

(b) 空間光制御技術に係る研究開発

研究責任者：豊田 晴義（浜松ホトニクス株式会社 執行役員 中央研究所長）

参画機関：浜松ホトニクス株式会社、宇都宮大学

1) 研究内容

研究開発の全体像：

我が国の産業を支えてきた「ものづくり」技術において、レーザー加工技術は科学技術立国である日本の蓄積してきた「材料」「レーザー」「光制御」「光計測」「システムインテグレーション」によって構築される融合技術である。このレーザー加工技術は、サイバー空間とフィジカル空間をつなぐデバイスの高機能化や加工が難しいが高機能である材料の高精度な加工等を実現する技術であり、スマート製造やスマートモビリティ等への寄与を通じて、Society 5.0を実現する技術となりうる。そのため、レーザー加工におけるボトルネックを克服する技術の実現が望まれている。

具体的には、軽さと剛性を兼備する新規材料の加工、曲面を多用した複雑なデザインの導入や新製品の投入時期の短縮化などに対応するための、高精度かつ高スループットな加工技術の実現があげられる。特に、輸送機械などで注目される軽量・高剛性な材料であるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、その素材の持つ非常に硬い特性から、現技術では、きれいに切断するための十分な加工精度が得られない、加工形状に制限がある等の課題があり、高精度かつ高スループットなレーザー加工への期待が大きい。また、5G/6Gに代表される高速通信機器やAI/IoT 応用機器、さらには、電動化の進む車などにおいても、高集積・高機能半導体デバイスの需要は大幅に増加しており、その構造の微細化・複雑化・多層化とともに材料の多様化などに伴って、加工技術への要求精度とスループット向上への要求が顕在化している。

本研究開発は、光の2次元位相分布を高精度に制御可能な空間光制御デバイス(Spatial light modulator : SLM) とその応用技術を発展させ、高精度かつ高スループットな加工を実現する空間光制御技術の実用化(10~100倍の高速化)等を行い、製造業における生産性を質的に変革させるネットワーク型製造システムの構築に貢献することを目標とする。具体的には、従来のレーザー加工の概念を凌駕する多点同時加工や型抜き加工を高精度かつ高速に実現するためのキーデバイスとなる次世代 SLM の高精度化(大面積化、紫外光対応、高速化、高集積化)、および、それを用いた加工と計測を一体化した高精度レーザー加工モジュールを産学官の力を結集して実用化し社会実装することを目標としている。実施体制を図 2-2-1 示す。

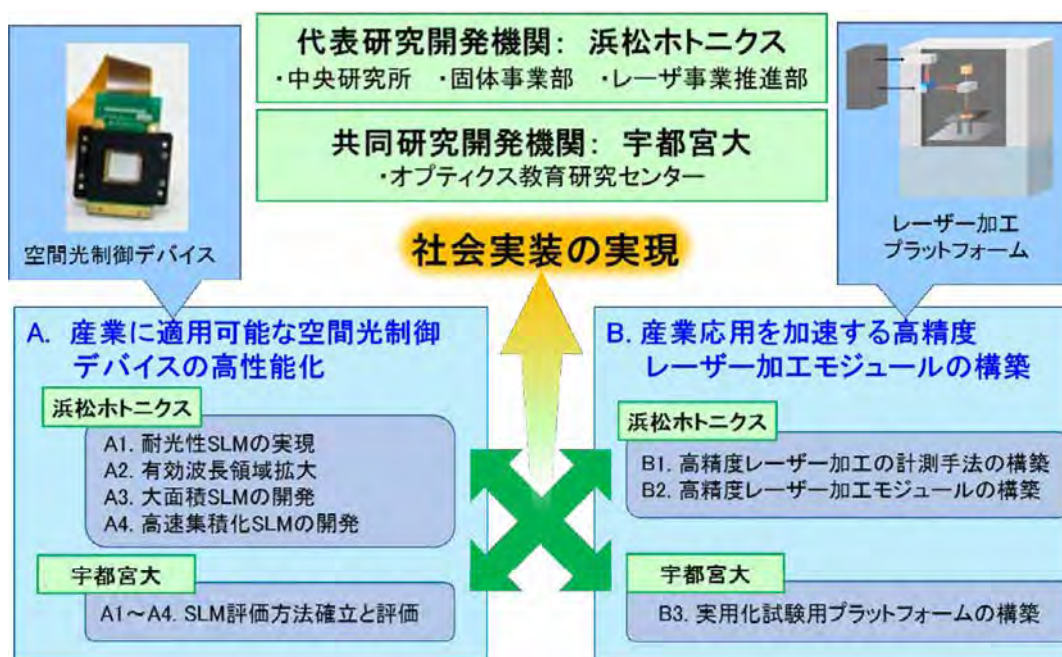


図 2-2-1. 研究開発の概要と実施体制

具体的な実施計画（内容）：

以下に、2つの主要な開発項目を記す。これらの実現により、高精度かつ高スループットな次世代レーザー加工技術の実用化を目指す。

A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化

液晶型 SLM において高い平均出力をもつ加工用レーザーの利用に十分耐えることができる耐光強度を持たせるために、SLM を構成する主要な要素について、反射ミラーの最適設計、透明導電膜の最適な成膜技術、液晶材料の最適化を行い、十分な耐光性デバイスを実現する。また、光変調材料・構成要素（ミラー、透明導電膜、無反射ミラー）の最適化により、レーザー加工に用いられる近赤外光から紫外光までの波長帯に、それぞれ対応するための SLM の開発を行い、多点同時加工を実証する。加えて、耐光性向上を目指した大面積化、平面度向上による高精度化、半導体微細加工技術を用いた高速・高集積化などにより、さらに高精度な位相変調機能を有する空間光制御デバイスを開発し、高スループットの高出力レーザー加工を目指す。例として、難加工物のレーザー加工で注目される非熱加工を実現するための超短パルスレーザーや、微細加工に特長を持つ紫外光レーザーに対応する SLM の開発を行う。

B) 産業応用を加速する光・量子制御モジュール（高精度レーザー加工モジュール）の構築

平均出力 100W 級の CW レーザー光源や平均出力 10W 級の短パルスレーザー光源と SLM を用いてレーザー光のビームパターン制御時の集光特性および材料加工性能を評価する。次のステップとして、一般的な産業用途に必要な出力レベルに増強したレーザー光源を用いて、同種のデータを取得する。このレーザー光源と SLM により、レーザー加工機を構築

し、ホログラフィック光学エンジンを活用したリアルタイムモニタリングによるフィードバック制御と自動でレーザー光のビームパターンを生成し、加工形状や加工対象に応じて制御し、パラメータを最適化することにより、スループットが従来手法に比べて1~2桁向上できることを確認する。さらに、最終段階においては実用化に向けて加工機メーカー等への技術移転を視野に「実用化試験用プラットフォーム」を構築し、東京大学や海外研究開発機関との連携をスムーズに進めるために浜松・宇都宮の拠点組織も強化し、国内外のユーザー等と連携した加工試験を実施し実用化を目指す。

社会実装（計画）：

光ビームの空間制御による高機能加工技術を確立し、熱／非熱加工の自在な切り替え、同時3次元多点加工を実現させ、一例として製造工程における高精度加工処理の高速化（現在の10~100倍程度）を目指す。本研究開発が最終目標をクリアすると、自動車産業・半導体産業からのニーズに応えるレベルの加工が実現できる。ユーザー連携の拠点として宇都宮大学オプティクス教育研究センター（CORE）および浜松ホトニクス（株）中央研究所に「実用化試験用プラットフォーム」（PF）を整備し、広くユーザー企業からのニーズを集約し、レーザー加工サンプル試験・評価を開始し、競争領域・協調領域ともにユーザー連携による実用化・事業化の道を開拓する。また技術の普及に向けて、COREが主催するシンポジウム・ワークショップやWebサイトなどの媒体を通じて研究成果の発信やPFの宣伝などを行い、技術者養成や人材育成のためのセミナー・講習会を研究開発機関やユーザー企業に向けて実施する。

2）技術的目標（計画）

事業終了時点アウトプット目標（2022年度の目標）

- A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化
 - ・従来のSLMより数倍大きな光制御面積かつ高耐光性の広波長領域SLM、及び3桁以上の高速応答性を持つSLMを実現（これらにより、高出力レーザー加工の高性能化に必要なSLM製造技術を獲得し、並列同時加工機能などを用いた100~1,000倍程度の生産性向上を実証する）（TRL7）。TRL7の実現により、実際の使用条件に近い状態で使用するための種々のツールも用意され、ユーザーにおけるレーザー加工装置において、SLMの持つ機能を十分に活用するための光源、光制御系、計測系の一体化技術とともに供給を行う。
- B) 産業応用を加速する光・量子制御モジュール（高精度レーザー加工モジュール）の構築
 - ・高スループットでのレーザー加工の実現。「実用化試験用プラットフォーム」における、ニーズに連動した加工試験を実施（これらにより、高出力レーザー加工の実用化を推進する）（TRL5）。
 - ・東京大学等との外部連携を拡大し、レーザー加工実証実験とユーザービリティ向上（TRL3）。「実用化試験用プラットフォーム（浜松拠点・宇都宮拠点）」での外部ユーザーとのレーザー

一加工試験実施により、加工ニーズの取り込みや最適な加工のためのホログラムデータベースを構築する。

以下に5年間の工程表を示す。

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
②空間光制御技術に係る研究開発							
1) 産業に適用可能な空間光制御デバイス(SLM)の高性能化	<ul style="list-style-type: none"> レーザー加工ニーズ収集 耐光性SLMデバイス作製・評価に関する基礎評価実施 大面積SLMの試作条件出しのための基礎評価 <p>TRL1</p>	<ul style="list-style-type: none"> 薄膜製膜技術の最適化による平面度向上による高精度化 大面積SLM製造の平面度向上の最適化 <p>TRL3</p>	<ul style="list-style-type: none"> 高耐光SLMの実現(平均強度:100Wレベル、位相制御精度:1/100波長以下) ユーザの使用環境に関する情報や要求仕様等に適合するデバイス評価 <p>TRL5</p>	<ul style="list-style-type: none"> 紫外耐光・高精度位相調整機能を再立したSLMの試作・評価・改良 大面積SLMの平面度向上、最適化 <p>TRL5</p>	<ul style="list-style-type: none"> 大面積かつ高耐光性の広波長領域SLMの実現 3桁以上の高速応答性SLMの実現 <p>(高出力レーザー加工の高性能化に必要なSLMデバイス製造技術を獲得し、100~1000倍程度の生産性向上実証)</p> <p>TRL7</p>	<ul style="list-style-type: none"> 研究参画企業による上市 研究参画企業での継続開発(SLMデバイス、顕微モジュール等) レーザーメーカーへの技術供給・モジュール供給 顕微イメージングメーカーへの技術供給・モジュール供給 実用化試験用プラットフォームの整備、試用機会提供 ユーザーおよび産学官と連携した新規ニーズの開拓とソリューションの創出 	<p>高耐光液晶SLM(2020~)</p> <p>大面積高機能SLM(2023~)</p> <p>高精度・高スループット型加工モジュール(2023~)</p> <p>高速高集積SLM(2025~)</p> <p>最適制御型加工モジュール(2025~)</p>
2) 産業応用を加速する高精度レーザー加工モジュールの構築	<ul style="list-style-type: none"> SLMを搭載したレーザー加工モジュールおよびレーザー加工プラットフォーム構築を旨とした設計、仕様策定、評価実験 既存のレーザー加工システムを用いた加工試験 <p>TRL1</p>	<ul style="list-style-type: none"> 高性能化SLMによるパラメータ可変加工・評価技術の確立 レーザー光源の高出力化の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 一般産業用途用レーザーにSLMを組み合わせたモジュールによるレーザー加工実施 ニーズに合致した加工試験によりSLMを用いたレーザー加工の有効性を実証 <p>TRL3</p>	<ul style="list-style-type: none"> 実用化試験用プラットフォームの構築 プラットフォーム用レーザー光源の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 高スループットでのレーザー加工実現 ニーズに連動した加工試験の実施 <p>TRL5</p>	<ul style="list-style-type: none"> 外部ユーザとの連携によるレーザー加工実証実験とユーザピリティ向上 <p>TRL3</p>	
民間からの出資(人材、物資、資金等)	(10%程度)	(35%程度)	(50%以上)	(50%以上)	(50%以上)		

3) 課題目標の達成度(成果)

① 国際競争力

図 2-2-2 に SIP 事業開始時および SIP 終了時における空間光制御デバイスのベンチマーク結果を示す(図 2-2-3 は SIP 終了時の他機関との比較)。SIP 終了時におけるベンチマークは第三者機関(ドイツのフラウンホーファー研究機構(FhG)、オランダの応用科学研究機構(TNO))によるグローバルベンチマーク結果である。高耐光性 SLM の研究開発の完了と SLM の大面積化(12x16mm から 30x30mm に拡大)により、本 SIP で着目している高出力レーザーと組み合わせたレーザー加工で約 10 倍の耐光性向上が実現したと言える。これにより、金属 3D プリンタへの応用に道が拓けた。位相制御精度の高さも維持できることから、比較対象と比べて高い優位性を実現した。FhG への SLM 応用ラボ開設(図 2-2-4)により、欧州市場での社会実装機会が拡大し、SIP 終了後に市場性もさらに拡大する。また、高出力レーザーと組合せたレーザー加工では、位相制御精度の高さも維持できることから、他機関に対し高い優位性を維持している。

耐光性向上、高出力 CW レーザーへの対応幅が増えたことで、金属 3D プリンタ、自動車製造関連、ガラスへのマーキング、医療材料などへの応用拡大が期待できる。低出力のレーザー加工分野では MEMS 方式が競合する可能性もあり(TNO 調査結果)、引続き市場ごとの要求を踏まえた戦略に基づいて社会実装を進める。

事業開始時 2018年度
研究開発計画

現在 2022年度
第三者機関（フラウンフォーファー、TNO）による
検証結果

各国で性能向上を目指した開発が進行しており、
日本も開発を加速して、各国の追従を引き離す
ことが重要



海外企業製品に性能向上が見られるものの、
ホトニクスが性能を維持し耐光性で更に優位

製品 (メーカー)	国内企業	独国企業	米国企業
有感エリア (mm)	16×12	15.4×8.6	7.68×7.68
有感エリア率 (%)	98	87	83.4
光利用効率 (%)	87-95	59-63	62
平面度 (A)	1/20	1/10	1/7~1/12
DACビット数	12	8	8
線形性	高	中	低
対応波長域	可視~赤外	可視~赤外	可視~赤外
耐光性 (Power density パルス)	131 GW/cm2	unknown	Up to 158 GW/cm2
耐光性 (Power density cw)	50 W, or 210 W/cm2	Up to 10 Watts	?

製品 (メーカー)	浜松ホトニクス 日本 (開発品)	Holoeye 独国(PLUTO)	Meadowlark米 国(1024x1024)
有感エリア (mm)	16×12	15.36×8.64	17.4×17.4
有感エリア率 (%)	98	93	97.2
光利用効率 (%)	87-95	65-95	75-98
平面度 (A)	1/20	1/10	λ/5-λ/12
DACビット数	12	8	8bit (in)12bit(out)
線形性	高	中?	?
対応波長域	可視~赤外	可視~赤外	可視~赤外
耐光性 (Power density)	400 GW/cm2	unknown	Up to 158 GW/cm2
耐光性 (Power density cw)	760 W/cm2	Up to 10 Watts	?

図 2-2-2. 空間光制御デバイスのベンチマーク結果

(左 : SIP 事業開始時、右 : SIP 事業終了時)

空間光制御デバイス (SIP終了時)

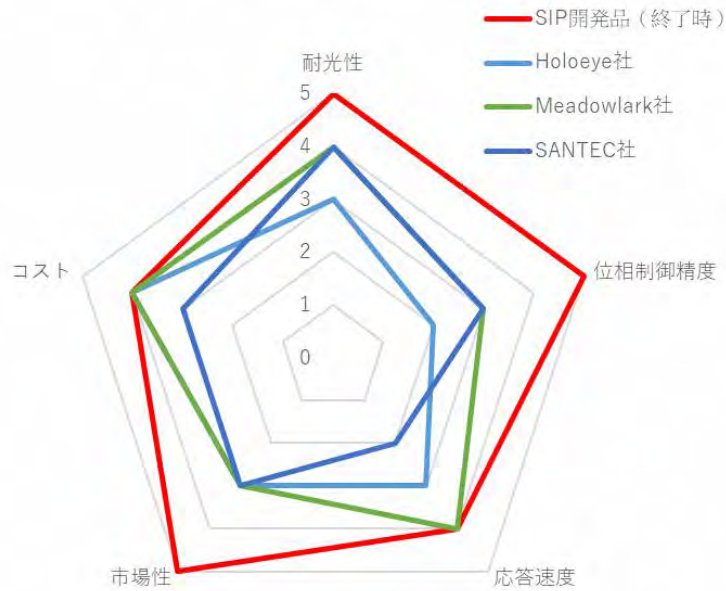


図 2-2-3. 空間光制御デバイスのベンチマーク結果 (SIP 終了時)

The screenshot shows a web page from Fraunhofer ILT. The header includes the Fraunhofer logo and navigation menus for PRESS, EVENTS, JOBS/CAREER, STUDIES, CLUSTERS, CONTACT, and DEUTSCH. Below the header, there is a breadcrumb trail: Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT > Press > Press Releases > New Spatial Light Modulator for dynamic beam shaping in industrial high-power USP processes.

The main content area features a title "New Spatial Light Modulator for dynamic beam shaping in industrial high-power USP processes" dated September 5, 2022. The text describes a collaboration with Hamamatsu to create an application lab for advanced laser material processing. It highlights the use of a scanner-based process head with a 150 W USP laser and a new SLM that can be operated up to 150 watts.

Two images are included: one showing the industrial setup and another showing a grid of light beams. The text explains that multi-beam systems are key for scaling power, speed, and costs, and that SLMs are particularly suitable for dynamic manufacturing processes.

On the right side, there is a "Contact" section with two individuals: Martin Kratz M. Sc., Group Micro and Nano Structuring, and Dipl.-Phys. Martin Reininghaus, Group leader Micro and Nano Structuring. Contact information for both, including phone and fax numbers, and a "Send email" link are provided.

図 2-2-4. フラウンホーファー研究機構 ILT 研究所からのニュースリリースの HP 写真

② 研究成果で期待される波及効果

本 SIP 光・量子課題で開発した高耐光性 SLM はすでに 2021 年に上市しており、2022 年度に開発した高耐光・大面積 SLM も製品化に向けた生産工程確立への取り組みが事業部内で取り組まれ、数年の間にこちらも上市される見通しである。

この事業を通じてデジタルフィードバック技術が向上し、均一なパターンを多点に投影することが可能となった。SLM の高耐光性が図られ、市場においてレーザー加工に用いられている kW 級レーザーにも対応できるようになったことから、より多くの多点分岐が可能

となり、その各点のビームの均一性・安定性が図られるため、より高度なレーザー加工が高いスループットで実現できるようになった。

また、SLMは光が持つ電場によって微小体を補足する光ピンセット、通常の回折限界を超えた分解能での撮像が実現できる超解像度顕微鏡（STED）の光源などにも使われる。また量子通信や量子情報にも使われるレーザー光が螺旋階段のようにねじれ・回転しながら伝搬するLGビーム光の発生にも使われる。このようにSLMは基礎科学の研究にも用いられる光制御デバイスであり、デジタルフィードバックとの組み合わせによるビームの安定化技術はこれら基礎科学分野においても必ずや貢献できるものと考えられる。

③ 達成度（1）※5年間の設定目標に対する達成度

A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化

この項目のSIP第2期5年間の設定目標は以下の通りである。

- ・従来のSLMより数倍大きな光制御面積かつ高耐光性の広波長領域SLM、及び3桁以上の高速応答性を持つSLMを実現（これらにより、高出力レーザー加工の高性能化に必要なSLM製造技術を獲得し、並列同時加工機能などを用いた100～1,000倍程度の生産性向上を実証する）(TRL7)。TRL7の実現により、実際の使用条件に近い状態で使用するための種々のツールも用意され、ユーザーにおけるレーザー加工装置において、SLMの持つ機能を十分に活用するための光源、光制御系、計測系の一体化技術とともに供給を行う。

この目標に対して、成果状況は以下の通りである。

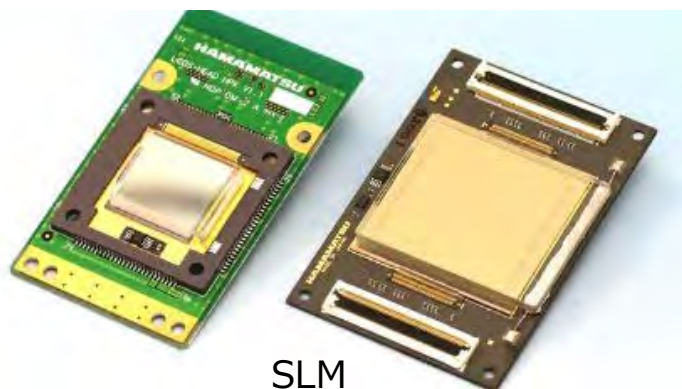
1) 大面積かつ高耐光性の広波長領域SLMの実現

SIP開始前から現有SLMの耐光性の調査を行い、耐光性を低下させる要因を特定した。

1年目にこの解決策を提案し、その解決に向けた新規SLMの設計を行った。2年目に、1年目の設計に基づいた半導体部の構造と反射ミラー（誘電多層膜ミラー）を含めた最適化により新規SLMを作製した。波長1030nm、繰り返し周波数1MHz、260fsの超短パルスでの耐光性試験を行い、現行品より1桁以上耐光性が向上していることを確認した。3年目に高耐光SLMのプレスリリースを行った。3年目にこの高耐光SLMをFhG ILT研究所とIWS研究所に提供し、耐光性試験を行った。超短パルス（波長Edgewave FX600（波長1030nm、平均出力300W、パルス幅1.5ps））では150W照射下で60分連続でも動作することを確認し、CW（CWファイバーレーザー（1070nm、1kW））では760W/cm²照射下で温度上昇によるビーム品質の劣化だけで動作することを確認し、高評価を得た。特にILT研究所では、この結果を踏まえて、この高耐光SLMを搭載したレーザー加工モジュールを新規設計、製造を行い、7x7列の多点をSLMで作成し、ステンレスの加工のデモを行った。4年目に高耐光SLMの製品化登録を行った。FhG ILT研究所では、レーザー加工を行えるアプリケーションラボ（SLM応用ラボ）を設立し、FhG ILT研究所がプレスリリースを行った（2022.9.5）。5年目に大面積SLMについてプレスリリース、学会発表を行い、大面積SLMの可能性を示せた。以上の通り

高い平均出力をもつ加工用レーザーの利用に耐えるデバイスを実現した。図 2-2-5 に示すように、従来サイズで高耐光性 SLM の開発に成功するとともに、世界最大級の液晶型大面積 SLM（従来比約 4 倍）を開発した。金属 3D プリントへの応用やレーザー熱加工の効率や精度向上が期待され、大面積化によって波長域も拡大する。

従来サイズでSLMの高耐光化に成功、大面積化で用途拡大



SLM

(左) 従来サイズSLM (有効エリア16mm×12mm)
(右) 大面積SLM (有効エリア30mm×30mm)

主な仕様

項目	従来開発品	本開発品	単位
対応波長	1050 (±50)	1050 (±50)	nm
画素数	1272 × 1024	1008 × 1024	pixels
有効エリアサイズ (W×H)	15.9 × 12.8	30.24 × 30.72	mm
画素ピッチ	12.5	30.0	μm
開口率	96.8	96.7	%

図 2-2-5. SIP 期間中に開発した SLM (左：高耐光 SLM, 右：高耐光・大面積 SLM)

2) 3 桁以上の高速応答性 SLM の実現

従来の液晶を用いた SLM よりも 3 桁以上高速となる、1MHz 動作の SLM 試作を 2 つの方式により進め、研究開発計画で目標とした単一 ch 構造での高速化を達成した。具体的には、サブ波長グレーティング方式では既に単一 ch 構造で 1MHz での動作を確認し、さらに踏み込んで、2023. 2 には有効面積 400μm × 400μm の 8ch の 1 次元専用機能 SLM (図 2-2-6 (a)) を動作速度 5MHz で動作させた。MIM 方式でも既に単一 ch 構造で 1MHz での動作を確認済みで、2023. 2 には動作速度 1MHz の 32ch 1 次元専用機能 SLM が完成した (図 2-2-6 (b))。なお、MIM 方式については日本、米国、ドイツ、中国に特許を出願した。

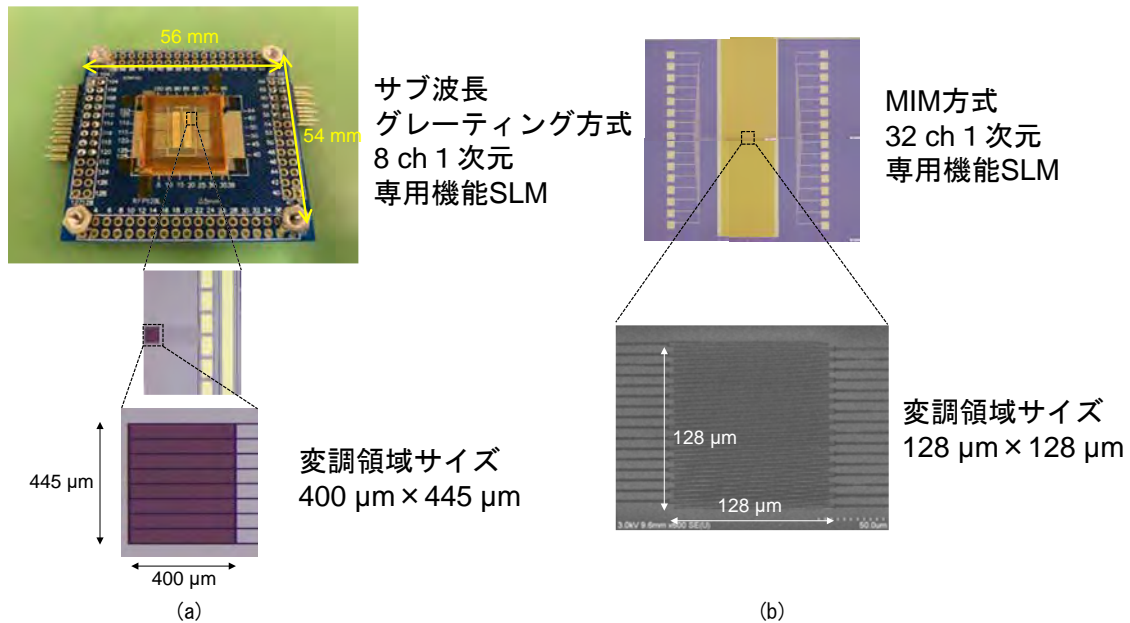


図 2-2-6. 高速応答 SLM : (a)サブ波長グレーティング方式、(b)MIM 方式

B) 産業応用を加速する光・量子制御モジュール（高精度レーザー加工モジュール）の構築

この項目の SIP 第 2 期 5 年間の設定目標は以下の通りである。

- ・ 高スループットでのレーザー加工の実現。「実用化試験用プラットフォーム」における、ニーズに連動した加工試験の実施（これらにより、高出力レーザー加工の実用化推進）(TRL5)
- ・ 東京大学等との外部連携を拡大し、レーザー加工実証実験とユーザビリティ向上 (TRL3)。「実用化試験用プラットフォーム（浜松拠点・宇都宮拠点）」での外部ユーザーとのレーザー加工試験実施により、加工ニーズの取り込みや最適な加工のためのプログラムデータベースを構築する。

この目標に対して、各年度の目標と成果状況は以下の通りである。

1 年目に、ユーザー企業などによりレーザー加工ニーズを収集し、空間光制御技術が適用可能なターゲット分野およびレーザー加工対象について、要求される性能・機能とこれを実現する技術課題との方策を検討し、実用化に向けた指針を示すことを目標とした。ニーズの観点から加工対象候補を挙げ、要求性能・機能などを加味して POC を開始出来る環境構築 (SLM 搭載レーザー加工機、モジュールなど) のための設計を完了した。また、宇都宮大学では既存のフェムト秒レーザーを用いたレーザー加工システムの再整備を行い、CGH のインシステム最適化系を新たに導入し、制御用ソフトウェアの整備と併せて、実用化試験用プラットフォームのプリシステムとして動作させ、実用化試験用プラットフォーム構築に向け着実に計画を進めた。

2年目に、SLMにより制御したビームパターンと加工現象を同時にモニタリング可能な計測・評価系の構築を完了するとともに、SLMを搭載したレーザー加工モジュールを構築し、レーザー加工評価試験を可能にすることを目標とした。SLMにより制御したビームパターンと加工現象を同時にモニタリングできる計測・評価系の構築を完了し、SLMを搭載したレーザー加工モジュールを構築し、フィードバック試験や加工試験を実施した。第3年次の本格運用に備えて、宇都宮大学に実用化試験プラットフォームを構築し、試験的運用を開始することを目標に、浜松ホトニクス(株)を含む3件の共同研究先に対して試験的運用を行った。また、空間光制御技術の社会実装を加速する人材育成を目標に、CGHの理解とそのために必要な波動光学・フーリエ光学・CGHの設計法・LCOS-SLMの動作原理、数学モデル、空間周波数応答特性や時間応答特性等の特性といった空間光変調技術のセミナーを実施した。

3年目に、安定な3D加工の実証に向けて、集光点近辺の集光状態を計測、予測できる技術を開発し、透明材料の内部加工における最適な加工条件を提供することを目標に、光軸方向も加えた3次元でのレーザー加工手法を提案・評価し、それぞれのモニタリングにおける利点/欠点を整理し、ユーザーから要望のあった多点による材料内部加工（レーザー波長が透過する領域において）で有効なモニタリング方法を提供した。一般産業用高出力（数十Wクラス）レーザーで安定加工（例えば孔あけ加工時の孔径のばらつきが10%以内）を提供できることを目標に、多点の強度安定化を図るデジタルフィードバック制御技術を搭載したレーザー加工モジュール構築を完了した。実際に強度フィードバックによる安定化が金属への多点切断加工の安定化にも寄与している結果が得られた。レーザー加工機において穴あけ加工への強度フィードバックの有効性を確認し、約10%の穴面積誤差まで抑制できることを実証した。穴径で示すと5%以下の誤差となり目標10%以内を達成した。ユーザーが所望の加工仕様を設定（指定）するだけでホログラムパターンを検索できるユーザーフレンドリーなソフトウェア環境の構築を目標に、ユーザーが所望の並列ビームパターン（または加工パターン）をコンピュータの画面を見ながら直感的に操作できるように、ユーザーフレンドリーなホログラフィック光学エンジン用ソフトウェア環境を整備した。

4年目に、デジタルフィードバック制御機能を備えたレーザー加工モジュールのプロトタイプ機によるレーザー加工において、ユーザーの加工機へ簡易に実装できるようにすることを目標に、3年目に構築を行った多点強度フィードバック技術を搭載したSLM制御モジュールに状態診断機能を開発し追加した。また、2年目および3年目に構築したレーザー加工機を用いて国内半導体企業とのPOCを実施し、空間光制御技術はユーザーの課題解決に合致することを実証し、さらにユーザー企業から生産設備導入の可能性があるとの評価を得た。社会実装に不可欠となる国内システムインテグレータ企業によるデジタルフィードバック加工モジュールの製造を可能にするために技術移転を開始した。将来的に企業への導入を加速する事を狙った技術移転である。実例として東京大学マイスターデータジェネレーター（MDG）へデジタルフィードバック加工モジュールを搭載し、課題内連携を推進する計画とした。

5年目に、デジタルフィードバック技術のユーザビリティ向上を目的に、生成した多点パターン（仮想空間）を加工面のモニタ上（実空間）に合わせて表示、制御できる技術を開発した。金属3Dプリンタで多く用いられる数百WクラスのCW発振ファイバーレーザー（ランダム偏光）では、2台のSLMを使用した制御が有効であり、2台のSLMを使って生成したビームパターンにおいても加工面で位置関係を一致させることができることを実証した。ガイド光では難しい多点パターンでの照射位置確認が可能のため、ユーザーにとって必要不可欠な技術である。国内半導体メーカーとのPOCでは、製造現場における課題として挙げられた加工時のデバイスへの損傷（課題）について取り組み、加工レーザービームの最適化（形状、強度）により、顧客要望値を満たす結果を得たほか、スループット向上要求についても対応可能な目途が立った。ホログラフィック光学エンジン実装拠点として、国内システムインテグレータ企業への技術移管を完了した。実際に東京大学のMDGに搭載しSLMを用いたレーザー加工がAIによって最適化できることを実証した。図2-2-7に、宇都宮大学で実施された、高速一括加工の実証実験の結果と、3次元加工のための設計技術の確立と検証についてまとめた。

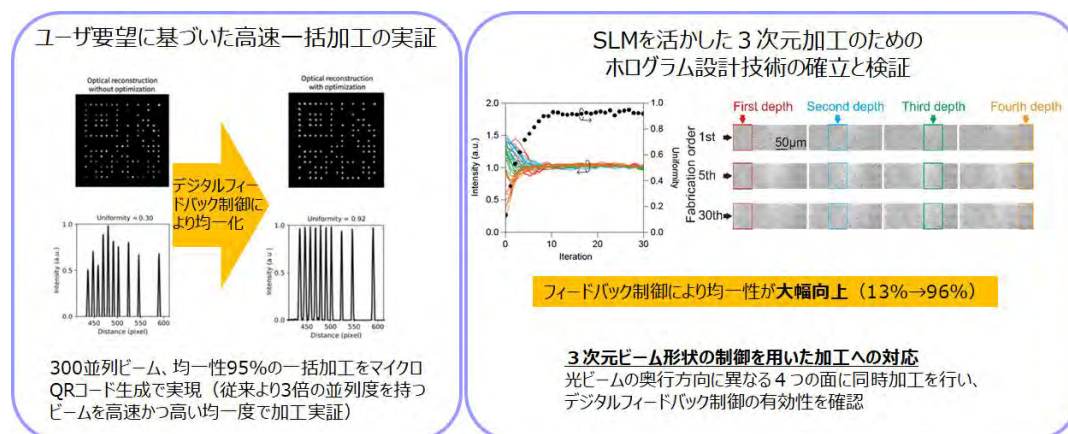


図 2-2-7. 高速一括加工の実証と3次元加工のための設計技術の確立と検証

④ 達成度（2）※社会実装の実現可能性

【計画及びその進捗状況】

- ・高耐光性SLMを実用化し、浜松・宇都宮拠点の「実用化試験用プラットフォーム」にて運用を開始した。ユーザー連携の実施体制を構築し、POCとして高品質・高スループットの加工実証でユーザーから好感触を得た。ユーザーによる事業化に向け、優位性向上を図っている。
- ・人材育成のためのセミナーを実施した。SLMによるデジタルフィードバック光制御による新技術創出や企業展開を加速する。

【体制整備状況】

- ・これまでの取り組みで、国内においては高耐光性 SLM を実装したレーザー加工機を浜松・宇都宮拠点に整備し本格的に稼働させ、これまでに半導体や車載部品などの国内主要メーカーとの加工実証実験を実施した。また、レーザー加工に強いネットワークを有する光産業創成大学院大学、宇都宮大学とも連携を図り、デジタルフィードバック光制御を用いたレーザー加工の技術サポート体制を整えた。情報発信に繋がるようにバーチャル展示室を準備し、コンテンツの充実を継続的に図っている。
- ・東京大学や TACMI コンソーシアムとの連携を進めることで、新たな加工技術へ展開することを狙っており、東京大学の MDG に SLM とデジタルフィードバック光学系を搭載した。
- ・海外拠点として FhG ILT 研究所と連携して超短パルスレーザー光による先端特殊レーザー加工向けの SLM 応用ラボを開設した（2022.9.5、ニュースリリース）。この SLM 応用ラボを通じ、欧州、特にドイツにおいて FhG の幅広いネットワークを活かし社会実装先及びニーズ探索に活用する。
- ・上述の関係機関による連携や体制整備状況を図 2-2-8 に示す。

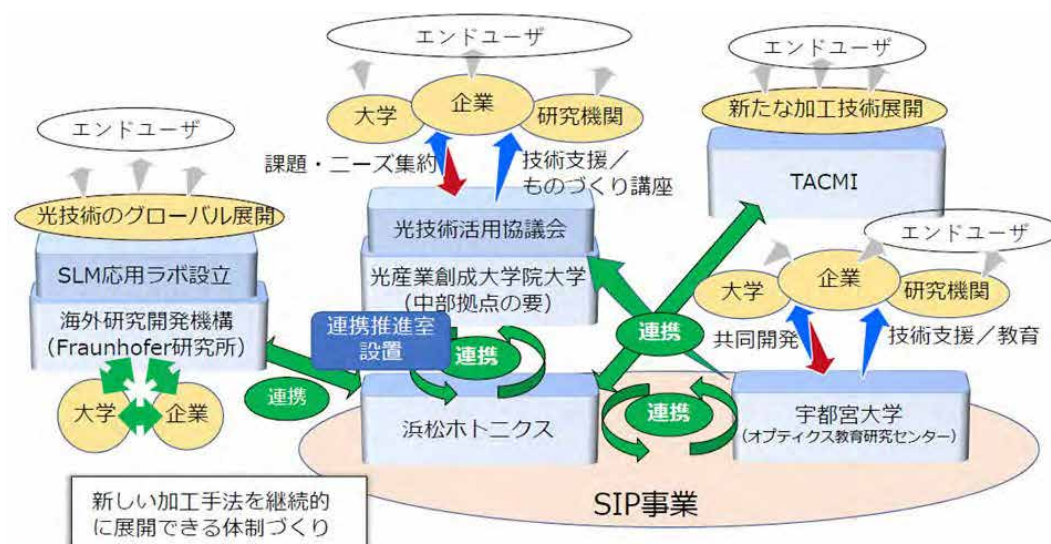


図 2-2-8. 浜松・宇都宮拠点の社会実装に向けた体制整備状況

【社会実装と認められる成果】

- ・工程表にも記載されているように、2020 年度に SIP 光・量子で開発した高耐光性 SLM を製品化した。（2021 年度製品登録）
- ・国内半導体メーカーとの POC（図 2-2-9）では、製造現場における課題として挙げられた加工時のデバイスへの損傷について取り組み、加工レーザービームの最適化（形状、強度）により、顧客要望値を満たす結果を得たほか、スループット向上要求についても対応可能な目途が立った。

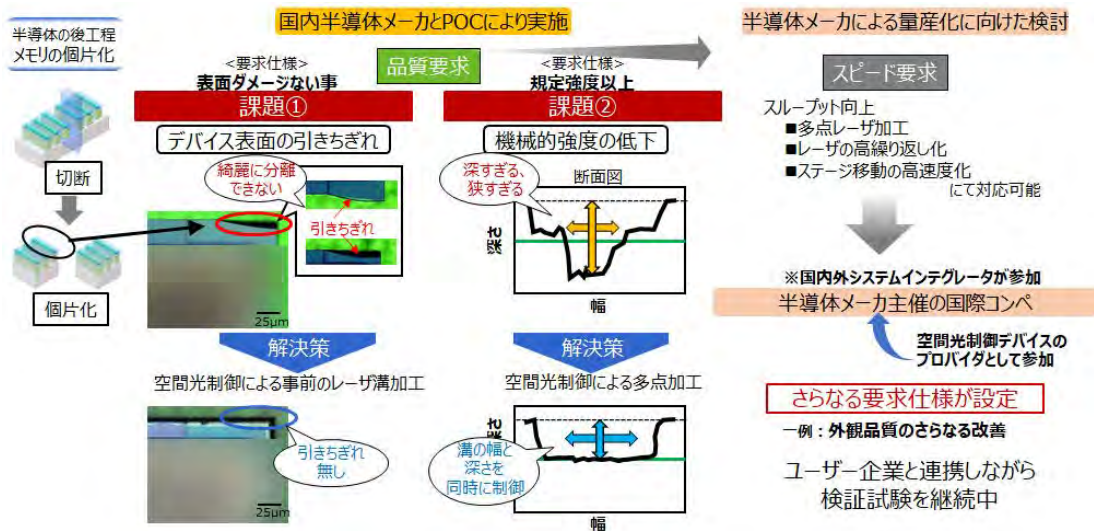


図 2-2-9. 国内半導体メーカーとの POC

- ・ 課題内連携で東京大学の MDG に SLM とデジタルフィードバック光学系を搭載すべく、システムインテグレータを活用し、レーザー加工エンジンを搭載したモジュールの外注製作に成功した (図 2-2-10)。

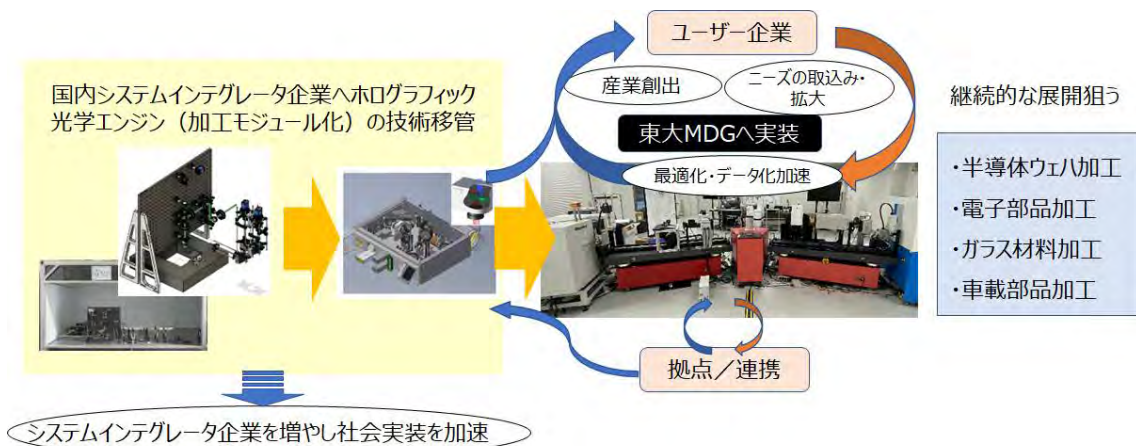


図 2-2-10. デジタルツイン実現に向けて東京大学 MDG へのレーザー加工エンジンの実装

- ・ ドイツ FhG が多点加工などのマルチタスク加工で高い実用可能性ありと評価したことで、SLM 応用ラボを現地に構築した。FhG のもつネットワークやユーザー連携の関係を活かし、広く海外での社会実装を進める。
- ・ ドイツ FhG を含め、空間光制御デバイスを用いたレーザー加工技術の社会実装に向けた計画を図 2-2-11 に示す。

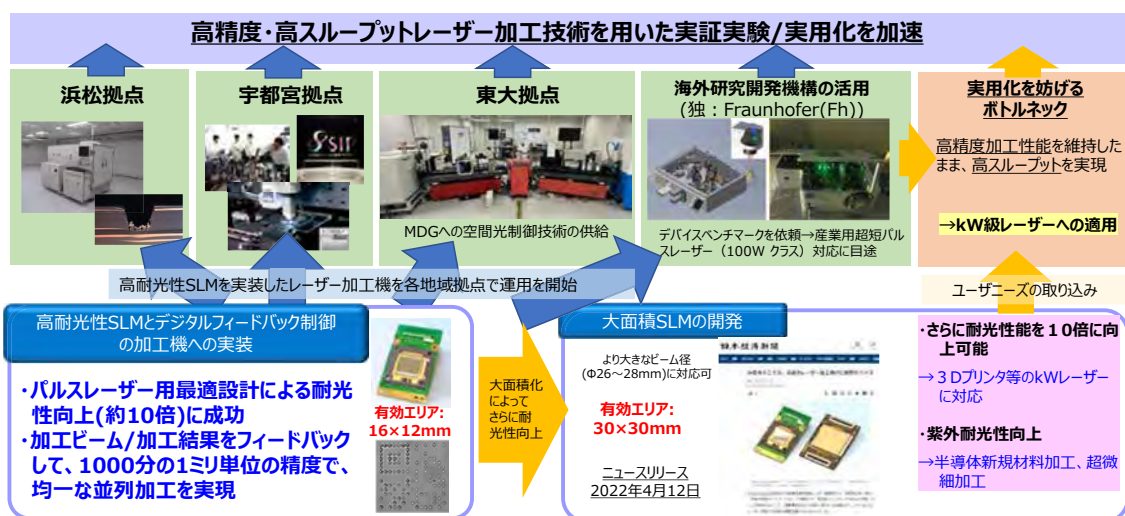


図 2-2-11. 浜松ホトニクス(株)の社会実装計画と進捗

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

2022年度は、「高出力レーザー位相変調器」(特願 2022-149927)の国内出願を行った他、「レーザー加工装置及びレーザー加工方法」(特願 2020-070001)及び「レーザー加工装置及びレーザー加工方法」(特願 2020-070002)を優先権主張とする2件の外国出願を行った。これらはSLMを利用した三次元レーザー加工法に関する特許で競争力強化の上で重要な特許である。また、2020.10.23に出願した特許「レーザー装置」が登録となった。空間光変調器SLMについては数多くの特許を持ち合わせており、SLM、レーザー加工法のいずれにおいても知的財産はしっかり取得しており、今後のSLMを搭載したCPS型レーザー加工技術の社会実装にしっかりと対応している。

⑥ 成果の対外的発信

耐光性を向上させるために開発した世界最大級の大面積SLMの開発に成功したことを2022.4.12にプレスリリースを行った。このSLMは2021年度に開発し上市した高耐光性SLM技術をベースに、実効的な有効面積を約1桁広げたもので、さらに約1桁の耐光性の向上を図ったものである。この大面積SLMは高出力CWレーザーに対応できることから金属3Dプリンタの高精度加工分野への適用が期待される。また、Nature Focal Point(2022.8.11号)でSLMを用いたレーザー加工技術の紹介を行った。また、FhG ILT研究所から、超短パルスレーザー光による先端特殊レーザー加工向けのアプリケーションラボ(SLM応用ラボ)を浜松ホトニクス(株)とともに開設したことに対しnews releaseを行った(2022.9.5)。このSLM応用ラボを通じ、欧州、特にドイツにおいてFhGの幅広いネットワークを活かし社会実装先の探索に利用する。この他、hamahot(浜松ホトニクス(株)技術紹介誌)(2022.8)、日経クロステック(2022.10.7)、Laser Focus World Japan(2022.11)、オプトロニクス(2022.12.9、WEBセミナー)の各誌を通じての積極的な情報発信を行うとともに、SLMワークショップ

(2022.12)を開催し、レーザー加工へのSLMの応用を紹介した。

高耐光性 SLM (有効エリア 16×12mm) や大面積 SLM (有効エリア 30×30mm) に関して、レーザー加工機メーカーからデモ機の貸し出し要望や価格問合せなど社会実装に直結する問い合わせがあり、また既存の SLM 顧客からの問い合わせもあり、社会実装に向けた活動が加速・拡大している。

FhG ILT 研究所とのアプリケーションラボ開設 (図 2-2-12) に関しては、LinkedIn や科学系のマスコミなどで紹介され、またモビリティ関連のメーカーから問い合わせが来ており、海外での反響も確認することが出来、社会実装に期待が持てる。

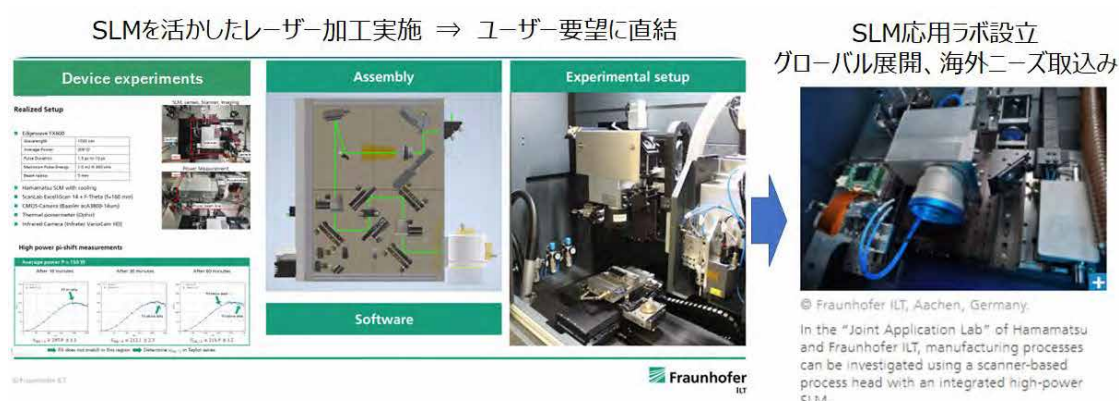


図 2-2-12. FhG ILT 研究所とのアプリケーションラボ (SLM 応用ラボ) 開設

⑦ 国際的な取組・情報発信

FhG による調査報告書 (ホワイトペーパー) を 2021.7 に受領した。ホワイトペーパーに記載されている SLM の高耐光性の良い評価結果を、情報発信・宣伝に活用している。また、FhG ILT 研究所から、超短パルスレーザー光による先端特殊レーザー加工向けのアプリケーションラボ (SLM 応用ラボ) を浜松ホトニクス(株)とともに開設したことに対し news release を行った (2022.9.5)。この SLM 応用ラボを通じ、欧州、特にドイツにおいて FhG の幅広いネットワークを活かし社会実装先の探索に利用する。

浜松および宇都宮に開設したレーザー加工プラットフォームの拠点運営、エコシステムの効率的な構築について、オランダの TNO にコンサルティングを依頼した。エコシステムについての調査報告を基に、TNO から欧州企業との技術交流の提案があった。欧州を中心に SLM を用いたレーザー加工機器の普及を目指し、ユーザー目線の技術紹介資料作成のサポートを受けるとともに、展示会等を活用して欧州企業との技術交流を実施した。

(c) フォトニック結晶レーザーに係る研究開発

研究責任者：野田 進（京都大学大学院工学研究科 教授）

参画機関：京都大学、三菱電気株式会社、ローム株式会社

協力機関：北陽電機株式会社、株式会社ブルックマンテクノロジー、フラウンホーファー研究機構 IMS 研究所等

1) 研究内容

研究開発の全体像：

半導体レーザーは、小型・安価・低消費電力・高制御性という優れた特徴を有するものの、輝度において、他の大型レーザーの十分の一程度以下（ $\sim 100\text{MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）に留まっており、スマート製造を支える半導体レーザー（LD）単体での小型・高効率加工の実現や、スマートモビリティを支えるセンシング技術の発展、健康社会を支える医療、生命科学への応用を困難としてきた。この限界を打破するためには、大面積でのコヒーレント動作が不可欠であり、この実現が期待される唯一の半導体レーザーが「フォトニック結晶レーザー（PCSEL）」である。このレーザーは、我が国発の半導体レーザーであり、2018.3 に世界で初めて、上記の輝度の壁、 $100\text{MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を 3 倍も上回る $300\text{MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を達成し、直接レーザー加工やセンシングへの応用に必要な輝度である $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ がターゲットに入ってきている段階にある。

本研究開発では、この進展著しいフォトニック結晶レーザー技術を発展させ、一層の高輝度化（＝高ビーム品質・高出力化）を図っていく。具体的には、将来のスマート加工への応用を見据え、輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を CW（＝連続）状態で実現可能なデバイス基盤技術の確立を目指していく。また、その開発過程において得られる光源技術は、センシングを始め、医療や生命科学などの様々な分野へと応用展開可能と考えられる。直近の出口として、ここでは、輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 動作をナノ秒パルス状態で実現し、Society 5.0 の実現に重要なスマートモビリティを支えるセンシング光源の実現を目標とする。さらに、電子的ビーム走査機能の付加や機械学習との融合など、フォトニック結晶レーザーそのもののスマート化の実現を、より将来の技術の目標として推進していく。

具体的な実施計画（内容）：

フォトニック結晶レーザーの高輝度化を図り、直近の様々な出口の 1 つとして、Society 5.0 を支えるスマートモビリティへの応用が可能なセンシング光源のための高輝度（ $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）・ナノ秒パルス光源の開発を実施する。併せて、将来的なスマート加工（レーザー加工）への展開を可能とする要素技術開発として、高輝度（ $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）・CW 動作のためのデバイス基盤技術開発と、その合波技術の開発を実施する。さらに、フォトニック結晶レーザーのスマート化（電子的ビーム走査やビームパターンの最適化）も行い、我が国の独創レーザーのさらなる高度化の基礎を築いていく。



図 2-3-1. 研究開発の概要と実施体制

より具体的な研究開発の内容(概要)と実施体制を、図 2-3-1 に示す。研究開発においては、

- (A) フォトニック結晶レーザーの高輝度化 (CW およびパルス動作型の高輝度フォトニック結晶レーザー光源の開発) として、
- A1 : 高輝度化に向けたデバイス基盤技術の構築
- ① 大面積で高出力かつ高ビーム品質動作を可能とするフォトニック結晶構造 (=2 重格子構造) の深化・最適化
 - ② 安定した高ビーム品質動作のための電流注入分布制御
 - ③ 高効率動作のための上方への光取り出し効率の向上および不要な吸収損失の抑制
- A2 : 将来的なスマート加工 (レーザー加工) への展開に向けた、実装・放熱・合波技術の確立、大面積ワンチップ高出力デバイス技術等の要素技術の構築
- A3 : LiDAR 等のセンシングシステム応用に向けた、ナノ秒動作技術の確立等の要素技術の開発を行い、それによる高輝度フォトニック結晶レーザー光源の実現、さらに、(直近の出口の1つとして) LiDAR 等のセンシング光源の実現を目指す。
- (B) フォトニック結晶レーザーのスマート化に関しては、
- B1 : 2次元全面に渡る電子的ビーム走査に向けた、望む方向へのビーム出射を可能とする

フォトリック結晶デバイスの構造設計・作製法の構築、および2次元マトリクス駆動技術の開発

B2：機械学習（AI）によるビーム形状のオンデマンドな制御に向けた、面内電流注入分布を制御可能なデバイス技術の構築、機械学習による電流分布とビーム形状の相関などの学習の検討、および機械学習や高度な数値解析技術をもとにした、フォトリック結晶レーザー製造のCPS化の検討等の技術開発を行い、フォトリック結晶レーザーのスマート化を図っていく。

研究開発の実施体制としては、京都大学（代表研究開発機関）が全体の取りまとめを行うとともに、高輝度フォトリック結晶レーザーの設計・試作・評価とそのスマート化研究を行い、三菱電機株（共同研究開発機関(1)）が高輝度フォトリック結晶レーザー技術開発（特にCW動作デバイス）およびその合波技術開発を、ローム株（共同研究開発機関(2)）が高輝度フォトリック結晶レーザー技術開発（特にパルス動作デバイス）および短パルス駆動技術開発を、それぞれ中心となって行う。また、京都大学に、参画機関が集結した、フォトリック結晶レーザーを広く社会実装していくための拠点を形成する。

社会実装（計画）：

本研究開発により、直近の出口の1つとして、高輝度ナノ秒パルス光源（フォトリック結晶レーザー）が実現されるために、高指向性かつ高い安定性をもつセンシングシステムに向けた社会実装が期待される。これにより、先行品が抱える課題（サイズ、コスト、信頼性）が根本的に克服されるものと期待される。また、フォトリック結晶レーザーの高輝度CW動作のためのデバイス基盤技術が確立されるため、終了後数年以内に、高効率・高スループット対応が可能な、コンパクトで安価な加工システムとしての社会実装、さらには将来のオンデマンドなスマート加工への展開が期待される。さらに、フォトリック結晶レーザーのスマート化により電子的走査技術の付加や、機械学習との融合、フォトリック結晶レーザー製造のCPS化を推進することで、将来にわたって持続可能な市場優位性を確保することが可能になる。

以上で述べたフォトリック結晶レーザーその“モノ”に関する社会実装においては、SIP推進中に、拠点から各種のユーザー企業・機関へとMTAに基づくデバイスの提供を行い、様々なフィードバックを得ていく。SIP終了後には、参画企業であるローム株、三菱電機株、さらには他の技術移転先企業から、フォトリック結晶レーザーを社会実装していくことを目指す。

上記に加え、研究開発を通じて生み出されるデータ・ノウハウ・インテリジェンス、所謂、“コト”をも社会実装のターゲットとする。“コト”の社会実装に関しては、SIP推進中に、フォトリック結晶レーザー製造のCPS化（デジタルツインの形成）を通じて製造に不可欠なデータ・ノウハウ・インテリジェンスを蓄積する。SIP終了後には、蓄積した高付加価値の“コト”を製造企業へと提供し、大規模な共同研究へと展開していくことを目指す。

以上のような社会実装活動のために、京都大学に拠点、すなわち、多くのユーザー企業・製造企業との連携を推進する核を形成する。そのための窓口体制や、試作・評価・デバイス提供体制の強化を図っていくほか、拠点から、社会実装を戦略的に拡大していくための議論も並行して進める。さらに、社会実装の加速度的波及の先行検証のために、フォトニック結晶レーザーを活用することを希望するユーザー企業（LiDAR システムやビーム走査システム等の開発企業・機関）をパートナーとして、開発の成果をその先のユーザーへと展開していく活動をも推進し、PCSEL の有用性をより広め、その優位性を明快にしていく取り組みを行う。また、このような拠点を通じて広く事業化していく時に障害とならないように、知財権のオープン化等の戦略をも検討する。

2) 技術的目標（計画）

事業終了時点アウトプット目標（2022 年度の目標）

(A) フォトニック結晶レーザーの高輝度化

- フォトニック結晶レーザーの高輝度ナノ秒パルス動作（ $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）を達成し、ビーム整形光学系不要、かつ高い SN 比、高い環境変化耐性を有するフォトニック結晶レーザーを実現（TRL7）。
- フォトニック結晶レーザーの高輝度 CW 動作（ $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）のための基盤技術およびその合波技術に目途をつける（TRL5）。また、大面積ワンチップ高出力デバイスの有効性を明らかにする。

(B) フォトニック結晶レーザーのスマート化

- フォトニック結晶レーザーのスマート化（電子的ビーム走査や機械学習との融合）により、電子的制御による狙った方向へのビーム出射、及び機械学習によるビーム形状制御の開発完了（TRL4）。

以下に 5 年間の工程表を示す。

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化	
③フォトニック結晶レーザー(PCSEL)に係る研究開発	(1) CWおよびパルス動作型の高輝度フォトニック結晶レーザー光源の開発	<ul style="list-style-type: none"> ●高輝度化のための2重格子点フォトニック結晶構造の深化 ●電流注入分布制御のための電極構造の第一設計 ●スロープ効率向上のためのDBRや高電圧取抑構造の探索 	<ul style="list-style-type: none"> ●2重格子点構造の設計 ●電流注入分布制御構造の設計 ●DBR構造等の設計・作製法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ●2重格子点構造最適化、電流分布制御、上方取り出し最適化、高電圧取抑構造の探索等の確立、放射効率:$<0.2^\circ$、スロープ効率0.8~1W/A等を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ●放射効率向上と異軸し、安定したCW動作可能なフォトニック結晶レーザーを用いた合波システムの構築 	<ul style="list-style-type: none"> ●高輝度(1GW $\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) CW動作やその合波に回送をつける ●大面積ワンチップ高出力デバイスの有効性を明らかにする 	<ul style="list-style-type: none"> ●高輝度PCSELの設計技術、デバイス作製技術、各種評価技術及びデバイスの制御技術等の民間企業への技術移転および、そのための拠点整備 ●センサや加工機等のシステムそのものを開発している各種の企業への提供および、そのための拠点整備 	<ul style="list-style-type: none"> ●加工システム用CWフォトニック結晶レーザー (2025~) ●センシング用ナノ秒パルスフォトニック結晶レーザー (2023~)
	(2) フォトニック結晶レーザーのスマート化	<ul style="list-style-type: none"> ●ビーム走査のためのフォトニック結晶構造の設計・試作 ●電流注入制御法の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ●設計したフォトニック結晶構造の作製法の確立 ●設計した電流注入法の試作と機械学習の検討開始 	<ul style="list-style-type: none"> ●様々な方向へのビーム射出技術の確立、ユーザー企業との連携による新たなLiDARコンセプトの有効性検証 ●機械学習等の高度技術の確立(電流注入とビーム形状の相関関係の学習) 	<ul style="list-style-type: none"> ●ユーザー企業と連携したLiDARシステムの構築・実証、PCSEL技術の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ●高輝度(1GW $\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) ビーム品質(M²)=2、出力10W超) ナノ秒パルス動作を達成し、高いSN比、高い環境変化耐性を有するフォトニック結晶レーザーを実現 		
	民間からの出資(人材、物資、資金等) (10%程度)	(30%程度)	(55%程度)	(60%程度)	(64%程度)			

3) 課題目標の達成度(成果)

① 国際競争力

フォトニック結晶レーザーは、我が国発の独創技術である。これまでに、従来の半導体レーザーの10倍以上の高輝度($>1.5\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)動作を、世界に先駆けて実現・実証しており、現時点において既に、極めて高い優位性があり、他の追従を許さない状況である。さらに、電子的ビーム走査技術の付加やその発展によるワンチップでの多点ビーム等のストラクチャード・ライトの生成、機械学習(AI)との融合によるビーム制御など、フォトニック結晶レーザーのスマート化にも成功しており、既存の光源・システムに対して極めて高い優位性を有しており、将来にわたって高い国際競争力・市場優位性が持続されるものと期待される。以下に、フォトニック結晶レーザーに関して、直近の出口としてのLiDAR 応用光源、将来の加工応用光源、およびビーム走査技術(スマート化)の3つの視点からグローバルベンチマークを実施した結果の概要を示す。

- 直近の出口としてのLiDAR 応用光源に関して、SIP 終了時点のレーダーチャートを、図2-3-2に示す。本SIPの高輝度フォトニック結晶レーザー(パルス動作型)の輝度は、 $1.5\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 以上に達し、既存のLiDAR 応用光源の10倍以上の輝度が得られている。本高輝度レーザーの具体的な特性として、素子単体で $\sim 0.1^\circ$ という極めて狭い拡がり角を実現出来ており、他機関のファブリ・ペロー型半導体レーザー(FP-LD)の拡がり角($\sim 10^\circ \times 20^\circ$ 程度以上)と比べて、圧倒的な優位性がある。スロープ効率、発振スペクトル幅、発振波長や出力の温度依存性も優れており、トップの性能を有していると言える。さらに、ユーザー企業からのフィードバックに基づき、量子計算に基づく設計をも踏まえて、より一層のデバイスの深化(偏光比の向上や、サイドローブの低減等)にも成功しており、総合的に極めて高い優位性を有していると言える。また、高輝度性により、レ

ンズフリー、アライメントフリーで、高分解能かつ小型・低コストな LiDAR の実現が可能となることから、高い市場性が期待出来るとともに、量産対応可能なナノインプリント法によるデバイス作製にも成功しており、コストの観点からも優位性がある。

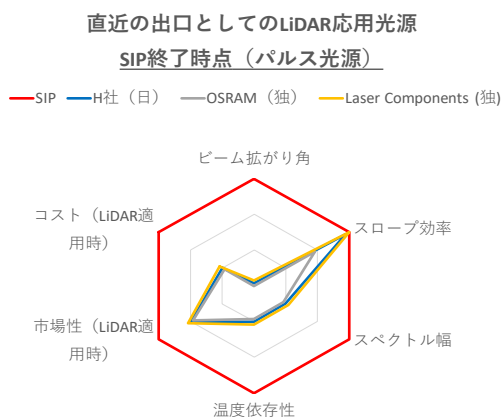


図 2-3-2. 直近の出口としての LiDAR 応用光源における他機関との比較

- 加工応用に向けた光源に関して、SIP 終了時点のレーダーチャートを、図 2-3-3 に示す。フォトリソ結晶レーザー（CW 動作型）は、 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ という極めて高い輝度を実現可能であり、ビーム形状も円形で扱いやすいという特長を有しており、10W 級および 100W 級の出力において、他機関のファブリ・ペロー型半導体レーザー（FP-LD）や垂直共振器面発光レーザー（VCSEL）と比べて、圧倒的な優位性がある。また、良好な効率であり、サイズも小型である。FP-LD および VCSEL アレイ等の既存の半導体レーザーでは実現不可能な、非常に高い輝度が得られることから、比較対象の FP-LD や VCSEL アレイの用途である樹脂溶着やファイバーレーザー励起等への適用はもちろんのこと、3D プリンタへ

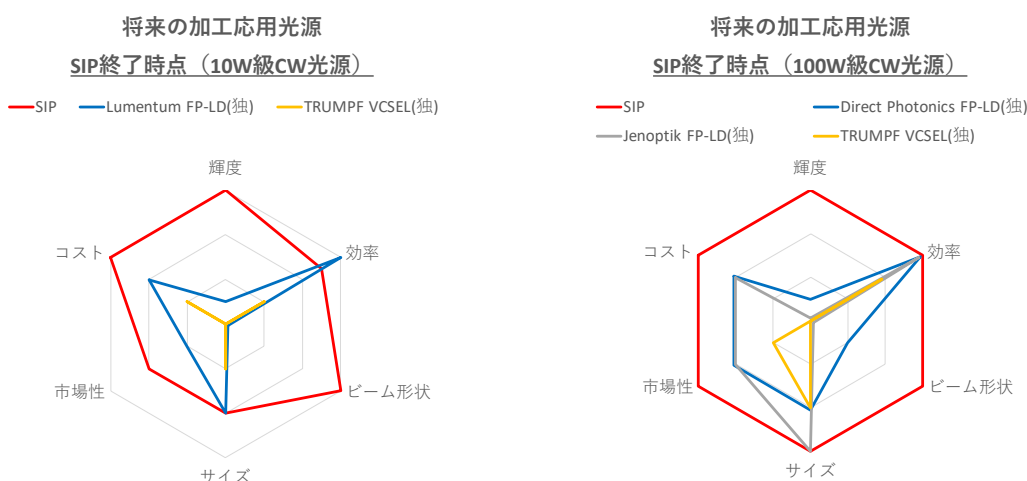


図 2-3-3. 将来の加工応用光源における他機関との比較

の展開、精密半田付けや金属表面加工、さらには板金加工も可能と期待出来る。面垂直出射型であることから、端面出射型のFP-LDと比べて、レーザーチップの製造工程・検査工程の簡略化が可能であり、コストの観点でも優れている。(さらに、高ビーム品質・高出力のフォトリソ結晶レーザーの合波技術をも構築しており、kW級以上の高出力レーザーモジュールにおいても、極めて高い優位性を有すると期待出来る。)

- ・ ビーム走査技術(スマート化)に関して、SIP終了時点のレーダーチャートを、図2-3-4に示す。他の方式と比較して、出力可能なレーザーパワーが圧倒的に高く、ToF方式のLiDAR等の様々な応用が可能であるという特長を有している。さらに、偏向範囲として既に±60°以上を実現するとともに、本技術を発展させることで、レンズや回折光学素子等の光学部品を用いることなく、広範囲の均一照明や、文字やロゴマーク・絵画などの複雑な図形、多点ビームなどの、ストラクチャード・ライトと呼ばれるパターンビームの照射や、その出力増大をも実現しており、フレキシブルなビーム制御に成功している。加えて、スキャン速度についてもMHz以上の高速動作が可能であり、他の方式を凌駕している。また、光源を集積したワンチップのみの簡単な構成である点も、他の方式に対して高い優位性があり、ビーム走査技術としてトップの性能である。

(以上に加えて、スマート化の研究開発において、機械学習(AI)との融合によりビーム形状制御(補正)可能な光源を開発し、作製工程で生じ得る揺らぎや、CW/QCW動作時における発熱による温度分布の影響の補正等、様々な環境で狙ったビーム形状が得られるリアルタイム制御を実現している。また、フォトリソ結晶レーザー製造のCPS化を通じて、サイバー空間での課題解決を行い、フィジカル空間へとフィードバックすることも可能としており、本CPS技術と量子計算の技術を融合することで、より高度かつ高速なフォトリソ結晶レーザーの設計に資することが出来ると期待される。これらのスマート化技術は、世界的にも他に類を見ない技術であり、フォトリソ結晶レーザーの国際的優位性をより一層高めるものである。)

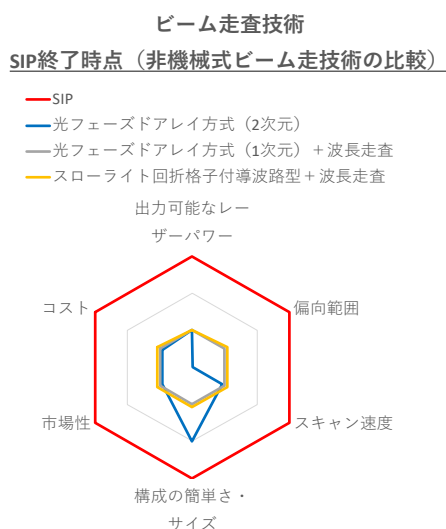


図2-3-4. ビーム走査技術(スマート化)における他機関との比較

② 研究成果で期待される波及効果

フォトリソグラフィ結晶レーザーは、前項①でも述べたように、既存の半導体レーザーとは一線を画すレーザーである。そのため、本研究開発は、科学技術・新技術の大きな進展に寄与するものであることはもちろんとして、その成果は、これまでにない高い機能性を備えた新製品へと展開されていくことが期待される。具体的には、Society 5.0を支える、スマートモビリティやスマート加工等を可能とするキーデバイスとして期待されるとともに、高度な機能・性能により、モバイル、光通信、照明等、幅広い分野へと波及することが期待される。このようなフォトリソグラフィ結晶レーザーによる、市場の拡大、新たな市場の創出、生産性向上、海外展開、社会貢献等の例を、以下に示す。

- ・ 直近の出口としてのLiDAR 応用においては、高輝度フォトリソグラフィ結晶レーザーの特長である狭い拡がり角により、測距システムにおける投光系レンズの省略やそれに伴う複雑な調整の排除が可能となる。これにより、システムの小型化・簡素化が可能となり、無人搬送ロボットや、農機・建機、自動車等の自動走行・運転への応用等への大きな貢献が期待出来、市場拡大や安心安全な社会への寄与が大きいと考えられる。また、レンズフリーであるため、部品点数が削減出来ることに加え、温度変化に対する高い波長安定性により、ノイズレベルの低減も可能となるため、省資源化や低消費電力化等の観点においても、貢献は大きい。さらに、レンズフリーという特長により、レンズのアライメント調整そのものが必要なくなり、生産性の向上にも貢献する。また、LiDAR を用いた自動化により、将来の労働力不足に対しても大きく貢献出来ると言える。LiDAR に代表される測距システムは世界中で活発に開発が進んでおり、海外の企業や研究機関からの引き合いが多くあるなど、海外展開も大きく進展している（海外への展開の例については、④「達成度(2)」および⑦「国際的な取り組み・情報発信」も参照）。具体的な海外機関との連携として、すでに、ドイツのフラウンホーファー研究機構との本格的な共同研究（Next Level Photonics プロジェクト）を推進し、IMS 研究所に加えて ISIT 研究所も加わるなど、開発体制が拡充・強化されている。また、半導体レーザーに関わる有力な研究機関への MTA 提供を通じた、新たな連携も開始している。さらに、オランダとの連携として、オランダ大使館を介した複数のオンライン会議や、オランダの High Tech Campus での展示（7/1～）を契機として、PhotonDelta との連携に向けた MOU 締結、オランダ代表団の京都大学拠点への受け入れと日独蘭交流、オランダ主催の Smart, Green And Healthy Life Innovation Summit での講演や議論等をも行っており、加速的に、世界中へと広まっていくことが期待される。
- ・ 将来の加工応用に向けては、フォトリソグラフィ結晶レーザーの高輝度性により、様々な応用範囲の拡大が期待出来る。すでに、10W 級 CW フォトリソグラフィ結晶レーザーでの金属表面加工や薄膜切断を実現しており、ごく最近では、ワンチップ半導体レーザーとして世界最大の 50W を超える高輝度 CW 出力を実現することにも成功しており、マーキング、半田付けのみならず、金属加工など様々な応用における、システムの簡略化が期待出来る。今

後も、さらなる面積拡大による出力増大を図り、コンパクトかつ高効率の光源として発展させていくことで、従来の大型レーザーに変わるスマート加工光源としての発展が期待出来、大きなイノベーション創出が期待される。また、フォトニック結晶レーザーは従来の大型レーザーに対して電力効率が高く出来るため、脱炭素/カーボンニュートラルへの貢献も期待出来る。加えて、顕著な小型化・単純化が期待出来るため、製造、据付に関しても必要なエネルギーを削減可能であり、この点でも環境負荷低減へと貢献出来る。

- ・ さらに、電子的ビーム走査機能の付加や機械学習（AI）との融合によるスマート化は、さらなる市場拡大や社会貢献を可能とするものと期待出来る。電子的ビーム走査機能やストラクチャード・ライトの出射機能を付加することにより、機械駆動部（サイズ増大、コスト増大、信頼性低下の要因）を取り除くことが出来、大幅なシステム簡略化によるシステム小型化や高度化が可能であり、超小型の非機械式 LiDAR による、大きなインパクトが期待される。他方式にない特長（超小型、多方向同時ビーム出射機能等）により、日本発の LiDAR 方式の構築にも成功しており、今後も新たな機能性をもつシステムの構築への寄与も期待出来る。また、機械学習（AI）との融合によるビーム制御により、センシングや加工等の分野のシステムがより高度化されるため、生産性向上の観点からも、大きな波及効果が期待される。加えて、追加で進めているフォトニック結晶レーザー製造の CPS 化を通じて、製造企業へと“コト”の社会実装を加速度的に進めていくことで、国内のみならず海外への展開も加速し、スマートモビリティ、スマート加工分野のみならず、モバイル分野や通信、照明分野等、幅広い分野でのフォトニック結晶レーザーの市場展開へと繋がることが期待される。

③ 達成度（1）※5年間の設定目標に対する達成度

当初計画を上回るペースで研究開発を進展させ、フォトニック結晶レーザーの高輝度化およびスマート化に関わる全ての研究開発項目について、当初の 2022 年度終了時の目標（SIP 第 2 期 5 年間の設定目標）を前倒しで十分に達成するとともに、様々なインプットに基づくさらなる高度化等、当初の目標を大幅に上回る発展的な成果が得られた（TRL の観点から、当初の計画および最終的な成果について纏めた結果を、図 2-3-5 に示す）。

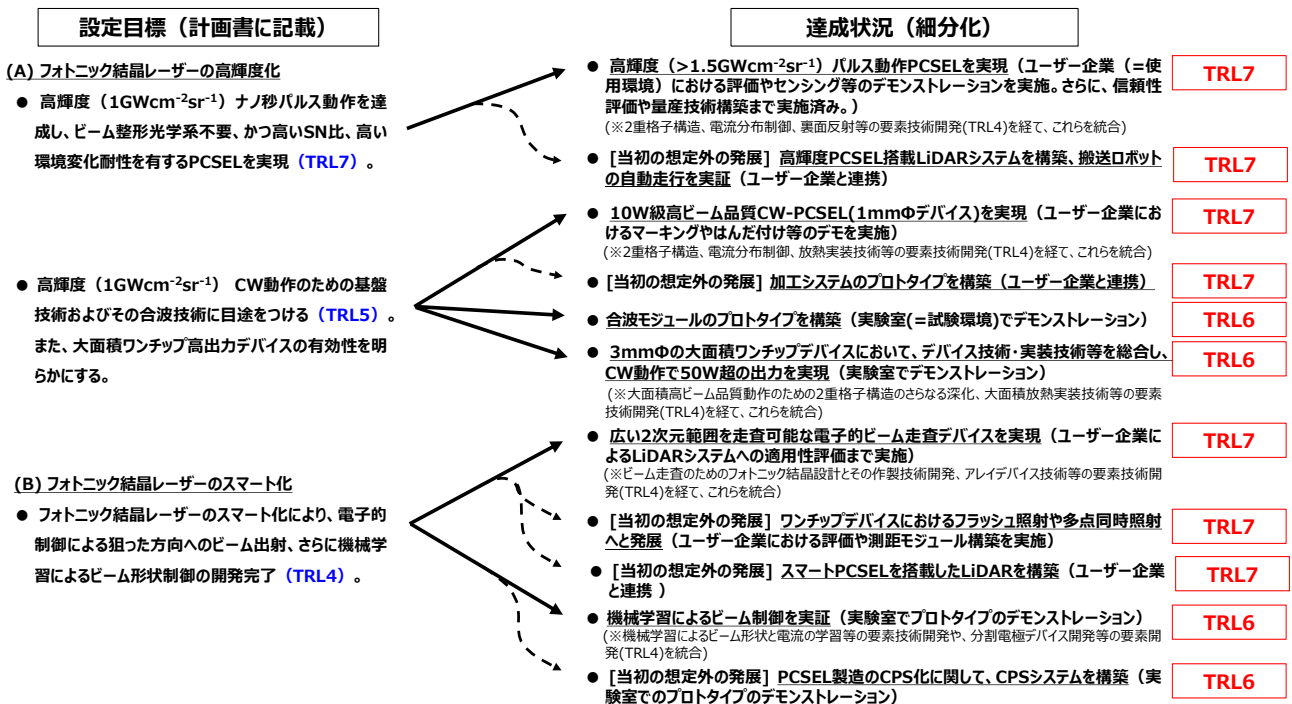


図 2-3-5. 目標の達成状況（TRL の観点）

本研究開発で得られた成果は、項目①でも述べたように、いずれも、他に類を見ないのであり、海外の研究機関等からも高く評価されており、国際的に極めて高い優位性がある。さらに、フォトニック結晶レーザーのスケラビリティや、自在なビームの制御などは、そのコンセプトも含めて、学術的にも極めて高い新規性を有しており、多くの企業が本技術に高い関心を有していることから、技術的にも高い価値があると言える。

以下に、SIP 第2期5年間を通じて得られた代表的な成果を示す。

(A) フォトニック結晶レーザーの高輝度化

- ・ パルス動作フォトニック結晶レーザーの高輝度化 ($>1.5\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) を実現（図 2-3-6）するとともに、高いビーム品質（狭い拡がり角）によりビーム整形光学系が不要、小さな発振波長の温度依存性により狭帯域フィルタが使用可能で高 SN 比が可能、さらに $-40^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ での安定した動作が可能であり高い環境変化耐性を有すること等を実証することに成功した（目標の TRL7 を達成）。さらに、名刺サイズのレンズフリー小型・高分解能 LiDAR（図 2-3-7）へと展開し、フォトニック結晶レーザーの有用性を明らかにするとともに、無人搬送ロボットへの適用によるスマートモビリティへの展開の実証（図 2-3-8）にも成功した（当初想定していなかった取り組みであるが、TRL7 へと発展）。

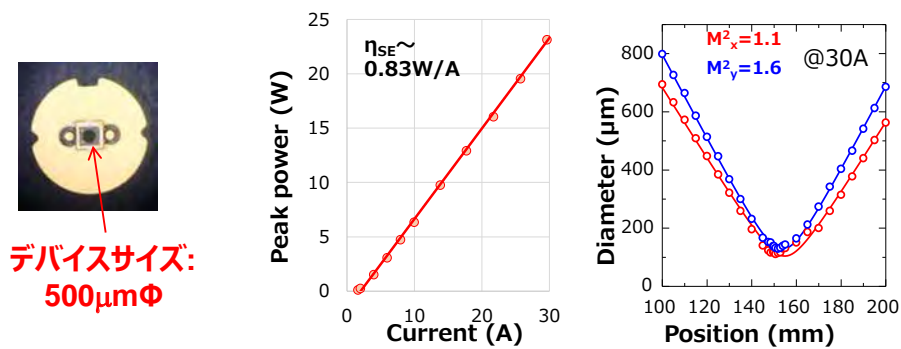


図 2-3-6. パルス動作における $1.5 \text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を超える輝度の実現（既存の半導体レーザーの 10 倍以上を達成）

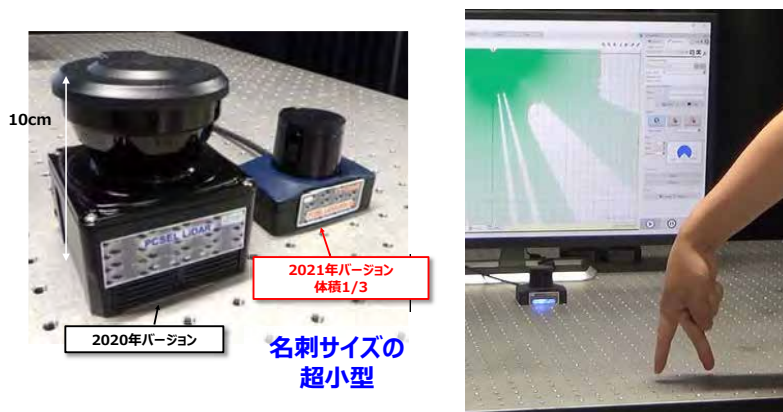


図 2-3-7. 高輝度フォトリック結晶レーザーを搭載したレンズフリー超小型 LiDAR（名刺サイズ）の構築と、高分解能測距のデモンストレーション

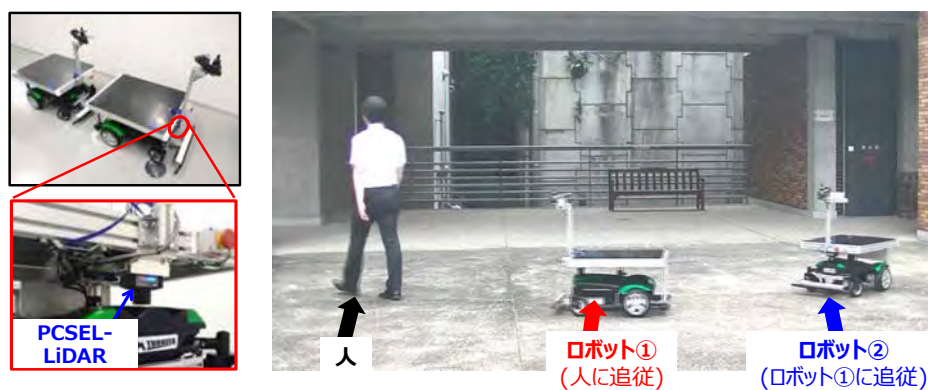


図 2-3-8. 小型 LiDAR のスマートモビリティへの展開

- ・ 上記に加えて、ユーザー企業からの要望に基づく、様々な発展的な取り組みをも行った。具体的には、パルス動作デバイスのさらなる深化（一例として、高出力・狭発散角・高偏光比の同時実現）に向けて、量子計算をも活用した設計の高度化（図 2-3-9）を図った。この成果に基づき、実験的なデバイス作製を行い、サイドローブの低減や偏光比の

向上を実証することにも成功した。また、信頼性評価を行い、フォトニック結晶レーザーが、高温動作や温度サイクルに対して高い信頼性があることを実証することにも成功した（図 2-3-10）。さらに、高速・簡便なナノインプリントリソグラフィ（Nano Imprint Lithography: NIL）法によりフォトニック結晶レーザーを開発し、電子ビーム（EB）露光によるデバイスに迫る性能を実証することにも成功（図 2-3-11）するなど、当初の計画を大幅に超える成果が得られた。

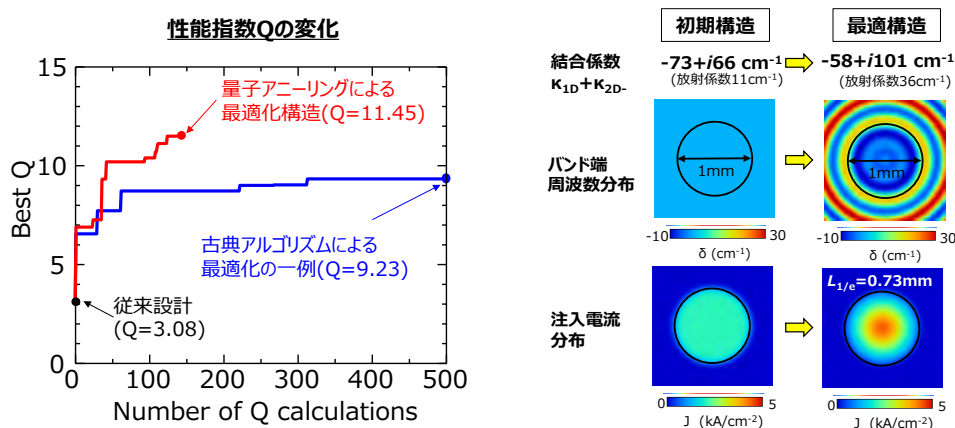


図 2-3-9. 量子計算を活用したフォトニック結晶レーザー設計のさらなる深化・高度化

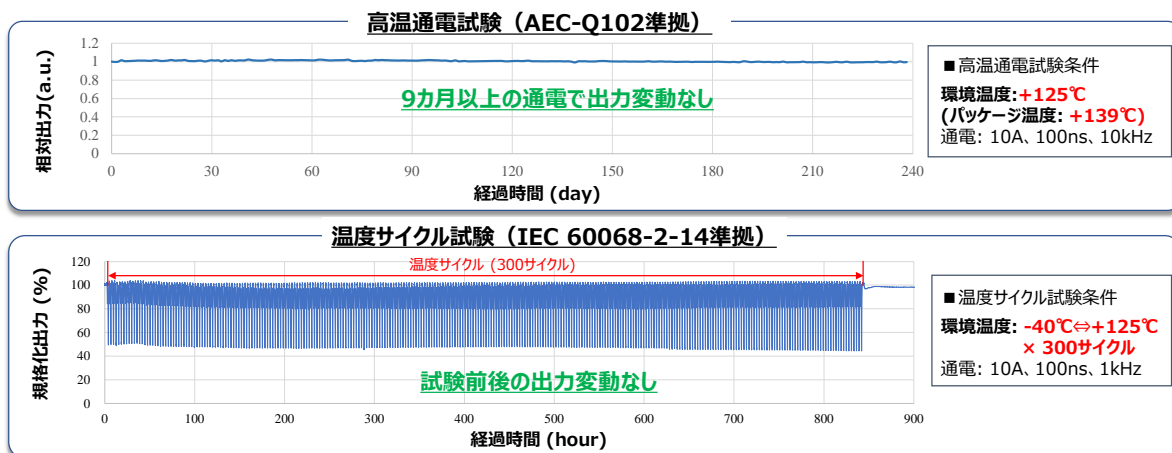


図 2-3-10. 高輝度パルス動作フォトニック結晶レーザーの信頼性評価（高温通電試験、温度サイクル試験）

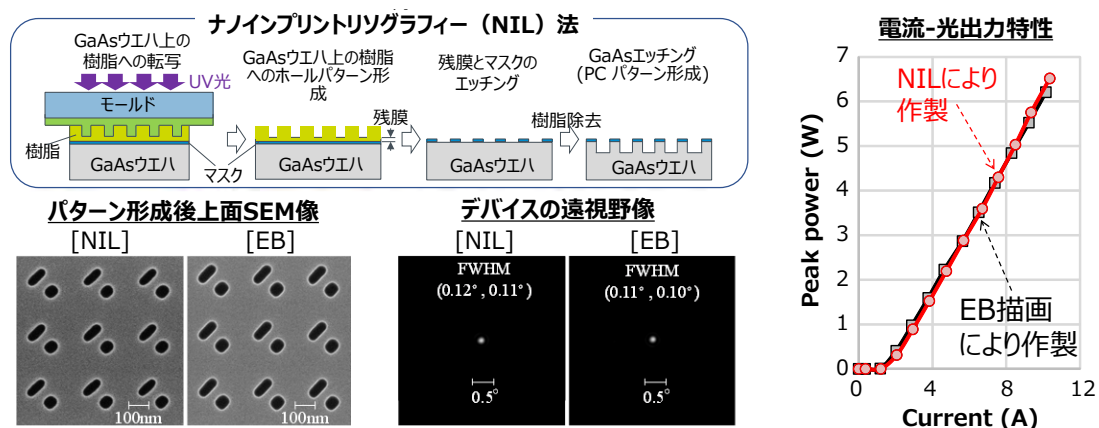


図 2-3-11. ナノインプリントを用いたフォトニック結晶レーザーの開発

- ・ CW 動作において、1mmΦデバイスで5~10W 級の高ビーム品質動作を実現(図 2-3-12 左)し、ユーザー企業への MTA 提供をも行い、CW 動作フォトニック結晶レーザーの加工分野(はんだ付けやマーキング等)への適用性の検証にも成功した(当初目標とした TRL5 を超えて、TRL7 を達成したと位置づけられる)。さらに、ユーザー企業と連携し、CW フォトニック結晶レーザーを用いた小型加工システムのプロトタイプをも構築し、様々なステンレス表面の加工デモに成功した(図 2-3-12 右)(TRL7)。

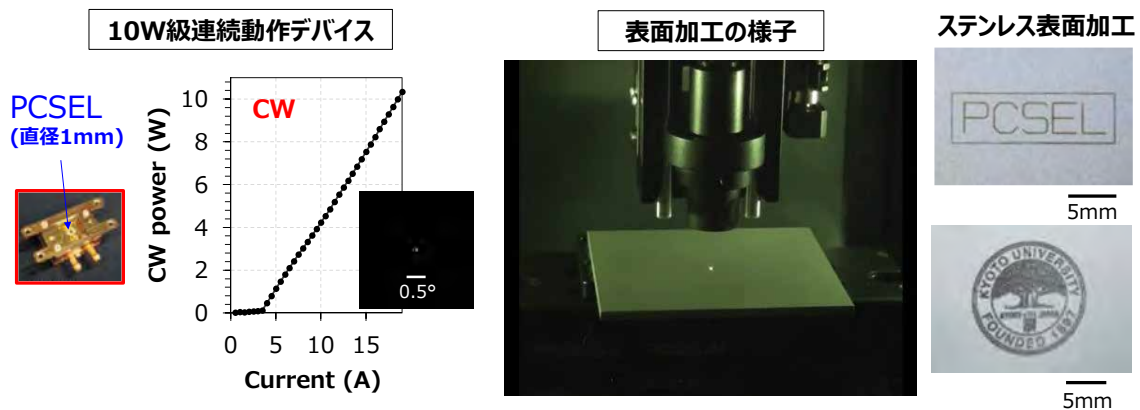


図 2-3-12. 1mmΦCW フォトニック結晶レーザーの高度化(左)と金属表面加工への展開(右)

- ・ さらなる大面積化(3mm~10mmΦ)のための基本方針を体系化し、CW 100W~1kW への設計指針を確立した(図 2-3-13)。さらに、設計に基づきエルミート・非エルミート結合を高度に制御したデバイスを作製し、3mmΦデバイスにおいて、パルス動作で、~0.045° という極めて狭い拡がり角を実現することに成功した。さらに、単一素子からの出力として世界最大となる 50W を超える高輝度 CW 動作にも成功(図 2-3-14)し、大面積デバイスの有効性を明らかにした(TRL6 へと発展)。

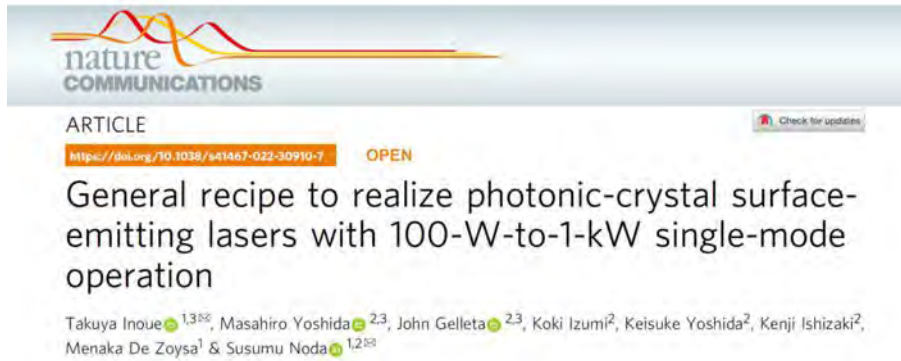


図 2-3-13. さらなる大面積化 (3mm~10mmΦ) のための指針の確立 (Nature Communications 誌に掲載)

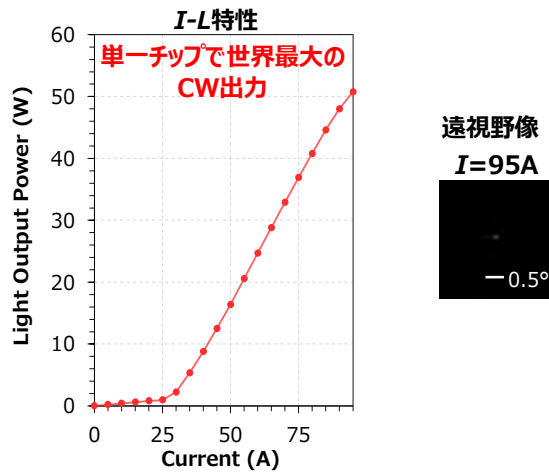


図 2-3-14. 3mmΦデバイスにおける、単一素子からの出力として世界最大となる 50W を超える高輝度 CW 動作の実現

- ・ 将来の kW~10kW 級モジュールの実現に向けて、合波、冷却、電源技術等の重要要素技術の開発を完了し、合波モジュールのプロトタイプを構築した (図 2-3-15) (目標を超える、TRL6 へと発展)。



図 2-3-15. 重要要素技術の開発と合波モジュールの構築

(B) フォトニック結晶レーザーのスマート化

- ・ 電子的ビーム走査光源を開発し、狙った方向へのビーム出射を実現するとともに、それを発展させたフラッシュ照射可能な光源等も含めて、スマート化フォトニック結晶レーザーを深化させた(当初目標としたTRL4を超えて、TRL7を達成したと位置づけられる)。これらを用いた非機械式の新型LiDAR(フラッシュ式とビーム走査式の利点を融合したLiDAR)の考案とその実現・小型化を行い、視野範囲(FOV)内の低反射率物体の自動検知による追尾・測距に成功(図2-3-16)するなど、当初の計画を大きく超える成果が得られた(当初想定していなかった取り組みであるが、TRL7へと発展)。



図 2-3-16. 電子的(非機械式)ビーム走査フォトニック結晶レーザーおよび光学系フリーフラッシュ照射フォトニック結晶レーザーの開発と、新たなLiDARの構築(左)。測距(黒い物体の追尾・検出)の様子(右)

- ・ 当初想定していなかった展開として、モバイル応用に向けた、多点同時出射デバイス等へと展開し、ユーザー企業と連携して多点同時出射アレイデバイスを用いた測距モジュールの構築に成功するとともに、広FOV(～100°)・W級動作に成功した(図2-3-17)(当初想定していなかった取り組みであるが、TRL7へと発展)。

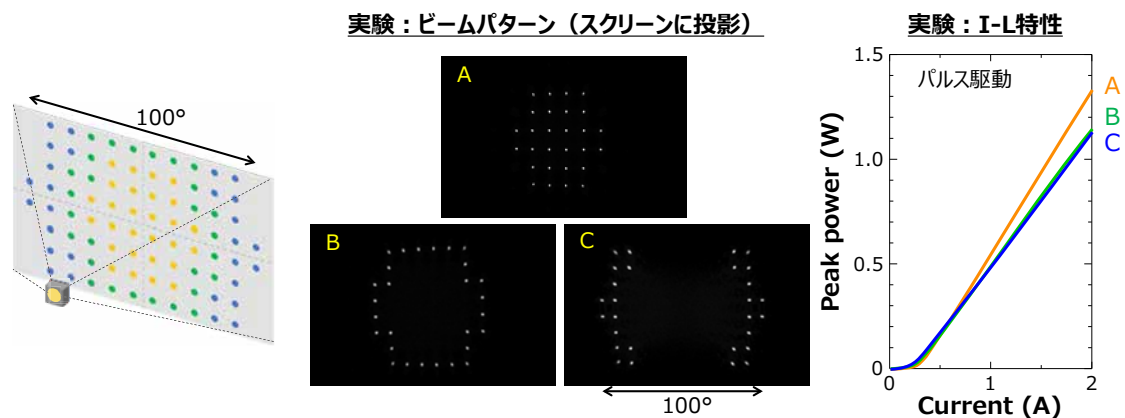


図 2-3-17. 外部光学系フリーのワンチップデバイスにおける、多点ビームの広FOV(～100°)・W級動作の実現

- ・ 機械学習（AI）との融合による、電流分布-ビームパターンの関係の学習とビーム制御の実現に成功するとともに、本技術を発展させ、CW/QCW 動作におけるビーム制御を実証することにも成功（図 2-3-18）した（目標とした TRL4 を十分に達成し、TRL6 へと発展）。また、フォトニック結晶レーザー製造の CPS 化（機械学習や 3 次元結合波理論等の高度解析法を用いた、フィジカル空間でのデバイス作製工程のデジタルツインの形成）において、高精度 RCWA 法等の解析法の導入や、構造抽出精度の向上のための新たなネットワークの導入等、システムの深化を図り、高度に面内や面垂直方向への結合状態を制御した 1mmφ以上のデバイスの特性まで解析可能な CPS の構築に成功した（当初想定していなかった取り組みであるが、TRL6 へと発展）。

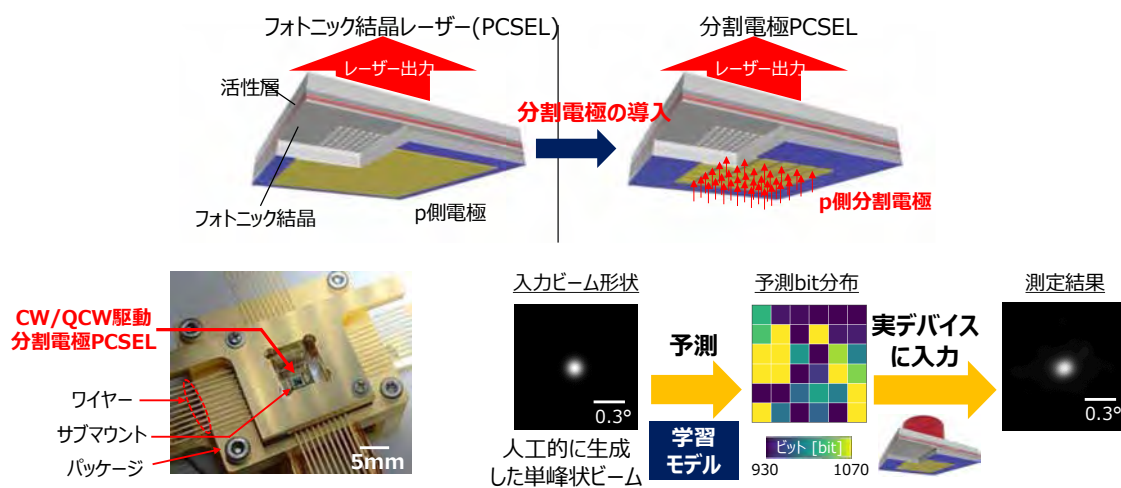


図 2-3-18. 電流分布-ビームパターンの関係の学習とビーム制御の実現（上）電流分布制御のための分割電極構造、（左下）開発したデバイス、（右下）CW/QCW 動作における、所望のビーム形状を実現する電流分布の予測とその実証。

④ 達成度（2）※社会実装の実現可能性

社会実装に向けた具体的な計画を設定し、計画に基づき体制整備を着実に進め、前項③でも述べたユーザー企業へのデバイス提供やユーザー企業と連携した LiDAR や加工機のプロトタイプ構築等の社会実装活動も推進するなど、目標を大きく上回る成果が得られた。以下に、計画および進捗状況、体制整備状況、社会実装成果、および SIP 終了後の事業の財源・人材確保の方法についての計画について示す。

【計画および進捗状況】

社会実装のターゲットとして、本 SIP における研究開発により実現されるフォトニック結晶レーザーその“モノ”および、フォトニック結晶レーザー製造の CPS 化により蓄積されるデータ、ノウハウ、インテリジェンス等の“コト”の両方を設定し、これらの社会実装

を推進するための核として、京都大学拠点の整備・強化を図った。

また、参画企業のローム(株)・三菱電機(株)においては、事業部や工場との連携体制を構築しながら、量産技術開発、信頼性試験、プロセスの社内への移管などを、計画に沿って着実に進展させた。

【体制整備状況】

京都大学拠点 (PCSEL COE) の整備・強化として、1,000m²以上の拠点スペース確保、フォトニック結晶レーザー試作ラインの整備、企業研究員等の集結スペースの整備 (数10人規模の研究員の受け入れ)、窓口機能の強化、マンパワーの増大、装置のメンテナンス・操作者の充実化、弁護士や技術移転機関 (TL0 京都) との連携、商社も活用したユーザー企業との議論や展示会への出展等を行った。

このようにして整備・強化した拠点において、各種アウトリーチ活動を積極的に行い、ユーザー企業・製造企業等との連携活動を拡大した。具体的には、毎週1-2件以上の企業・機関との打ち合わせを行い、拠点への引き合いが、海外を含めて、スマートモビリティ、スマート加工分野のみならず、モバイル分野や通信、照明分野等の83以上の企業・機関へと増加している (図2-3-19)。このような活動を通じて、前項③でも述べたように、ユーザー企業へのフォトニック結晶レーザーその“モノ”の提供を拡大させた。さらに、SIP終了後に想定していた億円レベルの大規模な共同研究が複数開始 (既存の共同研究についても、大型化) するなど、製造に関わるノウハウ・インテリジェンス等の“コト”の提供をも進展させた。(なお、これらの取り組みの具体的な例については、次ページ参照。)

さらに、PCSELの広範な社会実装に向けて、本拠点を核とした、ナノ構造形成、結晶成長、デバイス製造・応用、さらにはグローバル展開に関わる連携企業や機関からなるエコシステムの構築をも進めた。以上により、SIP終了後も自立的な運営が可能な拠点の構築が出来たと言える。

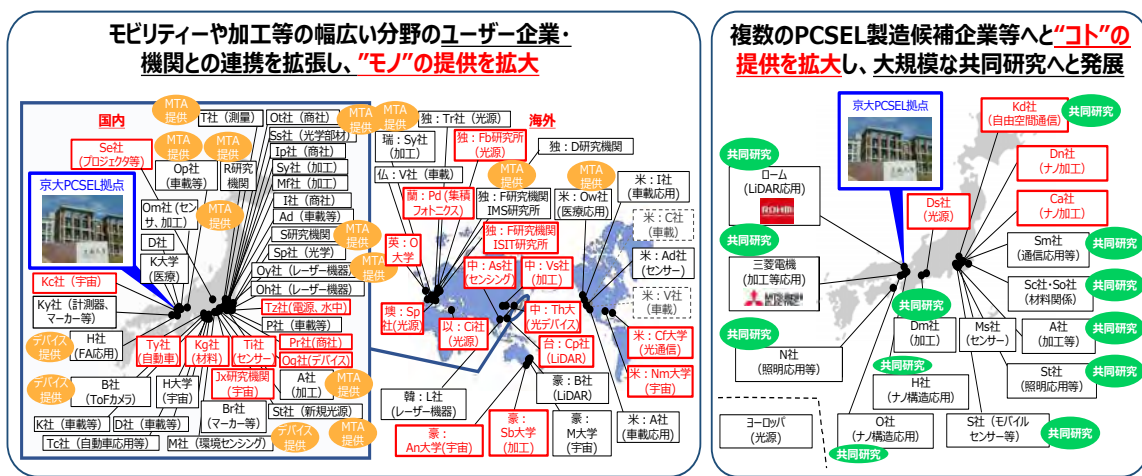


図 2-3-19. 京都大学拠点における社会実装活動の拡がり

ローム㈱においては、量産に向けて必須となる、ナノインプリント法等によるフォトニック結晶レーザーの量産製造技術の開発や、信頼性試験（高温通電試験、温度サイクル試験）を行うとともに、京都大学拠点との連携の下での、ユーザー企業への MTA によるデバイス提供等を行った。これらの進展を踏まえて、事業部との連携を強化し、事業部の量産ラインを使用したデバイス作製の検討を開始している。

また、三菱電機㈱においては、京都大学拠点との連携に基づく生産ラインの整備を推進した。三菱電機㈱半導体工場に新組織を発足し（2021.4）、フォトニック結晶レーザープロセス開発の専任者を配置して、工場でのフォトニック結晶レーザーの試作を行うなど、生産に向けた取り組みを加速している。

【社会実装成果】

フォトニック結晶レーザーそのもの、すなわち“モノ”の社会実装として、前項③でも述べたように、ユーザー企業への提供（MTA 等による提供）を、多数（予定も含めて、22 機関以上）行うとともに、ユーザー企業との連携によるフォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR システムや加工システムのプロトタイプ構築まで行った（なお、提供デバイスの作製においては、京都大学、ローム㈱、三菱電機㈱が連携）。具体的な活動の一例として、北陽電機㈱には、高輝度パルス動作フォトニック結晶レーザーを提供し、LiDAR への適用に向けた評価をして頂き、レンズフリーで 30m 先でも 5cm の拡がりであることに驚嘆の声を頂いた。その結果、同社との連携による、世界初のフォトニック結晶レーザーのレンズフリー特性を活かした超小型（名刺サイズ）・クラス最小の高性能 LiDAR の実現にまで成功した。さらに、その先の LiDAR のユーザー企業との連携へと発展し、搬送ロボットへのフォトニック結晶レーザー搭載 LiDAR の適用をも進め、スマートモビリティへの展開も進展した。他にも、測量分野の企業への MTA 提供を通じて、高性能化への有意義なフィードバックを受けるとともに、同社での測量機実機へのフォトニック結晶レーザー搭載試験により、空間分解能における高い優位性等が明確となった。また、㈱ブルックマンテクノロジー等には、同社からの強い要望に基づき、ビーム走査型フォトニック結晶レーザーおよびそれを発展させたフラッシュ照射型フォトニック結晶レーザーを提供し、同社との連携のもと、非機械式の新型 LiDAR（ビーム走査式とフラッシュ式を融合）の実現と超小型化（名刺サイズ）へと発展させることにも成功した（この成果については、米国光学会 OPTICA から、プレスリリース（2023.2.9）され、多くの海外メディアで報道された）。さらに、加工分野においても、複数の企業への CW 動作高輝度フォトニック結晶レーザーの MTA 提供を行い、同社におけるマーケティングやはんだ付けへの適用性評価を通じて、簡便に使用可能なフォトニック結晶レーザーへの高い評価を頂いた。また、他の加工分野の企業との連携による、加工機プロトタイプの構築をも推進した。他にも、海外の独フラウンホーファー研究機構、光源の独国企業、医療分野の米国企業等へと、幅広くデバイスの提供を行い、フォトニック結晶レーザーの優位性が高く評価されるとともに、様々なポジティブフィードバックに基づくさらなる深化を達成している。このようにして、“モノ”の社会実装が大幅に進展している状況にある。

上記の“モノ”の社会実装のみならず、製造に不可欠なデータ、インテリジェンスの製造企業等への提供、すなわち“コト”の社会実装も拡大した。参画企業であるローム(株)、三菱電機(株)への提供のみならず、モバイル応用企業、エピウエハ製造企業、宇宙通信に関心をもつ企業、3Dプリンタ企業等との、“コト”をベースとする億円レベルの複数の大規模共同研究を、予定を前倒しで複数開始しており、企業からの投資が拡大している状況にある。(さらに、モバイル分野の企業からの申し出により、2022.4より、フォトリソグラフィ結晶レーザーを活用した先端スマートセンシング技術に関する寄附講座が開設されるなど、より一層の体制強化も進んでいる。)さらに、光通信への展開に関心をもつ企業、可視光域への展開に関心をもつ企業などを含めて、多数の共同研究を通じて“コト”の提供を行い、各種フォトリソグラフィ結晶レーザーの開発や応用が加速的に進展している。

国際的な社会実装活動として、ドイツやオランダとのグローバル連携の拡大を図った(その詳細は、⑦「国際的な取組・情報発信」も参照のこと)。特に、ドイツのフ라운ホーファー研究機構との連携では、CSPAD等の測距センサーを得意とするIMS研究所の他、MEMSを得意とするISIT研究所との連携を新たに開始し、拠点からフォトリソグラフィ結晶レーザーを提供し、フォトリソグラフィ結晶レーザー/MEMS/CSPADを組み合わせた全く新たなLiDARの構築を推進している。また、半導体レーザーの有力な研究機関へのMTA提供を通じた、新たな連携も開始している。さらに、オランダとの連携として、オランダ大使館を介した複数のオンライン会議や、オランダのHigh Tech Campusでの展示(2022.7.1~)を契機として、PhotonDeltaとの連携に向けたMOU締結、オランダ代表団の京都大学拠点への受け入れと日独蘭交流(総勢、70名以上の参加)、オランダ主催のSmart, Green And Healthy Life Innovation Summitでの講演や議論を行うなど、社会実装のさらなる拡大に向けた連携体制構築を行っている。

【SIP終了後の「事業の財源・人材の確保の方法」】

上述のように、拠点における“モノ”と“コト”の社会実装が進み、既に83以上の企業・機関からの引き合いがあり、事業部門を含めた億円レベルの大規模な共同研究が複数進展し、人材の受け入れも含めて、SIP終了後も継続して自立的に運営できる体制が整っている。SIP終了後も、こうして確立した体制を、引き続き発展させていく計画である。その際、共同研究企業からの多数の研究員の受け入れ、派遣等の技術者(装置の操作、評価等)の採用等を継続し、SIPを通じて強化した人的な体制をも維持・発展させることを計画している。

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

知財等に関する以下の方針・戦略のもと、それに則った知財権活動等を推進している。その成果として、多くのユーザー企業・機関や製造企業等からの引き合いの増加へと繋がっている。

・ SIPの精神として、フォトリソグラフィ結晶レーザーの幅広い普及へと繋げるため、本SIPで

のフォアグラウンド特許については、全参画機関で共有するとともに、非独占実施とし、SIP 参画企業以外の連携企業にもオープンにする仕組みを構築している。また、現在独占権を与えているバックグラウンド特許についても、社会実装の支障を排除すべく、共有企業とのオープン化についても着実に推進している。

- ・ 新たに、“コト”の社会実装として共同研究を開始した連携企業との間でも、上記のSIPの精神に則り、非独占とすることを共同研究契約に盛り込み、SIPの成果をオールジャパンで発展させていく体制を確立している。
- ・ 知財戦略として、推定・分析可能な構造等については非独占の知財権化を推進し（オープン）、分析困難な詳細組成や作製条件などノウハウについては非公開（クローズ）とし、コア技術の流出を防止し、高い国際競争力を確実に維持するように努めている。

⑥ 成果の対外的発信

本研究開発の成果について、SIP 光・量子公開シンポジウムや、国際的にも影響力が強い学会会議での多数の基調講演・招待講演、インパクトファクターの高い学術誌への掲載、さらに多くのプレス発表等を通じて、積極的に発信した。以下に、SIP 全期間を通じた対外的発信の代表例を示す。

- ・ 毎年の光・量子課題の公開シンポジウムにおいて、具体的なフォトニック結晶レーザー技術およびその応用の進展、社会実装に向けた活動の状況等を広く発信した。
- ・ SPIE Photonics West、Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO PR)、International Semiconductor Laser Conference (ISLC)、Microoptics Conference (MOC)、Compound Semiconductor Week (CSW) 等において、多くの基調講演・招待講演を行い、関心を集めた。
- ・ 2重格子フォトニック結晶による高輝度フォトニック結晶レーザー (Nature Materials)、電子的ビーム走査 (Nature Communications)、2重格子構造を活用した短パルスデバイス (Nature Photonics)、大面積化の設計指針の確立 (Nature Communications)、青色高出力フォトニック結晶レーザー (Communications Materials *Nature系のオンライン誌)、高速自己変化可能なフォトニック結晶による高ピーク出力・短パルス光の発生 (Nature Communications) 等、本研究開発の成果が多くのインパクトファクターの高い学術誌に掲載された。
- ・ 高輝度フォトニック結晶レーザー (2018. 12)、世界初のフォトニック結晶レーザー搭載LiDARの開発 (2020. 7) とその名刺サイズへの小型化 (2021. 7)、電子的ビーム走査フォトニック結晶レーザーの開発 (2020. 7)、短パルスフォトニック結晶レーザーの開発 (2021. 3)、大面積化のための設計指針の確立 (2022. 6)、量子計算を活用した設計の高度化 (早稲田大学・慶應義塾大学との連携) (2022. 9)、高出力フォトニック結晶レーザーの自由空間通信への展開 (2022. 9)、量子セキュアクラウドの活用 (日本電気㈱・NICT・慶應義塾大学等との連携) (2022. 10)、青色波長域への展開 (2022. 11)、高速自己変化可

能なフォトニック結晶（2023.1）など、多くの開発成果についてプレス発表を行った。これらの成果が、テレビ・新聞・雑誌等で報道された（図 2-3-20）。

- ・ フォトニック結晶レーザーそのものや、フォトニック結晶レーザー搭載小型 LiDAR、フォトニック結晶レーザーによる小型加工システム等を、SPIE Photonics WEST(2020.2)、光とレーザーの科学技術フェア 2020(2020.10)、光・レーザー技術展 Photonix(2020.12)、第14回オートモーティブワールド クルマの先端技術展(2021.1)、OPIE 2021(2021.7)、Society 5.0 科学博@東京スカイツリータウン(2021.7)、OPIE 2022(2022.4)、ISLC 2022 併設展示会(2022.10)、Photonic Device Workshop 2022 展示会(2022.12)など、多くの展示会で展示し、実物を見ていただく形での情報発信をも行った（図 2-3-21）。また、国際的に広く普及させるために、イノベーション先進国であるオランダの High Tech Campus および Automotive Campus といった研究開発拠点でのフォトニック結晶レーザーおよびフォトニック結晶レーザー搭載 LiDAR の展示（2022.7~12）をも行い、大きな関心を集めた。
- ・ フォトニック結晶レーザーに関する研究活動が、Nature 誌の “Focal Point on Emerging Photonic and Quantum Technologies in Japan” において3記事掲載され、フォトンクス（＝フォトニック結晶レーザー）がスマート製造、スマートモビリティを変革すると紹介された。（“New semiconductors lasers will transform manufacturing”, “Compact lasers set to drive autonomous machinery”, “Laser tech that could cut into manufacturing emissions”：図 2-3-22）
- ・ 投資家向けセミナーでの講演等、広く投資を呼び込む活動等をも積極的に推進した。
- ・ 京都大学拠点（PCSEL COE）のホームページ（英語版：<https://pcsel-coe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>）を開設し、フォトニック結晶レーザー技術やデバイス提供情報等を広く発信した（図 2-3-23）。

高輝度PCSEL搭載LiDARの実現

NHK (NHK NEWS等) 2020/6/30~7/1放送
日本テレビ (日テレNEWS24) 2020/7/1放送



電子的ビーム走査の実現

NHK (NHK NEWS等) 2020/7/20-21放送



短パルス・高ピーク出力化



クラス最小LiDARの実現、Society5.0科学博での展示



100W~1kW級 高出力動作の指針確立



量子アニーリングの活用



自由空間通信への展開



量子セキュアクラウド活用



青色高出力PCSEL

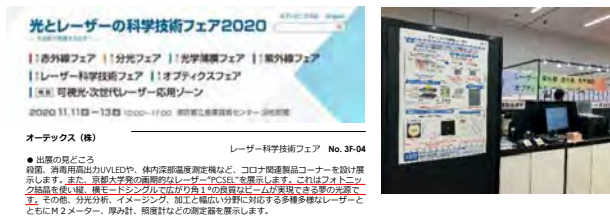


高速自己変化可能なフォトニック結晶



図 2-3-20. テレビ、新聞、雑誌等での報道の例

光とレーザーの科学技術フェア2020



SPIE Photonics WEST



OPIE 2021



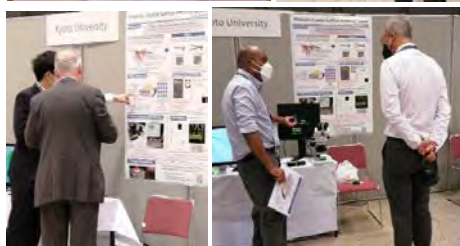
Society 5.0科学博



ISLC2022 展示会



井上科学技術政策担当大臣 (当時)



Photonics Device Workshop 展示会



図 2-3-21. 展示会への出展の様子の一例



図 2-3-22. Nature Focal Point への記事掲載



図 2-3-23. 京都大学拠点 (PCSEL COE) のホームページ (英語版)

⑦ 国際的な取組・情報発信

国際的な取り組みおよび情報発信について、以下のように積極的に行い、フォトニック結晶レーザーのポテンシャルの高さに、多くの機関からの関心が高まっている。以下に、具体的な取り組みの例を示す。

- ・ 前項⑥でも述べたように、SPIE Photonics WEST、International Semiconductor Laser Conference (ISLC) 等の国際的にも影響力の大きな国際会議の基調講演や招待講演等において、本 SIP の成果を、世界に向けて積極的に発信した。それを通じて、国際的に著名なレーザーの専門家からも、高出力フォトニック結晶レーザーを高く評価していただいた。これらをきっかけとして、拠点への海外からの引き合いが増加し、欧州の有力な

光源企業や研究機関との連携の議論やデバイス提供、米国や豪州の研究機関等との宇宙分野への展開に向けた連携検討等へと発展した。

- ・ 重要な国際連携の一つとして、ドイツのフラウンホーファー研究機構 IMS 研究所とは、量子的な光検出器（GSPADs）と高輝度/スマート（ビーム走査）フォトニック結晶レーザーとを組み合わせた、世界的に例のない LiDAR を目指した本格的な共同研究を、2021.8 より開始した。さらに、2022.8 からは、MEMS 技術を得意とする ISIT 研究所を交えた体制へと拡張し、より強固な連携体制を築いている（図 2-3-24）。また、半導体レーザーの有力な研究機関との、MTA によるデバイス等を介した連携をも開始した。
- ・ イノベーション先進国であるオランダとの連携に向けた活動を、加速的に進展させた。駐日オランダ大使館を介して、オランダの研究開発拠点との会合をもち、フラウンホーファー研究機構とも連携しつつ、High Tech Campus での会議やデモ展示（2022.7~11）、さらに Automotive Campus での展示（2022.11~12）を行うとともに、Photon Delta とは今後の連携に向けた MOU を締結（2022.10.11）した。また、京都大学拠点にオランダ代表団（およそ 30 名）を受け入れ、フラウンホーファー研究機構および拠点関係企業を交えた総勢 70 名以上でのネットワーキング（2022.10.14）を行い、連携体制を強化した（図 2-3-25）。さらに、オランダ ブラバント州が開催する Smart, Green And Healthy Life Innovation Summit（2022.11.16）での講演・ディスカッション等を通じて、より一層交流を深めた。
- ・ その他、米国の企業とは、MTA に基づいたフォトニック結晶レーザーの提供を通じて、医療応用に関する連携を推進している。また、商社等も通じて、欧州・米国の LiDAR メーカー等ともミーティングし、情報交換を行った。さらに、米国や豪州の大学等からは、高出力フォトニック結晶レーザーの宇宙における推進エネルギーとしての応用において、引き合いがある。これらを含めて、世界中から、フォトニック結晶レーザーの様々な応用に向けた引き合いが増加している。
- ・ 国際的にフォトニック結晶レーザーに関わる拠点形成とそこでの開発成果を広く発信するために、前項⑥でも述べたように、拠点のホームページ（英語版：<https://pcsel-coe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>）を開設し、ホームページを閲覧した、海外の企業・機関からの問い合わせが増加している。

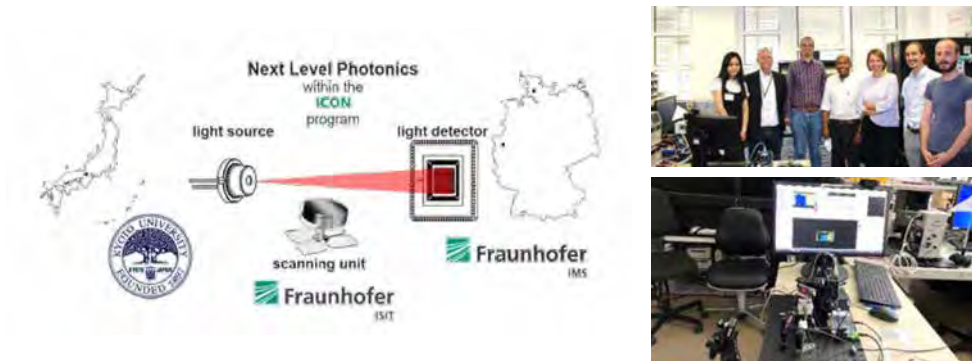
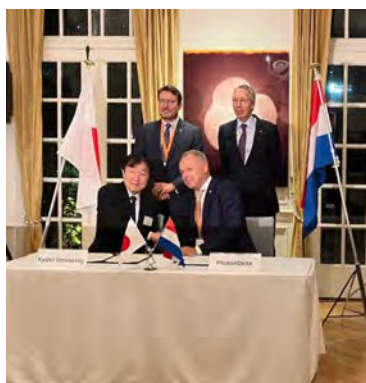


図 2-3-24. ドイツとの連携

High Tech Campusにおける会議、デモ・展示



Photon Deltaとの連携に関わるMOU締結



オランダ代表団の京大拠点訪問
(フ라운ホーファー・拠点関係企業含めた交流)



京都大学大学院工学研究科 研究科長 橋本 昭夫 教授
京都大学医学部連携本部 副本部長 木村 俊作 名誉教授
オランダ代表団 代表団長 Mr. Michiel Smeets
京都大学大学院工学研究科 PCSEL拠点長 野田 達 教授
Photon-Delta CEO Mr. Ewilt Roos
Quantum Delta NL Director Mr. Jesse Robbers
PIB Japan Coordinator Mr. Raoul Oosterbrink

図 2-3-25. オランダとの連携