rol onpulsed supercondu cting radio frequency c avities	Physical Review Accelerators and Beams, 24, 012804 (2021)	2021/1

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・ イベント名等	発表年月
谷峻太郎、他	東京大学	Observing laser ablation dynamics with sub- picosecond temporal resolution	[論文] Proceedings, SPIE: Proceedings Volume 10252, Optical Manipulation Conference	2017/4
谷峻太郎、他	東京大学	Observing laser ablation dynamics with sub- picosecond temporal resolution	[論文] The 4th Optical Manipulation Conference	2017/4

小林洋平	東京大学	NEDO 高輝度・高効率次世代 レーザー技術開発プロジェクト	[論文] レーザー加工学会誌	2017/6
Hideki Ohmura	産業技術総合研究所	Orientation-selective molecular tunneling ionization by four-color Fourier-synthesized laser fields	[論文] The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2017)	2017/7
Hideki Ohmura	産業技術 総合研究所	Interferometer-free Fourier-synthesized laser field generator estimated by molecular tunnelling ionization	[論文] Frontiers in Theoretical and Applied Physics (FTAPS 2017)、 Journal of Physics: Conf. Series	2017/7
小林洋平	東京大学	「高輝度・高効率次世代レ ーザー技術開発」特集号に よせて	[論文] レーザー研究	2017/9
湯本潤司、他	東京大学	レーザー加工研究プラット フォームとレーザー加工 データベースの構築	[論文] レーザー研究	2017/9
吉田剛、他	産業技術総 合研究所	Robust generation of Fourier-synthesized laser fields and their estimation of the optical phase by using quantum control of molecular tunneling ionization	[論文] Journal of Physics B	2018/1
Maki Kurata, Miyabi Hiyama, Takuma Narimatsu, Yuji Hazama, Takashi Ito, Yuhei Hayamizu, Xingping Qiu, Francoise M. Winnik and Hidehumi Akiyama	東京大学	Synthesis and quantitative characterization of coumarin caged D- luciferin	[論文] Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 189, 81-86 (2018)	2018/1

澁谷達則、高橋孝、坂上和之、チンタンフン、原広行、東口武史、石野雅彦、小柴裕也、錦野将元、小川博嗣、田中真人、鷲尾方一、小林洋平、黒田隆之助	産業技術総合研究所	Deep-hole drilling of amorphous silica glass by extreme ultraviolet femtosecond pulses	[論文] Applied Physics Letter 113, 171902 (2018)	2018/1
Zhigang Zhao, Chen Qu, Hironori Igarashi, Hongwen Xuan, Taisuke Miura, Shinji Ito, and Yohei Kobayashi	東京大学	Watt-level 193 nm source generation based on compact collinear cascaded sum frequency mixing configuration	[論文] Optics Express, vol. 26, issue 15, pp19435-19444 (2018), https://doi.org/10.1364/OE.26.019435	2018/7
澁谷達則、佐藤大輔、田中真人、小川博嗣、黒田隆之助	産業技術総合研究所	Femto-and nanosecond pulse duration dependence of the single-shot ablation threshold and multiple-shot morphology change of poly L-lactic acid in deep ultraviolet regime	[論文] Japanese Journal of Applied Physics, vol.58, SIIA02	2019/11
Hiroki Katow, Yoshiyuki Miyamoto	産業技術総合研究所	Ab initio approach to lattice softening of an Al slab driven by collective electronic excitations after ultrashort laser pulse irradiation	[論文] PHYSICAL REVIEW B Vol. 100, 085417	2019/12
大村英樹、吉田剛、齋藤直昭	産業技術総合研究所	Four-mode multi-selection in the dual phase control of a molecular ionization induced by Fourier-synthesized laser fields	[論文] Applied Physics Letters 114, 054101 (2019) (表紙に採択) (Featured Article に採択)	2019/2
宮本 良之	産業技術総合研究所	Non-thermal lattice dynamics in α -quartz induced by femtosecond laser pulses: An ab initio study	[論文] AIP Advances, 9, 025217 (2019)	2019/2
Shota Kimura, Shuntaro Tani, and Yohei Kobayashi	東京大学	Raman-assisted broadband mode-locked laser	[論文] Scientific Reports 9, Article number: 3738 (2019) DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-40313-2	2019/3
Shota Kimura, Shuntaro Tani, and Yohei Kobayashi	東京大学	Kerr-lens mode locking above a 20 GHz repetition rate	[論文] Optica, Vol. 6, Issue 5, pp. 532- 533, (2019)	2019/4

Haruyuki Sakurai, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Ryota Takaku, Yuki Sakurai, Nobuhiko Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, and Makoto Kuwata-Gonokami	東京大学	Terahertz broadband anti-reflection moth-eye structures fabricated by femtosecond laser processing	[論文] OSA Continuum 2 (9), 2764 (2019)	2019/5
小西邦昭、櫻井治之、湯本潤司、五神真	東京大学	3次元造形技術のテラヘルツ 光学素子作製への展開	[論文] レーザー研究 47(7) 356-360	2019/7
S. Kimura, S. Tani, and Y. Kobayashi	東京大学	Q switching stability limits of Kerr-lens mode locking	[論文] Physical Review A 102, 043505 (2020) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.043505	2020/1
Aiko Narazaki, Hideyuki Takada, Dai Yoshitomi, Kenji Torizuka, Yohie Kobayashi	産業技術総合研究所	Study on nonthermal-thermal processing boundary in drilling of ceramics using ultrashort pulse laser system with variable parameters over a wide range	[論文] Applied Physics A 126, Article number: 252 (2020)	2020/3
大村英樹、齋藤直昭	産業技術総合研究所	Sub-optical cycle attosecond control of molecular ionization by using Fourier-synthesized laser field	[論文] Physical Review A, 101, 043419 (2020)	2020/4
Eichi. Terasawa, Tatsunori. Shibuya, Daisuke. Satoh, Yasuaki. Moriai, Hiroshi. Ogawa, Masahito. Tanaka, Ryunosuke. Kuroda, Yohei. Kobayashi, Kazuyuki. Sakaue, Masakazu. Washio	早稲田大学、他	Pulse duration dependence of ablation threshold for fused silica in the visible femtosecond regime	[論文] Applied Physics A 126, Article number: 446 (2020) DOI: https://doi.org/10.1007/s00339-020-03640-0	2020/5

K. Sakaue, H. Motoyama, R. Hayashi, A. Iwasaki, H. Mimura, K.	東京大学	Surface processing of PMMA and metal nano-particle resist by sub-micrometer focusing of coherent extreme	[論文] Optics Letters, 45(10) 2926-2929	2020/5
Yamanouchi, T. Shibuya, M. Ishino, T. Dinh, H. Ogawa, T. Higashiguchi, M. Nishikino, R. Kuroda		ultraviolet high-order harmonics pulses		
宮本良之	産業技術総合研究所	Selecting Carbon Nanotubes with Diameters of Less than 1 nm by Laser Pulses: An Ab Initio Exploration	[論文] Nano Letter, Vol. 20, 4416-4421 (2020)	2020/5
Faris Sinjab, Kazuki Hashimoto, Venkata Ramaiah Badarla, Junko Omachi, and Takuro Ideguchi	東京大学	Multimodal laser-scanning nonlinear optical microscope with a rapid broadband Fourier-transform coherent Raman modality	Optics Express 28, 20794-20807 (2020) https://doi.org/10.1364/OE.397521	2020/6
Takashi Takahashi, Shuntaro Tani, Ryunosuke Kuroda & Yohei Kobayashi	東京大学	Precision measurement of ablation thresholds with variable pulse duration laser	[論文] Applied Physics A volume 126, Article number: 582 (2020). https://doi.org/10.1007/s00339-020-03754-5	2020/6
Shuntaro Tani, Yutsuki Aoyagi, and Yohei Kobayashi	東京大学	Neural-network-assisted in situ processing monitoring by speckle pattern observation	[論文] Opt. Express 28, 26180-26188 (2020) https://doi.org/10.1364/OE.400785	2020/6
澁谷達則 1、吉富大 1、佐藤大輔 1 坂上和之 2、田中真人 1、高田英行 1、小川博嗣 1、鳥塚健二 1、小林洋平 2、黒田隆之助 1、 1)産業技術総合研究所、2)東京大学	1)産業技術総合研究所、2)東京大学	Ablation Thresholds and Morphological Changes of Poly-L-Lactic Acid for Pulse Durations in the Femtosecond-to-Picosecond Regime	[論文] Surface and Interface Analysis, Wiley, 52: 1145-1149. (2020)	2020/6
澁谷達則、坂上和之、黒田隆之助	産業技術総合研究所	軟 X 線フェムト秒レーザー加工	[学会誌] 「軟 X 線フェムト秒レーザー加工」X 線結像光学ニューズレター, No. 51, pp.8-11 (2020)	2020/7

Y. Ishida, J. K. Jung, M. S. Kim, J. Kwon, Y. S. Kim, D. Chung, I. Song, C. Kim, T. Otsu, and Y. Kobayashi	東京大学	Work function seen with sub-meV precision through laser photoemission	[論文] Communications Physics volume 3, Article number: 158 (2020) https://doi.org/10.1038/s42005-020-00426-x	2020/9
Y. Koshiba, R. Morita, K. Yamashita, M. Washio, K. Sakaue, T. Higashiguchi, J. Urakawa	早稲田大学	Study on X-ray enhancement in Laser-Compton scattering for auger therapy	[論文] International Journal of Radiation Biology (2020), DOI:10.1080/09553002.2020.1811420	2020/9
澁谷達則 1、坂上和之 2、小川博嗣 1、佐藤大輔 1、チンタンフン 4、寺澤英知 1,3、東口武史 5、石野雅彦 4、錦野将元 4、田中真人 1、鷺尾方一 3、今亮 6,7、久保田 雄也 6,7、犬伏 雄一 6,7、大和田 成起 6,7、小林洋平 2、黒田隆之助 1	1)産業技術総合研究所、2)東京大学、3)早稲田大学、4)量子科学技術研究開発機構、5)宇都宮大学、6)高輝度光科学研究センター、7)理化学研究所	Ablation Threshold and Crater Morphology of Amorphous and Crystalline SiO ₂ Glass in Extreme Ultraviolet Femtosecond Pulses	[論文] Japanese Journal of Applied Physics 59, 122004 (2020)	2020/11
小林洋平、高橋孝、谷峻太郎	東京大学	レーザーアブレーションの学理解明と次世代レーザー加工に向けた自動計測技術開発	[論文] 応用物理, Vol.89, No.12, p719-723 (2020)	2020/12
R. Takaku, S. Hanany, H. Imada, H. Ishino, N. Katayama, K. Komatsu, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, T. Matsumura, K. Mitsuda, H. Sakurai, Y. Sakurai, Q. Wen, N. Y. Yamasaki, K. Young, and J. Yumoto	東京大学、他	Broadband, millimeter-wave anti-reflective structures on sapphire ablated with femto-second laser	[論文] Journal of Applied Physics, 128, 225302 (2020); https://doi.org/10.1063/5.0022765	2020/12

Aiko Narazaki1, Hideyuki Takada1, Dai Yoshitomi1, Kenji Torizuka1, Yohei Kobayashi2, 1Research Institute for Advanced Electronics and Photonics, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	産業技術 総合研究所、 他	Ultrafast Laser Processing of Ceramics: Comprehensive Survey of Laser Parameters	[論文] Journal of Laser Applications, 33, 012009 (2021). 2020年1月号。 web 公開:2020年 12月18日	2020/12
吉富 大 1、高田 英行 1、奈良崎 愛子 1、鳥塚 健 二 1	産業技術 総合研究所	複合パラメータ自動可変超 短パルスレーザー加工シス テムによる最適加工条件の 迅速な探索	[学会誌] レーザ協会誌 第 45巻3号	2020/12
Yoshiyuki Miyamoto	産業技術 総合研究所	Polarization as a new parameter determining the laser-induced dynamics of carbon nanotubes studies by ab initio simulations	[論文] Carbon 172, 372- 378 (2021) https://doi.org/10 .1016/j.carbon.2020.10.040	2021/1
Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Hiroharu Tamaru, Junji Yumoto, Makoto Kuwata- Gonokami	東京大学	Direct correlation of local fluence to single- pulse ultrashort laser ablated morphology	[論文] Communications Materials volume 2, Article number: 38 (2021)	2021/3
寺澤英知(早 大,AIST) 鷲尾方 一(早大), 佐藤 大輔(AIST), 盛合 靖章(AIST), 小川 博嗣(AIST), 田中 真人(AIST), 黒田 隆之助(AIST), 澁 谷達則(AIST), 小林洋平(東大), 坂上和之(東大)	早稲田大学、 産業技術総 合研究所、東 京大学	超短パルスレーザーによる 石英ガラスの加工現象のポ ンプ-プローブイメージング	[学会誌] 放射線化学, 111 号、2021年	2021/4
宮本良之	産業技術 総合	Examining ab initio approach for laser- induced volume expansion of metals	[論文] Physical Review Applied,	2021/4

加藤洋生・東大、 明石遼介、宮本 良之、常行真司	東京大 学、産業技術 総合研究所	First Principles Study of the Optical Dipole Trap for Two-Dimensional Excitons in Graphane	[論文] Physical Review Letters	2021/4
--------------------------------	------------------------	---	------------------------------------	--------

◆項目⑤-1 高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザー

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・ イベント名等	発表年月
中村 亘志	パナソ ニック (株)	ダイレクトダイオードレー ザー加工に向けた高出力G aN系半導体レーザーの開 発	レーザー研究	2019/4

◆項目⑤-3 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会 名・ イベント名等	発表年月
小野瀬貴士	ギガフoton	193nm レーザー 加工	OPTRONICS No.472	2021 / 4

◆項目⑤-4 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発

発表者	所属	発表媒体	発表タイトル	発表年月
Kohei Asano、 Masahiro Tsukamoto、 Yoshihisa Sechi、 Yuji Sato、Shin- ichiro Masuno、 Ritsuko Higashino、 Takahiro Hara、 Masanori Sengoku、Minoru Yoshida	ヤマザキマ ザック 大阪大学	Optics and Laser Technology	Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode lasers	2018/6
浅野 孝平、塚 本 雅裕、舟田 義 則 、左今 佑、森 本 健斗、佐藤 雄 二 、升野 振一 郎、 原 隆裕、西川 宏	ヤマザキマ ザック 大阪大学	レーザー学会誌 レーザー研究	金属の精密クラッ ディングのための マルチレーザービ ーム照射法の開発	2018/10

Kohei Asano、 Masahiro Tsukamoto、 Yoshihisa Sechi、 Yuji Sato、Shin- ichiro Masuno、 Ritsuko Higashino、 Takahiro Hara、 Masanori Sengoku、Minoru Yoshida	ヤマザキマ ザック 大阪大学		Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode lasers	2018/10
Yuji Sato、 Masahiro Tsukamoto、 Takahisa Shobu、 Yoshinori Funada、Yorihiro Yamashita、 Takahiro Hara、Masanori Sengoku、Yu Sakon、omomasa Ohkubo、Minoru Yoshida、 Nobuyuki Abe	大阪大学	Applied Surface Science	In situ X-ray observations of pure- copper layer formation with blue direct diode lasers	2019/3
Takahiro Hara、 Yuji Sato、Ritsuko Higashino、 Yoshinori Funada、 Tomomasa Ohkubo、Kento Morimoto、 Nobuyuki Abe、 Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Journal of Smart Processing – for Materials、 Environment & Energy–	Pure copper layer formation on pure copper substrate using multi-beam laser cladding system with blue diode lasers	2020/3
Kazuhiro Ono、 Yuji Sato、 Ritsuko Higashino、 Yoshinori Funada、 Nobuyuki Abe、 Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Journal of Laser Applications	Pure copper rod formation by multibeam laser metal deposition method with blue diode lasers	2020/10
Eiji Hori、Yuji Sato、Tomoki Shibata、Koji Tojo、Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Journal of Laser Applications	Development of SLM process using 200 W blue diode laser for pure copper additive manufacturing of high density structure	2020/10

【研究発表・講演】

◆項目① 高品位レーザー加工技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
Kentaro Ueda, Yosuke Orii, Yoshinori Takahashi, George Okada, Yusuke Mori, and Masashi Yoshimura	Osaka University, Spectronix	Picosecond high-power 355-nm UV generation in CsLiB ₆ O ₁₀ crystal	OSA Lasers Congress 2016 (Advanced Solid State Lasers), AW2A.2	2016 / 11
福原泰史, 高橋義典, 安達宏昭, 森 勇介, 吉村政志	大阪大学	高品質 CsLiB ₆ O ₁₀ 結晶成長に 向けたセルフフラックス組成の 検討	第 64 回応用物理学会春季学 術講演会, 14a-F203-3	2017 / 3
折井 庸亮, 奥山 大輔, 澤田 久, 山垣 美恵子, 濱 部 裕晃, 渋谷 公 彦, 岡田 穰治	スペクトロニクス	半導体レーザーを主発振器 に用いた高出力ピコ秒パルス 光源と応用例	レーザー学会学術講演会 第 37 回年次大会, B408aV02, (2017)	2017 / 1
福原泰史、大驛 悠一、高澤秀生、 高橋義典、日野 桂子、松本和久、 安達宏昭、森勇 介、吉村政志	大阪大学	非線形光学結晶 CLBO の 紫外レーザー損傷耐性向 上に向けた育成技術開発	レーザー学会第 506 回研 究会「高機能固体レーザー とその応用」	2017 / 7
Y. Mori, Y. Takahashi, H. Adachi, and M. Yoshimura	Osaka University	Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	The 24th Congress of the International Commission for Optics	2017 / 8
T. Fukuhara, Y. Oeki, Y. Takahashi, H. Adachi, Y. Mori, and M. Yoshimura	大阪大学	CsLiB ₆ O ₁₀ grown from self-flux solutions for high resistance against UV laser- induced damage	The 24th Congress of the International Commission for Optics	2017 / 8
M. Yoshimura, Y. Takahashi, H. Adachi, and Y. Mori	Osaka University	Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	The 7th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT- 7)	2017 / 10
T. Fukuhara, Y. Oeki, K. Ueda, H. Takazawa, Y. Takahashi, K. Hino, K. Matsumoto, H. Adachi, Y. Mori, and M. Yoshimura	Osaka University	CsLiB ₆ O ₁₀ grown from Li- poor flux solutions for high resistance against UV laser-induced damage	The 7th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT- 7)	2017 / 10

吉村政志、福原泰史、上田健太郎、大驛悠一、高澤秀生、高橋義典、日野桂子、松本和久、森勇介	大阪大学	非線形光学結晶CsLiB ₆ O ₁₀ の紫外レーザー損傷高耐性化	レーザー学会学術講演会第38回年次大会	2018 / 1
河野 健太,折井庸亮,渋谷 公彦,清水 政二,吉村政志,森 勇介,西前 順一,岡田 穰治	スペクトロニクス、大阪大学、三菱電機	高出力深紫外ピコ秒ハイブリッドレーザーの開発	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018 / 9
折井 庸亮,奥山大輔,澤田 久,河野 健太,田中 宏基,亀井 浩龍,吉井 健登,渋谷 公彦,清水 政二,岡田 穰治	スペクトロニクス	高出力深紫外ピコ秒レーザーの開発	日本フォトンクス協議会講演会第2回 TACMI コンソーシアムシンポジウム	2018 / 11
折井 庸亮,奥山大輔,澤田 久,河野 健太,田中 宏基,亀井 浩龍,吉井 健登,渋谷 公彦,清水 政二,岡田 穰治	スペクトロニクス、	高出力深紫外ピコ秒レーザーの開発	レーザー学会第39回年次大会	2019 / 1
M. Yoshimura, R.Murai, Y.Takahashi, and Y. Mori	Osaka University	UV Laser-induced degradation of nonlinear optical borate crystals	OPIC/Pacific Rim Laser Damage 2018 (PLD2018), Invited talk	2018 / 4
M. Yoshimura, Y.Takahashi, R. Murai, and Y.Mori	Osaka University	Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	The 11th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2018), Invited talk	2018 / 5
M. Yoshimura, Y.Takahashi, R. Murai, and Y.Mori	Osaka University	Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	The 10th International Conference on Photonics & Applications (ICPA-10), Invited talk	2018 / 11
安藤 豪, 高橋 義典, 村井 良多, 加藤 康作, 中嶋 誠, 今西 正幸, 森 勇介, 吉村 政志	大阪大学	非線形光学結晶CsLiB ₆ O ₁₀ の高品質・大型化の検討	第66回応用物理学会春季学術講演会, 口頭発表	2019 / 3

J. Kawanaka, S.Tokita, J.Ogino, K.Fujioka, G. Xiaoyang, H.Yoshida, K.Tsubakimoto, L.Zhaoyang, M. Sakamoto, N.Morio, R. Yasuhara, S.Motokoshi, O.Tomomasa, Y.Nakata, M.Yoshimura, Y.Fujimoto, K.Ueda, M. Fujita, N. Miyanaga, and R. Kodama	Osaka University	Innovative power laser system developed at Osaka University	The 8th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2019), Yokohama, Japan	2019 / 4
M. Yoshimura, G.Ando, Y.Takahashi, R.Murai, K. Kato, M. Nakajima, M.Imanishi, and Y.Mori	Osaka University	Development of high-quality CsLiB ₆ O ₁₀ crystal for high-power DUV application	The 8th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2019), Yokohama, Japan	2019 / 4
T. Jitsuno, H.Ogawa, S.Motokoshi, M. Yoshimura, K.Fujioka, M.Imanishi, and Y.Mori	Osaka University	Time-dependence of laser-induced absorption and LIDT of glass in deep UV	Pacific Rim Laser Damage & Thin Film Physics and Applications (SPIE-PLD TFPA2019), Qingdao, China	2019 / 5
M. Yoshimura, R.Murai, Y.Takahashi, and Y. Mori	Osaka University	Nonlinear optical crystals for deep-UV light generation	8th International Symposium on Optical Materials (IS-OM8), Wroclaw, Poland	2019 / 6
G. Ando, Y.Takahashi, R.Murai, K. Kato, M. Nakajima, M.Imanishi, Y.Mori, and M.Yoshimura	Osaka University	Development of high-quality and large CsLiB ₆ O ₁₀ crystal	8th International Symposium on Optical Materials (IS-OM8), Wroclaw, Poland	2019 / 6
R. Murai, T.Fukuhara, G.Ando, Y. Tanaka, Y. Takahashi, K.Matsumoto, M.Maruyama, M. Imanishi, Y. Mori, and M.Yoshimura	Osaka University	Study of self-flux composition for growing CsLiB ₆ O ₁₀ crystal with high DUV laser-induced degradation tolerance	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19), Keystone, Colorado, USA	2019 / 8

安宅邦晶, 村井良多, 高橋義典, 折井庸亮, 岡田穰治, 森勇介, 吉村政志	大阪大学、スペクトロニクス	深紫外ピコ秒パルス発生時のCsLiB ₆ O ₁₀ の熱位相不整合の影響	第80回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学	2019 / 9
五十川諒介, 村井良多, 高橋義典, 今西正幸, 吉村政志, 森勇介	大阪大学	CsLiB ₆ O ₁₀ の水不純物低減過程における紫外光誘起劣化耐性の変化	第80回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学	2019 / 9
村井良多, 安藤豪, 田中康教, 高橋義典, 松本和久, 今西正幸, 中嶋誠, 森勇介, 吉村政志	大阪大学	高レーザー損傷耐性CsLiB ₆ O ₁₀ 結晶の育成に向けたセルフフラックス組成の検討	第48回結晶成長国内会議(JCCG-48), 大阪大学	2019 / 10
安宅邦晶, 村井良多, 高橋義典, 折井庸亮, 岡田穰治, 森勇介, 吉村政志	大阪大学、スペクトロニクス	深紫外ピコ秒パルス発生時のCsLiB ₆ O ₁₀ の熱位相不整合の影響	レーザー学会学術講演会第40回年次大会, 仙台国際センター	2020 / 1
五十川諒介, 村井良多, 高橋義典, 今西正幸, 吉村政志, 森勇介	大阪大学	CsLiB ₆ O ₁₀ の水不純物低減過程における紫外光誘起劣化耐性の変化	レーザー学会学術講演会第40回年次大会, 仙台国際センター	2020 / 1
吉村政志, 安藤豪, 村井良多, 高橋義典, 森勇介, 河野健太, 折井庸亮, 岡田穰治, 西前順一	大阪大学スペクトロニクス	深紫外レーザー用非線形光学結晶の開発	第67回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学	2020 / 3
宮川慶昭, 安宅邦晶, 村井良多, 高橋義典, 折井庸亮, 岡田穰治, 中嶋誠, 森勇介, 吉村政志	大阪大学、スペクトロニクス	深紫外ピコ秒パルス発生時のCsLiB ₆ O ₁₀ の熱位相不整合の影響(2)	第67回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学	2020 / 3
安宅邦晶, 村井良多, 高橋義典, 折井庸亮, 岡田穰治, 今西正幸, 森勇介, 吉村政志	大阪大学、スペクトロニクス	CsLiB ₆ O ₁₀ 結晶を用いた高出力355nm紫外光発生	第67回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学	2020 / 3
Kenta Kohno, Yosuke Orii, Shibuya Kimihiko, Seiji Shimizu, Masashi Yoshimura, Yusuke Mori, Junichi Nishimae, and George Okada	Spectronix, Osaka University, Mitsubishi Electric	High-power DUVpicosecond pulse generation based on a gain-switched LD and hybrid MOPA	ALPS 2019, ALPS-1-01(2019)	2019 / 4

Y. Tanaka, R.Murai, Y.Takahashi, T.Sugita, D. Toh, K. Yamauchi, S.Aikawa, Y.Umeda, Y.Funamoto, T. Kamimura, M.Imanishi, and Y.Mori	Osaka University, Nikon, Osaka Institute of Technology, Soshō Chokō	Growth of SrB ₄ O ₇ crystal and its surface DUV laser-induced damage threshold	The 9th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2020), Oral presentation	2020 / 4
K. Atagi, R.Murai, Y.Takahashi, Y.Orii, G. Okada, M. Imanishi, Y.Mori, and M. Yoshimura	Osaka University, Spectronix	High-power 355-nm UV generation by using CsLiB ₆ O ₁₀ crystal	The 9th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2020), Oral presentation	2020 / 4
吉村政志、高橋義典、安藤豪、村井良多、上平友樹、石原陽太、河野健太、折井庸亮、岡田穰治、西前順一、森勇介	大阪大学、スペクトロニクス、三菱電機	深紫外レーザー用非線形光学結晶の開発	第49回結晶成長国内会議(JCCG-49)、招待講演	2020 / 11
前垣雄隆、田中康教、村井良多、高橋義典、杉田剛、宇佐美茂佳、今西正幸、丸山美帆子、森勇介、吉村政志	大阪大学、ニコン、創晶超光	ホウ酸系光学結晶SrB ₄ O ₇ の高品質化	第49回結晶成長国内会議(JCCG-49)、口頭発表	2020 / 11
安宅邦晶、村井良多、高橋義典、折井庸亮、岡田穰治、宇佐美茂佳、今西正幸、丸山美帆子、森勇介、吉村政志	大阪大学、スペクトロニクス	CsLiB ₆ O ₁₀ 結晶を用いた50W級355nm紫外光発生	レーザー学会学術講演会第41回年次大会、口頭発表	2021 / 1
M. Yoshimura, Y.Takahashi, GoAndo, Y.Kamihira, R. Murai, and Y.Mori	Osaka University	Growth of large CsLiB ₆ O ₁₀ crystal from Li-poor self-flux	The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-8), Oral presentation	2021 / 3

Y. Tanaka, R.Murai, Y.Takahashi, T.Sugita, D. Toh, K. Yamauchi, S.Arikawa, H.Marui, Y. Umeda, Y. Funamoto, T. Kamimura, M.J.F. Empizo, S.Usami, M.Maruyama, M. Imanishi, Y. Mori, and M.Yoshimura	Osaka University, Nikon, Osaka Institute of Technology, Sosho Choko	High surface laser- induced damage threshold of SrB4O7 single crystals under 266-nm (DUV) laser irradiation	The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT- 8), Oral presentation	2021 / 3
--	---	---	---	----------

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名 等	発表年月
関根尊史、他	浜松ホトニクス	High Gain, High Efficiency Cryogenic Yb:YAG Ceramics Amplifier for Several Hundred Joules DPSSL	ASSL	2016/11
関根尊史、他	浜松ホトニクス	Development of cryogenic Yb:YAG ceramics amplifier for over 100J DPSSL	Photonics West 2017 LASE	2017/1
関根尊史、他	浜松ホトニクス	Demonstration of a 64J at 10ns Output from Cryo- cooled Yb:YAG Laser using new laser-diode technology	The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2017)	2017/4
渡利威士、他	浜松ホトニクス	Development of Materials Processing Technology using 100-J class High-Energy-Laser Pulses	The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2017)	2017/4
関根尊史、他	浜松ホトニクス	64J Output Energy in 10ns Pulse from Cryogenic Yb:YAG Ceramics Laser	CLEO2017	2017/5
弘中陽一郎、他	大阪大学、産 業技術総合研 究所、浜松ホ トニクス	高パルスエネルギーレー ザーを用いた残留応力場 の形成	第78回応用物 理学会秋季学術講演会	2017/9
栗田隆史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、 産業技術総合 研究所	大出力レーザーの産業利 用と新たな量子ビーム計 測技術への展望	第60回放射線 化学討論会	2017/9

水田好雄、他	浜松ホトニクス	Low Temperature Gas Cooling Technique for a High Efficiency 100 J Class Ceramics Laser Amplifier	Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL2017)	2017/10
森田宇亮、他	浜松ホトニクス	Development of Compact LD Module for 10J at 10Hz Cryo-cooled Yb:YAG Ceramics Active Mirror Laser Amplifier	Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL2017)	2017/10
弘中陽一郎、他	大阪大学、産業技術総合研究所、浜松ホトニクス	高出力レーザーを用いた金属中の残留応力場形成	プラズマカンファレンス 2017	2017/11
川嶋利幸	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	高出力レーザーの産業利用と新たな量子ビーム計測技術への展望	TACMI シンポジウム	2017/12
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100J 級 LD 励起 Yb:YAG セラミックレーザーの開発	平成 29 年度レーザー核融合とレーザー加速研究会	2018/1
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100J 級 LD 励起 Yb:YAG セラミックレーザー装置の開発	レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会	2018/1
栗田隆史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	100ジュール級ナノ秒高輝度パルスによる加工基盤技術の開発	レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会	2018/1
弘中陽一郎、他	大阪大学	高出力レーザーによる金属材料の強靱化に関する研究	レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会	2018/1
三浦永祐	産業技術総合研究所	高出力レーザーの応用研究	計量標総合センター成果発表会	2018/2
宮西宏併、他	大阪大学	高パルスエネルギーを用いた残留応力場の形成と X 線自由電子レーザーを用いた形成過程の観察	平成 29 年度衝撃波シンポジウム	2018/3
宮西宏併、他	大阪大学	NEDO 高輝度高効率次世代レーザー技術開発プロジェクトにおける取り組み	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 構造物性研究センター研究会	2018/3
重森啓介、他	大阪大学	Laser Peening Study with Large Scale High Power Laser	Laser Solutions for Space and the Earth 2018 (LSSE2018)	2018/4

水田好雄、他	浜松ホトニクス	Development of High-Energy-Class Laser Processing Technologies Using a Laser-Diode Pumped 100-J Pulse-Shaped Laser System	OPTICS& PHOTONICS International Congress 2018	2018/4
森田宇亮、他	浜松ホトニクス、大阪大学	Development of a 10-J, 10-Hz Cryo-cooled Yb:YAG Ceramics Active Mirrors Laser Amplifier System	OPTICS& PHOTONICS International Congress 2018	2018/4
竹内康樹、他	浜松ホトニクス、大阪大学	Development of Cryogenically Cooled Helium Gas Circulation System for Cooling Active Medium of 100 J Class Laser Amplifier	OPTICS& PHOTONICS International Congress 2018	2018/4
重森啓介、他	大阪大学	高出力レーザーによるレーザーピーニングの研究	光・量子科学合同シンポジウム、量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所、	2018/5
壁谷悠希、他	浜松ホトニクス、産業技術総合研究所、大阪大学	Development of Laser Shock Peening Processing Technologies Using Repeatable 100-J Class Laser with Pulse Shape Control	7th International Conference on Laser Peening and Related Phenomena	2018/6
弘中陽一郎、他	大阪大学	干渉衝撃波を用いた残留歪と観測法	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
宮西宏併、他	大阪大学、浜松ホトニクス、産業技術総合研究所	レーザーピーニング過程におけるオーステナイト系ステンレス鋼の結晶構造変化のX線自由電子レーザーを用いたその場観察	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
宮西宏併、他	大阪大学、浜松ホトニクス、産業技術総合研究所	In-situ X-ray diffraction measurements of crystal structure transition of austenitic stainless steel under shock compression and release	SACLA Users' Meeting 2018	2018/9
宮西宏併、他	大阪大学、浜松ホトニクス、産業技術総合研究所	衝撃圧縮解放過程におけるオーステナイト系ステンレス鋼の結晶構造変化のその場X線回折計測	2018年 第59回高圧討論会	2018/11

重森啓介、他	大阪大学	IoT時代のパワーレーザー加工 ～レーザーによる先進的 ものづくりからインフラ整 備まで～	パワーレーザーフォーラ ムキックオフシンポジウム	2018/11
倉田将輝、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100 J class cryo- gas-cooled multi-disk Yb:YAG ceramics laser amplifier	14th Laser Ceramics Symposium 2018	2018/11
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、 産業技術総合 研究所	次世代加工技術の確立に 向けた100J級可変パルス レーザープラットフォームの開発	レーザー学会学術講演会 第39回年次大会	2019/1
竹内康樹、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100J級パルスエネルギー を目指した低温ヘリウム ガス冷却式 Yb:YAG レー ザー増幅器の開発	レーザー学会学術講演会 第 39回年次大会	2019/1
森田宇亮、他	浜松ホトニクス、大阪大学	低温 Yb:YAG セラミクス を用いたアクティブミラー 型 10-J, 10Hz レーザー増 幅システムの開発	レーザー学会学術講演会 第 39回年次大会	2019/1
宮西宏併、他	大阪大学	衝撃圧縮解放過程におけ るオーステナイト系ステン レス鋼の結晶構造変化 の X 線自由電子レーザー を用いたその場観察	レーザー学会学術講演会 第 39回年次大会	2019/1
玉置善紀、他	浜松ホトニクス	Current status of high energy laser development and future prospect	日本学術会 議・国際シンポジウム	2019/1
竹内康樹、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100J級パルスエネルギー を目指した低温ヘリウム ガス冷却式 Yb:YAG レー ザー増幅器の開発	平成30年度レ ーザーとプラズマに関す る研究会	2019/1
壁谷悠希、他	浜松ホトニクス、大阪大学	Development of a 10J,10- Hz laser amplifier system with cryo-cooled Yb:YAG ceramics using active- mirror method	SPIE PHOTONICS WEST LASE	2019/2
三浦永祐	2018 産業 技術総合研究 所	2019 高出力レーザーの 応用研究	2020 年度計量 標準総合センター成果発 表会	2019/2
関根尊史他	浜松ホトニクス、大阪大学、 産業技術総合 研究所	Development of high energy laser platform for next generation laser processing	SPIE. Optics+ Optoelectronics 2019 Workshop	2019/4
川嶋利幸	浜松ホトニクス	高出力レーザーを用いたも のづくり	OPIE'2019 併 設セミナー 「レーザー基礎 & 応用技 術セミナー」	2019/4

関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	A 100-J class laser processing system with variable parameters for the database/platform in the TACMI consortium	ALPS2019	2019/4
倉田将輝、他	浜松ホトニクス、大阪大学	Development of 100-J class cryogenically cooled Yb:YAG ceramics laser technology	AOPC2019	2019/7
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学	次世代レーザー加工応用の探索に向けた100J 固体レーザーの開発	レーザ学会研究会	2019/7
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	Development of repetitive high-energy pulsed laser technologies toward kilo-joule class diode-pumped solid-state laser	ISUILS2019	2019/8
栗田隆史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所、高輝度光科学研究センター	実時間応力状態の観察による大出力レーザー表面加工現象の解明	Spring-8 シンポジウム 2019	2019/8
加藤義則、他	浜松ホトニクス	AI/IoT 時代に向けた100J 級セラミックスレーザと加工応用への展開	精密工学会2019 年度秋季 シンポジウム	2019/9
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	Development of a 100 J DPSSL as a laser processing platform in the TACMI consortium	IFSA2019	2019/9
宮西宏併、他	大阪大学 (2019 年 4 月より理化学研究所に勤務)	In-situ observation of crystal structure transitions of austenitic stainless steel under shock compression and release using X-ray free electron laser	IFSA2019	2019/9
弘中陽一郎、他	大阪大学、産業技術総合研究所、浜松ホトニクス	Generation of Residual Stress Field in metal by an interference shock wave	IFSA2019	2019/9
倉田将輝、他	浜松ホトニクス、大阪大学	Development of a 100 J Class Cryogenically Cooled Multi-disk Yb:YAG Ceramics Laser	ASSL2019	2019/9
弘中陽一郎、他	大阪大学	衝撃波誘起残留応力場の生成	第 60 回高圧討論会	2019/10
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	高エネルギー光パルスによる新たな加工応用を目指した100J 超級レーザー加工プラットフォームの構築	多元技術融合光プロセス研究会	2019/12

関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	100J×10Hz動作を目指したLD励起固体レーザーの開発	レーザーとプラズマに関する研究会	2020/1
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学、産業技術総合研究所	高エネルギー可変パルスレーザーによる新たな材料加工応用の開拓	レーザー学会	2020/1
森田宇亮、他	浜松ホトニクス、大阪大学	10J級アクティブミラー型低温Yb:YAGレーザー増幅システムの10Hz動作に向けた開発	レーザー学会	2020/1
幡野佑真、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100J-10 Hz 出力へ向けた低温ヘリウム冷却式Yb:YAGレーザー増幅器の開発	レーザー学会	2020/1
村松侑輝、他	浜松ホトニクス	100mJ、10Hz室温動作アクティブミラー型Yb:YAGレーザーシステムの開発	レーザー学会	2020/1
三浦永祐	産業技総合研究所	高出力レーザーピーニング加工試料の非破壊残留応力分布測定	2019年度計量標準総合センター成果発表会	2020/2
倉田将輝、他	浜松ホトニクス、大阪大学	Development of 100J, 10Hz Cryogenically Cooled Yb:YAG Ceramics Laser	ALPS2020	2020/4
村松侑輝、他	浜松ホトニクス、大阪大学	250J出力LD励起低温冷却Yb:YAGセラミクスレーザー増幅器の開発	レーザー学会学術講演会	2021/1
幡野佑真、他	浜松ホトニクス、大阪大学	100J出力LD励起低温冷却Yb:YAGセラミクスレーザー増幅器の10Hz動作確認	レーザー学会学術講演会	2021/1
関根尊史、他	浜松ホトニクス、大阪大学	250J Yb:YAG ceramics laser system for laser processing platform in TACMI consortium	ALPS2021	2021/4

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
Susumu Noda, Masahiro Yoshida, Wataru Kunishi, Takuya Inoue, Kenji Ishizaki, Menaka De Zoysa, Kyoko Kitamura, Naohiro Shimaji, Kentaro Nishimura	Kyoto University	Photonic crystal lasers: fabrication with AI-assisted technology and application to LiDAR system	SPIE Photonics WEST	2021/3
Susumu Noda	Kyoto University	Progress of Photonic Crystal Surface-Emitting Lasers: Paradigm Shift for LiDAR Sensing and Laser Processing	SPIE Photonics WEST	2021/3
小泉 朋朗, 江本 溪, 日比野 拳三, 廣瀬 正輝, 井上 卓也, 石崎 賢司, De Zoysa Menaka, 野田 進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザーのワット級動作	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3
森田 遼平, 前田 純也, 井上 卓也, 野田 進	京都大学	円環可飽和吸収領域導入によるフォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化(III)	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3
増田 将紀, 森田 遼平, 井上 卓也, 野田 進	京都大学	可飽和吸収効果を導入したフォトニック結晶レーザーのナノ秒励起過渡応答特性	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3
二五 和樹, 井上 卓也, 森田 遼平, 野田 進	京都大学	周波数勾配を導入した短パルスフォトニック結晶レーザーのパルス圧縮効果の解析	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの応用に関する講演	一般社団法人 日本工作機械工業会会員向けセミナー	2021/2
井上 卓也, 森田 遼平, 吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化	第五回 フォトニクスワークショップ	2020/12

井上 卓也, 森田遼平, 吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの 短パルス・高ピーク出力発 振	Photonics DeviceWork shop2020	2020/11
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの 最近の進展	一般財団法人光産 業技術振興協会 2020年度第3回光材料・ 応用技術研究会 [研究会 設立30周年記念行事]	2020/11
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの 進展とLiDAR応用	日本学術振興会ワ イドキャップ半導体光・電子 デバイス第162委員会研 究会	2020/10
森田 遼平, 井 上 卓也, 前田 純也, De Zoy sa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進	京都大学	円環可飽和吸収領域を導入 したフォトニック結晶レー ザーの短パルス・高ピーク 出力発振(II)	第81回応用物理学会秋季 学術講演会	2020/9
増田 将紀, 井 上 卓也, 森田 遼平, De Zoy sa Menaka, 野田 進	京都大学	利得スイッチングによるフォ トニック結晶レーザーの単 一短パルス動作の観測	第81回応用物理学会秋季 学術講演会	2020/9
井上 卓也, 吉 田 昌宏, 森田 遼平, De Zoy sa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進	京都大学	屈折率勾配を導入したフォ トニック結晶レーザーの自 励パルス発振動作の観測 (II) —注入電流依存性—	第81回応用物理学会秋季 学術講演会	2020/9
江本 溪, 小泉 朋朗, 日比野 拳三, 廣瀬 正輝, 井上 卓也, 石崎 賢司, De Zoysa Menaka, 野田 進	京都大学, スタンレー電 気株式会社	青色帯域GaN系フォトニッ ク結晶レーザーの実現	第81回応用物理学会秋季 学術講演会	2020/9
野田 進	京都大学	光を操る技術が未来を拓く	一般財団法人光産 業技術振興協会 2020年度多元技術融合 光プロセス研究会第1回研 究交流会	2020/8
Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	Tailored Photonic Cry stals for Advanced S emiconductor Lasers	OSA Advanced Photo nics Congress, Lasers and LaserMaterials	2020/7

Susumu Noda	Kyoto University	Overview of PCSEL— From Principle to the State Of The Artfor Society 5. 0	PCSEL Workshop (International symposiums supported by JSP S London)	2020/5
M. Yoshida, K. Izumi, S. Katsuno, M. De Zoysa, K. Ishizaki, T. Inoue, and S. Noda	Kyoto University	PCSEL with Double Lattice Photonic Crystal	PCSEL Workshop (International symposiums supported by JSP S London)	2020/5
T. Inoue, R. Morita, M. Yoshida, M. De Zoysa, and S. Noda	Kyoto University	Time—dependent3D c oupled—wave analysis of PCSEL	PCSEL Workshop (International symposiums supported by JSPS London)	2020/5
江本溪, 小泉朋朗, 日比野拳三, 廣瀬正輝, 井上卓也, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 野田進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザーの連続動作	第67回応用物理学会春季 学術講演会	2020/3
小泉朋朗, 江本溪, 日比野拳三, 廣瀬正輝, 井上卓也, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 野田進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザーの高出力動作(Ⅲ)	第67回応用物理学会春季 学術講演会	2020/3
森田遼平, 井上卓也, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 野田進	京都大学	パルス幅 ~30ps・ピーク出力~20W自励パルス発振可能なフォトニック結晶レーザーの実現	第67回応用物理学会春季 学術講演会	2020/3
前田純也, 森田遼平, 井上卓也, 野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの 1 50W級自励パルス発振動作に向けたデバイス設計	第67回応用物理 学会春季学術講演会	2020/3
増田将紀, 井上卓也, 森田遼平, De Zoysa Menaka, 野田進	京都大学	利得スイッチングによるフォトニック結晶レーザーの単一短パルス動作—解析—	第67回応用物理学会春季 学術講演会	2020/3

井上卓也, 吉田昌宏, 森田遼平, De Zoysa Me naka, 石崎賢司, 野田進	京都大学	屈折率勾配を導入したフォ トニック結晶レーザーの自 励パルス発振動作の観測	第67回応用物理学会春季 学術講演会	2020/3
吉田昌宏	京都大学	高出力・高ビーム品質二重 格子フォトニック結晶レーザ (LQE奨励賞記念講演)	Photonic Device Works hop 2019	2019/12
Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	Progress in photonic crystals	The 4th POSTECH nanophotonics tutorial workshop (Pohang University of Science and Technology, Kor ea)	2019/12
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの 高輝度・高出力化	第154回微小光学研究会	2019/12
Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	Progress in photonic -crystallasers	24th Mic rooptics Conference (M OC 2019)	2019/11
Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	Recent progress and future prospects of p hotonic crystals (tent ative)	Micro and Nanophoto nics Days	2019/11
Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	Progress in p hotonic crystals	The Internationa l Sympos ium on Plasmonics a nd Nanophotonics (iS PN 2019)	2019/11
Ryohei Mori ta, Takuya Inoue, Menak a De Zoys a, Kenji Is hizaki, Yoshi noru Tanaka, and Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	8-W-Peak Self-Pul sating Photonic-Cryst al Surface Emitting L aser with Ring-Shap ed Saturable Absorbe r	IEEE Photonics Confe rence (IPC) 2019	2019/10
Susumu Noda	Kyoto Univ ersity	Recent progress in hi gh-brightness photon ic-crystal lasers	The 9th Asia-Pacific Worksho p on Widegap Semicond uctors (APWS 2019)	2019/10
野田 進	京都大学	フォトニック結晶の進展と将 来展望	第17回フォトニ クス・イノベーションセミナー	2019/10

Susumu Noda	Kyoto University	Photonic Crystals for Society 5.0 – Photonic-Crystal Lasers –	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2019)	2019/9
Susumu Noda and Menaka De Zoysa	Kyoto University	Photonic-Crystal Lasers for Society 5.0	European Materials Research Society (EMRS) 2019 Fall Meeting	2019/9
小泉朋朗, 江本溪, 日比野拳三, 石崎賢司, 井上卓也, DeZoysa Menaka, 野田進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN 系フォトニック結晶レーザーの高出力動作 (II)	第80回 応用物理学会 秋季学術講演会	2019/9
日比野拳三, 小泉朋朗, 江本溪, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 野田進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザーの格子定数と閾値電流密度	第80回 応用物理学会 秋季学術講演会	2019/9
森田遼平, 井上卓也, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 野田進	京都大学	ストリークカメラによる自励パルス発振フォトニック結晶レーザーの過渡応答測定	第80回 応用物理学会 秋季学術講演会	2019/9
森田遼平, 井上卓也, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 野田進	京都大学	円環可飽和吸収領域を有するフォトニック結晶レーザーの単一モード自励パルス発振	第80回 応用物理学会 秋季学術講演会	2019/9
井上卓也, 吉田昌宏, 森田遼平, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 野田進	京都大学	線形屈折率変調を導入したフォトニック結晶レーザーの自励パルス発振動作の解析	第80回 応用物理学会 秋季学術講演会	2019/9
Susumu Noda	Kyoto University	Photonic-Crystal Lasers for Society 5.0	2019 IEEE 16th International Conference on Group IV Photonics (GFIP)	2019/8
Susumu Noda	Kyoto University	Photonic-Crystal Lasers for Smart Mobility and Production	International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW) 2019	2019/7
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの現状と将来展望	光・レーザー関西 2019 レーザー総研オープンセミナー	2019/7

野田 進	京都大学	超スマート社会とフォトニック結晶	光・レーザー関西 2019開催記念公開シンポジウム	2019/7
Susumu Noda	Kyoto University	High-Power and High-Beam-Quality Photonic Crystal Lasers	International Summit on OPTICS, PHOTONICS AND LASER TECHNOLOGIES	2019/6
Susumu Noda	Kyoto University	High-Power and High-Beam-Quality Photonic-Crystal Lasers	Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2019	2019/5
De Zoysa Menaka, 吉田 昌宏, 石崎 賢司, 田中 良典, 初田 蘭子, 野田 進	京都大学	高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザー	2019年電子情報通信学会総合大会	2019/3
田中 良典, 吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進	京都大学	5mmφサイズのフォトニック結晶レーザーの動作特性解析	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
小泉 朋朗, 江本 溪, 日比野 拳三, 石崎 賢司, De Zoysa Menaka, 田中良典, 野田 進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザーの低閾値電流密度動作の実現	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
江本 溪, 小泉 朋朗, 日比野 拳三, 石崎 賢司, De Zoysa Menaka, 田中良典, 野田 進	京都大学, スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザーの高出力動作	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
森田遼平、井上卓也、De Zoysa Menaka、石崎賢司、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの自励パルス発振の高出力化に向けた検討(II)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3

吉田 昌宏, 和泉 孝紀, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 田中良典, 初田 蘭子, 野田進	京都大学	二重格子フォトニック結晶レーザーの大面積・高輝度化のための格子点構造の設計	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 田中良典, 初田 蘭子, 和泉孝紀, 榎健太郎, 野田進	京都大学	二重格子フォトニック結晶レーザーの発振特性に与える格子点構造の影響	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
井上 卓也, 吉田 昌宏, 田中良典, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 野田進	京都大学	面内ヘテロ構造を導入したフォトニック結晶レーザー(PCSEL)の解析	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
Susumu Noda	Kyoto University	High-brightness photonic crystal lasers and their extension to GaN material system	2019 SPIE Photonic West	2019/2
Susumu Noda	Kyoto University	Two decades of progress for photonic crystals: from the realization of complete 3D crystals to the state of the art for society5.0	2019 SPIE Photonic West	2019/2
野田 進	京都大学	フォトニック結晶による半導体レーザー	第150回記念微少光学研究会	2018/12
Susumu Noda	Kyoto University	Photonic Crystal Lasers and Their Extension to Nitride Semiconductor Systems	International Workshop on Nitride Semiconductors	2018/11
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザー	第374回蛍光体同学会講演会	2018/11
小泉 朋朗, 江本 溪, 石崎 賢司, デゾイサメーナカ, 田中良典, 園田 純一, 野田 進	京都大学、スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザー実現のためのMOVPE空孔形成法の検討	電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会	2018/11

Susumu Noda	Kyoto University	Photonic crystal surface emitting lasers	23rd Microoptics Conference (MOC 2018)	2018/10
小泉 朋朗, 江本 溪, 石崎 賢司, De Zoysa Menaka, 田中 良典, 園田 純一, 野田 進	京都大学、スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザ実現のためのMOVPE空孔形成法の検討(3)	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
江本 溪, 小泉 朋朗, 石崎 賢司, De Zoysa Menaka, 田中 良典, 園田 純一, 野田 進	京都大学、スタンレー電気株式会社	MOVPEで空孔形成したGaN系フォトニック結晶のバンド端共振作用の評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 田中 良典, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザのCW動作時の温度分布補償に関する検討	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
森田 遼平, 井上 卓也, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 田中 良典, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザの自励パルス発振の特性評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
森田 遼平, 井上 卓也, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 田中 良典, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザの自励パルス発振の高出力化に向けた検討	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 初田 蘭子, 田中 良典, 瀬尾 和, 榎 健太郎, 野田 進	京都大学	高輝度フォトニック結晶レーザの高効率化に関する検討	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
R. Morita, T. Inoue, M. D. Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, and S. Noda	Kyoto University	Demonstration of Self-pulsating Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers	The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2018)	2018/8

Susumu Noda	Kyoto University	High-Power and High-Beam-Quality Photonic-Crystal Lasers	The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2018)	2018/8
T. Inoue, R. Morita, M. Yoshida, M. De Zoysa, Y. Tanaka, and S. Noda	Kyoto University	Transient analysis of photonic-crystal surface-emitting lasers via time-dependent 3D coupled-wave theory	The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2018)	2018/8
Susumu Noda	Kyoto University	High-Power, High-Beam-Quality Photonic Crystal Lasers	International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2018)	2018/7
Susumu Noda	Kyoto University	High-power and high-beam quality photonic crystal lasers	18th International Conference on Laser Optics	2018/6
De Zoysa Menaka, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶面発光レーザの進展	超高速光エレクトロニクス(UFO)研究会 第5回研究会	2018/6
江本溪、小泉朋朗、園田純一、De Zoysa Menaka、田中良典、野田進	京都大学、スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザにおける各種構造設計	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
小泉朋朗、江本溪、園田純一、De Zoysa Menaka、田中良典、野田進	京都大学、スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザ実現のためのMOVPE空孔形成法の検討(II)	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
井上卓也、森田遼平、Kim Taejoon、De Zoysa Menaka、石崎賢司、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザの緩和振動測定	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
森田遼平、井上卓也、De Zoysa Menaka、石崎賢司、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザの自励パルス発振の実現	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
井上卓也、森田遼平、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザの高出力・短パルス動作の解析—空孔形状の設計—	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
森田遼平、井上卓也、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザの高出力・短パルス動作の解析—電極形状の設計—	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9

小泉朋朗, 江本溪, 園田純一, De Zoysa Menaka, 田中良典, 野田進	京都大学、スタンレー電気株式会社	GaN系フォトニック結晶レーザー実現のためのMOVPE空孔形成法の検討	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
森田遼平, 井上卓也, 北川均, 野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの高出力・短パルス動作の解析	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
田中良典, Menaka De Zoysa, 野田進	京都大学	三角格子フォトニック結晶レーザーの高出力化のための格子点設計	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
井上卓也, 森田遼平, 田中良典, 野田進	京都大学	3次元結合波理論によるフォトニック結晶レーザーの過渡応答解析	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3

◆項目③-2 高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LDの研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
M. Jo and H. Hirayama	理化学研究所	Recent progress and future prospects of AlGaIn deep-UV LEDs	International Conference UV LED Technologies & Applications (ICULTA-2018)	2018/4
M. Jo, S. Minami and H. Hirayama	理化学研究所	Improved crystal quality of semipolar AlN by employing thermal annealing technique with MOVPE	The 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX)	2018/6
M. Jo, Y. Itokazu and H. Hirayama	理化学研究所	UVC emission from (11-22) AlGaIn quantum wells grown by metal-organic chemical vapor deposition	International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-7)	2018/8
前田哲利, 定昌史, 平山秀樹	理化学研究所	280nm帯AlGaIn深紫外LD構造の作製とその電流注入発光特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
金輝俊, 齊藤貴大, 藤川紗千恵, 前田哲利, 岡田成仁, 平山秀樹, 只友一行	理化学研究所, 山口大学	AlNの選択横方向成長におけるストライプ方位依存性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9

前田哲利, 定昌史, 松本卓磨, 鎌田憲彦, 平山秀樹	理化学研究所	UVCレーザーダイオード実現へのアプローチ	日本学術振興会162委員会第110回研究会・特別公開シンポジウム	2018/9
定昌史, 糸数雄史, 平山秀樹	理化学研究所	m面サファイア上に成長した(11-12)面AlGaIn量子井戸の発光特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
糸数雄史, 桑葉俊輔, 定昌史, 鎌田憲彦, 平山秀樹	理化学研究所	高温アニール・再成長により作製したAlNの結晶性に及ぼす核形成条件の影響	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
糸数雄史, 桑葉俊輔, 定昌史, 鎌田憲彦, 平山秀樹	理化学研究所	高温アニール処理AlN上に作製したUVC-LEDの高効率動作	日本学術振興会162委員会第110回研究会・特別公開シンポジウム	2018/9
前田哲利, 山田陽一, 定昌史, 平山秀樹	理化学研究所	AlGaIn深紫外LDの実現に向けた最近の進展	電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)	2018/11
M. Jo, Y. Itokazu, and H. Hirayama	理化学研究所	Controlled crystal orientation of semipolar AlN grown on m-plane sapphire by MOCVD	The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN 2018)	2018/11
N. Maeda, M. Jo, and H. Hirayama	理化学研究所	Efficient emission by current injection from 280nm AlGaIn deep-UVLED structures	The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN 2018)	2018/11
K. Wang, N. Maeda, and H. Hirayama	理化学研究所	Hybrid growth of AlGaIn deep ultraviolet light emitting diodes by MBE and MOCVD	The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN 2018)	2018/11

Y. Itokazu, S. Kuwaba, M. Jo, N. Kamata, and H. Hirayama	理化学研究所	Influence of the nucleation conditions on the quality of AlN layers with high-temperature annealing and regrowth processes	The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN 2018)	2018/11
N. Okada, F. Kim, T. Saito, S. Fujikawa, N. Maeda, H. Hirayama and K. Tadatomo	理化学研究所, 山口大学	Epitaxial lateral overgrowth of AlN with partially non-dislocation-region on vicinal AlN template	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/7
M. Jo, Y. Itokazu, S. Kuwaba and H. Hirayama	理化学研究所	Improved simulation of MOCVD growth of AlN by using data assimilation	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/7
Y. Itokazu, Y. Mogami, S. Kuwaba, S. Motegi, A. Osawa, K. Osaka, Y. Tamioka, M. Jo, N. Kamata and H. Hirayama	理化学研究所	Influence of the strain relaxation on the optical property of AlGaN quantum wells	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/7
H. Murotani, K. Hisanaga, R. Tanabe, A. Hamada, N. Maeda, M. Jo, H. Hirayama and Y. Yamada	理化学研究所, 山口大学	Optically pumped stimulated emission from AlGaN-based UV-C multiple quantum wells with high internal quantum efficiency of 16% at 750 K	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/7

H. Murotani, H. Miyoshi, R. Takeda, M. A. Khan, N. Maeda, M. Jo, H. Hirayama and Y. Yamada	理化学研究所, 山口大学	Role of exciton recombination processes on internal quantum efficiency in AlGaIn-based UV-B multiple quantum wells	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/7
M. A. Khan, R. Takeda, H. Miyoshi, Y. Yamada, S. Fujikawa, N. Maeda, M. Jo and H. Hirayama	理化学研究所	Achievement of internal quantum efficiency up to 53% at 326nm-UV A emission from AlGaIn QWs with engineering of highly relaxed buffer layer	4th International Workshop on Ultraviolet Materials and Devices (IWUMD4)	2019/9
三好博之, 武田椋平, 中生拓希, 倉井聡, 室谷英彰, M. A. Khan, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn 系多重量子井戸構造における励起子レート方程式モデルによる効率曲線の解析	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
糸数雄史, 桑葉俊輔, 定昌史, 鎌田憲彦, 平山秀樹	理化学研究所	AlGaIn歪制御に向けたAlGaIn/AlIn界面構造とアニール効果の検討	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
室谷英彰, 三好博之, 武田椋平, 中生拓希, 倉井聡, M. A. Khan, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn系多重量子井戸構造における励起子レート方程式モデルによる効率曲線の解析(2)	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
田邊凌平, 久永桂典, 濱田晟, 別府寛太, 倉井聡, 室谷英彰, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn量子井戸構造における深紫外誘導放出の温度依存性	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9

M. A. Khan, J. P. Bermudo, Y. Ishikawa, H. Ikenoue, S. Fujikawa, N. Maeda, M. Jo and H. Hirayama	理化学研究所	The influence of both Mg-concentration and excimer laser annealing (ELA) on p-AlGaIn cladding layer for the application of AlGaIn-based UVB Laser diodes	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
定昌史, 糸数雄吏, 桑葉俊輔, 平山秀樹	理化学研究所	データ同化を用いたAlN成長シミュレーションの高精度化	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
斉藤貴大, 中村亮太, 藤川紗千恵, 金輝俊, 前田哲利, 岡田成仁, 平山秀樹, 只友一行	理化学研究所, 山口大学	微傾斜サファイア基板上AlNの選択横方向成長	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
Y. Itokazu, S. Kuwaba, M. Jo, N. Kamata, and H. Hirayama	理化学研究所	Investigation of AlGaIn/AlN interface structure and annealing effect for control of strain relaxation	The 9th Asia-Pacific Workshop on Wide gap Semiconductors (APWS 2020)	2019/11
H. Murotani, H. Miyoshi, R. Takeda, M. A. Khan, N. Maeda, M. Jo, H. Hirayama, and Y. Yamada	理化学研究所, 山口大学	Radiative and nonradiative recombination rates of excitons and their effects on internal quantum efficiency of AlGaIn-based UV-B MQWs	The 9th Asia-Pacific Workshop on Wide gap Semiconductors (APWS 2019)	2019/11
奥野椋, 斉藤貴大, 岡田成仁, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 只友一行	理化学研究所, 山口大学	選択横方向成長を用いたAlNの無転位領域の形成	2020年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会	2020/8
室谷英彰, 三好博之, 武田椋平, 中尾拓希, 倉井聡, M. A. Khan, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn系UV-A多重量子井戸構造における内部量子効率と励起子の輻射再結合ダイナミクスの励起強度依存性	第81回応用物理学会秋季学術講演会	2020/9

田邊凌平, 濱田昂, 別府寛太, 倉井聡, 室谷英彰, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn系UV-C多重量子井戸構造における室温誘導放出と縦共振器モードの観測	第81回応用物理学会秋季学術講演会	2020/9
M. Ajmal Khan, N. Maeda, M. Jo and H. Hirayama	RIKEN	The influence of Al-Graded undoped-AlGaIn cladding layer's thickness on the operating voltages as well as on injection current of Ultraviolet-B laser diode	Optics Virtual 2020	2020/9
室谷英彰, 田邊凌平, 久永桂典, 濱田晟, 別府寛太, 前田哲利, M. A. Khan, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn系UV-C多重量子井戸構造の内部量子効率と励起子系誘導放出特性	電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会	2020/11
濱田晟, 福田拓矢, 倉井聡, 室谷英彰, 前田哲利, M. A. Khan, 定昌史, 平山秀樹, 山田陽一	理化学研究所, 山口大学	AlGaIn系UV-C多重量子井戸構造における誘導放出のしきい励起パワー密度の温度依存性	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3
M. A. Khan, N. Maeda, M. Jo and H. Hirayama	RIKEN	Enhancing the current density of AlGaIn-based UV laser diode by introducing an Al-graded Mg-doped p-AlGaIn hole source layer	IS Plasma 2021 / IC-PLANTS 2021	2021/3
H. Murotani, H. Miyoshi, R. Takeda, H. Nakao, M. A. Khan, N. Maeda, M. Jo, H. Hirayama, and Y. Yamada	RIKEN, Yamaguchi University	Exciton recombination dynamics and internal quantum efficiency of AlGaIn-based UV-A multiple quantum wells	CGCT-8	2021/3

A. Hamada, R. Tanabe, K. Hisanaga, K. Beppu, H. Murotani, N. Maeda, M. A. Khan, M. Jo, H. Hirayama, and Y. Yamada	RIKEN, Yamaguchi University	Excitonic stimulated emission from AlGaN-based multiple quantumwells	CGCT-8	2021/3
R. Hidaka, T. Saito, T. Ito, T. Kaneko, R. Sakamoto, K. Ataka, H. Hirayama, N. Okada and K. Tadamoto	RIKEN, Yamaguchi University	Fabrication of high-quality AlN template by maskless epitaxial lateral overgrowth through self-forming tiny pits	IS Plasma 2021 / IC-PLANTS 2021	2021/3
奥野 椋, 日高 遼太, 齊藤 貴大, 岡田 成仁, 前田 哲利, 定昌 史, 平山 秀樹, 倉井 聡, 山田 陽一, 只友 一行	理化学研究所, 山口大学	極小ピットを介したAlNテンプレートの高品質化	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
齊藤 貴大, 金輝 俊, 藤川 紗千恵, 前田 哲利, 岡田 成仁, 平山 秀樹, 只友 一行	山口大学, 理化学研究所	選択横方向成長による高品質AINのストライプ方位依存性	応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会	2018/8
金輝 俊, 齊藤 貴大, 藤川 紗千恵, 前田 哲利, 岡田 成仁, 平山 秀樹, 只友 一行	山口大学, 理化学研究所	AINの選択横方向成長におけるストライプ方位依存性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
Y. Yao, Y. Sugawara, Y. Ishikawa, N. Okada, R. Inomoto, K. Tadamoto, Y. Takahashi, and K. Hirano	山口大学, 理化学研究所	Observation of dislocations and their arrays in AlN single crystal by synchrotron X-ray topography	IWN2018	2018/11

Narihito Okada, Fijun Kim, Takahiro Saito, Sachie Fujikawa, Noritoshi Maeda, Hideki Hirayama, and Kazuyuki Tadamoto		Epitaxial Lateral Overgrowth of AlN with Partially Non-Dislocation-Region on Vicinal AlN Template	ICNS2019	2019/7
齊藤貴大, 中村亮太, 藤川紗千恵, 金輝俊, 前田哲利, 岡田成仁, 平山秀樹, 只友一行	山口大学, 理化学研究所	微傾斜サファイア基板上AlNの選択横方向成長	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
齊藤貴大, 金輝俊, 岡田成仁, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 只友一行	山口大学, 理化学研究所	ELO-AlNテンプレートの作製とMQWの評価	第66回応用物理学会春季学術講演会	2020/3
奥野椋, 日高遼太, 齊藤貴大, 岡田成仁, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 倉井聡, 山田陽一, 只友一行	山口大学, 理化学研究所	極小ピットを介したAlNテンプレートの高品質化	第68回応用物理学会春季学術講演会	2021/3
奥野椋, 日高遼太, 齊藤貴大, 岡田成仁, 前田哲利, 定昌史, 平山秀樹, 倉井聡, 山田陽一, 只友一行	山口大学, 理化学研究所	選択横方向成長を用いたAlNの無転位領域の形成	応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会	2021/3

◆項目③-4 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
Shanting Hu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	Unidirectional Coupling Of Laterally Coupled VCSEL And Slow Light Modulator/Amplifier	The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO)	2017/8
Fumio Koyama	東京工業大学	High Power VCSEL Amplifier For Laser Processing(招待講演)	The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO)	2017/8

Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	High-resolution Beam Steering Of Slow Light VCSEL Amplifier	The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO)	2017/8
Fumio Koyama	東京工業大学	High Power VCSEL Photonics for Optical Sensing and Laser Processing (招待 講演)	International Nano- Optoelectronics Workshop 2017 (iNOW)	2017/8
Shanting Hu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	VCSELS Laterally Coupled with a Slow Light Modulator/Amplifier Showing Unidirectional Coupling	International Nano- Optoelectronics Workshop 2017 (iNOW)	2017/8
Ahmed Mohamed Ahmed Hassan, Moustafa Ahmed, Masanori Nakahama, Fumio Koyama	東京工業大学	Numerical analysis of Watt- class VCSEL amplifier	The 24th General Congress of the International Commission for Optics (ICO)	2017/8
Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Optical Amplifier for High Power Operations	The 24th General Congress of the International Commission for Optics (ICO)	2017/8
鷹箸雅司, 中濱 正統, 小山二三 夫	東京工業大学	面発光レーザーとスローラ イト導波路の高効率結合集 積化	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/9
許在旭, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷 晃宏, 小山二三 夫	東京工業大学	面発光レーザー増幅器の 結合効率の検討	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/9
森長瑞, 顧曉冬, 小山二 三夫	東京工業大学	高出力面発光レーザー増 幅器の放射ビーム制御に 関する研究	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/9
Fumio Koyama	東京工業大学	New Function and Integration of VCSEL Photonics (招待講演)	電子情報通信学会, レー ザー量子エレクトロニクス研 究会	2017/12

井上俊也, 旭利 紘, 西村 駿, 中濱正統, 松 谷晃宏, 坂口孝 浩, 小山二三夫	東京工業大学	MEMS VCSEL 集積スロー ライト導波路ビームスキャ ナの作製	第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会	2017/3
許在旭, 志村京 亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷 晃宏, 小山二三 夫	東京工業大学	長尺面発光レーザー増幅 器による高出力・高ビーム 品質動作	第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会	2018/3
森長瑞, 顧曉冬, 志村京亮, 中濱正統, 小山 二三夫	東京工業大学	折り返し構造を有する VCSEL 増幅器によるドット パターン形成	第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会	2018/3
Keisuke Kondo, Xiaodong Gu, Zeuku Ho, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	Two-Dimensional Beam Steering Using Slow-Light Waveguide Deflector Array with Optical Gain	Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 (OFC2018)	2018/5
Mizuki Morinaga, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura, Masanori Nakahama, Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Amplifier with High Power and Narrow Divergence Applying a Folded Waveguide Layout	Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 (OFC2018)	2018/5
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL photonics for optical sensing(招待講 演)	International Nano- Optoelectronics Workshop 2018 (iNOW2018)	2018/7
Shanting Hu, Masashi Takanohashi, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama and Fumio Koyama	東京工業大学	Lateral Integration of VCSEL and Amplifier with Dielectric DBR and Wavelength Detuning Design for Unidirectional Coupling	International Nano- Optoelectronics Workshop 2018 (iNOW2018)	2018/7
Keisuke Shimura, Masashi Takanohashi, Zeuku Ho, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama	東京工業大学	Non-Mechanical Beam Scanner Integrated with Wavelength Detuned VCSEL for LiDAR Applications	International Nano- Optoelectronics Workshop 2018 (iNOW2018)	2018/7
Fumio Koyama	東京工業大学	High Power VCSEL Photonics for 3D Sensing (招待講演)	BIT's 7th Annual World Congress of Advanced Materials 2018	2018/9

Fumio Koyama	東京工業大学	Advances of VCSEL Photonics(招待講演)	Samco Laser Diode Seminar	2018/9
Zeuku Ho, Junichiro Hayakawa, Keisuke Shimura, Keisuke Kondo, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Akemi Murakami and Fumio Koyama	東京工業大学	High Power and High Beam Quality VCSEL Amplifier	2018 International Semiconductor Laser Conference (ISLC)	2018/9
Shunya Inoue, Shun Nishimura, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama	東京工業大学	High Speed Wavelength Tuning of MEMS VCSEL with Advanced Voltage Drive Technique	2018 International Semiconductor Laser Conference (ISLC)	2018/9
Mizuki Morinaga, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Amplifier Dot Projector with Folded-Path Slow-light Waveguide for 3D Depth Sensing	2018 International Semiconductor Laser Conference (ISLC)	2018/9
富樫良介, Xiaodong Gu 松谷晃宏, 坂口孝浩, 清水淳一, 小山二三夫	東京工業大学	InP 系ブラッグ反射鏡導波路を用いた 1.5 μm 帯スローライト分波器	2018 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2018/9
Shanting Hu, Masashi Takanohashi, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama and Fumio Koyama	東京工業大学	Amplifier Integrated VCSEL with Dielectric DBR and Wavelength Detuning Design for Unidirectional Coupling	2018 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2018/9
志村京亮, 鷹箸雅司, 許在旭, 顧曉冬, 中濱正統, 坂口孝浩, 松谷晃宏, 小山二三夫	東京工業大学	カットオフ波長離調構造によるビームスキャナ集積面発光レーザー	第 79 回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/9

鷹箸雅司, 志村京亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷 晃宏, 坂口孝浩, 小山 二三夫	東京工業大学	面発光レーザーとスローライト光増幅器の横方向高効率結合集積化	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
Ruixiao Li, Zeuku Ho, Xiaodong Gu, Fumio Koyama	東京工業大学	Structured-Light Sensor Based on Non-mechanical VCSEL Beam Scanner	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9
小山二三夫, 顧曉冬	東京工業大学	VCSEL による 3D センシング: ソリッドステートLiDAR と顔認証用近接センサー光源の開発(招待講演)	第 149 回微小光学研究会	2018/9
小山二三夫	東京工業大学	VCSEL フォトニクス の 発 展 (招待講演)	第 150 回微小光学研究会	2018/9
Fumio Koyama, Xiaodong Gu	東京工業大学	High-speed VCSEL photonics for optical interconnects (招待講演)	SPIE. PHOTONICS WEST	2019/2
R. Togashi, X. Gu, T. Sakaguchi, and F. Koyama	東京工業大学	Full C-band Wavelength Demultiplexer with Optical Gain for Use in Wavelength Selective Switch	Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC2019)	2019/3
Keisuke Kondo, Xiaodong Gu, Zeuku Ho, Akihiro Matsutani, and Fumio Koyama	東京工業大学	Two-Dimensional Beam Steering Device Based on VCSEL Slow-Light Waveguide Array with Amplifier Function	Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC2019)	2019/3
Shanting Hu, Masashi Takanohashi, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura and Fumio Koyama	東京工業大学	Lateral Integration of VCSEL and Amplifier with Resonant Wavelength Detuning Design	Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2019)	2019/3
A. Hassan, M. Nakahama Nakahama, F. Koyama	東京工業大学	High peak power pulsed operations of VCSEL amplifier	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
R. Li, Z. Ho, X. Gu, Fumio Koyama	東京工業大学	Accuracy Analysis of Structured-Light Sensor Based on Non-mechanical VCSEL Beam Scanner	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
H. Ibrahim, M. Ahmed, Fumio Koyama	東京工業大学	Analysis of High-speed Double Transverse Coupled Cavity VCSELs	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3

鷹箸雅司, 志村京亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷晃宏, 坂口孝浩, 小山二三夫	東京工業大学	カットオフ構造を用いた VCSEL と VCSEL 増幅器の横方向集積	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
許在旭, 志村京亮, 顧曉冬, 松谷晃宏, 小山二三夫	東京工業大学	高出力面発光レーザー増幅器のビーム品質改善の検討	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
森長瑞, 顧曉冬, 志村京亮, 松谷晃宏, 小山二三夫	東京工業大学	3D センシングのための VCSEL 増幅器によるドットパターン生成	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
志村京亮, 許在旭, 顧曉冬, 中濱正統, 坂口孝浩, 松谷晃宏, 小山二三夫	東京工業大学	カットオフ波長離調構造によるビームスキャナ集積単一モード面発光レーザー	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
藤岡威吹, 森長瑞, Li Ruixiao, 顧曉冬, 小山二三夫	東京工業大学	VCSEL ビーム掃引デバイスをを用いた LiDAR システムの検討	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
旭利紘, 顧曉冬, 坂口孝浩, 小山二三夫	東京工業大学	MEMS VCSEL 集積 DBR 導波路偏向素子のビーム偏向特性	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
富樫良介, 顧曉冬, 松谷晃宏, 坂口孝浩, 小山二三夫	東京工業大学	C バンドにおける損失補償特性を持つ InP 系 VCSEL 分波器	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3
S. Hu, M. Takanohashi, X. Gu, F. Koyama	東京工業大学	Amplifier Integrated VCSEL with Resonant Wavelength Detuning	2019 年電子情報通信学会総合大会	2019/3
小山 二三夫	東京工業大学	VCSEL による 3D センシング (招待講演)	レーザーEXPO, 横浜	2019/4
Shanting Hu, Masashi Takanohashi, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura and Fumio Koyama	東京工業大学	Lateral Integration of VCSEL and Amplifier with Resonant Wavelength Detuning Design	Conference on Lasers and Electro-Optics 2019	2019/5

Mizuki Morinaga, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama	東京工業大学	Compact Dot Projector based on Folded Path VCSEL Amplifier for Structured Light Sensing	Conference on Lasers and Electro-Optics 2019	2019/5
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and 3D Sensing(招待講演)	Qingdao International Academic Forum, 青島,	2019/5
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL-Based Beam Scanner for 3D Sensing(招待講演)	Conference on Optics and Lasers, San Francisco	2019/5
小山 二三夫	東京工業大学	面発光レーザーの進展と将来展望(招待講演)	学振 162 委員会研究会, 東京,	2019/7
Fumio Koyama	東京工業大学	Beam Scanning VCSELs for 3D Optical Sensing(招待講演)	International Nano-optoelectronics Workshop 2019, 広州	2019/7
Shanting Hu	東京工業大学	Amplifier Integrated VCSEL with Wavelength Detuning Design	International Nano-optoelectronics Workshop 2019, 広州	2019/7
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and 3D Sensing(基調講演)	International Conference on Information Optics and Photonic, 西安	2019/8
Fumio Koyama	東京工業大学	High power VCSEL photonics for LIDAR applications(招待講演)	IS Auto Asia, 深圳,	2019/9
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and 3D Sensing(基調講演)	Laser , Optics and Photonics 2019, Barcelona	2019/9
Ahmed Hassan, M. Ahmed, Masanori Nakahama, Fumio Koyama	東京工業大学	High power, high speed pulse generation of VCSEL amplifier	The 80th JSAP Spring Meeting, Sapporo	2019/9
小山 二三夫	東京工業大学	面発光レーザーフォトリソの進展(チュートリアル講演)	薄膜デバイス材料研究会, 京都	2019/11
Ruixiao Li, Z. Ho, X. Gu, and F. Koyama	東京工業大学	Wide-range structured-light sensing based on non-mechanical VCSEL beam scanner	24th Microoptics Conference	2019/11
Ibuki Fujioka, R. Li, Z. Ho, X. Gu, and F. Koyama	東京工業大学	Time of flight 3D imaging using VCSEL beam scanner	24th Microoptics Conference	2019/11

Hiroki Ota, T. Asahi, X. Gu, T. Sakaguchi, and F. Koyama	東京工業大学	Integrated devices of MEMS VCSEL and DBR beam deflector	24th Microoptics Conference	2019/11
小山 二三夫	東京工業大学	面発光レーザーの進展と将来展望(招待講演)	日本学術振興会光エレクトロニクス 第 130 委員会(東京理科大森戸記念館)	2019/12
許 在旭, 志村京亮, 顧曉冬, 松谷晃宏, 小山二三夫	東京工業大学	多点接触構造を有する長尺 VCSEL 増幅器	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/3
Shanting Hu, Masashi Takanohashi, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura and Fumio Koyama 2019	東京工業大学	Solid-state Beam Scanner Based on VCSEL Integrated Amplifier with Scan Resolution of over 200	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/3
Fumio Koyama	東京工業大学	High power VCSEL amplifier for 3D sensing (招待講演)	2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)	2020/5
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and Sensing (招待講演)	25th Opto-Electronics and Communications Conference	2020/10
Fumio Koyama	東京工業大学	40 Years Evolution of VCSEL (招待講演)	25th Opto-Electronics and Communications Conference	2020/10
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and Sensing (招待講演)	Advanced Materials Lecture Series, International Association of Advanced Materials	2020/10
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and Sensing (招待講演)	VSET Scientist Award Lecture, Webinar on Materials Science, Engineering and Technology	2020/11
Fumio Koyama	東京工業大学	New Function and Integration of VCSEL Photonics (招待講演)	The 6th Laser and Optoelectronics Conference	2020/12
Ruixiao Li, Zeuku Ho, 2017 Xiaodong Gu, Fumio Koyama	東京工業大学	Enhanced-Field-of-View Solid-State VCSEL Beam Scanner with Lateral Resolution Points of More than 1200	The 46th European Conference on Optical Communication	2020/12

Shanting Hu, Xiaodong Gu, Ahmed Hassan, Masanori 2018 Nakahama and Fumio Koyama	東京工業大学	Surface Grating VCSEL- Integrated Amplifier/Beam Scanner with High Power and Single Mode Operation	第 68 回応用物理学会春 季 学術講演会	2021/3
Ahmed M.A Hassan, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Satoshi Shinada , Moustafa Ahmed, Fumio Koyama	東京工業大学	High power surface grating long aperture VCSEL	第 68 回応用物理学会春 季 学術講演会	2021/3
Shanting Hu, Xiaodong Gu, Ahmed Hassan, Masanori Nakahama and Fumio Koyama	東京工業大学	Surface Grating VCSEL- Integrated Amplifier/Beam Scanner with High Power and Single Mode Operation	2021Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)	2021/5
Fumio Koyama	東京工業大学	VCSEL Photonics for Communications and Sensing(招待講演)	IEEE Electron Device Society Webinar	2021/5
Ahmed M.A Hassan, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Satoshi Shinada , Moustafa Ahmed, Fumio Koyama	東京工業大学	High Power and High Beam Quality Surface Grating VCSELs	2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)	2021/5

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名 等	発表年月
Kazutaka Takeda	富士フイルム ビジネスイ ノベーション(株)	VCSELs for laser printers, optical communications and sensing at Fuji Xerox	大川賞シンポジウム	2018/10
Junichiro Hayakawa, Akemi Murakami, Daiki Tominaga, Yoshiyuki Suzuki, Zeuku Ho, Xiaodong Gu, and 2017 Fumio Koyama	富士フイルム ビジネスイ ノベーション(株)	Watt-Class High-Power and High-Beam-Quality VCSEL Amplifiers	Photonics West 2019	2019/2
小嶋 友暁	富士フイルム ビジネスイ ノベーション(株)	Society5.0 実現に貢献する VCSEL 技術	2019 年度 第5 回 日本画 像学会技術研究会	2020/1

◆項目③-5 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
Y.Arakawa (Invited)	東京大学	Quantum dot light sources- Past, present, and future-	The 25th International Semiconductor Laser Conference(ISLC 2016),Kobe Meriken Park Oriental Hotel, Hyogo, Japan (2016).	2016/9
Y.Arakawa (Plenary)	東京大学	Impact of Quantum Dots on Advanced Nano- Optoelectronics	The Second Conference on Micro-nano Optical Technology and Application (MOTA 2018), Wuhan, China (2018).	2018/9
有田 宗貴,梅 洋, 荒川 泰彦	東京大学	MOCVD 成長 GaN/Al(GaN) 薄膜の表面 形状制御と超高密度量子 ドットの形成	日本学術振興会第 162 委 員会第 110 回研究会・特別 公開シンポジウム,P34,p.84, 東京大学,東京(2018).	2018/9
T. Kageyama, V. Q. Huy, K. Watanabe, K. Takemasa, M. Sugawara, S. Iwamoto, and Y. Arakawa	東京大学(株) QDレーザ	Enhancement of Modulation Bandwidth in a Quantum Dot Laser by Thinning Active Layer Thickness	The 6th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence – Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems (ISPEC 2016) P-42, the University of Tokyo, Tokyo, Japan (2016).	2016/11
M. Kakuda, Y. Ota, K. Kuruma, K. Watanabe, S. Iwamoto and Y. Arakawa	東京大学	Improving optical properties of low density InAs/GaAs quantum dots by controlling partial capping temperature	The 6th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence – Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems (ISPEC 2016) P-40, the University of Tokyo, Tokyo, Japan (2016).	2016/11
Y. Arakawa (Keynote)	東京大学	Quantum Dots for Advanced Photonics	Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress, APPC- AIP 2016, Brisbaner, Australia (2016).	2016/12
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Quantum Dots for Advanced Photonics	Optics & Photonics Taiwan,International conference –Annual Meeting of Taiwan Photonics Society, Taiwan (2016).	2016/12
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Quantum dots for advanced photonics	The 47th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2017) January 13th 2017, Snowbird, Utah, USA(2017).	2017/1

R. Tao and Y. Arakawa	東京大学	A theoretical study on threshold currents of III-nitride quantum dot lasers	第 64 回応用物理学学会春季学術講演会,16a-503-10, 横浜(2017).	2017/3
渡邊 克之, 岩本敏, 荒川 泰彦	東京大学	GaAsP 層導入による InAs/GaAs 多重積層量子ドットの高品質化	第 64 回応用物理学学会春季学術講演会,15a-313-5,パシフィコ横浜,横浜,神奈川(2017).	2017/3
角田雅弘, 太田泰友, 車 一宏, 渡邊 克之, 岩本敏, 荒川 泰彦	東京大学	部分キャップ制御による低密度 InAs/GaAs 量子ドットの形成~厚さ制御によるバックグラウンド発光低減~	第 64 回応用物理学学会春季学術講演会,15a-313-4,パシフィコ横浜, 横浜, 神奈川(2017).	2017/3
影山健生, 渡邊克之, 武政敬三, 菅原充, 岩本敏, 荒川泰彦	東京大学 (株)QD レーザ	高密度 InGaAs 量子ドットのメタモルフィックテンプレート上成長	第 64 回応用物理学学会春季学術講演会,15a-313-2,パシフィコ横浜, 横浜, 神奈川(2017).	2017/3
Y. Arakawa (Keynote)	東京大学	Progress in Quantum Dot Photonics~ From Science to Practical Implementations ~	The International Nanotech & Nanoscience Conference & Exhibition (Nanotech France 2017),Paris, France (2017).	2017/6
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Progress in quantum dots for advanced photonics	22nd Microoptics Conference (MOC' 17), The University of Tokyo, Komaba, Tokyo,Japan (2017).	2017/11
K.Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa	東京大学	Photoluminescence improvements of InAs/GaAs quantum-dot multiple layers by introducing GaAsP layers	The 7th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2017) (2017).	2017/12
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Advances in quantum for advanced photonics	The 48th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE), Utah, USA. (2018).	2018/11
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Progress in Quantum Dot Photonics: From Science to Practical Realization	10th Biannual Conference on Quantum Dots(QD 2018), Tronto, Canada (2018).	2018/6
Y. Arakawa (Keynote)	東京大学	Progress in Quantum Dots: From Science to Engineering	2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics, Hue City, Vietnam (2018).	2018/7
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Advances in Quantum Dot Photonics	2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018), Toyama, Japan (2018).	2018/8
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Quantum dot lasers and single photon sources on silicon	International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2018), University of California, Berkeley, USA (2018).	2018/8

Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Impact of Quantum Dots on Advanced Nano-Optoelectronics	The Second Conference on Micro-nano Optical Technology and Application (MOTA 2018), Wuhan, China (2018).	2018/9
有田 宗貴, 梅 洋, 荒川 泰彦	東京大学	MOCVD 成長 GaN/Al(Ga)N 薄膜の表面形状制御と超高密度量子ドットの形成	日本学術振興会第 162 委員会第 110 回研究会・特別公開シンポジウム, P34, p.84, 東京大学, 東京 (2018).	2018/9
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Advances in Quantum Dot Photonics: From Science to Practical Implementation	Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2018), Hangzhou, China (2018).	2018/10
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Progress in quantum dot photonics ~From Science to Practical Implementation~量子ドットフォトリソの発展~基礎研究から実用化まで~	The 37th Electronic Materials Symposium, Hotel&Resorts Nagahama, Shiga, Japan (2018).	2018/10
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Progress in GaN quantum dots for lasers and single photon sources	The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN 2018), Kanazawa, Japan (2018).	2018/11
K. Watanabe, W. Zhan, M. Kakuda, J. Kwoen, and Y. Arakawa	東京大学	MBE Growth of GaInAs Metamorphic Layers and 1.5- μm - Band InAs/GaInAs Quantum Dots on GaAs Substrates	The 8th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence - Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems-, Univ. of Tokyo, Komaba, Tokyo, Japan (2018).	2018/12
M. Kakuda, J. Kwoen, K. Watanabe and Y. Arakawa	東京大学	MBE growth of stacked InAs/GaAs quantum dots with thin (25.5 nm) barrier layer	The 8th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence - Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems (ISPEC 2018) P-31, The University of Tokyo, Tokyo, Japan (2018).	2018/12
Y. Arakawa (Keynote), M.Arita, M. J. Holmes	東京大学	Progress in quantum dots for UV III-Nitride light sources	International Workshop on UV Materials and Devices 2018(IWUMD 2018), Kinming, China (2018).	2018/12
Y. Arakawa (Keynote)	東京大学	Advances in quantum- dot light sources	SPIE Photonics West, California, USA. (2019).	2019/2
渡邊 克之, 詹 文博, 角田 雅弘, 權 晋寬, 荒川 泰彦	東京大学	1.5 μm 帯メタモルフィック InAs/GaInAs/GaAs 量子ドットの MBE 成長	第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 11p-S422-5, 東京工業大学, 東京 (2019).	2019/3

角田 雅弘, 權 晋寛, 渡邊 克 之, 荒川 泰彦	東京大学	In フラッシュ法を用いた InAs/GaAs 量子 ドットの高密度 化	第 66 回応用物理学会春季 学術講演会, 11p-S422-7, 東京工業大学, 大岡山, 神 奈川(2019).	2019/3
有田 宗貴, 梅 洋, 荒川 泰彦	東京大学	MOCVD による高密度(\times 1 × 10 ¹¹ cm ⁻²) GaN/AlGaIn 量子ド ットの形成	第 66 回応用物理学会春季 学術講演会, 11p-W541-16, 東京工業大学, 大岡山, 神 奈川(2019).	2019/3
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	GaN-based single Photon sources at room temperature	German Physical Society Spring Meeting Condensed Matter, Regensburg, Germany (2019).	2019/4
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Advances in quantum dots for III-Nitride photonics	Workshop on Nitride Semiconductor Lasers, 2019, Xiamen University, China (2019).	2019/5
Y. Arakawa (Special Lecture)	東京大学	The Fundamentals of Quantum Dots for Advanced Photonics	Compound Semiconductor Week 2019: ISCS2019/IPRM2019, Nara, Japan (2019).	2019/5
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Excitons in quantum dots for advanced light sources with photonic nanostructures	International Conference on Physics of 2D Crystals 2019(ICP2DC4), Zhejiang Hotel, Hangzhou, China (2019).	2019/6
M. Arita (Invited), M. J. Holmes, and Y. Arakawa	東京大学	III-nitride Quantum Dots for Single-photon Sources: Epitaxial Growth and Optical Characteristics	The 41st Photonics & Electromagnetics Research Symposium, 4A8-2, p. 2179, Rome, Italy (2019).	2019/6
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Progress in quantum dots for lasers and single photon sources	International Nano- Optoelectronics Workshop(iNow), China(2019).	2019/7
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Quantum dots for advanced photonics	2019 Workshop on Frontiers in Optoelectronic Integrations, Peking University, Beijing, China (2019).	2019/7
Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Quantum dots for advanced photonics	ICO&IUPAP-C17 Topical Meeting on Optics and Applications to Sustainable Ramada Plaza Hotel Tunis, Carthage, Tunisia (2019).	2019/9
石田夏子, 太田 泰友, 林 文博, 荒川泰彦, 岩本 敏(Poster)	東京大学	トポロジカルエッジ状態を用 いた大面積単一モードレー ザの 検討	第 80 回応用物理学会秋季 学術講演会, 19p-PA5-10, 北 海道大学 札幌キャンパス, 北海道(2019).	2019/9
M. Kakuda, J.K.Kwoen, K. Watanabe and Y. Arakawa	東京大学	Enhanced modal gain of InGaAs/GaAs quantum dot lasers with stacked high- density quantum dots	第 38 回電子材料シンポジ ウム(EMS38), 奈良県橿原 市 (2019).	2019/10

Y. Arakawa (Plenary)	東京大学	Progress in quantum dots for advanced photonics	Asia Communication and Photonics Conference ACP2019 Chengdu, China (2019).	2019/11
K. Watanabe, W. Zhan, M. Kakuda, J.-K. Kwoen, and Y. Arakawa(Poster)	東京大学	Structure and Photoluminescence Properties of 1.3-1.5- μ m-Band Metamorphic InAs/GaInAs Quantum Dots	The 9th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence- Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems- ,(ISPEC2019), P-31, Tokyo, Japan(2019).	2019/11
角田 雅弘, 權 晋寛, 渡邊 克之, 荒川 泰彦	東京大学	InGaAs/GaAs 量子ドットの高体積密度化によるレーザ特性向上	第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 東京(2019).	2020/3
有田宗貴, 荒川 泰彦	東京大学	サファイア基板上高密度 ($2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) GaN 量子ドットのMOCVD 成長	第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 東京 (2019).	2020/3
石田夏子, 太田 泰友, 林文博, 荒川泰彦, 岩本 敏	東京大学	トポロジカルエッジ状態を用いた単一モード動作アレイレーザの検討~次近接共振器間結合の影響~	第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 東京(2019).	2020/3
J, Kwoen, Y. Arakawa	東京大学	Classification of Reflection High- Energy Electron Diffraction Pattern Using Machine Learning	Crystal Growth and Design 20, 8, 5289-5293 (2020).	2020/5
Y. Arakawa (Keynote)	東京大学	Progress in quantum dot lasers and single photon sources	Photonic North 2020, online (2020).	2020/5
J. Kwoen, Y. Arakawa	東京大学	Classification of in- situ RHEED Images Using Principal Component Analysis	2020 International Conference on Solid State Devices and Materials(2020).	2020/9
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Progress in quantum dot light sources for silicon photonics	2020 IEEE Photonics Conference(IPC), online (2020).	2020/9
荒川 泰彦 (基調講演)	東京大学	半導体量子ドット: 誕生から社会実装まで (Semiconductor quantum dot: From its birth to practical implementation)	日本金属学会 2020 年秋季第167 回講演大会 K4.1(2020).	2020/9
Y. Arakawa (Keynote)	東京大学	Advances in Photonic and Electronic Convergence System Technology	The 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence- Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems- (ISPEC2020), A-1, Online, (Tokyo, Japan), (2020).	2020/11

N. Ishida, Y. Ota, W. Lin, Y. Arakawa, and S. Iwamoto	東京大学	Analysis of Threshold Gain Difference in a Topological Edge State Laser	The 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence- Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems- (ISPEC2020), S-29, Online, (Tokyo, Japan),, (2020).	2020/11
Y. Arakawa, S. Iwamoto, J. Nishimae, and M. Sugawara (招待講演)		高効率・高出力化に向けた量子ドットレーザーの進展	一般社団法人レーザー学会学術講演会 第41回年次大会 B04-18p-II-01, 北九州国際会議場(福岡県北九州市小倉北区)(2021).	2021/1
有田 宗貴, 荒川 泰彦	東京大学	AlN/sapphire テンプレート上への GaN 量子ドットの形成	2017 年 第68 回応用物理学会春季学術講演会 16p-Z27-12 オンライン開催 (2021).	2021/3
渡邊 克之, 権 晋寛, 角田 雅弘, 詹 文博, 荒川 泰彦	東京大学	メタモルフィック GaInAs/GaAs 上の 1.5 μm 帯高均一 InAs 量子ドットの成長	2018 年 第68 回応用物理学会春季学術講演会 19p-P03-2 オンライン開催 (2021).	2021/3
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	Quantum dots ~ From science to Application ~	iCANX Talks, vol. 43 March 19(2021).	2021/3

◆項目③-7 超高速利得スイッチ LD をシードとするレーザー加工用光源の開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
秋山英文	東京大学	超高速利得スイッチLDをシードとするレーザー加工用光源の開発	『高輝度・高効率次世代レーザー技術開発』プロジェクト成果報告会、日刊工業新聞社「モノづくり日本会議」	2021/2
秋山英文	東京大学	量子細線から短パルス利得スイッチ半導体レーザーへ	レーザー学会第41回年次大会 [招待講演]	2021/1
秋山英文	東京大学	超高速利得スイッチ半導体レーザー	Photonic Device Workshop 2020 [招待講演]	2020/11
秋山英文	東京大学	超高速利得スイッチ半導体レーザー	2020年電子情報通信学会総合大会(広島大学、東広島キャンパス) [依頼講演] C-3/4-74	2020/3
秋山英文	東京大学	Smart nano light emitter	JST さきがけ「光極限」領域会議(柏の葉カンファレンスセンター、千葉) [招待講演]	2019/4

◆項目③-8 分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発

発表者	所属	発表タイトル	発表媒体	発表年月日
加藤龍好	KEK	コンパクトERLを用いた中赤外自由電子レーザー計画	第25回FELとHigh-power Radiation研究会(兵庫)	2019/2/14
加藤龍好	KEK	NEDOの予算によるcERL-FEL計画の内容報告	EUV-FEL光源産業化研究会 第9回全体会議(東京)	2019/3/15
阪井寛志	KEK	超伝導空洞によるエネルギー回収型加速器“Compact ERL”の開発現状とその応用利用	先端加速器科学技術推進協議会 第60回技術部会(東京)	2019/4/22
Ryukou Kato, et. al.	KEK	cERL upgrade plan for a n IR FEL	10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19)(メルボルン、オーストラリア)	2019/5/19
加藤龍好, 他	KEK	cERLによる高繰り返し高平均出力FELの実証	次世代リソグラフィ(NGL) ワークショップNGL2009(東京)	2019/7/4
島田美帆、他	KEK	cERLにおけるIR-FELに向けたバンチ圧縮	第16回日本加速器学会年会(京都)	2019/7/30
加藤龍好, 他	KEK	cERLを用いた高繰り返し中赤外自由電子レーザーの開発	第16回日本加速器学会年会(京都)	2019/7/31
土屋公央, 他	KEK	cERL自由電子レーザー用アンジュレータの開発	第16回日本加速器学会年会(京都)	2019/7/31
田中織雅, 他	KEK	赤外線自由電子レーザー試験に向けたcERL入射器の60 pC運転	第16回日本加速器学会年会(京都)	2019/7/31
Ryukou Kato, et al.	KEK	IR-FEL project at the cERL and future EUV-FEL Lithography	39th International Free-Electron Laser Conference (FEL2019)(ハンブルク、ドイツ)	2019/8/26
河田洋	KEK	次世代半導体微細加工に向けた超伝導加速器によるEUV-FEL光源	応用超伝導加速器コンソーシアム設立 記念シンポジウム(東京)	2019/9/2
Ryukou Kato, et al.	KEK	High Repetition Rate (8.125MHz) ERL-based FEL Project at cERL	International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography(モントレー、米国)	2019/9/15
Hiroshi Sakai	KEK	Industrial applications of cERL	ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL'19), (ベルリン、ドイツ)	2019/9/15
Miho Shimada	KEK	Beam Optics of Bunch Compression at Compact ERL	ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL'19), (ベルリン、ドイツ)	2019/9/15
佐藤正健、他	産業技術総合研究所	量子カスケードレーザーによる樹脂材料の赤外レーザープロセッシング	応用物理学会秋季学術講演会	2019/9/18
Norio Nakamura (KEK)	KEK	ERL Design and Simulation Using Elegant	Workshop SAD 2019(つくば)	2019/9/19

Hiroshi Sakai	KEK	Industrial applications of "Compact ERL"	International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2019)(仙台)	2019/10/28
Ryukou Kato , et al.	KEK	Development to realize the EUV-FEL high power light source for future lithography	2019 Source Workshop(アムステルダム、オランダ)	2019/11/4
Hiroshi Sakai	KEK	Development of Compact Energy Recovery Linac (cERL) based on superconducting RF technology at KEK and its applications	LANL seminar(ロスアラモス、米国)	2019/11/26
佐藤正健	産業技術総合研究所	産業界への波及を目指す新波長域レーザー技術開発	第4回EUV-FELワークショップ(東京)	2019/12/10
加藤龍好	KEK	cERLを用いた高繰返し FELの実証とEUV-FELのその先	第4回EUV-FELワークショップ(東京)	2019/12/10
島田美帆、他	KEK	IR-FELに向けたコンパクトERLのバンチ圧縮	第26回FELとHigh-Power Radiation研究会(東広島)	2019/12/17
本田洋介	KEK	cERL赤外FELの高度化の検討状況	第26回FELとHigh-Power Radiation研究会(東広島)	2019/12/17
Tadatake SATO, et al.	産業技術総合研究所	Laser processing of polymeric materials by quantum cascade lasers	SPIE, Photonics West2020(サンフランシスコ、米国)	2020/2/3
Ryukou Kato , et al.	KEK	Practical development to realize the EUV-FEL high power light source for future lithography	Symposium: SPIE Advanced Lithography (サンノゼ、米国)	2020/2/23
島田美帆、他	KEK	コンパクトERLアンジュレータのビーム調整	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
本田洋介、他	KEK	cERL赤外自由電子レーザー用の電子銃レーザーシステム	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
東直、他	KEK	cERL-FELの建設	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
加藤龍好、他	KEK	cERLを用いた中赤外自由電子レーザーの開発とその光発生実験	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
中村典雄、他	KEK	コンパクトERLの赤外FEL用シケイン電磁石の性能と運転	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
土屋公央、他	KEK	cERL自由電子レーザー用アンジュレータの磁場調整	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
中村典雄、他	KEK	コンパクトERLの高出力赤外FEL運転に向けた運動量アクセプタンス改善の検討	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
本田洋介、他	KEK	cERL赤外自由電子レーザーにおける再生増幅FELの検討	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
高井良太、他	KEK	コンパクトERLにおける赤外FEL設置に伴うビーム診断系の改造	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2

阪井寛志、他	KEK	cERL赤外自由電子レーザーを用いたサンプル照射試験	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
加藤龍好	KEK	KEKコンパクトERLの現状	第17回日本加速器学会年会(オンライン)	2020/9/2
阪井寛志	KEK	コンパクトERLでのFEL調整運転の状況報告	EUV-FEL光源産業化研究会第10回全体会議(オンライン)	2020/9/15
Ryukou Kato, et. al.	KEK	Achievement of an important milestone to realize the EUV-FEL high power source	SPIE PHOTOMASK TECHNOLOGY + EUV LITHOGRAPHY (online)	2020/9/20
Ryukou Kato, et. al.	KEK	Present status of cERL-FEL as a Proof of Concept on the EUV-FEL high power light source for future lithography	2020 Source Workshop(online)	2020/10/31
秋草直大、他	浜松ホトニクス	ワット級高出力中赤外量子カスケードレーザー光源の開発及び樹脂加工への応用	第94回レーザー加工学会講演会(オンライン)	2020/11/26
Norio Nakamura	KEK	Construction and commissioning of cERL IR-FEL toward realization of the EUV-FEL	第5回EUV-FELワークショップ(オンライン)	2021/1/22
大島悠輔	東京理科大学	赤外自由電子レーザーによるABS樹脂のレーザーアブレーション	東京理科大学 2020年度修士論文	2021/1/25
河田洋	KEK	将来のリソグラフィ微細化に向けた大強度EUV-FEL光源の開発状況	次世代リソグラフィ(NGL)ワークショップNGL2021(オンライン)	2021/1/28

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
Yohei Kobayashi, Zhigang Zhao	東京大学	Research Progress for kW Femtosecond Solid State Lasers	[招待講演:国際] OSA 2016 International Workshop on Compact EUV & X-ray Light Sources, Hiroshima (Invited)	2016/1
Yohei Kobayashi and Shuntaro Tani	東京大学	Toward cool laser manufacturing	[招待講演:国際] The 3rd Smart Laser Processing Conference 2018(SLPC2018), SLPC2-2, Yokohama	2018/4
Yohei Kobayashi and Shuntaro Tani	東京大学	Automated data acquisition and deep learning in a laser processing	[招待講演:国際] Laser Material Processing and Manipulation, JSAP- OSA Joint Symposia, Nagoya	2018/9
Shuntaro Tani and Yohei Kobayashi	東京大学	Pulse-by-pulse surface structure evolution during multiple-pulse femtosecond laser ablation	[招待講演:国際] Photonics West 2019, San francisco, USA	2019/2
Haruyuki Sakurai	東京大学	Fabrication of THz anti-reflection moth-eye structures by laser processing	[招待講演:国際] 4th EMN Meeting on Terahertz (Prague, Czech Republic)	2019/6
Yohei Kobayashi, Takashi Takahashi , Keiichi Bamoto, Dai Yoshitomi, Hideyuki Takada, and Shuntaro Tani	東京大学	Next Generation Light Source and Artificial Intelligence for Laser Processing	[招待講演:国際] COLA 2019, Maui, USA	2019/9
Akira Mizutani	東京大学	Reduction of Thermal Damage during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic	[学会発表:国際] CIAiS International Symposium 2017(東大、福 武ホール) ポスター発表	2017/2
大村英樹	産業技術総合 研究所	Orientation-selective molecular tunneling ionization by four- color Fourier- synthesized laser fields	[学会発表:国際] Frontiers in Theoretical and applied Physics(FTAP 2017)	2017/2

Akira Mizutani	東京大学	Reduction of Thermal Damage during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plasti	[学会発表: 国際] International Workshop in Brazil –Global Business and Industry–University Collaborations (サンパウロ大学、ブラジル),	2017/3
谷峻太郎、他	東京大学	Direct observation of electromagnetic field emission from laser ablation with sub-picosecond temporal resolution	[学会発表: 国際] COLA2017 (International Conference on Laser Ablation)	2017/9
Haruyuki Sakurai, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Yuki Sakurai, Nobu Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, Makoto Kuwata–Gonokami	東京大学	Ultrashort Pulsed–Laser Fabrication of Silicon Moth–Eye Structures for Terahertz Anti–Reflection	[学会発表: 国際] Conference on Lasers and Electro–Optics 2018 (CLEO 2018)	2018/5
T. Takahashi, M. Washio	早稲田大学	How things break with light:Fluence or Light Intensity	[学会発表: 国際] International Symposium on Laser Precision Microfabrication(LPM2018) (スコットランド)	2018/6
Takashi Takahashi, Shuntaro Tani, Ryunosuke Kuroda, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Yohei Kobayashi	東京大学	The impact of fluence and intensity on the pulse laser ablation	[学会発表: 国際] the 19th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2018), Mon–4–OR8, Edinburgh	2018/6
Shota Kimura, Takuma Nakamura, Shuntaro Tani, Yohei Kobayashi	東京大学	Anomalous Spectral Broadening in High Quality–Factor, 1–GHz Mode–locked Oscillatorusing Yb:CALGO crystal	[学会発表: 国際] Pasific Rim Conference on Lasers and Electro–optics 2018(CLEOPR2018), W4A.8,Hong Kong	2018/8
Shuntaro Tani and Yohei Kobayashi	東京大学	Nanometer–Precision Measurement of Surface Morphology Change Induced by Femtosecond Laser Ablation”	[学会発表: 国際] 11th International Conference on Photo–Excited Processes and Applications, Vilnius, Lithuania	2018/9
大村英樹	産業技術総合研究所	Orientation–selective molecular tunneling ionization by four–color Fourier–synthesized laser fields	[学会発表: 国際] World Quantum Physics Congress 2018 (Stockholm Sweden)	2018/12

高田英行、奈良崎愛子、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	Development of Various-Parameters-Controlled Laser Processing and Observation System	[学会発表:国際] Photonics West LASE 2019 (San Francisco, California, USA)	2019/2
加藤洋生、宮本良之	産業技術総合研究所	Ehrenfest molecular dynamics approach to a light-induced softening of aluminum slab based on time-dependent density functional theory	[学会発表:国際] 米国物理学会 March Meeting (Boston, MA)	2019/3
宮本良之	産業技術総合研究所	Real time-TDDFT study of thermal and non-thermal lattice dynamics depending on laser pulse-width	[学会発表:国際] 米国物理学会 March Meeting (Boston, MA)	2019/3
Masahiro Moriyama, Akira Mizutani, Shuntaro Tani, Ryosuke Nakamura, Atsushi Kosuge, Isao Ito, Zhigang Zhao, Takashi Hira, Yohei Kobayashi, Hiroharu Tamaru, Norikatsu Mio, Makoto Kuwata-Gonokami, Junji Yumoto	東京大学、他	High aspect ratio laser cutting of CFRP using nanosecond UV laser pulses	[学会発表:国際] The 3rd Smart Laser Processing Conference 2018(SLPC2018), SLPC9-5, 横浜	2019/4
Shota Kimura, Shuntaro Tani, and Yohei Kobayashi	東京大学	Three-element cavity enables Kerr-lens mode-locking at 20-GHz repetition rate	[学会発表:国際] CLEO 2019, San Jose, USA	2019/5
T. Uchida, S. Hanai, K. Sakaue, M. Washio	早稲田大学	Development of Supercontinuum Light Production System Using Er Fiber Laser for Pulse Radiolysis	[学会発表:国際] IPAC19、メルボルン、2019年5月19-24日	2019/5
R. Morita ¹ , Y. Koshiba, S. Ota ¹ , M. Washio, K. Sakaue, T. Higashiguchi, J. Urakawa	早稲田大学	DEVELOPMENT OF YB-BASED LASER SYSTEM FOR CRAB CROSSING LASER-COMPTON SCATTERING	[学会発表:国際] IPAC19、メルボルン、2019年5月19-24日、THPGW035	2019/5

吉富大、高田英行、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所、他	Automatic parameter-variable high-average-power femtosecond fiber laser system for efficient optimization of laser processing	[学会発表: 国際] Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose	2019/5
R. Takaku, T. Matsumura, H. Sakurai, K. Konishi, H. Imada, S. Hanany, K. Young, Q. Wen, Y. Sakurai, N. Katayama, K. Mitsuda, N. Yamasaki, K. Komatsu, H. Ishino, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami	東京大学、他	Broadband anti-reflection coating for LiteBIRD LFT HWP: Sub-wavelength structures fabrication progress and prospects	[学会発表: 国際] LiteBIRD kickoff symposium, LiteBIRD global F2F meeting (JAXA/ISAS, Japan)	2019/7
小柴裕也、森田遼介、鷲尾方一、坂上和之、東口武史、浦川順治	早稲田大学	X-ray Generation by Crab Crossing Laser-Compton Scattering	[学会発表: 国際] ICRR2019、マンチェスター、2019年8月25-29日、P89	2019/8
Takashi Takahashi, Shuntaro Tani, Ryunosuke Kuroda, and Yohei Kobayashi	東京大学、他	Energy flow measurement during pulse laser ablation enabled by high-precision threshold determination	[学会発表: 国際] COLA 2019, Maui, USA	2019/9
Shuntaro Tani and Yohei Kobayashi	東京大学	Nanometer-precision big data to quantify impact of surface morphology to laser ablation	[学会発表: 国際] COLA 2019, Maui, USA	2019/9
Haruyuki Sakurai, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Yuki Sakurai, Nobuhiko Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, and Makoto Kuwata-Gonokami	東京大学	Femtosecond Laser Processing And Evaluation Of Broadband THz Anti-Reflection Structures	[学会発表: 国際] IRMMW-THz 2019 (Paris, France)	2019/9

R. Takaku,T. Matsumura,H. Sakurai,K. Konishi,H. Imada,S. Hanany,K. Young,Q. Wen,Y. Sakurai,N. Katayama,K. Mitsuda,N. Yamasaki,K. Komatsu,H. Ishino,J. Yumoto,M. Kuwata- Gonokami	東京大学、他	Demonstration of broadband anti-reflection coating on sapphire based on mm-wave sub-wavelength structures	[学会発表:国際] IRMMW-THz 2019 (Paris, France)	2019/9
Ryosuke Morita, Yuya Koshiba, Koki Yamashita, Masakazu Washio, Kazuyuki Sakaue, Takeshi Higashiguchi, Junji Urakawa	早稲田大学、 他	Development of Yb-based Laser System for Crab Crossing Laser-Compton Scattering	[学会発表:国際] RREPS-19、ベルゴロド、 2019年9月16-20日	2019/9
奈良崎愛子、高 田英行、吉富大、 鳥塚健二、小林 洋平	産業技術総合 研究所	Study on Nonthermal-Thermal Processing Boundary in Drilling of Ceramics using Various-Parameters-Controlled Ultrashort Pulse Laser System	[学会発表:国際] COLA2019 15th International Conference on Laser Ablation	2019/9
澁谷達則、坂上 和之、佐 藤大輔、寺澤英 一、ヂンタンフ ン、東口武史、石 野雅彦、錦野将 元、小川博嗣、田 中真人、鷺尾方 一、黒田隆之助	産業技術総合 研究所	Ablation Threshold and Crater Morphology of SiO2 Glass in Extreme Ultraviolet Femtosecond Pulses	[学会発表:国際] COLA2019 15th International Conference on Laser Ablation	2019/9
佐藤大輔、澁谷 達則、寺澤英一、 盛合靖章、小川 博嗣、田中真人、 黒田隆之助	産業技術総合 研究所	Femtosecond pump-probe transient reflection and transmission measurements near the ablation threshold	[学会発表:国際] COLA2019 15th International Conference on Laser Ablation	2019/9

寺澤英知、澁谷達則、佐藤大輔、盛合靖章、小川博嗣、田中真人、黒田隆之助、坂上和之、鷺尾方一	産業技術総合研究所、他	Pulse Duration Dependence of Ablation Threshold for Fused Silica in a Visible Femtosecond Regime	[学会発表:国際] 15th International Conference on Laser Ablation	2019/9
小川博嗣、澁谷達則、盛合靖章、佐藤大輔、池浦広美、寺澤英知、田中真人、黒田隆之助	産業技術総合研究所	Photoluminescence and Raman Spectroscopy of Laser Affected Zone in Ultrafast Laser Microprocessing of Polydimethylsiloxane (PDMS)	[学会発表:国際] 15th International Conference on Laser Ablation (COLA 2019)	2019/9
田中真人、馬場大輔、澁谷達則、盛合靖章、寺澤英知、安崎利明、佐藤大輔、小川博嗣、黒田隆之助	産業技術総合研究所	Mapping of Linear Birefringence Spectra Induced by Short Pulse Laser Irradiation in Fused Silica and Poly-lactic Acid	[学会発表:国際] 15th International Conference on Laser Ablation (COLA 2019)	2019/9
澁谷達則、坂上和之、佐藤大輔、寺澤英一、小川博嗣、田中真人、黒田隆之助	産業技術総合研究所	Ablation Threshold Measurement of Poly L-lactic Acid with Fine Variation of Pulse Durations from Femtosecond to Picosecond	[学会発表:国際] ECASIA19 18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis	2019/9
佐藤大輔、澁谷達則、田中真人、小川博嗣、池浦広美、黒田隆之助、菅原仁、豊川弘之	産業技術総合研究所	Characterization of binary Ce-Ir alloys and single crystalline CeIr ₂	[学会発表:国際] ECASIA19 18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis	2019/9
奈良崎愛子、高田英行、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	PULSE WIDTH DEPENDENCE OF HEAT ACCUMULATION IN ULTRASHORT PULSE LASER PROCESSING	[学会発表:国際] ICALEO (The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics)	2019/10

R. Takaku,T. Matsumura,H. Sakurai,K. Konishi,H. Imada,S. Hanany,K. Young,Q. Wen,Y. Sakurai,N. Katayama,K. Mitsuda,N. Yamasaki,K. Komatsu,H. Ishino,Y. Kobayashi,J. Yumoto,M. Kuwata- Gonokami	東京大学	The development of SWS as a broadband AR in a large area using laser ablation for LFT HWP	[学会発表:国際] LiteBIRD global F2F meeting,B-mode from space (Munich, Germany)	2019/12
Miu Sato, Tomoya Uchida, Yuya Koshiba, Kazuyuki Sakaue , Masakazu Washio	早稲田大学	Development of supercontinuum light source for pulseradiolysis using erbium fiber laser	[学会発表:国際] APSRC2020、オンライン、 2020年4月21日-24日	2020/4
奈良崎愛子、高 田英行、 吉富大、鳥塚健 二、小林洋平	産業技術総合 研究所	Ultrafast laser drilling of ceramics: comprehensive survey of laser parameters and material properties	[学会発表:国際] LPM2020 (21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication 2020)、オンライン、2020/6/26-6/26	2020/6
Ryohei Yamada, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata- Gonokami	東京大学	Observation of Luminescence Dynamics of Plasma Excited by Femtosecond Laser Ablation of Copper	[学会発表:国際] The 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020)	2020/8
宮本良之	産業技術総合 研究所	Survival of sub-nm nanotube under femtosecond laser shot: A TDDFT study	[学会発表:国際] 第59回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム、オンライン、2020/9/19-9/18	2020/9
S. Kimura, S. Tani, Y. Kobayashi	東京大学	Q-switching instability in Kerr-lens mode-locked lasers	[学会発表:国際] Advanced solid state lasers, AW2A.1, Online	2020/10
奈良崎愛子、高 田英行、 吉富大、鳥塚健 二、小林洋平	産業技術総合 研究所	Ultrafast Laser Processing of Ceramics: Comprehensive Survey of Laser Parameters	[学会発表:国際] ICALEO 2020 (The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2020)、オンライン、2020/10/19	2020/10

Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Mizuho Matoba, Ryota Takaku, Yuki Sakurai, Nobuhiko Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, Makoto Kuwata- Gonokami	東京大学	Broadband Anti- Reflection Moth-Eye Structures Realized In The Above 1 THz Region By Laser Processing	[学会発表: 国際] 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020)	2020/11
Yuya Koshiba, Ryosuke Morita, Koki Yamashita, Masakazu Washio, Kazuyuki Sakaue, Takeshi Higashiguchi, Junji Urakawa	早稲田大学	Luminosity Enhancement in Laser- Compton Scattering by Crab Crossing	[学会発表: 国際] OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress、オン ライン、2020年11月16日 -20日	2020/11
Ryota Takaku, Shaul Hanany, Yurika Hoshino, Hiroaki Imada, Hirokazu Ishino, Nobuhiko Katayama, Kunimoto Komatsu, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata- Gonokami, Tomotake Matsumura, Kazuhisa Mitsuda, Haruyuki Sakurai, Yuki Sakurai, Qi Wen, Noriko Y. Yamasaki, Karl Young, Junji Yumoto	東京大学、他	Demonstration of anti-reflective structures over a large area for CMB polarization experiments	[学会発表: 国際] SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2020	2020/12
Hideyuki Takada, Aiko Narazaki, Dai Yoshitomi, and Kenji Torizuka (AIST), Yohei Kobayashi (The University of Tokyo)	産業技術総合 研究所	Optimization of laser-induced periodic surface structures formation on zirconia ceramic by ultrashort pulsed laser	[学会発表: 国際] Photonics West (SPIE LASE)、Laser Applications in Micro- electronic and Opto- electronic Manufacturing (LAMOM) XXVI, Paper# 11673-29、オンライン、 2021/3/6	2021/3

宮本良之	産業技術総合研究所	Selecting diameter and orientation of carbon nanotubes by linearly polarized femtosecond laser: an ab initio study	[学会発表:国際] International Conference on the Sci. Appl. Of Carbon Nanotubes	2021/6
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	電気光学サンプリング法を用いた金属のレーザーアブレーションダイナミクスのサブピコ秒時間分解測定	[招待講演:国内] 第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ) 【光・フォトンクス分科内招待講演】	2016/9
小林洋平	東京大学	高輝度・高効率レーザー技術による加工(NEDO高輝度・高効率次世代レーザー技術開発)	[招待講演:国内] 第8回光科学フォーラムサミット	2016/11
小林洋平	東京大学	レーザー加工における産官学協創	[招待講演:国内] 第2回大学等研究交流サロン	2016/11
H. Akiyama	東京大学	Smart nano light emitters	[招待講演:国内] NTU-UT Joint Conference 招待講演	2016/11
大村英樹	産業技術総合研究所	位相制御レーザーパルスによる物質制御	[招待講演:国内] 分子キラリティー研究センターシンポジウム 光科学の最先端 2016	2016/11
小林洋平	東京大学	レーザー応用技術 — 新しいレーザーものづくりを目指して—	[招待講演:国内] 第19回光ものづくりセミナー@京都府産業支援センター	2016/12
小林洋平	東京大学	“先端フェムト秒レーザーとその応用”	[招待講演:国内] ISUPT2016@NICT	2016/12
伊藤隆、中前秀一、挾間優治、中村考宏、金昌秀、小林洋平、吉田正裕、秋山英文	東京大学	利得スイッチ半導体レーザーの短パルス発生限界	[招待講演:国内] レーザー学会 招待講演	2017/1
大村英樹	産業技術総合研究所	位相制御レーザーパルスによる分子トンネルイオン化の量子制御	[招待講演:国内] 日本大学工学部生命応用化学科セミナー	2017/2
小林洋平	東京大学	NEDO高輝度・高効率次世代レーザー技術開発プロジェクト	[招待講演:国内] 第17回レーザー学会東京支部研究会・電気学会光・量子デバイス技術研究会@東海大学高輪キャンパス	2017/3
鳥塚健二	産業技術総合研究所	超短パルスレーザーの開発と物質プロセッシングへの応用	[招待講演:国内] 第64回応用物理学会春季学術講演会(S6-シンポジウム 招待講演 15p-418-3)	2017/3
大村英樹	産業技術総合研究所	位相制御レーザー場による物質の量子制御	[招待講演:国内] JST さきがけ懇話会(千葉県千葉市)	2018/1

谷峻太郎	東京大学	シンポジウム「超短パルスコヒーレント光源が拓く固体のサブフェムト秒電子ダイナミクス」まとめ	[招待講演:国内] 日本物理学会第73回年次大会 東京理科大学(野田キャンパス)	2018/3
小林洋平	東京大学	次世代高効率レーザーとレーザー加工	[招待講演:国内] 学振125委員会第241回研究会 明治大学	2018/5
小林洋平	東京大学	基調講演「レーザー加工のモニタリングと知的生産システム」	[招待講演:国内] レーザ加工学会第89回講演会 大阪大学(吹田キャンパス)	2018/5
高田英行	産業技術総合研究所	液晶空間光変調器の高強度超短パルスレーザーシステムへの応用	[招待講演:国内] 京都府中小企業技術センター主催第25回光ものづくりセミナー (京都府京都市)	2018/6
Yohei Kobayashi	東京大学	High-power laser systems for intelligent laser manufacturing	[招待講演:国内] 第3回 集積光デバイスと応用技術研究会「ハイパワーレーザ」 東京大学	2018/7
小林洋平	東京大学	スマートものづくりのためのレーザー加工	[招待講演:国内] レーザー学会「ファイバーレーザー技術」専門委員会第2回研究会@支笏湖	2018/7
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	チュートリアル講演「不可逆系の光物理:超短パルスレーザー加工の基礎と応用」	[招待講演:国内] 第8回光科学異分野横断萌芽研究会@箱根	2018/8
高橋孝、鷺尾方一	早稲田大学	レーザーアブレーション閾値のフルエンス・パルス幅依存性精密測定	[招待講演:国内] 第79回応用物理学会 秋季学術講演会 (名古屋)	2018/9
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	超短パルス光制御技術の精密加工への応用:光ものづくりの最適自動化に向けて	[招待講演:国内] 京都光技術研究会5周年記念 第26回 光ものづくりセミナー@京都府産業支援センター	2018/9
小林洋平	東京大学	レーザー加工技術	[招待講演:国内] グローバル研究拠点【柏の葉】シンポジウム ~社会イノベーション拠点形成に向けて~@柏の葉	2018/9
小林洋平	東京大学	レーザー加工の挑戦—ものづくり改革へ—	[招待講演:国内] 物性研究所一般講演会@柏の葉フューチャーセンター	2018/11
小林洋平	東京大学	スマートものづくりのためのレーザー加工	[招待講演:国内] 多元技術融合光プロセス研究会@産総研お台場	2018/11
吉富大、高田英行、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	最適加工条件の効率的探索のための自動パラメータ可変高出力フェムト秒ファイバーレーザーシステム	[招待講演:国内] レーザー学会第525回研究会「ファイバーレーザー技術」 (愛知県名古屋市)	2018/11

小林洋平	東京大学	スマートものづくりのためのレーザー加工	[招待講演: 国内] 第2回 TACMIシンポジウム @大阪大学	2018/11
小林洋平	東京大学	極限コヒーレント光科学イノベーション	[招待講演: 国内] 物性研究に関連する大型 将来計画について@柏の 葉駅前キャンパス FC	2018/12
大村英樹	産業技術総合 研究所	位相制御レーザー場による物質の量子制御	[招待講演: 国内] 第3回環境・生体の関わる 物理・化学の研究会 (沖縄県西原町)	2018/12
小林洋平	東京大学	CPS 型レーザー加工機システム研究開発	[招待講演: 国内] 戦略的イノベーション創造 プログラム(SIP)第2期 「光・量子を活用した Society5.0実現化技術」公開 シンポジウム 2018@浜離 宮朝日ホール	2018/12
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	深層学習でレーザー加工をスマートに	[招待講演: 国内] レーザー加工学会第90回 講演会@産業技術総合研 究所臨海副都心センター	2018/12
吉富大、高田英行、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合 研究所	最適加工条件の効率的探索のための自動パラメータ可変レーザー加工システム	[招待講演: 国内] レーザー加工学会講演会 (東京都江東区)	2018/12
小林洋平, 谷峻太郎	東京大学	ものづくり CPSにおける計算機科学への期待	[招待講演: 国内] ポスト「京」重点課題(7)「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成(CDMSI)シンポジウム@東京大学物性研究所	2018/12
小西 邦昭	東京大学	3D プリンター・レーザー加工を用いて作製した3次元テラヘルツ光学素子	[招待講演: 国内] シンポジウム テラヘルツ 科学の最前線 V	2018/12
小林洋平	東京大学	「なぜ物はきれのか」を知りたい	[招待講演: 国内] Oak leaf セミナー@東京大学 柏の葉キャンパス	2018/12
小西 邦昭	東京大学	3次元造形技術のテラヘルツ光学素子作製への展開	[招待講演: 国内] レーザー学会学術講演会 第39回年次大会シンポジウム 「人工構造による光機能制御の新展開」	2019/1
木村祥太, 谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	超高繰り返し広帯域レーザー光源	[招待講演: 国内] レーザー学会学術講演会 第39回@東海大学	2019/1
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	深層学習援用による加工過程モニタリング	[招待講演: 国内] レーザー学会学術講演会 第39回@東海大学	2019/1

吉富大、高田英行、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	最適加工条件探索のためのパラメータ可変高出力ファイバーレーザーシステム	[招待講演:国内] レーザー学会学術講演会第39回年次大会シンポジウム「スマートレーザー加工を牽引する光源・プロセス技術」 (東京都港区)	2019/1
奈良崎愛子	産業技術総合研究所	セラミックスの超短パルスレーザー加工: 熱的/非熱的加工境界に迫る	[招待講演:国内] 次世代産業用レーザー専門委員会およびSIP「高付加価値設計製造を実現するレーザーコーティング技術研究開発「ユーザー連携」推進会議」 (大阪府茨木市)	2019/3
木村祥太、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	誘導ラマン散乱を用いた広帯域モード同期レーザーの開発	[招待講演:国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	レーザープロセスの基礎課程解明にむけた大規模データ解析	[招待講演:国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3
小林洋平	東京大学	機械学習のレーザー加工への応用	[招待講演:国内] 第16回AMO討論会 電気通信大学	2019/6
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	深層学習支援によるレーザー加工の最適化	[招待講演:国内] 日本光学会 第2回 AIOptics研究会～光AIの活用と将来展望～ 宇都宮大学	2019/7
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	超短パルスレーザーはなぜ面白いのか:ガラスによる光の自己組織化と極限状態形成	[招待講演:国内] 第51回ガラス部会夏季若手セミナー 伊豆山研修センター	2019/8
小林洋平	東京大学	先端レーザーによる微細加工の展望	[招待講演:国内] 第153回微小光学研究会「微細加工・操作の微小光学」@日本女子大学	2019/9
黒田隆之助	産業技術総合研究所	産総研加速器施設における光・量子ビーム技術の産業利用への取組みと超伝導加速器への期待	[招待講演:国内] 応用超伝導加速器コンソーシアム設立記念シンポジウム	2019/9
奈良崎愛子、高田英行、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	セラミックスのパラメータ可変超短パルスレーザー加工	[招待講演:国内] 電気学会電子・情報・システム部門大会「レーザープロセスと先端技術」	2019/9
小林洋平	東京大学	スマートものづくりのためのレーザー加工	[招待講演:国内] 第43回レーザー協会セミナー@日精ホール	2019/11
小林洋平	東京大学	レーザー加工CPSに向けて	[招待講演:国内] レーザー加工学会@お台場産総研	2019/12

吉富大	産業技術総合研究所	自動パラメータ可変100Wレーザーシステムによる迅速な最適加工条件の探索	[招待講演:国内] 多元技術融合光プロセス研究会第4回研究交流会「レーザー光源」	2019/12
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	深層学習支援によるレーザー加工の最適化	[招待講演:国内] AI Optics オンライン研究会(日本光学会主催)	2020/7
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	高精度大規模データによる超短パルスレーザー加工の定量化	[招待講演:国内] 令和2年度多元技術融合光プロセス研究会第3回研究交流会プログラム	2020/11
奈良崎愛子、高田英行、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	広域パラメータ可変超短パルスレーザー加工による高速パラメータ探索	[招待講演:国内] レーザー加工学会(WEB開催)	2020/11
宮本良之	産業技術総合研究所	超短パルスレーザーを利用した炭素材料およびその周辺材料の反応誘起:第一原理計算による提案	[招待講演:国内] 日本レーザー学会第41回年次大会(WEB開催)	2021/1
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	大規模データと深層学習によるレーザー加工の定量化	[招待講演:国内] レーザー学会第41回年次大会	2021/1
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	深層学習によるレーザー加工の定量化	[招待講演:国内] 第2回日本光学会関西支部講演会	2021/1
小林洋平	東京大学	基調講演:NEDOレーザープロジェクトが生み出したもの	[招待講演:国内] 第32回新産業技術促進検討会シンポジウム NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクト成果報告会, 2.26@Web, TKP 虎ノ門(2021)	2021/2
水谷 彬、中村 亮介、森山 匡洋、田丸 博晴、玄洪文、谷 俊太郎、小林洋平、三尾典克	東京大学、他	レーザー切断した炭素繊維のラマンスペクトルによる熱影響評価	[学会発表:国内] 第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ、新潟) 口頭発表	2016/9
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	フェムト秒レーザーパルス励起による超高密度励起Siからの電磁波放射の時間分解測定	[学会発表:国内] 日本物理学会2016年秋季大会 金沢大学	2016/9
田口将大、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	金属表面への超撥水性付与を最適化するレーザーパラメータの探索	[学会発表:国内] 第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9
大村英樹、斎藤直明、森下亨	産業技術総合研究所	分子トンネルイオン化の量子制御を利用したレーザー場フーリエ合成4	[学会発表:国内] 2016年(平成28年)第10回分子科学討論会	2016/9
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	金属のレーザーアブレーション過程の電場強度依存性の時間分解測定	[学会発表:国内] 日本物理学会第72回年次大会 大阪大学	2017/3

中前秀一、伊藤隆、中村孝宏、金昌秀、挟間優治、黒田隆之助、秋山英文	東京大学	半導体反転分布状態に対する位相緩和測定	[学会発表:国内] 日本物理学会 ポスター発表	2017/3
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	複数の励起過程により駆動されるレーザーアブレーションの電磁場サブピコ秒時間分解測定	[学会発表:国内] 第64回応用物理学会春季学術講演会 パシフィコ横浜	2017/3
青柳弓槻、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	フェムト秒レーザー加工過程のパルス毎散乱光イメージング	[学会発表:国内] 第64回応用物理学会春季学術講演会 パシフィコ横浜	2017/3
Chang KaiHsun	東北大学	Generation of smooth-shape nano-second light pulses from gain-switched laser diodes	[学会発表:国内] 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
高橋孝、他	早稲田大学	レーザー加工の学理解明に向けたパルス幅可変レーザーシステムの開発	[学会発表:国内] 第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
青柳弓槻、他	東京大学	深層学習を用いたアブレーション体積のパルス毎測定	[学会発表:国内] 第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
小西邦昭	東京大学	誘電体レーザー加工における光物性探索とマイクロ造形への応用	[学会発表:国内] 日本物理学会 2017年秋季大会領域5シンポジウム	2017/9
吉田剛、他	産業技術総合研究所	フーリエ合成レーザー場による分子トンネルイオン化の4状態量子制御	[学会発表:国内] 第11回分子科学討論会	2017/9
田中真人、他	産業技術総合研究所	レーザー加工の高度化のための真空紫外領域における透過吸収・エリプソメトリ測定装置の開発	[学会発表:国内] 第60回放射線化学討論会	2017/9
谷峻太郎、他	東京大学	光で物質を操る ~レーザー加工における極限的光と物質の相互作用とそのダイナミクス~	[学会発表:国内] 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会	2017/12
谷峻太郎、他	東京大学	レーザーアブレーションダイナミクスの遠赤外波長領域計測	[学会発表:国内] 第15回赤外放射応用関連学会年会	2018/1
宮本良之	産業技術総合研究所	非平衡励起状態を利用した材料産業へ向けて	[学会発表:国内] 理研中村特別研究室シンポジウム (埼玉県和光市)	2018/1
黒田隆之助、田中真人、澁谷達則、小川博嗣、佐藤大輔、伊藤功、小林洋平	産業技術総合研究所	Fabrication of microstructures on thermoplastic polymer using laser processing and its applications	[学会発表:国内] ACSIN-14&ICSPM26 (宮城県仙台市)	2018/1

澁谷達則、佐藤大輔、田中真人、小川博嗣、黒田隆之助	産業技術総合研究所	Laser processing of poly L-lactic acid with deep ultraviolet pulses	[学会発表:国内] ACSIN-14&ICSPM26 (宮城県仙台市)	2018/1
Jui-Hung Hung、他	東北大学	Generation of burst optical pulses from a gain-switched laser diode by CW laser light injection	[学会発表:国内] 第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
He-Jie Yan、他	東北大学	長光子寿命半導体レーザーの利得スイッチング動作	[学会発表:国内] 第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
櫻井治之、他	東京大学	フェムト秒レーザー加工によるテラヘルツ波反射防止モスアイ構造の作製	[学会発表:国内] 第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
吉田剛、他	産業技術総合研究所	フーリエ合成レーザー場を用いた分子トンネルイオン化の4モード量子制御	[学会発表:国内] 電気学会光量子デバイス研究会	2018/3
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	金属のフェムト秒レーザー加工過程におけるエネルギー移動	[学会発表:国内] 日本物理学会第73回年次大会 東京理科大学(野田キャンパス)	2018/3
場本圭一, 青柳弓槻, 谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	フェムト秒レーザーアブレーションのレーザービーム幾何依存性	[学会発表:国内] 第65回応用物理学会春季学術講演会 早稲田大学西早稲田キャンパス	2018/3
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	フェムト秒レーザー加工における深さ形状のパルス毎測定	[学会発表:国内] 第65回応用物理学会春季学術講演会 早稲田大学西早稲田キャンパス	2018/3
高橋孝, 谷峻太郎, 黒田隆之助, 坂上和之, 鷺尾方一, 小林洋平	東京大学、他	レーザーアブレーション閾値のフルエンス・パルス幅依存性	[学会発表:国内] 第65回応用物理学会春季学術講演会 早稲田大学西早稲田キャンパス	2018/3
澁谷達則、高橋孝、坂上和之、ヂンタンフン、原広行、東口武史、石野雅彦、小柴裕也、錦野将元、小川博嗣、田中真人、鷺尾方一、小林洋平、黒田隆之助	産業技術総合研究所	高強度極端紫外線パルスによる誘電体の非熱的レーザー加工	[学会発表:国内] 第15回日本加速器学会年会(新潟県長岡市)	2018/8
大村英樹、吉田剛、齋藤直昭	産業技術総合研究所	分子トンネルイオン化の量子制御を利用したフェムト秒レーザー場フーリエ合成	[学会発表:国内] 分子化学討論会(福岡県福岡市)	2018/9

田中真人、田中宏、澁谷達則、佐藤大輔、小川博嗣、盛合靖章、黒田隆之助	産業技術総合研究所	セラミックスのレーザー一穴あけにおける加工品位制御 - 熱蓄積の影響について -	[学会発表: 国内] 第 61 回放射線化学討論会 (大阪府大阪市)	2018/9
高田英行、奈良崎愛子、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	時間制御型レーザー用試験加工機の開発	[学会発表: 国内] 応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市)	2018/9
吉富大、高田英行、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	最適加工条件探索のためのパラメータ可変高出力フェムト秒ファイバーレーザーシステム	[学会発表: 国内] 応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市)	2018/9
田中真人、澁谷達則、小川博嗣、佐藤大輔、盛合靖章、田中宏、三浦永祐、藤原健、O'Rourke Brian、大島永康、小林洋平、黒田隆之助	産業技術総合研究所	実用材料加工のためのレーザー加工システムならびに加工評価技術の開発	[学会発表: 国内] 分析計測標準研究部門 第 4 回シンポジウム (千葉県千葉市)	2018/9
高橋孝、谷峻太郎、黒田隆之助、坂上和之、鷲尾方一、小林洋平	東京大学、他	レーザーアブレーション閾値のフルエンス・パルス幅依存性精密測定	[学会発表: 国内] 日本物理学会第 73 回年次大会 東京理科大学(野田キャンパス)	2018/9
Jui-Hung Hung, Kazuo Sato, He-Jie Yan, Hirohito Yamada, Hiroyuki Yokoyama	東北大学	Amplification and nonlinear wavelength conversion of the burst optical pulses generated from a semiconductor laser	[学会発表: 国内] 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 名古屋国際会議場	2018/9
He-Jie Yan, Jui-Hung Hung, Kazuo Sato, Hirohito Yamada, Hiroyuki Yokoyama	東北大学	Stabilization of narrow-bandwidth gain-switching operation of an external-cavity laser diode	[学会発表: 国内] 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 名古屋国際会議場	2018/9
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	フェムト秒レーザーアブレーション過程の表面粗さ依存性	[学会発表: 国内] 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 名古屋国際会議場	2018/9
寺澤英知、佐藤大輔、澁谷達則、盛合靖章、黒田隆之助、坂上和之、鷲尾方一	早稲田大学	400nmのフェムト秒レーザーによるガラスのアブレーション閾値のパルス幅依存性の研究	[学会発表: 国内] 2018年ビーム物理研究会・若手の会 (千葉県習志野市)	2018/11

奈良崎愛子, 高田英行, 吉富大, 鳥塚健二, 小林洋平	産業技術総合研究所	セラミックスのレーザー穴あけにおける加工品位制御 - 熱蓄積の影響について -	[学会発表: 国内] レーザー学会年次大会(D部門レーザープロセッシング) (東京都港区)	2019/1
高田英行, 奈良崎愛子, 吉富大, 鳥塚健二, 小林洋平	産業技術総合研究所	パラメータ可変高出力フェムト秒レーザー加工・計測装置による自動レーザー加工・計測	[学会発表: 国内] レーザー学会年次大会(D部門レーザープロセッシング) (東京都港区)	2019/1
加藤洋生, 宮本良之	産業技術総合研究所	A theoretical estimation of the modulated interatomic potential in metal induced by a femtosecond laser pulse irradiation using TDDFT approach	[学会発表: 国内] Computational Sciences Workshop 2019 (東京都墨田区)	2019/1
田中真人, 田中宏, 小川博嗣, 佐藤大輔, 澁谷達則, 盛合靖章, 黒田隆之助	産業技術総合研究所	偏光を用いた分光・イメージング分析手法の開発と応用	[学会発表: 国内] 2018年度計量標準総合センター成果発表会 (茨城県つくば市)	2019/2
谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	レーザープロセスの基礎課程解明にむけた大規模データ解析	[学会発表: 国内] 第74回日本物理学会年次大会 九州大学伊都キャンパス	2019/3
He-Jie Yan, Jui-Hung Hung, Kazuo Sato, Hirohito Yamada, Hiroyuki Yokoyama	東北大学	Generation of pulse duration-tunable optical pulses from an injection-locked gain-switched laser diode	[学会発表: 国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学	2019/3
木村祥太, 谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	20GHz繰り返しカーレンズモード同期レーザーの開発	[学会発表: 国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3
島原光平, 谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	レーザー照射によるガラス破壊現象のパルス毎多変量イメージング	[学会発表: 国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3
杉山慶, 谷峻太郎, 米田修, 須藤裕之, 小林洋平	東京大学	中赤外光コムと高分解能分散素子を用いた高分解能分光システムの構築	[学会発表: 国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3
遠藤翼, 谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	任意波形ナノ秒パルスレーザー加工系の開発	[学会発表: 国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3
場本圭一, 谷峻太郎, 小林洋平	東京大学	フェムト秒レーザー微細穴あけ加工におけるビームモード最適化	[学会発表: 国内] 第66回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学大岡山キャンパス	2019/3

寺澤英知、鷺尾方一	早稲田大学	短波長フェムト秒レーザーによる合成石英のアブレーション閾値のパルス幅依存性	[学会発表:国内] 第66回応用物理学会 春季学術講演会 (東京)	2019/3
奈良崎愛子、高田英行、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	セラミックスの超短パルスレーザー加工における非熱的/熱的加工境界	[学会発表:国内] 応用物理学会春季学術講演会 (東京都目黒区)	2019/3
小柴裕也、森田遼介、鷺尾方一、坂上和之、東口武史、浦川順治	早稲田大学	クラブ衝突レーザーコンプトン散乱に向けたリング型再生増幅器の開発	[学会発表:国内] 加速器学会、京都、2019年7月31-8月3日、WEPI024	2019/7
木村祥太、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	最小構成カーレンズモード同期レーザーの開発	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学札幌キャンパス	2019/9
高橋孝、谷峻太郎、黒田隆之助、小林洋平	東京大学	パルス幅可変高出力レーザーによる表面改質のパラメータ依存	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学札幌キャンパス	2019/9
島原光平、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	ニューラルネットワークを用いたガラスのレーザー誘起プラズマの特徴予測	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学札幌キャンパス	2019/9
遠藤翼、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	任意波形ナノ秒パルスレーザー加工における反射光とプラズマ発光の時間分解同時測定	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学札幌キャンパス	2019/9
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	半導体におけるフェムト秒アブレーション過程の時空間ダイナミクス	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学札幌キャンパス	2019/9
He. -Jie. Yan, H. A. Truong, K. Sato, H. Yamada, H. Yokoyama	東北大学	Generation of duration-tunable narrow-bandwidth nanosecond optical pulses from a semiconductor laser	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学札幌キャンパス	2019/9
小川博嗣、澁谷達則、盛合靖章、佐藤大輔、池浦広美、寺澤英知、田中真人、黒田隆之助	産業技術総合研究所	レーザー加工材料の特性評価技術の開発	[学会発表:国内] JASIS 2019 コンファレンス 分析計測標準研究部門 第5回シンポジウム	2019/9

田中真人、澁谷達則、小川博嗣、佐藤大輔、盛合靖章、馬場大輔、安崎利明、寺澤英知、牛窪大樹、三浦永祐、藤原健、O'Rourke Brian、大島永康、黒田隆之助	産業技術総合研究所	短パルスレーザーによる加工技術の産業応用	[学会発表:国内] JASIS 2019 コンファレンス 分析計測標準研究部門 第 5回シンポジウム	2019/9
加藤洋生、宮本良之	産業技術総合研究所	超短パルスレーザー照射によるAIスラブ中の原子間力変調とプラズモン励起に関する第一原理的研究	[学会発表:国内] 日本物理学会	2019/9
加藤洋生、宮本良之	産業技術総合研究所	フェムト秒パルスレーザーによるAI薄膜励起過程と原子間力変調の時間依存密度汎関数理論に基づく第一原理的研究	[学会発表:国内] 応用物理学会	2019/9
大村英樹、齋藤直昭	産業技術総合研究所	分子トンネルイオン化の量子制御を利用したフェムト秒レーザー場フーリエ合成2	[学会発表:国内] 第13回分子科学討論会 名古屋2019	2019/9
吉富大、高田英行、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	金属の超短パルスレーザー穴あけ加工における加工痕の広域かつ連続的なパルス幅依存性分析	[学会発表:国内] 応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
高田英行、奈良崎愛子、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	パラメータ可変超短パルスレーザー加工装置によるCMCの加工	[学会発表:国内] 応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
奈良崎愛子、高田英行、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	超短パルスレーザー加工における非熱的/熱的加工挙動	[学会発表:国内] 応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
高橋孝、谷峻太郎、黒田隆之助、小林洋平	東京大学	パルス幅可変高出力レーザーによる表面改質のパラメータ依存	[学会発表:国内] 第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9
高田英行、奈良崎愛子、吉富大、鳥塚健二、小林洋平	産業技術総合研究所	Nonthermal/Thermal Process Boundary in Ultrashort Pulse Laser Processing of Various Ceramics	[学会発表:国内] 第13回分子科学討論会 名古屋2019	2019/9
佐藤未宇、内田朋哉、坂上和之、鷺尾方一	早稲田大学	パルスラジオリシスに向けたErファイバーレーザーを用いたスーパーコンティニューム光源の開発	[学会発表:国内] ビーム物理研究会・若手の会、大阪、2019年11月25-27日、P02	2019/11
安岡篤史、沈奕璋、寺澤英知、小柴裕也、坂上和之、鷺尾方一	早稲田大学	レーザーアブレーション現象の時間分解計測に向けたレーザーシステム開発	[学会発表:国内] ビーム物理研究会・若手の会、大阪、2019年11月25-27日、P03	2019/11

牛窪大樹、鷺尾方一	早稲田大学	フェムト秒レーザーによる PEEKの加工後における濡れ性の変化	[学会発表: 国内] ビーム物理研究会・若手の会、大阪、2019年11月25-27日、P05	2019/11
山下洗輝、小柴裕也、森田遼介、坂上和、東口武史、浦川順治、鷺尾方一	早稲田大学	クラブ衝突を用いたレーザーコンプトン散乱のための Thin-diskレーザー開発	[学会発表: 国内] ビーム物理研究会・若手の会、大阪、2019年11月25-27日、P06	2019/11
Y. Shen, A. Yasuoka, Y. Koshiba, K. Sakaue, M. Washio	早稲田大学	Development of Compact and Intense Laser System for THz Wave Generation	[学会発表: 国内] ビーム物理研究会・若手の会、大阪、2019年11月25-27日、P10	2019/11
大塚誠也、Aryshev Alexander、上杉祐貴、浦川順治、大森恒彦、小柴裕也、坂上和之、高橋徹、照沼信浩、保坂勇志、本田洋介、鷺尾方一	早稲田大学	レーザーコンプトン散乱に向けた自発共鳴型パルス蓄積光共振器の開発	[学会発表: 国内] ビーム物理研究会・若手の会、大阪、2019年11月25-27日、P11	2019/11
吉富大	産業技術総合研究所	フェムト秒高出力ファイバーレーザーとレーザー加工の迅速な最適化	[学会発表: 国内] 光とレーザーの科学技術フェア併設レーザーセミナー	2019/11
川口海周、黒田健太、Zhigang Zhao、原沢あゆみ、矢治光一郎、野口亮、谷俊太郎、藤澤正美、辛埴、小森文夫、小林洋平、近藤猛	東京大学	時間・スピン・角度分解光電子分光装置の開発: 遠紫外光学素子の評価	[学会発表: 国内] 第75回日本物理学会年次大会 名古屋大学	2020/3
Yoshiyuki Miyamoto	産業技術総合研究所	Preferable stability of carbon nanotubes with sub-nm diameter under polarized laser irradiation: An ab initio TDDFT study	[学会発表: 国内] フラレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム	2020/3
伊藤 功、藤原 和樹、小林 洋平	東京大学	異なる種類のモード同期ファイバーレーザーの縦モード線幅測定	[学会発表: 国内] 第67回応用物理学会春季学術講演会[14a-B409-5]@上智大学 2020年3月12日-15日(コロナのため中止だが発表扱い)	2020/3

場本 圭一、谷 峻太郎、小林 洋平	東京大学	フェムト秒レーザー穴あけ加工におけるフィードバック制御	[学会発表:国内] 第 67 回応用物理学会春季学術講演会[13a-B410-4]@上智 大学 2020年 3 月 12 日-15 日(コロナのため中止だが発表扱い)	2020/3
高橋 孝、谷 峻太郎、黒田 隆之助、小林 洋平	東京大学	誘電体に対するレーザーアブレーション閾値のパルス幅依存性精密測定	[学会発表:国内] 第 67 回応用物理学会春季学術講演会[13a-B410-5]@上智 大学 2020年 3 月 12 日-15 日(コロナのため中止だが発表扱い)	2020/3
島原 光平、小林 洋平、谷 峻太郎	東京大学	深層学習を用いたレーザー照射によるガラスの空洞分布の時間発展予測	[学会発表:国内] 第 67 回応用物理学会春季学術講演会[12p-B410-16]@上 智大学 2020年 3 月 12 日-15 日(コロナのため中止だが発表扱い)	2020/3
島原光平、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	深層学習を用いたガラスのレーザー穴開けシミュレータの構築	[学会発表:国内] 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会[9p-Z18-6]@同志社大学, 2020年 9 月 8 日-11 日(オンライン開催)	2020/9
遠藤翼、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	任意波形ナノ秒パルスレーザーによる加工効率の時間波形依存性評価	[学会発表:国内] 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会[9p-Z18-10]@同志社大学, 2020年 9 月 8 日-11 日(オンライン開催)	2020/9
高橋孝、谷峻太郎、黒田隆之助、小林洋平	東京大学	種々の材料に対するレーザーアブレーション閾値パルス幅依存性精密測定	[学会発表:国内] 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会[9p-Z18-11]@同志社大学, 2020年 9 月 8 日-11 日(オンライン開催)	2020/9
木村祥太、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	カーレンズモード同期レーザーにおける Q スイッチ不安定性	[学会発表:国内] 第 68 回応用物理学会春季学術講演会[10p-Z19-13]@同志社大学, 2020年 9 月 8 日-11 日(オンライン開催)	2020/9
山田 涼平、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真	東京大学	金属のフェムト秒レーザーアブレーションにおけるプラズマ発光ダイナミクスの観測	[学会発表:国内] 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会	2020/9

高久諒太, 松村知岳, 櫻井治之, 小西邦昭, 今田大皓, Shaul Hanany, Karl Young, Qi Wen, 桜井雄基, 片山伸彦, 満田和久, 山崎典子, 小松国幹, 石野宏和, 湯本潤司, 五神真, 他 LiteBIRD Joint Study Group	東京大学、他	LiteBIRD 偏光変調器に向けたサファイア広帯域反射防止構造の大面积レーザー加工の手法と光学評価	[学会発表: 国内] 日本物理学会 2020年秋季大会	2020/9
佐藤未宇, 金子悠隆, 小柴裕也, 坂上和之, 鷺尾方一	早稲田大学	パルスラジオリシスシステム高度化へ向けたスーパーコンティニューム光源開発	[学会発表: 国内] 第17回日本加速器学会年会、オンライン、2020年9月2日-4日、WEPP21	2020/9
小柴裕也, 山下洸輝, 坂上和之, 東口武史, 浦川順治, 鷺尾方一	早稲田大学	レーザーコンプトン散乱のためのリング型Thin-disk再生増幅器の開発	[学会発表: 国内] 第17回日本加速器学会年会、オンライン、2020年9月2日-4日、THPP21	2020/9
吉富大, 高田英行, 奈良崎愛子, 鳥塚健二, 小林洋平	産業技術総合研究所	超短パルスレーザー穴あけの加工速度と品質に及ぼす繰り返しレートとパルス幅の影響	[学会発表: 国内] 2020年 応用物理学会 秋季学術講演会、オンライン、2020年9月8日~9月11日	2020/9
高田英行, 奈良崎愛子, 吉富大, 鳥塚健二, 小林洋平	産業技術総合研究所	セラミックスの超短パルスレーザー加工における非熱/熱加工の境界	[学会発表: 国内] 2020年 応用物理学会 秋季学術講演会、オンライン、2020年9月8日~9月11日	2020/9
松下彩華, 山下洸輝, 小柴裕也, 坂上和之, 東口武史, 浦川順治, 鷺尾方一	早稲田大学	クラブ衝突によるレーザーコンプトン散乱の散乱X線強度増大の原理実証	[学会発表: 国内] ビーム物理研究会・若手の回、オンライン、2020年12月9日-10日	2020/12
牛窪大樹, 澁谷達則, 佐藤大輔, 盛合靖章, 小川博嗣, 田中真人, 黒田隆之助, 坂上和之, 小林洋平, 鷺尾方一	早稲田大学、他	フェムト秒パルスレーザー照射によるPEEKへのナノ周期構造の形成	[学会発表: 国内] 第63回放射線化学討論会、オンライン、2020年12月12日-14日、30-02	2020/12

寺澤英知、佐藤大輔、澁谷達則、盛合靖章、小川博嗣、田中真人、黒田隆之助、小林洋平、坂上和之、鷺尾方一	早稲田大学、他	超短パルスレーザーによる石英ガラスの加工現象のポンプ-プローブイメージング	[学会発表:国内] 第63回放射線化学討論会、オンライン、2020年12月12日-14日、30-03	2020/12
小川博嗣、澁谷達則、坂上和之、盛合靖章、黒田隆之助、田中真人、佐藤大輔、寺澤英知、牛窪大樹	産業技術総合研究所	顕微ラマン分光によるポリマー材料のレーザーアブレーション加工評価	[学会発表:国内] 第63回放射線化学討論会、オンライン、2020年12月13	2020/12
寺澤英知、佐藤大輔、澁谷達則、盛合靖章、小川博嗣、田中真人、黒田隆之助、坂上和之、鷺尾方一	早稲田大学、他	超短パルスレーザー加工のメカニズム解明に向けた同軸入射型のポンプ-プローブイメージング装置の開発	[学会発表:国内] レーザー学会学術講演会第41回年次大会、オンライン、2021年1月18日-20日、D06-20a-IV-03	2021/1
伊藤功、小林洋平	東京大学	200 Hz線幅フリーランYbファイバーレーザー	[学会発表:国内] 第68回応用物理学会秋季学術講演会[16a-Z08-7], 2021年3月16日-19日 (オンライン開催)	2021/3
谷峻太郎、小林洋平	東京大学	フェムト秒アブレーション加工による熱影響の定量評価	[学会発表:国内] 第68回応用物理学会秋季学術講演会[19p-Z07-9], 2021年3月16日-19日 (オンライン開催)	2021/3
遠藤翼、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	任意波形ナノ秒パルスレーザーによる表面加工の時間波形依存性評価	[学会発表:国内] 第68回応用物理学会秋季学術講演会[18a-Z04-6], 2021年3月16日-19日 (オンライン開催)	2021/3
島原光平、谷峻太郎、小林洋平	東京大学	深層学習シミュレータを用いたパルスエネルギー変調加工の最適条件探索	[学会発表:国内] 第68回応用物理学会秋季学術講演会[19p-Z07-8], 2021年3月16日-19日 (オンライン開催)	2021/3
佐藤和夫、和田健司、横山弘之	東北大学	光注入同期半導体レーザーによる広域時間幅可変光パルス発生	[学会発表:国内] 第68回応用物理学会秋季学術講演会[19a-Z03-2], 2021年3月16日-19日 (オンライン開催)	2021/3

山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真	東京大学	空気との非線形相互作用による光パルスの強度分布変化のレーザー加工への影響	[学会発表:国内] 第 68 回応用物理学会春季 学術講演会	2021/3
高久 諒太、松村知岳、櫻井治之、小西邦昭、Shaul Hanany, Qi Wen, 桜井雄基、片山伸彦、山崎典子、星野百合香、湯本潤司、五神真	東京大学、他	超短パルスレーザー加工を用いた CMB 偏光観測のためのアルミナ IR フィルターの広帯域反射防止構造の開発	[学会発表:国内] 日本物理学会第 76 回年次大会	2021/3
寺澤英知、佐藤大輔、澁谷達則、盛合靖章、小川博嗣、田中真人、黒田隆之助、小林洋平、坂上和之、鷲尾方一	早稲田大学、他	透過型ポンプ-プローブイメージング装置による石英ガラスの超短パルスレーザー誘起加工現象の時間分解測定	[学会発表:国内] 第 68 回応用物理学会春季学術講演会、オンライン、2021 年 3 月 16 日-19 日、18p-Z32-1	2021/3
宮本良之	産業技術総合研究所	レーザー偏光に依存したカーボンナノチューブのフェムト秒ダイナミクス	[学会発表:国内] 日本物理学会・春の年会、オンライン、2021 年 3 月 12 日~3 月 15 日	2021/3

◆項目⑤-1 高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザー

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
瀧川 信一	パナソニック (株)	高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発	第1回 TACMI コンソーシアム シンポジウム	2017/12
持田 篤範	パナソニック (株)	High-power continuous-wave operation over 100W of a single-chip InGaN Laser Diode	The 7th Advanced Lasers and Photon Sources 2018 (OPIC2018)	2018/4
瀧川 信一	パナソニック (株)	青色半導体レーザーの開発と加工応用	第3回 TACMI コンソーシアム シンポジウム	2020/1
能崎 信一郎	パナソニック (株)	A high power InGaN laser array with built-in smile suppression structure	SPIE Photonics West 2020	2020/2
萩野 裕幸	パナソニック (株)	High-power operation of beam-quality-improved InGaN lasers with lateral corrugated waveguides	IEEE Photonics Conference	2020/9
片山 琢磨	パナソニック (株)	高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発	モノづくり日本会議 (NEDO プロ成果報告会)	2021/2
能崎 信一郎	パナソニック (株)	高出力青色半導体レーザーアレイの開発	溶接学会 春季全国大会 フォーラム	2021/4

◆項目⑤-2 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

発表者	所属	発表媒体	発表タイトル	発表年月
Yasushi Fujimoto	千葉工業大学	OPIC2017, Advanced Lasers and Photon Sources (APLS)	Development of high-power visible fiber laser based on double-clad Pr-doped waterproof fluoride glass fiber	2020/4
Yasushi Fujimoto・他	千葉工業大学	OPIC 2018, Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS)	Development of compact and high efficient UV laser system	2020/4
本越伸二	レーザー技術総合研究所	レーザー技術総合研究所 成果発表会	高精細！UVプリンティング光源開発	2016/7
篠崎勉 佐藤毅	金門光波	光とレーザー科学技術フェア 2018(展示会)	UVファイバーレーザーの紹介	2019/11
藤本靖	千葉工業大学	レーザー研究 47 巻 4 号	青色 LD 励起可視光ファイバーレーザーを用いた高効率 UV レーザー光源の開発	2016/4
藤本靖	千葉工業大学	CLEO/Europe-EQEC2019	2W single-mode visible laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fiber	2020/6
本越伸二	レーザー技術総合研究所	レーザー関西 2019	ここまで来た！高輝度 UV 光源開発	2019/7
深川正基	金門光波	イノベーションジャパン 2019(展示会)	UVファイバーレーザーの紹介	2019/8
本越伸二	レーザー技術総合研究所	光とレーザー科学技術フェア 2019(展示会)	UVプリンティング光源の開発	2018/11
佐藤毅	金門光波	光とレーザー科学技術フェア 2019(展示会)	UVファイバーレーザーの紹介	2018/11
佐藤毅	金門光波	光とレーザー科学技術フェア 2020(展示会)	UVファイバーレーザーの紹介	2018/11

◆項目⑤-3 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
小林正和	ギガフォトン	DUV High Power Laser Processing	Optics+Optoelectronics 2017	2017/ 4
藤本准一	ギガフォトン	193 & 248nm high power lasers for the micro and macro material processing	Lasers in Manufacturing conference 2017	2017/ 6
老泉博昭	ギガフォトン	Excimer Lasers Microfabrication for interposer materials made of industrial glass and organic matter	LPM 2017	2017/ 6
柿崎弘司	ギガフォトン	193nm high-power lasers for drilling with high aspect ratio into wide bandgap materials	ICALEO 2017	2017/ 10
諏訪輝	ギガフォトン	Microprocessing of organic material for semiconductor packaging by 248 nm excimer laser	SPIE Photonics West 2019	2019 / 2
田丸裕基, 五十嵐裕紀, 曲晨, 淵向篤, 村上嘉彦, 上場康弘, 三浦泰祐, 藤本准一, 溝口計	ギガフォトン	Short Pulse Light Source at 193nm for Hybrid ArF Laser	The 8th Advanced Lasers and Photon Sources	2019 / 4
上場康弘, 納富良一, 三浦泰祐, 老泉博昭, 五十嵐裕紀, 曲晨, 田丸裕樹, 淵向篤, 田中洋平, 佐々木裕次郎, 村上義彦, 藤本准一, 溝口計	ギガフォトン	DUV laser processing of ceramic matrix composites (CMC)	The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing	2019 / 5

五十嵐裕紀、田丸裕樹、曲晨、淵向篤、村上義彦、上場康弘、三浦泰祐、藤本准一、溝口計	ギガフォトン	Generation of 10W, 1ns Deep Ultraviolet Pulse at 193nm	CLEO Europe – EQEC 2019	2019 / 6
藤本准一、小林正和、諏訪輝、水谷彬、川筋康文、荒川正樹、小野瀬貴士、溝口計	ギガフォトン	The micro via processing for semiconductor package by excimer lasers	Lasers in Manufacturing Conference 2019	2019 / 6
三浦泰祐、五十嵐裕紀、田丸裕樹、曲晨、淵向篤、村上義彦、上場康弘、小野瀬貴士、藤本准一、溝口計	ギガフォトン	Hybrid ArF Excimer Laser for Lithography and Micromachining	IAPLE2019	2019 / 7
藤本准一、諏訪輝、小林正和、小野瀬貴士、川筋康文、水谷彬、荒川正樹、溝口計	ギガフォトン	The micro via processing for semiconductor package by DUV excimer lasers	The International Conference on Laser Ablation 2019	2019 / 9
五十嵐裕紀、田丸裕基、曲晨、上場康弘、淵向篤、村上嘉彦、三浦泰祐、藤本准一、溝口計	ギガフォトン	高ピークパワーハイブリッドArFエキシマレーザーの開発	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019 / 9
熊崎貴仁、手井大輔、服部正和、藤巻洋介、藤本准一、溝口計	ギガフォトン	Laser-induced damage threshold by high pulse repetition rate ArF excimer laser radiation	SPIE Laser Damage 2019	2019 / 9
田丸裕基、五十嵐裕紀、曲晨、淵向篤、村上嘉彦、上場康弘、三浦泰祐、藤本准一、溝口計	ギガフォトン	Sub-nanosecond ArF hybrid laser for laser micromachining	The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics	2019 / 10

川筋康文, 藤本准一, 小林正和, 諏訪輝, 水谷彬, 荒川正樹, 小野瀬貴士, 溝口計	ギガフォトン	DUV EXCIMER LASER PROCESSING FOR THE MICRO VIA HOLE ON SEMICONDUCTOR PACKAGE	The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics	2019 / 10
上場康弘, 納富良一, 三浦泰祐, 五十嵐裕紀, 老泉博昭, 曲晨, 田丸裕基, 淵向篤, 田中洋平, 佐々木裕次郎, 村上嘉彦, 藤本准一, 溝口計	ギガフォトン	DUV laser processing of Ceramic matrix composites (CMC) in the atmosphere.	The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics	2019 / 10
上場康弘, 五十嵐裕紀, 小野瀬貴士, 納富良一, 老泉博昭, 村上嘉彦, 淵向篤, 曲晨, 田丸裕基, 田中洋平, 佐々木裕次郎, 藤本准一, 溝口計	ギガフォトン	High Peak Power DUV Laser Processing	SPIE Photonics West 2020	2020 / 2
老泉博昭, 上場康弘, 小野瀬貴士, 荒川正樹, 諏訪輝, 五十嵐裕紀, 村上嘉彦, 三浦泰祐, 曲晨, 田丸裕基, 淵向篤, 田中洋平, 佐々木裕次郎, 柿崎弘司, 藤本准一, 溝口計	ギガフォトン	193 nm Laser Processing of Ceramic Matrix Composites (CMC)	21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication	2020 / 6

上場康弘, 五十嵐裕紀, 小野瀬貴士, 村上嘉彦, 老泉博昭, 三浦泰祐, 柿崎弘司	ギガフォトン	Precise Laser Cutting of Ceramic Matrix Composites using Short Pulse Hybrid ArF Laser	Advanced Solid State Lasers Conference 2020	2020 / 10
小野瀬貴士, 上場康弘, 五十嵐裕紀, 村上嘉彦, 老泉博昭, 三浦泰祐, 柿崎弘司, 溝口計	ギガフォトン	Direct laser cutting of ceramic matrix composites using short pulse hybrid ArF excimer laser	International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics	2020 / 10
老泉博昭, 上場康弘, 小野瀬貴士, 三浦泰祐, 柿崎弘司	ギガフォトン	193 nm Excimer Laser Processing of Ceramic Matrix Composites (CMC)	第3回 CMC シンポジウム	2020 / 11
上場康弘, 五十嵐裕紀, 小野瀬貴士, 老泉博昭, 村上嘉彦, 三浦泰祐, 柿崎弘司	ギガフォトン	Direct Cutting and Drilling of Ceramic Matrix Composites (CMC) Utilizing DUV Laser at 193 nm	45th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2021 / 2
老泉博昭, 小野瀬貴士, 上場康弘, 五十嵐裕紀, 村上嘉彦, 三浦泰祐, 柿崎弘司	ギガフォトン	ハイブリッドArFエキシマレーザによる難加工材の加工-セラミック複合材(CMC)微細加工の紹介-	令和3年度 多元技術融合光プロセス研究会 第1回研究交流会	21 / 7

◆項目⑤-4 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
塚本雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発	[解説記事] レーザー研究	2017/9
升野振一郎、 塚本雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーによる 金属の積層造形	[ポスター発表] 溶接学会平成 29 年度秋 季全国大会	2017/9
升野 振一郎、 塚本雅裕	大阪大学	Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing with 100W Blue Diode Laser	[ポスター発表] COLA2017 (International Conference on Laser Ablation)	2017/9
升野 振一郎、 塚本雅裕	大阪大学	Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing with 100W Blue Diode Laser	[ポスター発表] ICALEO 2017	2017/10
升野 振一郎、 塚本雅裕、東條 公資、浅野 孝 平、飛鳥 慶 太、舟田 義則、 左今 佑	大阪大学、 島津製作所	高輝度青色半導体レー ザー搭載溶接機および積 層造形装置の開発	[ポスター発表] レーザー加工学会第88 回 講演会	2017/10/1 2
升野 振一郎	大阪大学	高輝度青色半導体レー ザーを用いた積層造形装 置の開発	[口頭発表] レーザー学会第 516 回研 究会	2018/1/
塚本 雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レー ザーを用いたアディティブマ ニュファクチャ リング	[招待講演] 溶接学会第 120 回軽構造 接合加工研究委員会	2018/ 1
塚本 雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーの高 輝度化による純銅の積層 造形を可能とした 3D プリンターの開発	[招待講演] 溶接学会 第 107 回界面 接合研究委員会	2018/ 1
塚本 雅裕	大阪大学	青色半導体レーザー開発と AM へ の展開	[招待講演] 第 8 回青色半導体レ ーザー開発とAM への展開	2018/1/
升野 振一郎	大阪大学	青色半導体レーザー搭載S LM型3Dプリンターの開発	[口頭発表] レーザー学会第 38 回年次 大会	2018/1
塚本 雅裕	大阪大学	Development of high intensity blue diode laser system for materials processing	[招待講演] SPIE Photonics West 2018	2018/1
升野 振一郎	大阪大学	Selective laser melting for copper modeling with high power blue diode laser	[口頭発表] SPIE Photonics West 2018	2018/1
塚本 雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーを用い たアディティブマニュファク チャリング	[招待講演] 2018 年度精密工学会春季 大会	2018/3/
Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Blue diode laser development for advanced materials processing	[招待講演] The Third Smart Laser Processing Conference (SLPC2018)	2018/4/

Ritsuko Higashino、Masahiro Tsukamoto、Yuji Sato、Nobuyuki Abe、Kouhei Asano、Takahisa Shobu、Yoshinori Funada	大阪大学	Investigate of the laser cladding process with blue diode laser	[口頭発表] The Third Smart Laser Processing Conference (SLPC2018)	2018/4/
塚本 雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レーザー開発と次世代加工への展開	[招待講演] 第2回ナノ理工学情報交流会	2018/10
塚本 雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーが拓く新しいものづくりー高輝度青色半導体レーザーの開発ー	[招待講演] 溶接・接合技術に関する特別講演および研究発表会	2018/12
塚本 雅裕	大阪大学	レーザー加工の現状とこれからーハイパワー青色半導体レーザーのアディティブマニファクチャリングへの展開ー	[招待講演] レーザー学会 第39回年次大会	2019/1
Masahiro Tsukamoto	大阪大学大阪大学	Development of laser additive manufacturing technology with IR and blue diode lasers	[招待講演] 4th International Conference on Smart Engineering Materials(ICSEM2019)	2019/3
塚本 雅裕		青の錬金術師	[招待講演] やわらか3D 共創コンソーシアム1周年記念シンポジウム	2019/4
森本 健斗、塚本 雅裕、阿部 信行、升野振一郎、安積一幸、林 良彦	大阪大学	青色半導体レーザー及びファイバーレーザーを用いた純銅のボードオンプレート溶接におけるレーザー波長が熔融池形成に及ぼす影響	[口頭発表] (一社)溶接学会平成30年度春季全国大会	2019/4
東條 公資	島津製作所	高輝度青色半導体レーザーモジュールとその応用	[招待講演] 電気学会パワー光源及び応用システム調査専門委員会	2019/4
Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Smart laser additive manufacturing with IR and blue diode lasers	[招待講演] The 7th Laser Ignition and Giant- microphotronics Conference (LIC2019)	2019/4
宇野 進吾	島津製作所	高輝度青色ダイレクトダイオードレーザー BLUE IMPACTTM	[招待講演] OPIE' 19 オープンセミナー ”加工用高出力青色・緑色レーザーの現状と今後(パシフィコ横浜)	2019/4

浅野 孝平	大阪大学	青色半導体レーザーを搭載したハイブリッド複合加工機とその活用事例	[招待講演] OPIE'19 オープンセミナー ”加工用高出力青色・緑色レーザーの現状と今後(パシフィコ横浜)	2019/4
塚本 雅裕	大阪大学	新しいものづくり技術を実現する青色・緑色レーザー開発	[招待講演] 加工用高出力青色・緑色レーザーの現状と今後	2019/4
Kento Morimoto、Masahiro Tsukamoto、Nobuyuki Abe、Shin-ichiro Masuno、Kazuyuki Azumi、Yoshihiko Hayashi	大阪大学	Effect of laser wavelength on welding of pure copper plate with blue diode laser	[口頭発表] The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2019)	2019/5
Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Development of laser additive manufacturing technology with IR and blue diode lasers	[招待講演] MTEC Additive Manufacturing Workshop	2019/6
森本 健斗、塚本 雅裕、升野 振一郎、阿部信行、林良彦、安積一幸	大阪大学	青色半導体レーザーの波長が純銅箔の溶接に及ぼす影響	[ポスター発表] 第91回レーザー加工学会講演会	2019/6
Kento Morimoto、Masahiro Tsukamoto、Shin-ichiro Masuno、Kazuyuki Azumi、Yoshihiko Hayashi、Nobuyuki Abe	大阪大学	Influence of laser wavelength on melt pool behavior in welding of thin pure copper plate with blue diode and fiber lasers	[口頭発表] Lasers in Manufacturing (LiM2019)	2019/6
大内 誠悟	ヤマザキマザック	ハイブリッド複合加工機とその活用事例	[招待講演] 精密工学会第6回切削加工専門委員会(東京電機大学)	2019/6
塚本 雅裕	大阪大学	高出力青色半導体レーザー開発と拡大する加工分野への応用	[招待講演] 光・レーザー関西2019 開催記念公開シンポジウム	2019/7
塚本 雅裕	大阪大学	kW級青色半導体レーザー開発	[招待講演] レーザープラットフォーム協議会フォーラム	2019/8
塚本 雅裕	大阪大学	アディティブマニュファクチャリングのための高出力青色半導体レーザー開発	[国内会議論文] 第153回微小光学研究会機関紙 Vol.37、P17-22	2019/9

Takahiro Hara、Masahiro Tsukamoto、Yuji Sato、Ritsuko Higashino、Yoshinori Funada、Nobuyuki Abe	大阪大学	Pure copper layer formation on copper based alloy substrate with blue diode lasers	[ポスター発表] 15th International Conference on Laser Ablation (COLA2019)	2019/9
森本健斗、塚本雅裕、升野振一郎、阿部信行、安積一幸、林良彦	大阪大学	200W 青色半導体レーザーを用いた純銅のビードオンプレート溶接	[口頭発表] (一社)溶接学会2019 年度秋季全国大会	2019/9
塚本雅裕、東野律子、升野振一郎、阿部信行、佐藤雄二、舟田義則、左今佑、大内誠悟、浅野孝平、東條公資	大阪大学 島津製作所 ヤマザキマザック	高輝度青色半導体レーザー開発と加工への応用展開＝世界初、高輝度青色半導体レーザー搭載複合加工機＝	[解説] 光アライアンスVol.30 No.10 P16-20	2019/10
Takahiro Hara、Masahiro Tsukamoto、Yuji Sato、Ritsuko Higashino、Yorihiro Funada、Nobuyuki Abe	大阪大学	Pure copper layer formation on aluminum based alloy substrate with multi-color laser cladding system combined with Blue and IR lasers	[ポスター発表] 38th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2019)	2019/10
Kento Morimoto、Masahiro Tsukamoto、Shin-ichiro Masuno、Eiji Hori、Yuji Sato、Susumu Kato、Kazuyuki Azumi、Yoshihiko Hayashi、Nobuyuki Abe	大阪大学	High Quality Welding of Pure Copper Plate with High Intensity Blue Diode Laser	[ポスター発表] 38th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2019)	2019/10
Eiji Hori、Masahiro Tsukamoto、Shinichiro Masuno、Kento Morimoto、Yuji Sato、Susumu Kato、Kazuyuki Azumi、Yoshihiko Hayashi、Nobuyuki Abe	大阪大学	Influence of laser wavelength on weld quality in bead-on-plate welding of pure copper with high intensity blue diode laser	[口頭発表] 38th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2019)	2019/10
諏訪雅也、東條公資、塚本雅裕、佐藤雄二、升野振一郎、堀英治、東野律子	大阪大学	ファイバー結合型高輝度青色半導体レーザー BLUEIMPACT の紹介とその加工例	[口頭発表] レーザー学会第 537 回研究会 「次世代レーザー加工」	2019/11

東野律子、塚本雅裕、佐藤雄二、升野振一郎、堀英治、東條公資	大阪大学 島津製作所	青色半導体レーザーの開発と加工への応用展開	[口頭発表] レーザー学会第 537 回研究会「次世代 レーザー加工」	2019/11
Takahiro Hara、 Masahiro Tsukamoto、 Yuji Sato、 Ritsuko Higashino、 Yoshinori Funada、 Kazuhiro Ono、 Nobuyuki Abe	大阪大学	Pure copper rod formation by laser metal deposition system with blue diode lasers	[口頭発表] Visual-JW 2019 & WSE 2019	2019/11
Kento Morimoto、 Masahiro Tsukamoto、 Yuji Sato、 Shin- ichiro Masuno、 Sisimi Kato、 Tomomasa Ohkubo、 Kazuyuki Azumi、 Yoshihiko Hayashi、 Nobuyuki Abe	大阪大学	Effect of Laser Wavelength on Welding of Pure Copper Sheet with Fiber and Blue Diode Lasers	[ポスター発表] Visual-JW 2019 & WSE 2019	2019/11
塚本 雅裕	大阪大学	レーザー加工技術の概要と 技術動向	[口頭発表] 豊田中央研究所講演会 「レーザー加工技術の開発 動向」	2019/11
塚本 雅裕	大阪大学	レーザー加工技術の開発 動向	[口頭発表] 長野県溶射技術研究会令 和元年度現地研修(第2 回 研究会)	2019/11
藤尾駿平、森本 健斗、柴田知希、 升野振一郎、佐 藤雄二、阿部信 行、塚本雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レー ザーを用いた無酸素銅の溶 接と溶融・凝固ダイ ナミクスの観察	[ポスター発表] 第92 回レーザー加工学会 講演会	2019/12
塚本雅裕	大阪大学	Development of high power blue diode laser for additive manufacturing of pure copper	[招待講演] Materials Research Meeting 2019(MRM2019)	2019/12
Kento Morimoto、 Masahiro Tsukamoto、 Shin-ichiro Masuno、 Yuji Sato、 Kazuyuki Azumi、 Yoshihiko Hayashi	大阪大学	Pure Copper Film Welding with Near Infrared and Blue Diode Lasers	[口頭発表] Materials Research Meeting 2019(MRM2019)	2019/12

塚本雅裕	大阪大学	SIP、NEDO における高輝度青色半導体レーザー開発	[解説] 溶接学会誌 Vol.89 P21-26	2020/1
塚本雅裕	大阪大学	「加工用青色・緑色レーザーとその応用への期待」特集によせて	[解説] OPTRONICS1月号(2020.1 No.457)寄稿 P39-40	2020/1
東條公資、宇野進吾、諏訪雅也、若林直樹、廣木知之、徳田勝彦、石垣直也、湯浅善仁、塚本雅裕	島津製作所 大阪大学	島津製作所の1kW級青色半導体レーザー光源	[解説] OPTRONICS1月号(2020.1 No.457)寄稿 P41-44	2020/1
浅野 孝平	ヤマザキマザック	青色半導体レーザーを搭載した工作機械と加工事例の紹介	[解説] OPTRONICS1月号(2020.1 No.457) P62-65	2020/1
東條公資、諏訪雅也、若林直樹、宇野進吾、廣木知之、徳田勝彦、升野振一郎、堀英治、東野律子、佐藤雄二、塚本雅裕	島津製作所 大阪大学	高出力青色半導体レーザーモジュールの新展開	[招待講演] レーザー学会学術講演会第40回年次大会	2020/1
原隆裕、小野和宏、佐藤雄二、舟田義則、阿部信行、塚本雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーを用いたマルチビーム式レーザー金属堆積法による純銅皮膜形成メカニズムの解明	[口頭発表] レーザー学会学術講演会第40回年次大会	2020/1
小野和宏、原隆裕、佐藤雄二、東野律子、舟田義則、阿部信行、塚本雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーを用いたマルチビーム式レーザー金属堆積法による純銅ロッドの造形	[口頭発表] レーザー学会学術講演会第40回年次大会	2020/1
柴田知希、藤尾駿平、升野振一郎、佐藤雄二、塚本雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーを用いた純銅の積層造形における空隙形成を抑制するレーザー照射法の開発	[口頭発表] レーザー学会学術講演会第40回年次大会	2020/1
藤尾駿平、森本健斗、柴田知希、升野振一郎、佐藤雄二、阿部信行、塚本雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レーザーを用いた純銅の溶接	[口頭発表] レーザー学会学術講演会第40回年次大会	2020/1
塚本雅裕	大阪大学	Developments of high power blue diode laser system for laser metal deposition and welding of pure copper materials	[招待講演] SPIE Photonics West2020	2020/2

Ritsuko Higashino, Yuji Sato, Sin-ichiro Masuno, Takahisa Shobu, Yoshinori Funada, Nobuyuki Abe and Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Development of blue diode laser for additive manufacturing	[ポスター発表] SPIE Photonics West2020	2020/2
Kazuhiro Ono, Masahiro Tsukamoto, Yuji Sato, Ritsuko Higashino, Takahiro Hara, Yoshinori Funada, Nobuyuki Abe	大阪大学	Forming of pure copper rod by LMD method with blue direct diode lasers	[ポスター発表] SPIE Photonics West2020	2020/2
Kento Morimoto, Masahiro Tsukamoto, Yuji Sato, Susumu Kato, Kazuyuki Azumi, Yoshihiko Hayashi, Nobuyuki Abe	大阪大学	Bead on-plate welding of pure copper sheet with 200 W high intensity blue diode laser	[口頭発表] SPIE Photonics West2020	2020/2
塚本雅裕	大阪大学	「高出力青色・緑色レーザー開発の現状と今後の展望」特集によせて	[解説記事] スマートプロセス学会誌 Vol.9-No.2 P39-40	2020/3
東條公資、諏訪雅也、若林直樹、宇野進吾、廣木知之、徳田勝彦、升野振一郎、堀英治、東野律子、佐藤雄二、塚本雅裕	島津製作所	先進加工応用に向けた高出力青色半導体レーザー(解説)	[解説記事] スマートプロセス学会誌 Vol.9-No.2 P43-44	2020/3
Shumpei Fujio, Yuji Sato, Eiji Hori, Rika Ito, Nobuyuki Abe, Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Development of hybrid laser system with blue diode laser and single mode fiber laser for welding of pure copper	[ポスター発表] 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication 2020(LPM2020) (Web 開催)	2020/6
塚本 雅裕	大阪大学	細菌・ウイルスによるリスクを低減する公衆衛生環境実現化のための高輝度青色半導体レーザーを用いた銅コーティング技術開発	[招待講演] 公衆衛生 × 光技術WEB セミナー	2020/8

藤尾俊平、佐藤雄二、堀英治、井藤里香、阿部信行、塚本雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーの先行加熱を用いた近赤外線ファイバーレーザーによる純銅の溶接	[口頭発表] (一社)溶接学会2020 年度秋季全国大会 (Web 開催)	2020/9
小野和宏、佐藤雄二、東野律子、阿部信行、塚本雅裕、舟田義則	大阪大学	青色半導体レーザーを用いたマルチビーム照射式LMD 法による純銅ロッドの造形	[ポスター発表] (一社)溶接学会2020 年度秋季全国大会 (Web 開催)	2020/9
塚本雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レーザーを利用した LMD 方式金属3D プリンティング技術	[招待講演]Formnext Forum Tokyo 2020	2020/9
塚本雅裕	大阪大学	浪速博士の溶接がっせん！「レーザーによる金属のアドティブ・マニファクチャリングって何？の巻」	[解説記事] WE-COM マガジン	2020/10
Kazuhiro Ono、Yuji Sato、Ritsuko Higashino、Yoshinori Funada、Nobuyuki Abe、Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Pure copper rod formation by multibeam laser metal deposition method with blue diode lasers	[ポスター発表] 39th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2020) (Web 開催)	2020/10
Eiji Hori、Yuji Sato、Tomoki Shibata、Koji Tojo、Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Development of SLM process using 200 W blue diode laser for pure copper additive manufacturing of high density structure	[口頭発表] 39th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2020) (Web 開催)	2020/10
Yuji Sato、Shumpei Fujio、Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Development of Hybrid Laser Welding System with Blue Diode Laser and Single Mode Fiber Laser	[口頭発表] 39th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2020) (Web 開催)	2020/10
塚本雅裕	大阪大学	高輝度加工用青色半導体レーザーの新展開	[招待講演] 光とレーザーの科学技術フェア レーザーセミナー	2020/11
塚本雅裕	大阪大学	コロナ禍社会におけるブルーレーザーの役割	[招待講演] 3 地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業セミナー	2020/11
塚本雅裕	大阪大学	新型コロナウイルス禍 青色半導体レーザーが拓く未来-スマートカントリー構想「人にやさしく人が集まれるまちづくり」-	[招待講演] 第94 回レーザー加工学会講演会	2020/11

塚本雅裕	大阪大学	銅の接合・3D プリンティング・精密レーザーコーティング -スマートカントリー構想- 「人にやさしく 人が集まれる まちづくり」	[解説記事] 溶接技術	2020/12
塚本雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レーザー開発と拡大する加工分野への応用	[招待講演] 第13回レーザー加工技術展 専門技術セミナー	2020/12
竹中啓輔	大阪大学	「高輝度青色半導体レーザーを用いた銅の接合加工・精密レーザーコーティング -スマートカントリー構想 「人にやさしく 人が集まれる まちづくり」-」	[口頭発表] レーザー学会技術専門委員会「次世代産業用レーザー」研究会	2020/12
佐藤雄二、菘蒲敬久、塚本雅裕	大阪大学	青色半導体レーザーを用いたマルチビーム式 LMD 法の開発と純銅の皮膜形成過程の実時間観察	[解説記事] スマートプロセス学会誌	2021/1
黒田裕志、藤尾駿平、竹中啓輔、井藤里香、佐藤雄二、吉田実、塚本雅裕	大阪大学	ファイバーレーザーと青色半導体レーザーを用いたハイブリットレーザーシステムによる銅の溶接	[口頭発表] レーザー学会学術講演会第41回年次大会 (Web 開催)	2021/1
塚本雅裕	大阪大学	高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発	[招待講演] 第32回新産業技術促進検討会シンポジウム	2021/2
竹中啓輔	大阪大学	高輝度・高効率青色半導体レーザー開発とその応用	[口頭発表] 第2回「先進機能性 表面・構造を創出するレーザー表層加工」 (Web 開催)	2021/2
Sumpei Fujio, uji Sato, Eiji Hori, Rika Ito, Sin-ichiro Masuno, N.obuyuki Abe, Masahiro Tsukamoto	大阪大学	Effect of preheating on pure copper welding by hybrid laser system with blue diode laser and IR laser	[ポスター発表] Photonics West 2021 (Web 開催)	2021/3

【成果普及の努力（プレス発表等）】

◆プロジェクト全体

・プレスリリース

発表者	タイトル	発表日
NEDO 浜松ホトニクス	世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発 —レーザー加工の効率向上により、医療・エネルギーなどの応用 開拓に期待—	2021/6/28
三菱電機 大阪大学 スペクトロニクス	世界最高出力でガラスなどの高速微細加工を実現 「高出力深紫外ピコ秒レーザー加工装置」を開発	2021/6/22
NEDO 京都大学 QST	短パルス・高ピーク出力動作可能な新しいフォトニック結晶レー ザーの開発に成功 —超微細加工や高精度光センシング、バイオイメージングなどに 応用可能—	2021/3/26
NEDO 東京大学 産総研 三菱電機(株) スペクトロニクス(株) 大阪大学 浜松ホトニクス(株) パナソニック(株) PSFS(株) (株)金門光波 千葉工業大学 (公財)レーザー総研 ギガフoton(株) (株)島津製作所	NEDO の事業成果を集約したプラットフォームを構築 —レーザー光源や加工機を連携させ、最適な加工条件を探索—	2021/2/22
NEDO 大阪大学 ヤマザキマザック(株) (株)島津製作所	従来比 6 倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合 加工機を開発 —細菌・ウイルスリスク低減による公衆衛生環境実現への活用に 期待—	2020/7/1
NEDO スペクトロニクス(株)	世界最高級出力の深紫外ピコ秒パルスレーザー発振器を開発 —高出力化で電機や航空・宇宙分野の部品加工の高生産性と高 品位性を実現—	2020/3/19
パナソニック(株)	高出力青色ダイレクトダイオードレーザーの波長合成技術を開発 ～ファインプロセスに最適な高ビーム品質・高出力短波長レーザ 光の提供が可能に～	2020/1/29
スペクトロニクス(株)	266nm(<15ps) 50W 級ピコ秒レーザ発振に成功!!	2019/8/20
スペクトロニクス(株)	266nm10W ピコ秒レーザ 世界初！連続動作 10,000 時間達成!!	2019/6/24
浜松ホトニクス(株)	世界最高、117 ジュールの出力を実現 半導体レーザー励起の高出力産業用パルスレーザ装置を開発	2019/4/18
NEDO (株)島津製作所 大阪大学	青色半導体レーザー装置の世界最高出力 1kW を達成	2019/1/29

京都大学	新たなフォトニック結晶構造を用いて半導体レーザーの高輝度化に成功	2018/12/20
NEDO 大阪大学 ヤマザキマザック(株) (株)島津製作所	世界初、高輝度青色半導体レーザー搭載複合加工機を開発、製品化へ	2018/10/30
産業技術総合研究所 東京大学 早稲田大学	極端紫外線レーザーにより熱影響が極めて少ない材料加工を実現	2018/10/23
浜松ホトニクス(株)	小型ながら高出力で均一照射が可能なレーザーモジュールを開発	2018/4/19
NEDO	光とレーザーの最新技術展示会「OPIE'18」に出展へ	2018/3/28
NEDO (株)島津製作所 大阪大学	世界最高クラスの高出力・高輝度青色半導体レーザーを製品化へ	2018/1/25
NEDO	産学官連携で「TACMI コンソーシアム」を設立	2017/11/27
東京大学	「TACMI コンソーシアム」を設立	2017/11/27
NEDO 大阪大学	世界初、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発	2017/10/24
NEDO	次世代レーザー加工技術の研究開発に着手	2016/7/12

・WEB、雑誌等掲載

タイトル	掲載誌名	発表年月
特集1 ものづくりを変える！NEDOのレーザー加工技術	Focus NEDO	2018/3

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

タイトル	Web、掲載誌名	掲載年月
展示会レポート(100Jレーザー向け励起用LDモジュール)	月刊オプトロニクス誌 6月号(オプトロニクス社)	2018/6
浜ホト、高出力/均一照射可能なLDモジュールをOPIEに出展	OPTRONICS online Web掲載 https://optronics-media.com/news/20180424/50989/	2018/4
浜松ホトニクス、新型の産業用パルスレーザー装置開発 世界最高の117J、航空機製造のレーザーピーニングなどに	航空新聞 Web掲載 https://www.jwing.net/news/12120	2019/4
浜ホト、世界最高出力産業用パルスレーザーを開発	OPTRONICS online Web掲載 https://optronics-media.com/news/20190419/56894/	2019/4
Hamamatsu develops LD-pumped pulsed laser system that delivers 117J	LASER SYSTEMS EUROPE https://www.lasersystemseurope.com/news/hamamatsu-develops-ld-pumped-pulsed-laser-system-delivers-117j	2019/5

Hamamatsu develops diode-pumped pulsed laser that delivers 117J	Optics.org (Web 掲載) https://optics.org/news/10/4/51	2019/ 5
Improved Laseres and Techniques Benefit Materials Processing	Photonics Spectra	2019/9
「光業界トピックス」第 12 回レーザー産業賞受賞社が決定 優秀賞 浜松ホトニクス「高出力半導体レーザー製品ラインナップ」	月刊オプトロニクス誌 6 月号(オプトロニクス社)	2020/6
Hamamatsu launches laser thermal processor for quenching	Optics.org (Web 掲載) https://optics.org/news/12/3/2	2021/3
250J のパルスエネルギーを出力する産業用パルスレーザー装置を開発——医療／エネルギー分野での応用開発も期待 浜松ホトニクス	Fabcross for エンジニア Web 掲載 https://engineer.fabcross.jp/arhive/210629_hamamatsu.html	2021/ 6
世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発 ～レーザー加工の効率向上により、医療・エネルギーなどの応用開拓に期待～(NEDO/浜松ホトニクス株)	CEND —EMC 対策ノイズ対策の総合情報サイト—Web 掲載 https://cend.jp/user/headline/20210629.html	2021/ 6
世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発	Laser Focus World Japan Web 掲載 http://ex-press.jp/lfw/lfw-news/lfw-products-app/40849/	2021/ 6
NEDO など 世界最高出力のパルスレーザー装置を開発	日刊ケミカルニュース Web 掲載 https://chemical-news.com/2021/07/13/nedo-%E3%81%AA%E3%81%A9%E3%80%80%E4%B8%96%E7%95%8C%E6%9C%80%E9%AB%98%E5%87%BA%E5%8A%9B%E3%81%AE%E3%83%91%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC%E8%A3%85%E7%BD%AE%E3%82%92%E9%96%8B/	2021/ 6
250J のパルスエネルギーを出力する、産業用パルスレーザー装置を開発	MONOist Web 掲載 https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/2107/16/news033.html	2021/ 6
世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発 —レーザー加工の効率向上により、医療・エネルギーなどの応用開拓に期待—	Optinews Web 掲載 https://optinews.info/2021/06/29/nedo-6/	2021/ 6
浜ホト、世界最高出力の産業用パルスレーザー装置を開発	OPTRONICS online Web 掲載 https://optronics-media.com/news/20210628/73714/	2021/ 6
世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発	Rob-tech.jp Web 掲載 https://robot-tech.jp/news/20210628.html	2021/ 6

世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発 —レーザー加工の効率向上により、医療・エネルギーなどの応用開拓に期待—	日本の研究.com Web 掲載 https://robot-tech.jp/news/20210628.html	2021/ 6
Hamamatsu's Industrial Laser System Delivers 250 Joules	IDEX Health & Science Web 掲載 https://www.idex-hs.com/news-events/industry-news/hamamatsus-industrial-laser-system-delivers-250-joules/	2021/ 6
連続照射から最短 4 ミリ秒のパルス照射まで操作の自由度が高いレーザー加熱加工装置を開発 レーザ焼入れの普及促進に期待	Automotive Engineers' Guide Web 掲載 http://guide.jsae.or.jp/topics/308487/	2021/ 7
世界最高出力の 250J 浜松ホトニクスが産業用パルスレーザー装置	電波新聞 https://dempa-digital.com/article/209792	2021/ 7
Hamamatsu develops pulsed laser system delivering 250 joules	Optics.org (Web 掲載) https://optics.org/news/12/7/2	2021/ 7
Hamamatsu Develops Industrial Pulsed Laser System with World's Highest Output Power	GoPhotonics Web 掲載 https://www.gophotonics.com/news/details/2672-hamamatsu-develops-industrial-pulsed-laser-system-with-world-s-highest-output-power	2021/ 7
Hamamatsu Photonics' Industrial Pulsed Laser Produces 250 Joules	NOVUSLIGHT technologies today Web 掲載 https://www.novuslight.com/hamamatsu-photonics-industrial-pulsed-laser-produces-250-joules_N11729.html	2021/ 7
浜松ホトニクスが新しいパルスレーザーシステムを開発、パルスエネルギーが 250J の世界記録を更新	HTRLASER Web 掲載 https://www.htrlaser.com/article-a567066.html	2021/ 7
Hamamatsu Photonics has developed laser thermal processing equipment capable of operating with a high degree of freedom while emitting continuous to pulsed irradiation with a minimum pulse width of 4 milliseconds	PR-Web Web 掲載 https://www.pr-web.com/2021/08/03/hamamatsu-photonics-has-developed-laser-thermal-processing-equipment-capable-of-operating-with-a-high-degree-of-freedom-while-emitting-continuous-to-pulsed-irradiation-with-a-minimum-pulse-width-of-4/	2021/ 8
Hamamatsu Photonics develops an industrial pulsed laser system delivering the world's highest output power of 250 joules!	News research Web 掲載 https://www.news-research.net/2021/08/hamamatsu-photonics-develops-an-industrial-pulsed-laser-system-delivering-the-worlds-highest-output-power-of-250-joules/	2021/ 8

Industrial Laser System Delivers 250 J	PHOTONICS MEDIA Web 掲載 https://www.photonics.com/Articles/Hamamatsus_Industrial_Laser_System_Delivers_250/a67139	2021/ 9
---	--	---------

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
フォトニック結晶レーザー 京大、短時間・高出力実現	日刊工業新聞	2021/3
短パルス・高ピーク出力動作可能な新しいフォトニック結晶レーザーの開発に成功 – 超微細加工、高精度光センシング、バイオイメージング等への応用に向けて –	京都大学プレス発表	2021/3
フォトニック結晶で高出力レーザー 京大グループ技術開発	京都新聞	2021/3
Development of photonic crystal lasers toward short-pulse and short-wavelength operations	NEDO Youtube Channel	2021/3
フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化	NEDO Youtube Channel	2021/3
光操る結晶、レーザーに革新	日本経済新聞	2019/8
光の強さ3倍 半導体レーザー 自動車のセンサーや医療へ応用期待	朝日新聞	2019/1
光を自在に操作 日本発の技術で強力レーザー	産経ニュース	2019/1
高出力・高輝度化を実現 フォトニック結晶レーザー 単一モードで安定動作 自動運転などに応用	日刊工業新聞	2018/12
「半導体レーザー」高出力化 自動運転センサー応用期待	読売新聞	2018/12
新たなフォトニック結晶構造を用いて半導体レーザーの高輝度化に成功 – 来たるべき超スマート社会におけるスマート製造やスマートモビリティに貢献 –	京都大学プレスリリース	2018/12
高輝度レーザー開発 より多くの光を一点に	京都新聞	2018/12
二重格子フォトニック結晶 京大が考案 半導体レーザー高輝度化に成功	科学新聞	2018/12

◆項目③-2 高品質 AlN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LD の研究開発

タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
新型コロナウイルス禍を契機に深紫外線デバイスの次なるブレイクスルーを追及へ	月刊OPTRONICS	2020/11

◆項目③-5 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発

タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
活動の紹介: ナノ量子情報エレクトロニクス研究開発と先端融合イノベーションの共創	東大駒場リサーチキャンパス公開, 東京大学生産技術研究所 (2018)	2018/6

活動の紹介: ナノ量子情報エレクトロニクス研究開発と先端融合イノベーションの共創	東大駒場リサーチキャンパス公開, 東京大学生産技術研究所(2019)	2019/5
--	------------------------------------	--------

◆項目③-8 分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発

発表タイトル	発表媒体	発表年月日
中赤外高出力レーザーによる材料加工	第12回レーザー加工技術展 (パネル展示)	2019/12
将来の EUV リソグラフィに向けた大強度 EUV-FEL の開発	X線結像光学研究会ニューズレター	2020/8
波長自在、高効率プラ加工	日刊工業新聞	2020/9
コンパクト ERL の紹介	高エネ研一般公開 (youtube 含む)	2020/9
量子カスケードレーザーと赤外光検出器の最新動向と応用事例	光とレーザーの科学技術フェア (セミナー講演)	2020/11
量子カスケードレーザーの合波技術で波長 8.6 μm、出力 2W を実現	プレス発表	2021/2

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

タイトル	雑誌名・学会名 ・イベント名等	発表年月
先端レーザー技術の産業展開	OPTRONICS, Vol.35, No.418, 2016年10月号 p60-65	2016/1
超スマート社会におけるレーザー加工	日刊工業新聞(31面)	2017/9
TACMIコンソーシアムの展望	光アライアンス, 29巻10 号, p43 (2018.10)日本工業出版	2018/1
ものづくりを変える! NEDOのレーザー加工技術	focus NEDO, No68, p4 (2018.3) NEDO	2018/3
レーザー加工自動化	日本経済新聞夕刊(3面)	2018/3
レーザー加工、AIで自動化 三菱電機や東大が連携	日本経済新聞電子版	2018/3
レーザー加工、AIで	日経産業新聞	2018/3
レーザー加工がもたらす未来 のものづくりシステムとは? -AIを駆使した加工 レシピの最適化へ	OPTRONICS, Vol.37, No.436, 2018年4月号 p167-172	2018/4
カーレンズモード同期レーザーを用いた高繰り返し光周波数コム の開発	光技術コンタクト, Vol.57, No.3, p3-9 (2019)	2019/3
高性能レーザー 研究開発に熱 -ものづくり力 世界と競合-	日本経済新聞(科学技術)面	2019/7
最先端レーザー研究	OPTRONICS, Vol. 38, No.453, 2019年9月号 p97-102	2019/9

部品の試作時間 9 割削減	日本経済新聞	2020/1
非熱的レーザー加工の素過程を数値シミュレーションで理解する	理研シンポジウム概要集、近代科学社より出版	2020/3
極端紫外光源による直接表面微細加工をラボスケールで実現	ニュースリリース	2020/5
フェムト秒レーザーで細いナノチューブだけを選択	フラレンナノチューブグ ラフェン学会ホームページ、「会員短信」	2020/7
Polarization as a new parameter determining the laser-induced dynamics of carbon nanotubes studied by ab initio simulations	CARBON vol. 172 page 372-378 (2020)	2020/10
大規模データによるレーザー加工の定量化	フォトニクスニュース 第 6 巻 第 3 号	2020/11
NEDO・東大・三菱電機など、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の成果を集約したプラットフォームを構築	日本経済新聞 Web 版	2021/2
NEDOの事業成果を集約したプラットフォームを構築ーレーザー光源や加工機を連携させ、最適な加工条件を探索ー	ニュースリリース	2021/2
NEDO「高輝度高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトの特集号に寄せて	OPTRONICS, Vol.40, No.471, 2021年3月号	2021/3
次世代モノづくり拠点をめざすレーザー加工プラットフォームとデータベース	OPTRONICS, Vol.40, No.471, 2021年3月号	2021/3
計測評価基盤技術開発とロードマップの策定	OPTRONICS, Vol.40, No.471, 2021年3月号	2021/3
次世代レーザーおよび加工の共通基盤技術	NEDO YouTube Channel, NEDO-IoT 推進部 紹介動画	2021/3
NEDO「高輝度高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトの特集号に寄せて	OPTRONICS, Vol.40, No.472, 2021年4月号	2021/4

その他

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
小林洋平	東京大学	TACMIコンソーシアムの紹介	第1回 TACMIコンソーシアムシンポジウム	2017/12
小林洋平	東京大学	スマートものづくりのためのレーザー加工	第2回 TACMIコンソーシアムシンポジウム	2018/11
小林洋平	東京大学	TACMIコンソーシアム代表から	第3回 TACMIコンソーシアムシンポジウム	2020/1
中里智治、高塚肇	東京大学	TACMIにおけるプラットフォーム・データベースの活用について	第3回 TACMIコンソーシアムシンポジウム	2020/1
奈良崎愛子	産業技術総合研究所	産業技術総合研究所における取り組みの紹介 研究紹介「先進レーザー加工」	第3回 TACMIコンソーシアムシンポジウム	2020/1
田中真人	産業技術総合研究所	オープンイノベーションへの取り組みの紹介 「量子ビーム計測クラブ／先端オペランド計測技術 OIL について」	第3回 TACMIコンソーシアムシンポジウム	2020/1

吉富 大、高田 英行、奈良崎 愛子、鳥塚 健二、小林 洋平	産業技術総合研究所	自動パラメータ可変レーザー加工システム	InterOpto 2020; All about Photonics (東京ビッグサイト)	2020/1
-------------------------------	-----------	---------------------	--	--------

◆項目⑤-1 高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザー

タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
高出力青色ダイレクトダイオードレーザーの波長合成技術を開発	プレスリリース	2020/1

◆項目⑤-2 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

展示会	場 所	出展日
Laser World of Photonics 2017	ドイツ・ミュンヘン	2017/6
Photonics West 2019	アメリカ・サンフランシスコ	2018/1
Laser World of Photonics Chine 2018	中国・上海	2018/3
OPIE2018	パシフィコ横浜(NEDO ブース)	2018/4
光とレーザーの科学技術フェア 2018	東京・科学技術館	2018/11
Photonics West 2019	アメリカ・サンフランシスコ	2019/2
OPIE2019	パシフィコ横浜	2019/4
Laser World of Photonics 2019	ドイツ・ミュンヘン	2019/6
イノベーションジャパン 2019	東京ビッグサイト・青海展示棟 B	2018/8
光とレーザーの科学技術フェア 2019	東京・科学技術館	2019/11
中小企業 新ものづくり・新サービス展	東京ビッグサイト・青海展示棟 B	2017/12
Photonics West 2020	アメリカ・サンフランシスコ	2018/2
光とレーザーの科学技術フェア 2019	東京・都立産業貿易センター	2019/11

◆項目⑤-4 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発

掲載タイトル	掲載媒体	掲載年月
世界初、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる 3D プリンターを開発 —航空・宇宙・電気自動車等の産業に必要な加工部品への応用に期待—	NEDO、大阪大学 プレスリリース	2017/10
BP ニュースセレクト 日経テクノロジー —online 純銅を積層造形	日経産業新聞に掲載	2017/10
世界最高クラスの高出力・高輝度青色半導体レーザーを製品化へ —金や銅などの加工用光源への応用に期待—	NEDO プレスリリース	2018/1
NEDO・島津製作所・阪大 世界最高性能の青色半導体レーザー製品化	日刊工業新聞に掲載	2018/1
青色レーザー出力 100 ワット、高輝度島津製作所 金属加工の光源に	化学工業日報に掲載	2018/1
島津製作所 金属加工用の青色半導体レーザー発売 阪大と開発 出力・輝度、世界最高クラス	電波新聞に掲載	2018/1
最高水準の半導体レーザー	京都新聞に掲載	2018/2
高輝度化青色半導体レーザー開発と純銅の3Dプリンターへの展開	溶接技術に掲載	2018/4
純銅加工も楽々 国産青色半導体レーザー	日経ものづくりに掲載	2018/5

阪大ら銅を積層する3D プリンターを始めて開発レーザーコーティング照射条件の施工前予測が可能なシステムを開発—レーザー職人技をより手軽に	fab cross for エンジニアに掲載	2018/6
溶接・接合工学の最近の動向「高エネルギービーム加工研究委員会」	溶接学会誌に掲載	2018/7
「次世代加工のための高出力青色半導体レーザー」特集によせて	レーザー加工学会誌に掲載	2018/10
パワーブルーレーザ	レーザー加工学会誌に掲載	2018/10
高輝度青色レーザー搭載 複合加工機を開発	化学工業日報に掲載	2018/10
NEDO・阪大・ヤマザキマザック・島津製作所・高輝度青色半導体レーザー搭載複合加工機を開発し製品化	日本経済新聞に掲載	2018/10
世界初・高輝度青色半導体レーザー搭載のハイブリッド複合加工機を開発—NEDO プロジェクト	fab cross for エンジニアに掲載	2018/10
NEDO/大阪大/ヤマザキマザック/島津製作所:世界初、高輝度青色半導体レーザー搭載複合加工機を開発、製品化へ	Motar Fan に掲載	2018/10
モノづくり業界に青色半導体レーザー旋風	日刊工業新聞に掲載	2018/10
高輝度パワーブルーレーザ	レーザー加工学会誌に掲載	2018/10
金属 AM と加工革新	日経ものづくりに掲載	2018/12
青色半導体レーザー装置の世界最高出力 1kW を達成	プレスリリース	2019/1
青色半導体レーザー装置の世界最高出力1kw を達成	All about PHOTONICS に掲載	2019/1
NEDO・島津製作所・阪大、青色半導体レーザー装置の世界最高出力1kW を達成	日本経済新聞に掲載	2019/1
青色半導体レーザー装置の世界最高出力 1kW を達成	Motar Fan に掲載	2019/1
青色半導体レーザー 厚さ数 mm の金属切断 島津・阪大が装置開発	日刊工業新聞に掲載	2019/1
3D プリンター活用推進 大阪に産官学が拠点	日本経済新聞に掲載	2019/1
3D プリンター関西を拠点	産経新聞に掲載	2019/1
高出力青色レーザー 金・銅の切断・溶接に	日本経済新聞に掲載	2019/2
青色レーザーで世界最高出力	化学工業日報に掲載	2019/2
青色半導体レーザー装置 世界最高出力1kW を実現	電波新聞に掲載	2019/2
青色半導体レーザー装置 出力1kW 開発	日刊工業新聞に掲載	2019/2
「マクロアプリケーション レーザー3D マニュファクチャリングの最新動向 2019」	OPTRONICS PHOTONICS WEST 2019 報告書に掲載	2019/4
「LASE におけるレーザー式3D プリンターの動向」	OPTRONICS PHOTONICS WEST 2019 報告書に掲載	2019/4
「特集=3D 積層造形 3D プリンターによるものづくり革新の期待」	溶接ニュースに掲載	2019/6
「特別インタビュー 可能性を秘めた青色半導体レーザー」	溶接ニュースに掲載	2019/6
「溶接や切断、積層(3D プリンター)加工機での普及目指す」	PRO トロンに掲載	2019/7
「科学の森 古くて新しい金属の「接合」	毎日新聞に掲載	2019/8

「青の革命」	ぶーめらんに掲載	2019/9
「青い光が拓く新たな純銅接合・3D プリンティング技術」	DENSO TECHNICAL REVIEW2019 に掲載	2019/11
「次世代ものづくりを支える進化するレーザー加工技術」	選択に掲載	2020/3
6 倍速で銅コート 青色半導体レーザー複合加工機公衆衛生分野などに応用	化学工業日報に掲載	2020/7
6 倍速で銅コート 青色半導体レーザー複合加工機公衆衛生分野などに応用	化学工業日報に掲載	2020/7
高輝度青色半導体レーザーで銅の高速コーティング加工機開発	航空新聞社に掲載	2020/7
銅のコーティング、従来比6 倍以上に高速化。 NEDO などが新加工機	鉄鋼新聞に掲載	2020/7
金属に銅被覆 6 倍速 青色半導体レーザー搭載複合機	日刊工業新聞に掲載	2020/7
従来比 6 倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合加工機を開発 —細菌・ウイルスリスク低 減による公衆衛生環境実現への活用—	日本の研究.com に掲載	2020/7
NEDO・阪大・ヤマザキマザック・島津製作所、従来比 6 倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合加工機を開発	日本経済新聞に掲載	2020/7
従来比 6 倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合加工機を開発	テック・アイ技術研究所に掲載	2020/7
NEDO プロレーザーの銅コーティングを 6 倍速に	OPTORONICS ONLINE に掲載	2020/7
従来比 6 倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合加工機を開発	All about PHOTONICS に掲載	2020/7
高速/精密に銅コーティングできる青色半導体レーザー複合加工機を開発—ウイルスリスク低減による公衆衛生環境への活用 阪大ヤマザキマザックら	fab cross for エンジニアに掲載	2020/7
抗菌作用 銅加工を 6 倍速で ヤマザキマザックなど試作機開発	中日新聞に掲載	2020/7
特別インタビュー レーザで公衆衛生環境作る期待される銅コーティング	溶接ニュースに掲載	2020/7
ブルーレーザ複合加工機開発 従来 6 倍速で銅コーティング	溶接ニュースに掲載	2020/7
NEDO など、青色半導体レーザー複合加工機を開発 従来に比べ 6 倍速で銅コーティングが可能に	溶接技術に掲載	2020/8
青色半導体レーザーが導く金属加工革命	日本物流新聞に掲載	2020/9
「人が集まれる街づくりへ工学技術の結集を	日本物流新聞に掲載	2020/10
ブルーレーザで公衆衛生環境作り 青色半導体レーザー接合加工研究会設立へ	溶接ニュースに掲載	2020/10
「人が集まれる街づくりへ工学技術の結集を	日本物流新聞に掲載	2020/10
ブルーレーザで公衆衛生環境作り 青色半導体レーザー接合加工研究会設立へ	溶接ニュースに掲載	2020/10
感染症リスク減の公衆衛生実現へ	日刊工業新聞に掲載	2020/12
新型コロナに負けない高度な公衆衛生を！阪大などが 1 月に研究会	ニュースイッチに掲載	2020/12

日本の次世代ものづくりを支える、高性能な青色レーザー	国立大学附置研究所・センター会議 HP に掲載	2020/12
----------------------------	-------------------------	---------

【受賞実績】

◆項目① 高品位レーザー加工技術

受賞者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
TaishiFukuhara	OsakaUniversity	CsLiB ₆ O ₁₀ grown from Li-poor flux solutions for high resistance against UV laser-induced damage	The 7th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-7) CGCT-7 Best Poster Awards	2017/10
折井庸亮, 澤田久, 奥山 大輔, 山垣 美恵子, 泉 英男, 渋谷 公彦, 岡田 穰治	スペクトロニクス	高出力深紫外ピコ秒レーザー	レーザー学会誌レーザー研究第 45 巻、第 9 号レーザー学会業績賞(論文賞)	2018 / 5
折井庸亮, 吉川徹, 奥山大輔, 濱宏隆, 河野健太, 加藤豪, 内海功朗	スペクトロニクス	素材機能の維持と高品位微細加工を両立するピコ秒ハイブリッドレーザー技術の開発	第 8 回ものづくり日本大賞 経済産業大臣賞	2020 / 1

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

受賞者	所属	受賞内容	タイトル	受賞年月
倉田将輝	浜松ホトニクス	14th Laser Ceramics Symposium Best presentation award	100 J class cryo-gas-cooled multi-disk Yb:YAG ceramics laser amplifier	2018/ 11
森田宇亮	浜松ホトニクス	レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会 論文発表奨励賞	10J 級アクティブミラー型低温 Yb:YAG レーザー増幅器システムの 10Hz 動作に向けた開発	2020/1
幡野佑真、 他 16 名	浜松ホトニクス	第 45 回 2021 年度レーザー学会業績賞(進歩賞)	100J 出力 LD 励起低温冷却 Yb:YAG セラムクスレーザー増幅器の 10 Hz 動作特性	2021/5

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
吉田昌宏	京都大学	Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams	第4回フォトニクス奨励賞	2020/3
吉田 昌宏, 井上 卓也, 和 泉 孝紀, De Zoysa Menaka, 野田進	京都大学	大面積(≥3~5mmΦ)高輝度フォトニック結晶レーザー実現に向けた格子点設計とバンド構造についての考察	第47回応用物理学会講演奨励賞	2020/3
Masahiro Yoshida	Kyoto University	High-power, high-beam-quality double-lattice photonic-crystal lasers	IEEE Photonics Society Kansai Chapter Best Student Presentation Award	2019/11
野田 進	京都大学	フォトニック結晶に関する研究	2019 MOC Award	2019/11
R. Morita, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, and S. Noda	Kyoto University	8-W-Peak Self-Pulsating Photonic-Crystal Surface-Emitting Laser with Ring-Shaped Saturable Absorber	2019 IPC Student Paper & Poster Award	2019/10
吉田昌宏	京都大学	高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザー	2018年度LQE奨励賞	2019/2
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーに関する研究	泰山賞 レーザー進歩賞	2018/7
M. Yoshida, M. D. Zoysa, R. Hattsuma, Y. Tanaka, K. Ishizaki, and S. Noda	Kyoto University	Elliptical Double-Hole Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers	Best Student Paper Award of CLEO Pacific Rim	2017/8
野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーに関する研究	レーザー学会フェロー	2017/5
井上 卓也	京都大学	On-chip integration and high-speed switching of multi-wavelength narrowband thermal emitters	第1回フォトニクス奨励賞	2017/3

◆項目③-2 高品質 AlN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LED の研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
平山秀樹	理化学研究所	Al 系窒化物結晶ヘテロ成長技術とそれを用いた深紫外線 LED の開発	応用物理学会 化合物半導体エレクトロニクス業績賞 (赤崎勇賞)	2019/3
平山秀樹	理化学研究所	AlGaN 混晶の結晶成長と深紫外発光素子に関する先駆的研究	応用物理学会フェロー表彰	2018/9

◆項目③-4 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発

- ・2017 第 32 回櫻井健二郎氏記念賞(東京工業大学 小山二三夫)
- ・2018 大川賞受賞 (東京工業大学 小山二三夫)
- ・2019 OSA Nick Holonyak, Jr. Award 受賞 (東京工業大学 小山二三夫)
- ・2019 電子情報通信学会 第 56 回業績賞(東京工業大学 小山二三夫)
- ・2020 OSA Fellow(東京工業大学 小山二三夫)
- ・2020 IAAM Scientist Award (東京工業大学 小山二三夫)

◆項目③-5 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
荒川泰彦	東京大学	量子ドットとその光素子応用に関する研究	第 107 回日本学士院賞	2017/6
Fong Chee Fai	東京大学	Modification of dynamic nuclear spin polarization in single quantum dots by photonic crystal	OSA/SPIE Student Paper Award	2017/7
勝見亮太	東京大学	Fabrication of quantum dot- nanocavity- waveguide coupled systems via transfer printing method	First Prize, Best Poster Award (iNOW2017)	2017/8
荒川泰彦, 舘林潤	東京大学	ナノワイヤ量子ドットレーザーの進展	第 39 回(2017 年度)応用物理学会 解説論文賞	2017/9
Vo Quoc Huy	東京大学	A Photonic Crystal Nanocavity with a Quantum Dot Active Region Embedded by MBE Regrowth	The MOC Student Award	2017/11

荒川泰彦	東京大学	Pioneering contribution to quantum dot lasers and related nanophotonics devices	The MOC Award	2017/11
Y. Arakawa (Invited)	東京大学	2019 IEEE Jun-ichi Nishizawa Medal For contribution to the development and commercialization of quantum	2019 IEEE VIC(Vision, Innovation, and Challenges) Summit and Honors Ceremony, (San Diego, USA.)(2019).	2019/5
荒川 泰彦, 岩本敏, 西前 順一, 菅原 充	東京大学 (株)三菱電機 (株)QD レーザ	「レーザー研究47-04-210(2019)」高効率・高出力化に向けた量子ドットレーザーの進展”	第 44 回レーザー学会業績賞の論文賞【解説部門】(2020).	2020/5

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
高橋孝	東京大学	レーザーアブレーション閾値のフルエンス・パルス幅依存性	第 44 回(2018年春季)応用物理学会講演奨励賞	2018/3
木村祥太	東京大学	誘導ラマン散乱を用いた広帯域モード同期レーザー	第 45 回(2018年秋季)応用物理学会講演奨励賞	2018/9
奈良崎愛子	産業技術総合研究所	セラミックスの超短パルスレーザー加工における非熱的/熱的加工境界	第 13 回(2019年春季)応用物理学会 Poster Award	2019/3
寺澤英知	早稲田大学	超短パルスレーザーによる石英ガラスの加工現象のポンプ・プローブイメージング	第 63 回放射線化学討論会若手優秀講演賞	2020/12

◆項目⑤-4 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発

受賞者	受賞名	受賞年月
原 隆裕、佐藤 雄二、塚本 雅裕、升野 振一郎	(一社)レーザー加工学会 優秀ポスター賞	2017/10
Masanori Sengoku, Masahiro Tsukamoto, Yuji Sato, Nobuyuki Abe, Kohei Asano, Ritsuko Higashino, Yoshinori Funada, Minoru Yoshida	Laser Institute of America (ICALEO) Poster Presentation Award Contest 3rd Place	2017/10
Ritsuko Higashino, Masahiro Tsukamoto, Yuji Sato 他	The SLPC2018 Outstanding poster paper award	2018/4
浅野 孝平、塚本 雅裕、舟田 義則、左今 佑、森本 健斗、佐藤 雄二、升野 振一郎、原隆裕、西川 宏	(一社)レーザー学会 レーザー学会論文賞	2019/5
小野 和宏、原 隆裕、佐藤 雄二、東野 律子、舟田 義則、阿部 信行、塚本 雅裕	(一社)レーザー学会 論文発表奨励賞	2020/5
原 隆裕、小野 和宏、佐藤 雄二、舟田 義則、阿部 信行、塚本 雅裕	(一社)レーザー学会 論文発表奨励賞	2020/5
藤尾 駿平	The 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication(LPM2020) Best Student Poster Awards	2020/6
小野 和宏、佐藤 雄二、東野 律子、阿部 信行、塚本 雅裕、舟田義則	(一社)溶接学会 2020 年度溶接学会優秀ポスター発表賞	2020/12