

戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）第2期

最終結果報告書

課題名：光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術

2023年 3月 9日

目次

第1章 課題全体の概要と課題目標の達成度	4
(1) 課題全体の概要・目標	4
A. はじめに	4
B. 各研究課題の概要	5
(a) GPS型レーザー加工機システム研究開発	6
(b) 空間光制御技術に係る研究開発	6
(c) フォトニック結晶レーザーに係る研究開発	7
(d) 量子暗号技術	8
(e) 次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発	9
(f) GPS化戦略の波及加速パイロット拠点の形成	10
C. 各研究課題の事業終了時点のアウトカム目標（社会的波及効果、市場規模等経済的波及効果）	11
(2) 課題目標の達成度	13
① 国際競争力	13
② 研究成果で期待される波及効果	17
③ 達成度（1） ※5年間の設定目標に対する達成度	21
④ 達成度（2） ※社会実装の実現可能性	37
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	49
⑥ 成果の対外的発信	51
⑦ 国際的な取組・情報発信	56
第2章 各研究課題の内容と課題目標の達成度	59
(a) GPS型レーザー加工機システム研究開発	59
(b) 空間光制御技術に係る研究開発	76
(c) フォトニック結晶レーザーに係る研究開発	91
(d) 量子暗号技術	117
(e) 次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発	129
(f) GPS化戦略の波及加速パイロット拠点の形成	179
第3章 課題マネジメント	199
① Society 5.0の実現を目指すもの	199
② 社会実装を実現するためのマネジメント体制が構築されていたか。	200
③ 研究テーマに対する評価、マネジメントが適正に実施されていたか。	203
④ 民間から適切な負担を求めていたか。官民の役割分担が適切になされていたか。	205
⑤ マッチング額が十分に計上されていたか。	207
⑥ 府省連携が不可欠な分野横断的な取り組みとして実施されていたか。	208
⑦ SIP第2期で実施する他の課題との連携が適切に図られていたか。	209

⑧ 上記以外にマネジメントの観点から評価すべきこと	210
参考情報	212

第1章 課題全体の概要と課題目標の達成度

(1) 課題全体の概要・目標

A. はじめに

Society 5.0は先端技術をあらゆる産業や社会生活に取りいれて、経済の発展と社会的課題の解決を両立する新たな社会であり、イノベーションで新たな価値を創造することにより、だれもが快適で活力に満ちた質の高い生活を送る人間中心の社会である。Society 5.0では、フィジカル空間にある豊富なデータをサイバー空間に集め、AI技術などを用いて解析し、その結果をフィジカル空間に戻して、現実社会を豊かにする。その実現のためには、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたサイバーフィジカルシステム(CPS)の構築が鍵となる。

本SIP光・量子課題が開始する前の時点で、既にIoT/AIからスマート製造へと投資が開始されているが、未だスマート製造分野ではネットワーク型製造システムへの移行が実現するか見通せていないこと、サイバー空間でのセキュリティの脅威が増加の一途をたどっていること等が社会・産業界共通の投資を阻むボトルネックとなっている。本SIP光・量子課題「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」では、光・量子技術から重要かつ優先度の高いレーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理を活用して、複雑な物理現象を伴うためCPS化が最も困難とされているレーザー加工を代表例にCPS化を先導実証し、ほとんどの製造装置のスマート化が可能であることを証明する。本SIP光・量子課題では、スマート製造等への潮流(投資、社会システム、ビジネス展開)を引き起こして、CPS型レーザー加工によるネットワーク型製造システムの実現に貢献するが、開発されたCPS構築手法は、モビリティ、エネルギーなどの幅広い分野に広められると考えている。本SIP光・量子課題がSociety 5.0実現に貢献することにより、経済の発展並びに我が国及び国民の安全、安心を確保し、豊かで質の高い社会の実現に貢献する。

図1-1では、本SIP光・量子課題が光・量子技術基盤の中から、重要かつ優先度の高い研究開発テーマとして選定したレーザー加工、光・量子通信および光電子情報処理技術の関係性を示した。サイバー空間でモノづくり設計や生産の全体最適化を世界最高速で実現する光電子情報処理技術、その結果をフィジカル空間で活用してスマート製造を実現するCPS



図1-1. 本SIP光・量子課題が取り組む研究課題の関係性

型レーザー加工機システム、および、サイバー空間とフィジカル空間でやり取りされるデータのセキュリティを原理的に担保する光・量子通信が一体となり、本 SIP 光・量子課題の目標を達成する姿を描いている。具体的には、レーザー加工では、複雑な物理現象を伴うため、加工条件をデジタル化するのが非常に難しいレーザー加工を CPS 化することで、ほとんどの製造装置のスマート化が可能であることを証明するとともに、日本発の技術でレーザー加工市場のシェアの奪還に大きく貢献する、レーザー加工ビームのフィードバック制御の実施に必要な空間光制御技術や将来のレーザー加工機の大幅な小型化にも寄与するフォトニック結晶レーザーに係る研究開発も実施する。光電子情報処理では、サイバー空間でモノづくり設計や生産の全体最適化を世界最高速で実現し、光・量子通信がサイバー空間とフィジカル空間でやり取りされるデータのセキュリティを原理的に担保するだけでなく、高機密情報の安全な流通、保管、利活用で、医療・製造分野等の生産性向上に貢献する。これらの 3 項目の研究成果を糾合することで、ネットワーク型製造システムの構築を通じて Society 5.0 の実現に貢献する。

B. 各研究課題の概要

本 SIP 光・量子課題は 5 つの研究課題から構成されている。レーザー加工では、(a) 「CPS 型レーザー加工機システム研究開発」、(b) 「空間光制御技術に係る研究開発」、(c) 「フォトニック結晶レーザーに係る研究開発」の 3 研究課題、光・量子通信では (d) 「量子暗号技術」、光電子情報処理では (e) 「次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発」の 5 研究課題である。これらに加え、上記研究課題成果の大規模社会実装に向けて、より多くの企業

表 1-1. 本 SIP 光・量子課題を構成する研究課題一覧

研究テーマ	研究責任者	参画機関	研究概要
1 CPS型レーザー加工機システム研究開発	小林 洋平 (東京大学)	東京大学、パナソニック ホールディングス(株) パイロット機関：九州大学、ギガフォトン(株)	加工工程の実績や計測によるリアルタイムでの高度光制御を達成し、まずは電子部品製造分野における難加工材料など電子機器の製造工程に実装
CPS化戦略の波及加速パイロット拠点の形成	池上 浩 (九州大学)	九州大学、ギガフォトン(株)	東大のCPS化拠点構築ノウハウを活用し、半導体材料のレーザー改質プロセスのCPS化を加速する拠点形成
2 空間光制御技術に係る研究開発	豊田 晴義 (浜松ホトニクス)	浜松ホトニクス(株)、宇都宮大学	非熱レーザー加工等の高精度かつ高スループットな加工技術を実用化
3 フォトニック結晶レーザーに係る研究開発	野田 進 (京都大学)	京都大学、三菱電機(株)、ローム(株)	フォトニック結晶により、半導体レーザーの大幅な高輝度化・高機能化を実現し、システム簡略化・小型化を通じて、Society 5.0の実現に貢献
4 量子暗号技術	藤原 幹生(NICT)	NICT、日本電気(株)、(株)東芝、学習院大学、東京大学、北海道大学、(株)ZenmuTech	市場競争力の高い量子暗号装置の開発と、量子セキュアクラウドシステムの構築
5 次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発	戸川 望 (早稲田大学)	早稲田大学、(株)フィクスターズ、(株)QunaSys、慶応義塾大学	量子及び古典を含むコンピュータをアクセラレータとして活用するシステムアーキテクチャを構築し、従来の計算方法と比較して格段に処理や解析を高速化・高度化

や機関を巻き込む取組みとして、社会実装加速プロジェクト (f) 「GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成」を実施した。以下に(a)から(f)までの研究概要と取り組み結果等について記載するが、表 1-1 にこれら課題の研究責任者、参画機関、研究概要を簡便にまとめた。なお、各研究課題の内容と課題目標の達成度等を第 2 章にも記載する。

(a) GPS 型レーザー加工機システム研究開発

研究責任者：小林 洋平（東京大学 物性研究所 教授）

参画機関：東京大学、パナソニック ホールディングス株式会社

研究内容の概要

実績収集・学習用レーザー加工・計測システムとして、多機能・高速・その場観察機能を備えた「マイスターデータジェネレーター(MDG)」を構築する。現場での加工を行う自動パラメータ可変レーザー加工システムとしては、「スマートレーザー加工機」を構築する。パラメータ抽出システムは上記 2 者を連携させてレーザー加工に必要なパラメータを抽出するシステムであり、本研究課題では「マイスターデータジェネレーター」と「スマートレーザー加工機」の両者のシステムインテグレーションとして実現し、これを中核として、GPS を搭載するレーザー加工機のシステム化を促進する拠点を形成する。

初期の加工対象としては、Society 5.0 推進におけるキーデバイスである電子デバイス部品の高度化・低製造コスト化におけるボトルネックの解消に資する材料を対象に選定して実証を行う（電子部品製造分野における難加工材料など）。その後、さらに他の材料・加工へと対象を拡大するために必要な基盤を整備し、広範なパラメータ領域における加工データ取得を行い、機械学習などの手法により、加工パラメータと結果の相関が取れるデータベースの構築を行う。また、レーザー加工の GPS 化の実現と進展を支える、加工の物理モデルの構築および検証手法の深化にも取り組む。さらにこれらの技術成果を早期に活かすため、社会実装にも取り組む。

事業終了時点アウトプット目標

スマートレーザー加工機の実証として TRL7 を目指すとともに、マイスターデータジェネレーターの実証として TRL5 を目指し、当システムで収集したデータを基に、さらに加工性能を向上させるシステムの検証を実施する。これらの成果により、パラメータ抽出に要する時間を大幅に短縮し、加工方式の初期選定時におけるリードタイムを 9 割削減することを目指す。溶接工程対応拡張の開発においては、リードタイムの 9 割削減に目途を付けることを目指す。

(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

研究内容の概要

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、(1) 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、及び、(2) 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、の 2 課題に取り組む。またこれらの技術成果を早期に活かすため、社会実装にも取り組む。

事業終了時点アウトプット目標

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

・既存の 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の使用のための種々のツールも用意し、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。

・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)

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

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を向上する (TRL3)。「実用化試験用プラットフォーム (浜松拠点・宇都宮拠点)」で外部ユーザーとのレーザー加工試験を実施することにより、加工ニーズの取り込みや最適加工のためのプログラムデータベースを構築する。

(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、三菱電機株式会社、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

研究内容の概要

フォトニック結晶レーザー (PCSEL) の高輝度化を図り、Society 5.0 を支える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 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$: ビーム品質 (M^2) ~2、出力 10W 超級)・CW 動作のためのデバイス基盤技術開発と、その合波技術 (100W 超級) の開発を実施する。併せて、直近の様々な出口の 1 つとして、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 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$: ビーム品質 (M^2) ~ 2 、出力 10W 超級)・ナノ秒パルス光源の開発を実施する。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く。またこれらの技術成果を早期に活かすため、社会実装にも取り組む。

事業終了時点アウトプット目標

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)

・フォトニック結晶レーザーの高輝度 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$: ビーム品質 (M^2) ~ 2 、出力 10W 超級) CW 動作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。

・フォトニック結晶レーザーの高輝度 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) ナノ秒パルス動作を達成し、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)。

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)。

(d) 量子暗号技術

研究責任者：藤原 幹生 (国立研究開発法人情報通信研究機構 量子 ICT 協創センター 研究センター長)

参画機関：国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)、日本電気株式会社、株式会社東芝、学習院大学、北海道大学、東京大学、株式会社 ZenmuTech

研究内容の概要

市場競争力のある装置開発や標準化の取り組みを進めるとともに、量子暗号技術と従来から利用されている重要デジタル情報を安全に保管する手段としての秘密分散手法を組み合わせることで、理論上、将来にわたり機密漏洩を完全に防ぐデータ保管を初めて実現する。本研究課題では A) 量子暗号技術、B) 量子セキュアクラウド技術に取り組む。量子暗号技術では、BB84 方式の暗号装置の低コスト化*、CV-QKD 方式の暗号装置では、性能向上と大学から企業へ技術移転を、また両方式に共通の課題となっている i) 安全性保証技術の標準化、ii) 物理乱数源の小型化、iii) 検定基準・推奨方式リストの整備 についても取り組む。C) 社会実装では、医療情報ストレージネットワークや企業・国家等重要インフラ網などを想定し、これらの分野の潜在ユーザーと連携しながら、社会実装を進める。本 SIP 光・量子課題内のレーザー加工および光電子情報処理のチームと連携しながらスマート製造分

野への適用試験を進めビジネスモデルを構築する。さらに、金融分野の潜在ユーザーと共同で調査研究を進め出口戦略の強化につなげる。

*…2020年度にコスト半減を達成し、参画機関が事業化。BB84の低コスト化への取組は2020年度に円満卒業。

事業終了時点アウトプット目標

A) 量子暗号技術

- ・CV-QKD方式装置に関して、企業による準製品化（ユーザー環境で稼働可能な研究試作品）を完了し、100波の古典光が多重化された同一ファイバー内での鍵生成を実証する。
- ・安全性保証技術に関し、実装安全性評価や鍵管理など主要な作業項目について、量子ICTフォーラム/量子鍵配送技術推進委員会やITU-T（国際電気通信連合/電気通信標準化部門）、ISO/IEC（国際標準化機構/国際電気標準会議）やETSI（欧州電気通信標準化機関）等の国際標準化組織から勧告を発行する。
- ・物理乱数源に関して、現状比10倍の高速化（生成速度～数Gbps）かつ従来比2分の1の小型化（量子暗号装置内での占有体積を半減化）を実現し、企業へその技術を移転する。
- ・量子暗号の運用ガイドライン及びセキュリティ設計仕様案を完成する。
- ・物理乱数源、量子暗号技術の安全性保証、検定基準、推奨方式リストの策定と更新を継続的に行うための制度設計提案書を取りまとめ、標準化関係省庁へ提案する。

B) 量子セキュアクラウド技術

- ・秘密分散・秘匿計算の軽量化技術、鍵管理・運用技術、ユーザー権限に基づくアクセス権管理技術を統合するアプリケーションをフィールドテストベッド上にプログラム実装するとともに、データの属性（種類・意味、機密性の度合い、データサイズ、利活用頻度等）に応じた安全なデータ二次利用技術を開発し、80GB程度のゲノムデータ解析に適用して有効性を検証する。
- ・電子カルテの日々のトランザクションストレージ、長期間の標準化ストレージ、異なる病院間での安全なデータ相互参照を可能とするシステムを開発する。災害時等、ネットワーク品質の劣化を想定し、1Mbps程度の比較的低容量の回線が含まれるネットワーク環境でも迅速なデータ復元・相互参照機能を支障なく実行するアプリケーションを開発し、HLINCOS*上で動作を検証する。開発したアプリケーションをフィールドテストベッド上でオープンリソース化する。

*…電子カルテ保管・交換システム。

C) 社会実装

医療情報ストレージネットワーク分野と企業・国家等重要インフラ分野において、都市圏スケールの分散ストレージネットワークにおいて想定ユーザーと共に実施したPOCの結果を反映し、運用ユーザー拡大のためのビジネスエコシステムのモデルを構築する。

(e) 次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発

研究責任者：戸川 望（早稲田大学 理工学術院 教授）

**参画機関：早稲田大学、株式会社フィックスターズ、株式会社 QunaSys、
慶應義塾大学**

研究内容の概要

イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ (Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer)、誤り耐性ゲート型量子コンピュータを次世代アクセラレータとし、これらを適材適所で利活用することで、Society 5.0 に資するアプリケーションプログラム全体を高速化・高度化し、従来の計算方法と比較し格段に処理や解析を高速化・高度化する次世代アクセラレータ基盤の研究開発を目的とする。すなわち、アプリケーションプログラムと次世代アクセラレータの集合が与えられたとき、適材適所に次世代アクセラレータを利活用し、アプリケーションプログラム全体を高速・高精度処理するソフトウェア群（最適化ライブラリ・API (Application Programming Interface)、次世代アクセラレータ評価系等）を構築する。研究開発では、次世代アクセラレータ・コードザイン技術と次世代アクセラレータインタフェース技術に分け、これらを同時並行して効率的・効果的に研究開発を進める。またこれらの技術成果を早期に活かすため、社会実装にも取り組む。

事業終了時点アウトプット目標

- ・次世代アクセラレータ・コードザイン基盤を実現するソフトウェアを実装完了し、オープンテストベッド化を完了する (TRL7)。
- ・代表的なアプリケーションについて、次世代アクセラレータ基盤により、古典アクセラレータのみを活用した従来技術に比較して 10 倍～100 倍高速化を達成し、企業による準製品化を完了し、社会実装コンソーシアムで活用する (TRL7)。

(f) CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成

連携研究課題：CPS 型レーザー加工機システム研究開発（研究責任者：小林 洋平 東京大学 物性研究所 教授）

実施代表者：池上 浩（九州大学 システム情報科学研究院 教授）

実施機関：九州大学、ギガフォトン株式会社

協力機関：パデュー大学

研究内容の概要

連携研究課題において蓄積した CPS 化拠点構築のノウハウ（「プロセスを CPS 化するための基盤技術群」と「CPS 化推進拠点を構築する枠組」）の提供を受けて、電子デバイス製造の中でも特に半導体材料のレーザー改質プロセスの CPS 化に取り組み、CPS 型製造技術の社会への波及を加速するための課題抽出から、解決策を包括的に提示するまでの一貫した拠点整備を進める。本技術分野において、CPS 化技術を広く産業界に提示し、その成功事例を産業界に提示する。このプロジェクトを推進することにより、スマート製造への民間の投

資を誘起することで、研究開発成果の社会実装、ひいてはネットワーク型製造のエコシステムの構築を加速する。レーザー改質の具体的なプロセスとしては、産業界からのニーズの多い (1) SiC パワーデバイス半導体のレーザードーピングと、(2) ディ스플레이用多結晶 Si 薄膜半導体のレーザーアニールを選定し、GPS 化によって最適なプロセスが見いだせることを実証する。

事業終了時点アウトプット目標

- ・ AI 解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置を市場投入する。
- ・ 企業ニーズを反映した具体的な改質プロセスに対して当該企業の投資も受け入れつつ機能実証機 (α 機: TRL6) を製作し、民間企業の評価ラインなどを活用して、製作した電子デバイスの評価を行う。この結果に基づき、量産実証機 (β 機: TRL7) の実証実施に向けた企業の投資判断を獲得する。
- ・ GPS 化ニーズのあるレーザー改質プロセス全般に対して、企業が量産実証機 (β 機: TRL7) の投資判断を実施可能な拠点として、本実施課題の年額予算規模相当以上の民間資金を受け、年総事業費規模相当以上の活動規模の持続可能な拠点を実現し、GPS 化戦略の持続的な波及に貢献する。

C. 各研究課題の事業終了時点のアウトカム目標（社会的波及効果、市場規模等経済的波及効果）

本 SIP 光・量子課題で取り組む 5 研究課題及び社会実装加速プロジェクトのアウトカム目標を以下に記載する。

事業終了時点のアウトカム目標

【レーザー加工】

(a) GPS 型レーザー加工機システム研究開発

- ・ Society 5.0 実現の鍵となる GPS の構築について、特に積極的な投資が始まったスマート製造分野に注目し、民間企業の積極的な投資を阻害するボトルネックの解消に資する。
- ・ ネットワーク型製造システムの構築に貢献する。
- ・ あらゆるものを GPS 化する上でカギとなる、電子デバイス製造の高度化に資する。

(b) 空間光制御技術に係る研究開発

- ・ 耐光性向上・波長領域拡大された SLM を実用化し、それらを搭載したレーザー加工モジュールの実証実験により、高精度かつ高スループットなレーザー加工を実現するためのデジタルフィードバック光制御技術を実用化、提供することで、高い生産性を実現する GPS 型レーザー加工機システムや様々なレーザー加工機を実現する。
- ・ 実用化レーザー加工プラットフォームを活用し、デジタルフィードバック光制御によるレーザー加工の普及を進め、自動車・電子部品・医療機器などの新材料・新機能デバイス等の精密加工の要望が高い新たな市場への展開を加速する。

(c) フォトニック結晶レーザーに係る研究開発

- ・直近の出口の1つとして、スマートモビリティや工場のスマート化、農機・建機の自動化等を支えるLiDAR等のセンシング応用を図ることで、フォトニック結晶レーザーのビーム整形光学系不要、高いS/N比、高い環境変化耐性などの特徴により、システムの簡略化・小型化・低雑音化に資する。
- ・フォトニック結晶レーザーの大面積CW高輝度化およびその合波に関する基盤技術の確立を通じて、将来のスマート製造に向けた超小型、高効率加工システムの構築に資する。
- ・電氣的ビーム走査機能の付加等のスマート化により、機械駆動部（サイズ増大、コスト増大、信頼性低下要因）を排除した、大幅なシステム簡略化を図る。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方式の構築等へ寄与する。さらに、フォトニック結晶レーザーのCPS化により、製造技術の蓄積・発展に資する。
- ・京都大学拠点（およびそこから技術移転先）からユーザー企業へのフォトニック結晶レーザーの提供（“モノ”の社会実装）、製造企業へのデータ・ノウハウ・インテリジェンス等の提供（“コト”の社会実装）の推進により、広く社会へ向けてフォトニック結晶レーザー技術の普及・展開を図る。

【光・量子通信】

(d) 量子暗号技術

- ・情報通信に求められるセキュリティレベルを踏まえて、政府機関から始めて、医療、重要インフラ系、スマート製造等へ量子暗号装置を導入する。
- ・GPS社会にとって重要な通信の安全性を保証するだけでなく、重要なデジタルデータも安全に保管する量子セキュアクラウド技術を社会に導入する。
- ・量子暗号装置導入に欠かすことのできない基準を確立（制定）する。

【光電子情報処理】

(e) 次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発

- ・オープン戦略として、研究開発の最終段階あるいは研究開発終了後間もなくの時期に、本研究開発によって得られた成果を部分的にもいち早くオープンソース化することにより、世界でデファクトスタンダードを確立し、利用促進を図る。
- ・さらに順次クローズ戦略として、本研究開発を主体的に進める、あるいは関与した産業界を中心に、(1)研究開発されたソフトウェア群を用いたアプリケーションプログラムの高速化・高度化サービス、(2)研究開発されたソフトウェア群のライセンスなど競争領域にて事業展開を図る。
- ・次世代コンピューティングの活用ノウハウを蓄積する。
- ・国内メーカーの各種アクセラレータの開発を大幅に促進する。

【社会実装加速プロジェクト】

(f) CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成

・CPS 化のノウハウである「プロセスを CPS 化するための基盤技術群」と「CPS 化推進拠点を構築する枠組」を半導体材料のレーザー改質プロセス分野に適用し、課題抽出から解決までの一貫した体制を整備し、CPS 化ニーズを持つ企業群とオープン/クローズ体制で連携する。

(2) 課題目標の達成度

以下に課題全体としての粒度で、課題目標の達成度について記載する。各研究課題の達成度は第 2 章でも記載する。

① 国際競争力

【製造のパラダイムシフトにつながる世界的に見て例がない取組み、或いは世界最高性能を実現する研究開発を遂行しており、海外機関が高く評価する国際競争力を持つ。】

本 SIP 光・量子課題で実施している研究課題は、世界的に見て例がない（CPS レーザー加工機システム、次世代アクセラレータ基盤技術）、或いは世界最高性能を実現する高い技術力（空間光制御技術、フォトニック結晶レーザー（PCSEL）、量子暗号技術）を有していることを、ベンチマークでも確認した。こうした取組みや技術力の高さに対し、関心のある企業や国内外の機関から問い合わせや引合いが多く来ており、その一部との共同研究、共同開発、試料提供や POC 実施へ発展しており、その競争力や実用化に向けたポテンシャルの高さは第三者の認めるところである。また 2021 年度もベンチマークを実施し、その優位性を確認したが、最終年度も全課題において優位性を保持している。大学拠点を含め、本 SIP 光・量子課題の終了後も、開発した技術成果や成果を継続的に提供する拠点として自立的に運営することにより、競合に対し総合的な優位性を維持し続け、社会実装を推進・拡大できると判断している。

より具体的には、本 SIP 光・量子課題では、全課題が世界的に見て例がない、或いは世界最高性能を実現する高い技術力を有していることとして、(1)CPS 化の難しいレーザー加工の自動計測評価を行い、自律的に高品位のデータを大量に取得し、そのデータ解析を機械学習などの AI を使って最適加工条件を見つけ出す CPS 型レーザー加工機システムは、世界に本格的な試行例がなく、モノ中心からコト中心へのパラダイムシフトにつながる取組みであること、(2)空間光制御デバイス（SLM）を利用したデジタルフィードバック制御による CPS 型レーザー加工技術が、世界に先駆けたものであること、(3)フォトニック結晶レーザー（PCSEL）がこれまで困難であった半導体レーザーの高輝度化を可能とする全く新たな光源技術であり、高輝度化・スマート化により、様々なレーザーを用いたシステムの簡略化・小型化、さらには高度化・高性能化が出来ること、(4)量子暗号技術は暗号鍵の伝送距離及び鍵配信速度の点で世界最高レベルであり、かつ量子セキュアクラウドの実装面でも世界最先端を走っていること、(5)次世代アクセラレータ基盤技術における技術開発は古典計算機

及び量子計算機を自動で適材適所に最適に高度化・高速化して利活用する世界にも組み込み例のないソフトウェア開発であること、である。こうしたユニークで高い性能に裏付けされたことにより、国内外機関との社会実装へ向けた取り組みや共同研究、国際標準化活動での主導的活躍等へ発展している。

GPS レーザー加工機システムは最先端半導体製造の TGV（微細貫通穴、Through Glass Via）加工分野で台湾の工業技術研究院（ITRI）との協業へ進展し、SLM はドイツのフラウンホーファー研究機構（FhG）と共同で現地に SLM 応用ラボを開設し、自動車製造分野ほか欧州市場での応用も視野に入れた社会実装の展開を進め、PCSEL は世界トップシェアを誇る日本企業との連携強化やドイツの FhG と新型 LiDAR の共同研究開始、オランダの PhotonDelta との連携への合意に発展している。量子暗号装置（QKD）では(株)東芝、日本電気(株)が依然世界最高性能（海外製の 10 倍高速、2 倍長距離）を誇り、量子暗号ネットワークでも世界最長 10 年間以上の運用実績を有している。その成果を国際標準化活動として ITU-T での 11 編の勧告化（勧告 Y. 3803 ほか）等にも結実させることで日本の技術の市場競争力強化に活かしている。さらに量子セキュアクラウド技術でも、ゲノム解析データの分散バックアップ等で他国に例のない POC 実績を有しており、高い国際競争力を持つと判断している。次世代アクセラレータ基盤技術では、開発中のアルゴリズムエンジンや計算時間推論エンジンの有効性検証のため、Honeywell*最新デバイスにて実機検証を実施し、今日のシステムで小さい分子量の材料の振動解析を古典計算機と同等の精度で行えたことで、将来の量子コンピュータでより大きな分子量の材料に関する問題を扱うことに道筋をつけたと高く評価され、海外機関によって成果のプロモーションが行われている。

*…現在は Cambridge Quantum Computing Limited と米国 Honeywell 社の量子コンピューティング部門である Honeywell Quantum Solutions が経営統合し Quantinuum 社。

以下では個別の研究課題のベンチマーク結果に基づく、国際競争力の概略を記載する。

GPS 型レーザー加工機システムの研究開発では、ベンチマークの評価軸として、レーザー加工にとって重要な光源波長、GPS 化に重要な物理モデル、及びシステムの拡張性のほか、内閣府より指定された市場性、コストを選択した。ベンチマークの結果、マイスターデータジェネレーター（MDG）の本格稼働に伴い、AI が自律的に判断して高品位・大規模データを自律的に収集することが可能になった（2021 年度の 300 data cycle/day から装置限界の 1,000 data cycle/day へ拡大）結果、広くユーザーニーズに対応できる可能性が広がり、社会実装が可能な市場も広げられるようになった。さらに具体的な開発として、半導体基板への TGV 加工では台湾の半導体製造産業と強く連携している工業技術研究院（ITRI）との協業が開始された。ITRI との協業を基点に半導体メーカーへの認知を拡大し、国際的な展開体制の構築を目指して活動を継続している。また、様々な市場で広くユーザーニーズに応えられる体制を構築した。コスト面でもさらに充実したデータベースの構築が進み、深化する高度なシミュレータも活用しユーザーにデータ（ノウハウ）として提供することで、SIP 終了

後はユーザーが導入・運用するコスト改善が見込める。本研究課題では、光源波長、GPS化に重要な物理モデル、システムの拡張性は他機関の取組みを凌駕するようはじめから設計されており、他機関よりも社会実装に優れたシステムを実現できたと考えている。

空間光制御デバイス (SLM) では、レーザー加工用途に焦点を当てた評価軸を選択した。高出力レーザー (特に超短パルスレーザー) との組み合わせによる高精度・高スループットな加工の要望に応える耐光性と、その際に高い光利用効率と高精度なビーム制御を実現するための位相制御精度、さらに、高スループットに必須となる応答速度の3つを主要な機能として、また内閣府より指定された市場性およびコストの2つの指標を加えた5つの指標で評価を行った。ベンチマークの結果、2022年度の大面積 SLM 試作完了により、本 SIP 光・量子課題終了時の耐光性は、さらに約10倍に向上することが確認された。これにより、3Dプリンタ (Additive manufacturing) などの高出力 CW レーザー (kW クラス) への対応や、超微細加工に必須となる紫外光耐光性 (350nm 帯) の向上も期待される。さらに、国内の企業との POC やフラウンホーファー研究機構 (FhG) による実機評価により、先端半導体製造や自動車部品製造等への社会実装が視野に入り、特に FhG に SLM 応用ラボを開設したことから、SLM が参入可能な市場が海外にも拡大できる足掛かりを築いた。こうしたことから SIP 終了時に他機関よりも社会実装でも優れた SLM を実現したと考えている。

フォトリソグラフィ結晶レーザー (PCSEL) は幅広い応用が考えられるが、ここでは直近の出口としての LiDAR 応用光源に言及する。評価軸として LiDAR 等のセンシング応用において重要となる、ビーム拡がり角、スロープ効率、発振スペクトル幅、温度依存特性及び内閣府より指定された市場性およびコストを選択した。PCSEL は他機関のファブリ・ペロー型半導体レーザー (FP-LD) と比べて極めて狭いビーム拡がり角で、温度依存性が小さいことなどから、極めて高い優位性がある。デバイス性能の温度依存特性や温度サイクルに対する信頼性などでも安定であることが検証されたほか、電氣的ビーム走査技術等を付加した PCSEL のスマート化により、機械駆動部や外部光学系なしで、様々なビームの制御が可能であり、既存の光源・システムに対して極めて高い優位性があり、将来にわたって高い国際競争力が持続できると期待される。また、汎用品として使用されるために必要なデバイスの低コスト化に向けて取り組んだナノインプリント (NIL) による微細構造形成技術の適用では、NIL を用いて作製した PCSEL が従来の電子ビーム露光で作製したデバイスと同等性能であることも確認されたことから、LiDAR の適用範囲をさらに広げ、市場の拡大を可能にできると見込んでいる。以上のことから、PCSEL は他機関の LiDAR 向けには、原理的な限界に達している FP-LD 光源を圧倒的に凌駕する優れた性能の光源として、社会実装の面でも極めて高い市場性と良好なコスト性も伴うデバイスとなることを見込まれる。こうした実力は既に高く評価され、2022年度に83以上の機関からの問い合わせ (内27機関以上が海外) があり、予定も含めて22機関以上へのデバイス等の提供を実施している。フラウンホーファー研究機構 (FhG) との共同研究拡大やオランダ PhotonDelta との MOU 締結による関係強化が開始され、さらに新しい LiDAR 開発へ発展している。

量子暗号装置では、評価軸として性能、標準化/安全性(国際標準化(ITU-T*1、ISO/IEC*2)への取り組み活動を評価、実装安全性の評価検討、耐タンパー性能等についての取り組み実績)、ブランド力(市場性)、アプリケーションの多様性(量子暗号を用いたアプリケーションやサービスの多様性)、実証規模、サービス価格競争力を選択した。現時点でも、量子暗号装置の性能は他機関に対して10倍以上の性能を誇り、標準化/安全性においても国際標準化を主導、ブランド力で(株)東芝と日本電気(株)がICTインフラ系の強力なブランドによる潜在的な総合力を有し、サービス価格競争力(コスト、市場性)では、その指標となる鍵ビット単価(=装置価格/鍵生成速度)を他機関に対し1/5~1/10程度で実現できるポテンシャルを持つ。このように、性能等の総合力では他機関を上回るが、実証規模は国策で量子暗号装置の拡充を図る中国の後塵を拝している。本SIP光・量子課題終了後も実証規模に関しては変わらないと予想されるものの、装置価格のさらなる低コスト化、実証分野の拡大、主導的な国際標準化活動等から、総合力で日本が引き続き他をリードすると予想している。

*1: 国際電気通信連合-電気通信標準化部門

*2: 国際標準化機構/国際電気標準会議

次世代アクセラレータ基盤技術では、明らかな他の類似の取り組みはないが、評価軸に技術の適用対象の広さ、対応可能なアクセラレータの機種数、インタフェース自体の拡張性のほか、社会貢献性、コストを選択した。本研究課題における開発技術は、その設計思想から、適用範囲の広さ、対応可能なアクセラレータ機種数について大きな優位性を持つと同時に、理論的な定式化やそれに基づくプロトタイプ設計、実ソフトウェア設計を通じて拡張性(自動化、コデザイン性)にも優れる。2022年度は物流倉庫における作業者最適配置への取り組みが進展し、(株)ベルメゾンロジスコの実現場での社会実装に至ったほか、住友商事(株)による事業化も始まった。また、京都大学との連携による半導体デバイスの性能向上に結び付くデバイス設計の最適化提案を継続し、Amazon AWSと連携し、主要国内企業50社の計算技術者に量子計算機(実機)を活用可能な環境を提供するなど、適用市場拡大に向けて貢献した。また研究面でも、化学計算分野での研究成果はIBMチューリッヒ研等での個別セミナー実施に繋がるほどである。このように、本SIP光・量子課題終了時には、社会貢献度(オープン開発、コミュニティ育成)での優位性が向上し、さらに、多くの業種からなるコンソーシアム参画企業との対話から得られたユーザーフィードバック、POCによる取り組みを通じた導入コスト低減による優位性を獲得すると予想することから、社会実装の面でも極めて高い市場性と良好なコスト性も伴うソフトウェアとなることが見込まれる。

GPS化戦略の波及加速パイロット拠点の形成では、評価軸として、SiCパワーデバイスにおける高性能化及び信頼性の向上に資する技術であるか、また量産ライン導入後に他の製造プロセスに適用可能な拡張性を備えた装置であるかに加え、市場性とプロセスコストを選択した。本SIP光・量子課題終了時は、他機関では信頼性が向上する一方で、レーザー波長選択性や装置構成の問題で高性能化や拡張性が改善されず、高温イオン注入+ファーンエスアニールなどの汎用性の高い一般的なプロセス技術は、SiCパワーデバイス市場拡大に

向けたボトルネックを解消する技術とは成り得ないと考えている。一方、本プロジェクトで取り組むレーザードーピング加工装置（メーカーと共同開発）は、量産工程を想定したスキャン照射条件のチップレベル評価で良好なコンタクト抵抗が再現良く実現できることが重要である。すでにチップレベル評価で良好なコンタクト抵抗が再現できており、ウエハレベルでの再現性が得られる目途もたっているため、本 SIP 光・量子課題終了時には、メーカー要求レベルを実現できる。世界的な脱炭素の潮流に沿って、EV の加速度的な開発が進み、パワーデバイスの市場予測も大きく上方修正されている。このように他の競合技術と比較して優位性を持つ取組みであり、CPS 化システムにより開発を加速することで、世界の潮流に乗った企業の設備投資時期を逃さず量産装置の市場投入が実現できると考えている。

② 研究成果で期待される波及効果

【あらゆる製造が CPS 化できることの先導実証だけでなく、電子部品、医療分野、農機、自動車、安全保障などの幅広いユーザーへ成果の波及効果が見込まれる。】

本 SIP 光・量子課題は、モデル化の最も困難なレーザー加工をテーマに CPS を構築し、スマート製造を実用化し、スマートモビリティ、スマートエネルギー領域に波及させ Society 5.0 の実現に貢献することに取り組んでいる（図 1-2 参照）。CPS 化が困難なレーザー加工を先導実証の例題とし、CPS 化が達成可能なことを示すことで、殆どの製造システムのスマート化の可能性を実証する野心的な取組みである。すでに多くの成果が各研究課題で得られており、新技術を新製品や新機能へ展開、生産性向上へ貢献、海外研究機関との共同研究に発展、実デバイスを海外機関が評価することによる海外市場展開活動、安全・安心な通信・データの利活用実績の蓄積、開発した次世代アクセラレータ基盤技術ソフトウェア群の企業による活用の蓄積等により、新たな応用展開の拡充などにつなげる成果に結びついている。

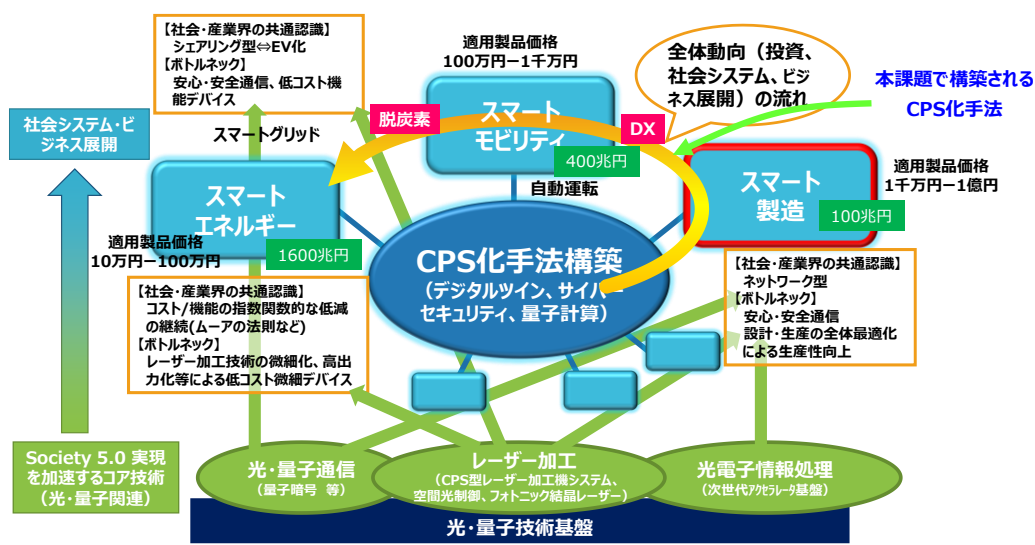


図 1-2. 研究成果で期待される波及効果

CPS 型レーザー加工機システムは、あらゆる製造が CPS 化できることを示す先導実証例である。半導体・電子部品製造向けのマイクロ加工を実演することを皮切りに、他の半導体製造工程の CPS 化、脱炭素関連のモノづくりの CPS 化、スマートモノづくりへと波及し、Society 5.0 の実現を加速することが期待される。モノづくりをはじめとする社会のスマート化はウィズコロナ・ポストコロナのニーズと合致するとともに、生産性の向上に大きく寄与することが期待されている。先端半導体の微細穴あけ等への適用に関しては、半導体・電子部品製造向けの基板への微細穴あけなどのマイクロ加工を CPS 型レーザー加工により実現したことで、台湾 ITRI との協業が進められたほか、国内企業 3 社との連携による先端半導体基板材料への超微細穴あけにも成功した。こうした協業や成果がさらに台湾の半導体製造企業等に活用されるように、東京大学がさらなる企業間連携の拡大を目指している。脱炭素に関連する EV 用二次電池の溶接工程などでは、革新的な生産性向上が期待される新たな分野への適用も開始した。本課題で取り組む CPS 化が困難とされるレーザーモノづくりの CPS 化実現によって企業の投資を阻むボトルネックを解消し、モノづくり全体からスマートモビリティ分野、スマートエネルギー分野への波及を狙う。その際、TACMI (Technological Approaches toward Cool laser Manufacturing with Intelligence) コンソーシアムなどとの連携・展開体制を通じて CPS スマート製造システムの有用性を広く展開することも同時に推進している。すでにマイスターデータジェネレーター (MDG) の有償利用も開始しており、企業等の期待の高さも実感している。

空間光制御デバイス (SLM) の耐光性が 1 桁向上したことに加え、大面積化により、kW 級の CW 発振レーザー加工機や金属 3D プリンタへの展開が視野に入った。こうした 1 桁以上高出力なレーザーに対応可能な SLM をレーザー加工に導入することで、加工のボトルネックの 1 つであるスループットの大幅な向上が見込め、難加工材料の加工に有効な非熱レーザー加工等の高精度かつ高スループットな加工技術の実用化も視野に入った。SLM 搭載のレーザー加工モジュールやホログラフィックレーザー加工機も外注製作で入手可能となり、ユーザー企業が活用するハードルも下がった。さらなる社会実装の展開として、FhG ILT 研究所に SLM 応用ラボを開設したことで、海外の金属穴あけ加工や金属表面のクリーニング処理加工への応用が見えつつあり、海外自動車産業での車載部品加工への活用が期待される。加えて今後、SLM を用いたデジタルフィードバック制御による CPS 型レーザー加工技術の普及により、自動車産業においては軽量化素材加工・固体電池の製造、半導体分野では 5G を支える多層半導体基板・異種材料積層部品等の加工、医療分野においては安全性を確保する透明材料へのトレーサビリティ用マーキング加工などに応用され、日本のものづくり競争力向上に貢献することが期待されている。既に POC で企業と取り組んでいる多層半導体切断の生産性向上では、企業要求をクリアできる見込みも立った。

フォトリソグラフィ結晶レーザー (PCSEL) は、既存の半導体レーザーとは一線を画す、高輝度化・スマート化が可能なレーザーである。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とともに、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、直近の出口として、Society 5.0を支えるスマートモビリティ等のキーデバイスとして期待され、既に LiDAR への適用を実証している。工場のロボットの自動走行、農機・建機の自動化等を支える LiDAR 等のセンシング応用において、フォトリソニック結晶レーザーのレンズフリー特性（ビーム整形光学系不要）、高い環境変化耐性などの特徴により、高分解能化、小型・簡略化、動作安定化が可能であり、大きなイノベーションが期待される。また、将来のスマート加工への展開において、10W 級 CW フォトリソニック結晶レーザーでの金属表面加工等を実現し、さらに 50W を超える CW 動作にも成功しており、今後、フォトリソニック結晶レーザー単体あるいは少数の合波によるさらなる出力増大を図り、コンパクトかつ高効率の光源へと展開することで、従来の大型レーザーの置き換えや補完が期待され、生産性の向上やカーボンニュートラルの観点からも、大きなイノベーション創出が期待される。さらに、スマート化（電氣的ビーム走査やストラクチャード・ライトの出射機能の付加）により、機械駆動部（サイズ増大、コスト増大、信頼性低下要因）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、高度化など、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 方式の構築等への寄与も期待される。以上に加えて、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。追加で進めている PCSEL 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ることで、国内のみならず海外への展開も加速し、幅広い分野での PCSEL の市場展開へと繋がることを期待される。PCSEL は小出力から大出力までのあらゆる応用において、既存のレーザーを席捲するポテンシャルをもち、今後、モバイルや通信、照明分野等も含めて、より広い市場へと波及していくことが期待される。

量子暗号技術が取組む「暗号解読技術が進展してもセキュリティが危殆化しない量子セキュアクラウドサービス技術」は、本 SIP 光・量子課題によって実現される新規性の高い技術であり、世界初となる試みである。医療分野、生体認証分野、製造分野、金融分野、安全保障分野など様々な分野に恩恵をもたらすと期待されており、SIP 期間中に実施した POC により、以下の分野での有用性が確認された。量子通信では、医療分野のゲノム解析の大規模・実データ通信、生体認証分野ではアクセス管理上の重要な個人情報通信、製造分野では企業秘密の通信や管理、金融分野では顧客取引データ等のバックアップで光・量子通信の成果が活かされた。また本 SIP 光・量子課題の成果も踏まえ、参画企業が独自に海外での POC を進めており、世界展開も進展している。量子暗号技術や量子セキュアクラウド技術では、本 SIP 光・量子課題が国際標準化活動でも主導的な役割を果たしており、既に 11 編の勧告を成立させ、日本の技術を世界標準にすることで、日本の技術を海外展開しやすくしている。さらに秘密分散技術や秘匿計算技術を加味した量子セキュアクラウドでは、電子カルテ情報の管理・運用でも、有用性が確認された。今後は、強力な計算エンジンを量子セキュアクラウド内に取り込み、データの安全な二次利用を可能とすること、さらには昨今の個人情報

を域内でのみ利用する方向での各国の法整備を利用し、ゲノムデータや金融関連データの安全なデータベースのプラットフォームとして期待される。

次世代アクセラレータ基盤技術は、多くの分野の機械学習、組合せ最適化問題において、より高精度、より高速に最適解をユーザーに提供することができる潜在力を有しており、GPS 型スマート製造、物流・配送、材料開発、センシング・データ解析などでの波及が期待されている。製造全体では、複雑化した各種工程を効率よく実行するスケジューリング最適化や、労働負担軽減を行うためのロボットにおいて必須の技術であるセンシングのための機械学習やロボットによる部品ピッキング・運搬の計画最適化等への適用が期待される。2021 年度に続き、PCSEL の性能向上につながる新規構造提案を継続実施し、さらなる性能向上の提案につなげたことから、様々な半導体デバイス設計の最適化への適用が有用であることを検証した。またレーザー加工に対しては、対象スケール（マイクロ、マクロ）や対象材料に対して、レーザーと材料の相互作用によって駆動される光物理化学現象の光学・熱シミュレーション、適切な加工パラメータの算出の一部分を機械学習によって実行すること等が期待される。2022 年度はレーザー光源開発・レーザー加工時の状態解析への応用を実施し成果をあげた。物流・配送では、次世代アクセラレータは、モーダルシフトや人員配置等の各種リアルタイム最適化（考慮すべき制約として、倉庫数、顧客拠点数、配送指定時間・場所等がある）、貨物を運ぶトラックの配車スケジューリング、需給予測のための機械学習等への活用が期待される。2022 年度は物流倉庫での実作業に対応するため、作業配置最適化エンジンを開発し、(株)ベルメゾンロジスコの倉庫現場に社会実装され、親会社の住友商事(株)が SmileBoard として事業化した。センシング・データ解析では、特にデータ取得の際にノイズや誤りを含む可能性が有る場合の解析に、必要なデータと不要なデータの識別といった取捨選択、すなわち組合せ最適化で活用され、実社会において効率的かつ持続可能な社会システムの構築や、高度な医療技術の提供や、新たなサービスやソリューションの創出と提供が可能になることが期待される。既に企業と連携し、最適な次世代通信基地局配置ならびに位置情報解析を実現しており、その成果の一部は通信事業者により、次世代通信に向けて限られた周波数資源の利用最大化に活用されている。このほか、材料開発では励起状態計算や量子ダイナミクス計算が得意な NISQ 実機を利用した開発を進め、量子化学計算を実行できるソフトウェアへ研究開発成果を実装し、実証した。太陽電池、CO₂ 吸着材、人工光合成触媒等への貢献が期待されている。

GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成では、九州大学が課題内連携先の東京大学から提供された GPS 化のノウハウである「プロセスを GPS 化するための基盤技術群」と「GPS 化推進拠点を構築する枠組」等を半導体材料のレーザー改質加工プロセス分野に適用し、課題抽出から解決策を包括的に提示するパイロット拠点を形成することを主眼に活動を行っている。半導体関連企業が集まる九州地区の利点を活かし、様々な企業や研究機関との連携を推進し、新技術の確立と新たな市場創出活動を推進するため、拠点機能の拡充を行っている。2020 年の光・量子プロセス研究開発センターの設立に続き、2022 年度は光・量子プロ

セス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、システム LSI 研究センター、及び量子コンピューティングシステム研究センターの 4 センターが一体となって活動できる組織運用体制に発展した。この 4 センター一体の組織体制「CPS 化推進半導体拠点」は、九州大学総長の指示により実現しており、CPS 化のニーズを持つパートナー企業の課題に幅広く取り組むと共に、民間資金により持続的な拠点として発展させ、モノづくり CPS 化の社会実装を効率化する活動を実施している。こうした拠点形成、機能の拡大により、「九州大学拠点形成による波及効果」が拡大し、共同研究や共同開発を進める企業数も増加し、2019 年度 7 社であった綺羅 (KILA: Kyushu University Innovative Laser Application) コンソーシアムへの参画企業数は、2020 年度には 20 社、2021 年度には 25 社、2022 年度には目標 40 社を超える 41 社に達しており、拠点形成・運用拡大が高い波及効果を生んでいる。

③ 達成度 (1) ※5 年間の設定目標に対する達成度

【全研究課題が研究計画以上のペースで研究活動を完了し、世界トップレベルの課題目標を達成した。】

最終年度も、新型コロナウイルスの世界的な拡大が収束したとは言えない中、ウクライナでの戦争がサプライチェーンへさらに大きな影を落とし、その影響は世界各地、あらゆる業態に及び、未だその収束が見えていない。そのような状況下、本 SIP 光・量子課題の全研究課題の技術開発及び社会実装は当初計画以上のペースで進み、本 SIP 光・量子課題の事業開始時の主要な世界トップレベルの設定目標を達成した。研究課題ごとの 5 年間の主要成果概略は以下の通りである。なお、初年度にあたる 2018 年度は、レーザー加工、光・量子通信で研究開発計画書に記載の開発目標を完遂するのにふさわしい研究責任者を PD、サブ PD を含まない外部有識者から構成される第三者的な公募審査委員会の判断で選定した。見識の高い審査員の集結に成功したこともあり、最高レベルの研究責任者の採択に成功し、2018. 11. 15 から活動を開始した。

③-1. CPS レーザー加工機システムの主要成果

【2018 年度】

CPS 化が難しいとされるターゲットを扱うために、その困難さの分析に基づく対応方法のブレークダウンを適切に実施した。これまでの試行実績に基づき終了時の達成も十分に見込める研究開発計画策定を行った。また、比較的新しいパラダイムを、ユーザーのハードルを下げて速やかに波及させる目的に向けて、TACMI コンソーシアムの加工プラットフォームへ提供することによって成果技術をユーザー企業・材料企業等に迅速に評価してもらうことと、必要な技術を直接商品として受け渡せる体制を整備するという戦略へとブレークダウンした。さらに、その実現に必要な連携・調査・交渉等を計画通り順調に進展させた。

【2019 年度】

- 1) 自動取得した良質な加工データを基に、深層学習(AI)で解析するという新規の要素技術評価方式を実加工である穴掘り加工の過程に適用し、世界で初めての実用的シミュレーション手法の検証に成功した。本手法の検証は技術評価委員からも高く評価され、世界に先駆けた成果であるとともに、良質なデータ蓄積で大きく先行することでGPSプラットフォームへ向けた基盤構築の第一歩となる。また、具体的事例としてCFRP、ガラス等の難加工性材料と呼ばれる加工が困難な素材に対して、革新的な実加工が可能であることを示した。
- 2) GPSのコアとなる「検証されたシミュレータ」を生成するマスターレーザー加工機システム(その後「マイスターデータジェネレーター」と改名)を技術供給元のプラットフォームとして展開するクローズド部分と社会実装先の企業に広く展開するオープン部分との分離設計に成功し、オープン/クローズ体制によるGPS化技術波及展開の確かな方向性を得た。
- 3) 連携先のTACMIコンソーシアム企業へのGPS化システム展開に必要な制度上のすり合わせや、POCによる拠点連携設計等のエコシステム構想を具体化させることにより、TACMIコンソーシアム会員数の増加率が約2倍に向上した。

【2020年度】

- 1) マイスターデータジェネレーター(MDG)の運用を開始し、大規模データ自動取得を開始した。データの取得に際しても、AIを用いた自律的な最適化を導入し、加工リードタイム9割削減に目途が立った。取得している大規模データを基に、すでに検証済みの実用的シミュレーション手法を深化させた。また、MDG自身もデータ取得効率や新たな計測機器の導入など、これまでの知見に照らして更新しており、順調に進展した。
- 2) 現場におけるスマート製造を担うスマートレーザー加工機のプロトタイプを設計・構築し、試験を開始した。MDGによって抽出したデータを活用したスマートレーザー加工機のデモンストレーションを開始してMDGで生成したレシピによってスマートレーザー加工機を稼働できることを確認し、TRL5を達成した。
- 3) グローバルベンチマーク活動や、深いサプライチェーンの各層におけるパートナー候補企業からの聴き取りを受けて、社会実装バックキャスト分科会において議論し、幅広いお客様に対応するため、間口を広げて展開できる体制へと改訂した。また、TACMIコンソーシアムや九州大学パイロット拠点と連携し、GPS化拠点としてスマート製造を推進・普及する活動を継続している。開発したGPS型レーザー加工機システムを年内にコンソーシアムの加工プラットフォームに提供し、それにより、ユーザーのニーズに合致したシステムの設計と運用を行い、GPS型レーザー加工機の社会実装を加速した。

【2021年度】

- 1) MDGが本格稼働し、AIによる自律的なパラメータ探索による効率的なデータ収集が可

能になり、高品位なデータ取得を（上方改訂した目標である） 300 data cycle/day の規模で達成した（職人の 30 倍以上の速度）。データ蓄積の加速に伴い、データベース拡充・シミュレータの高度化が進んだ。サイバー空間上の「エージェント」アプリが、現場の加工機を MDG に仲介するモデルで、レーザー加工の CPS を具体化した。ユーザーが、職人ではなく誰であっても、バックエンドリソースを用いて効率的に最適なレーザー加工を実施可能になることを目指して、システムの開発を進めた。

- 2) 現場におけるスマート製造を担うスマートレーザー加工機と MDG を連携するシステムの運用を開始した。装置ごとの機差定量化と相関するデータの収集手法の探索を進め、機差の補正が実現可能であることを確認した。また、例題として Society 5.0 科学博の CFRP 微細加工を提示したが、目標とする加工リードタイム 9 割削減が現実のものとなった。
- 3) TACMI コンソーシアム加工プラットフォームにおける MDG の有償利用を開始し、利用評価に基づく設計へのフィードバックを得た。また、TACMI コンソーシアム CPS 化推進 WG 内での利用ニーズ等に基づき体制を整備したほか、新たにレーザー溶接工程への展開も開始した。

【2022 年度】

- 1) 開発したレーザー加工 CPS と接続し、スマートにレーザー加工を実施できるスマートレーザー加工機を用途に応じて構築した。構築したスマートレーザー加工機によって CFRP の微細加工や半導体後工程における微細穴あけ加工などを実施し、実際の製造現場で活用できることを示すとともに、TACMI コンソーシアム加工プラットフォームにも提供し、パートナー企業による試用とフィードバックを受けた。このことから、開発したスマートレーザー加工機群は開発リードタイム 9 割削減を実証するとともに TRL7 を達成した。
- 2) MDG のデータ蓄積は、人力と質的に異なる領域となる 1000 data cycle/day を達成し、レーザー加工 CPS の中核として稼働している。既に 2021 年度開催の Society 5.0 科学博における CFRP 加工や 2022 年度の ABF*の微細穴あけ加工などを例題として、開発リードタイムを 9 割削減できることを明らかにするとともに、難加工材料の加工デモンストレーション実施し、当初の本研究課題目標を達成した。
- 3) レーザー加工 CPS の除去系加工以外への展開として開始した溶接工程対応拡張に関しては、MDG に溶接工程ラインを導入し、全自動でのデータ収集を開始した。溶接工程においては、引張試験などの破壊試験を含む煩雑な評価を必要とするが、これら工程を全自動で実現できることが確認でき、リードタイム削減に資するデータ収集の目途が立った。SIP 終了時までデータ蓄積を進め、溶接工程における CPS 化技術開発に取り組む。（穴あけ加工のみならずレーザー溶接工程や SLM を用いた加工の最適化などにも取り組んでおり、予想を上回る成果が得られた。）

*…味の素ファインテクノ(株)が製造する半導体の層間絶縁基板材料。高性能半導体 (CPU) の絶縁材に使われており、現在では全世界の主要なパソコンなどの層間絶縁材のほぼ 100%のシェアに達している。

③-2. 空間光制御デバイス (SLM) の主要成果

【2018 年度】

「時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」という設定目標の達成に向け、「耐光性 SLM デバイスの作製・評価に関する基礎評価実験」、「大面積 SLM の試作条件出しのための基礎評価」、「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目指した設計、仕様策定、評価実験」を行った。

【2019 年度】

- 1) レーザー加工の革新的な生産性向上 (10~100 倍) に貢献する新構造の SLM を実現した。世界最高レベルの耐光性 (従来比で単位面積あたり約 10 倍) をプロトタイプで達成し、従来限界の 10W を越え、産業用に展開可能な 100W レベルのレーザーが使える目処がたち、GPS による加工レシピの高速最適化とそれを支えるデジタルフィードバック技術の確立へ前進した。さらに、従来品に比較して約 100 倍の耐光性向上と波長域拡大 (紫外領域) につながる世界最大級の大面積 SLM (30 mm x30 mm) の設計も完了し、一次試作が完了した。
- 2) 実用化加工プラットフォーム (PF) の稼働とデジタルフィードバック制御の有効性を確認した。2019. 10. 1 の稼働直後から企業等 10 件ほどの引き合いがあり、PF 運営・自立への手応えを感じた。レーザー加工機の機差・環境に依らず、安定した加工性能を実現する加工制御部の試作が完了し、世界最高並列度の多点加工 (均一性を保ちつつ、1000~1500 点に分岐) を実証した。
- 3) 光産業創成大学院大学と連携し中部地区のグローバル企業へアウトリーチした。レーザー加工製造ラインの工場を多数有する有力企業から高い評価を受け、現場レベルでの具体的な加工検証へ進展した。

【2020 年度】

- 1) 高耐光性 SLM プロト機の安定性、基礎特性を評価し、パルス耐光性を従来比約 10 倍に向上した高耐光性 SLM の開発を達成し、目標スペック (耐光性: 平均強度 100W レベル、かつ位相制御精度: 1/100 波長以下) に目途をつけた。さらに、高耐光性 SLM を東京大学等関係先で実使用評価を開始したほか、フラウンホーファー研究機構において国際ベンチマーク評価を実施した。
- 2) 宇都宮拠点に加えて、浜松拠点を 2020 年秋に構築し、SLM を組み込んだレーザー加工

用システムを構築した。半導体デバイス加工や複合材料微細加工などで、連携先顧客ニーズに基づく加工評価を実施した。

- 3) 一般産業用途レーザー、SLM とデジタルフィードバック機能を組合わせたモジュールを構築し、溝加工でばらつき 10%以内の加工が可能なフィードバック制御を確認した。
- 4) 高耐光性 SLM を用いたサテライト地域拠点（浜松地区、宇都宮地区）の加工機を活用し、複数の国内コアレーザー関連メーカーと、社会実装に向けた加工テストを実施した。

【2021 年度】

- 1) 高耐光性 SLM を実装したレーザー加工機を各地域拠点で運用を開始し、半導体関連、ガラス材料、自動車部品の国内主要メーカーとの加工実証実験を実施し、デジタルフィードバック制御のユーザビリティ向上を推進した。また、室温±10°Cの環境温度変化に対応するため水冷式構造を検討した。
- 2) 大面積 SLM の平坦度向上のため、動作可能な大型チップの反りの低減を実現した。また、位相制御用表示レベルの最適化、加工実用化のため新規駆動回路の設計を行い、ハードウェアが完成した。
- 3) 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、本格稼働させた。また、海外研究開発機構（ドイツフラウンホーファー研究機構、ILT 研究所、IWS 研究所）を活用し、高耐光性 SLM の高強度レーザーに対する実機評価を依頼し、超短パルスレーザーおよび高強度 CW レーザーに対して良好な結果を得た。さらに、フラウンホーファー研究機構の持つ産業分野ごとのネットワークを活用した、応用開発の進め方について議論し、SLM 応用ラボを ILT 研究所に設置することで合意した。また、コロナ禍でも社会実装を円滑に行うため、バーチャル展示室を立ち上げ、加工事例などを公開し、ユーザーニーズも収集した。

【2022 年度】

- 1) 従来と比べ 4 倍以上（有効エリア 10 倍）の高耐光かつ大面積の SLM を開発した。これにより波長域拡大や高出力レーザー加工用途が拡大した。また従来最大でも 100Hz 程度の動作であった SLM を 1MHz で高速動作可能な 1 次元専用機能 SLM 試作機を完成させた。
- 2) ユーザーとの連携により POC を実施し、課題である高品質・高スループットなレーザー加工を実証した。さらに高出力なレーザーと組み合わせて優位性を示すことができる見込みで、ユーザーによる事業化を促進した。
- 3) ユーザビリティ向上のために、SLM を用いたデジタルフィードバック制御による多点強度均一化や加工データをフィードバックした安定加工を実証した。多点加工ならではの一括処理による高速化をユーザーが意識せず使える制御技術を実現した。
- 4) 浜松ホトニクス(株)、宇都宮大学、東京大学が連携し、SLM 搭載加工モジュールを MDG

に搭載した。SLM を用いた加工が AI によって最適化できることを実証した。国内 Sler に SLM 搭載加工モジュールの技術移管をしたことで、外部への展開を加速する準備を整えた。

- 5) FhG のネットワークやユーザー連携の関係を活かし、海外ニーズ情報の取込みやグローバル展開に活用することを狙い、海外拠点の位置づけでもある FhG ILT 研究所に「SLM 応用ラボ」設置した。

③-3. フォトニック結晶レーザー (PCSEL) の主要成果

【2018 年度】

- 1) フォトニック結晶レーザーの高輝度化の肝となる「2重格子フォトニック結晶」について、構造パラメータの系統的変化に対する面内光強度分布の関係を明らかにし、最適パラメータの抽出の第一次検討を完了した。
- 2) 安定した CW 動作のための、放熱・実装治具の第一次設計を完了した。さらに、高ビーム品質・コンパクト7合波系の第一次設計も完了した。
- 3) 短パルス動作技術に関して、数 10 ナノ秒パルス駆動時の応答特性を明らかにした。
- 4) 2次元的な電子的ビーム走査に関して、結晶再成長法によるデバイス構造作製に適したフォトニック結晶構造の設計・試作を完了した。
- 5) 機械学習 (AI) との融合に関して、マトリクス・トランジスタの導入による電流注入制御法の基礎として、トランジスタの設計等を完了した。

【2019 年度】

- 1) 高輝度化のデバイス基盤技術の開発に関して、180° 回折と 90° 回折の消失性干渉を利用するという新たな発想に基づきフォトニック結晶構造を深化させ、発振面積 1mmΦ 以上という世の中に例のない大面積において、単一モード動作を実現可能なフォトニック結晶構造を、理論的に世界で初めて明らかにした。本設計に基づき従来比で 4 倍の面積となる 1mmΦ の大面積デバイスでの安定発振を実現し、出力~70W、拡がり角~0.1° (FWHM) を実現し、世界最大の輝度 $600\text{MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を達成することに成功した。
- 2) 直近の出口の一つとしての LiDAR への展開に関する研究開発として、10 ナノ秒以下のパルス駆動回路の設計・試作を行い、高速パルス動作を実現した。さらに、高輝度特性を活用した複雑なレンズ系フリー LiDAR 動作のデモンストレーションにも成功し、非常に多くの (>15) ユーザー企業、機関から熱い問い合わせを受け、MTA 契約を通じた試料の提供を開始した。さらに、追加 POC 事業にてユーザーと連携した PCSEL 搭載 LiDAR システムの構築を開始するなど、世界的に例のない試みを進めた。
- 3) 将来のスマート加工応用を見据えて、より大面積のワンチップデバイスによる高出力動作に向けた検討を行い、3mmΦ への大面積化のプロセス技術を構築した。本技術により、その第一試作 (世界初) に成功し、ワンチップ高出力デバイスの可能性を示した。

コンパクトな超小型合波システムの検討（合波光学系の設計、合波予備試験、合波用アレイデバイスの開発）をも行った。

- 4) スマート化に向けて、独自の変調フォトニック結晶構造による、ビーム出射方向の制御を実証するとともに、当初の計画を越えて、アレイ化による広範囲の電氣的 2 次元ビーム走査デバイスのプロトタイプ試作・動作検証も完了（世界初）した。
- 5) 機械学習 (AI) との融合に関して、電流注入を制御可能なマトリクス・トランジスタ集積型フォトニック結晶レーザーデバイスの試作を完了し機械学習方法の基礎を築いた。

【2020 年度】

- 1) 2 重格子フォトニック結晶構造を深化させたデバイスの作製、上方取り出しの最適化（DBR 構造のさらなる深化）等の実験評価および分析を行い、高輝度化の要素技術を確認した。これらの要素技術の開発を通じて、 $500\mu\text{m}\sim 1\text{mm}\phi$ デバイスにおいて計画を上回る狭発散角 $< 0.1^\circ$ (FWHM) で、スロープ効率 $0.8\sim 0.9\text{W/A}$ を実現することに成功した。
- 2) 高輝度特性を活かして、高い分解能が実現可能かつレンズフリーにより小型化が可能なフォトニック結晶レーザー搭載 LiDAR システムの開発に、世界で初めて成功（ユーザー企業と連携）。テレビ・ネット放送（NHK 等 3 局）、新聞・記事（読売新聞、日刊工業新聞等、35 新聞社以上）等に多数報道。さらに、ユーザー企業からのフィードバックに基づき、環境温度 $\sim 50^\circ\text{C}$ でも効率・出力を維持可能となるようにデバイスを深化、性能向上を実現した。
- 3) $3\text{mm}\phi$ デバイスで、 100W 級動作（パルス）にも成功するとともに、大面積デバイスの高ビーム品質の実現に向けて、 180° と 90° の回折の打消し合いに関して、厳密に定式化し、決定論的な面内結合係数（エルミート結合）制御のための重要な指針を見出した。また、ディラック点の形成を、実験的に示すことにも成功した。また、CW 動作時の発熱による温度分布を考慮した温度分布補償法を確立するとともに、放熱性を高めるための狭ピッチフィンを導入した放熱治具の導入、高熱伝導ヒートシンク + 熱膨張整合ヒートシンクを組み合わせた実装法を構築し、要素技術を確認することにより、CW で $1\text{mm}\phi$ デバイスで、 10W 級かつ $M^2\sim 2$ という高ビーム品質動作を実現した。またワンチップ半導体レーザーで初めて金属表面加工に成功した。さらに、 10cm 以下のコンパクトな 7 波合波モジュールの構築を行い、理論通りのビーム品質での合波を実証した。
- 4) 様々な方向へとビーム出射可能なフォトニック結晶レーザー技術を確認し、ビーム走査（複数方向の同時走査も含めて）を実現した。ビーム走査技術を用いた、世の中にない新しい LiDAR のコンセプトを考案し、ユーザー企業との連携による POC にも成功した。（本成果が、Nature Communications 誌に掲載（2020. 7. 17）され、新聞・テレビ等で報道された。）
- 5) 機械学習 (AI) との融合によるオンデマンドなビーム制御に向けて、電流注入分布とビーム形状（ビーム拡がり角）との相関関係の学習のために、畳み込みニューラルネット

ワークを構築すると共に、多数のデータを収集して学習することで、高い精度での予測が可能となることを実証した。さらに、PCSEL 製造の CPS 構築を推進した。具体的には、機械学習や 3 次元結合波理論等の高度解析法を用いて、フィジカル空間でのデバイス作製工程（エッチングや MOVPE 法による埋め込み再成長）のデジタルツインを形成し、サイバー空間で製造の様子を模擬して課題解決を行い、それを実空間にフィードバックするシステムの構築を推進した。

【2021 年度】

- 1) パルス動作における輝度増大化を図り、既存の半導体レーザーの 10 倍以上の $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を超える輝度の実現に成功した。また、ユーザー企業からのフィードバックを踏まえて、 $-40\sim 100^\circ\text{C}$ という幅広い温度範囲で、安定したレーザー発振にも成功した。さらに、ユーザー企業と連携した小型 LiDAR システムの構築・評価を行い、レンズフリー特性を活かしてクラス最小の高分解能 PCSEL 搭載 LiDAR システム（従来の $1/3$ の体積）の開発に成功した。本成果を Society 5.0 科学博で展示し、広く発信した。
- 2) 大面積高輝度動作を安定に実現可能な 2 重格子フォトニック結晶構造の設計を推進するとともに、 $3\text{mm}\Phi$ デバイスの試作・詳細評価を行い、パルス駆動で 150W 出力・高ビーム品質動作を実現した。さらに、 $3\text{mm}\Phi$ デバイスの高ビーム品質 ($M^2\leq 2\sim 4$) 動作実現のための設計の深化を図り、非エルミート性をも制御することが、高輝度動作に重要なことを見出すことに成功した。本設計に基づき、 $3\text{mm}\Phi$ 2 重格子の高度な制御を実験的に行った結果、高ビーム品質動作可能な理想的なフォトニック結晶構造を作製可能であることを示すことにも成功した。
- 3) CW 動作に関して、まず、 10W 級の CW フォトニック結晶レーザーを高度化するとともに、加工システムプロトタイプを構築し、表面加工のデモンストレーションを実施した。さらなる高出力化に向けて、 $2\text{mm}\Phi$ へとデバイスサイズを拡大し、電流・温度分布を制御したデバイスの試作を行うとともに、高度な放熱実装技術をも構築した。これにより、単一チップによる世界最大 30W 級 CW 動作の実現に成功した（本成果が半導体レーザー国際会議で金メダルを受賞。）。さらに、ビーム品質を低下させない、波長・偏光合波方式による 4 波合波の POC 実験を行い、合波後も高いビーム品質を維持しながら、光学系性能に近い合波効率 93% （出力 ~ 4 倍）の合波出力を得ることに成功した。
- 4) 電氣的ビーム走査技術とその応用に関して、様々な方向へとビーム出射可能なフォトニック結晶レーザーを活用した新しいコンセプト（ビーム走査+フラッシュ型）の非機械式 LiDAR について、ユーザー企業との連携の下、小型化（従来の $1/15$ ）に成功した。その際、ユーザーの希望に基づき、広範囲にわたりフラッシュ照射が可能な新たな光源を開発し、有用性を評価した。さらに、ビーム走査技術を発展させ、多点を同時に出射し、ワンチップでストラクチャード・ライトを形成可能なデバイスを新たに開発し、投光系光学系フリーのモバイル向け測距モジュールの構築・POC 実験に成功した（他のユ

ーザー企業との連携)。

- 5) 機械学習 (AI) との融合に関して、畳み込みニューラルネットワークを用いたビームパターンと電流分布の大規模データを収集した。それを用いた学習を通じて、(パルス状態の)ビーム制御の検討を行い、実際に目標とするビームパターンを高精度に実現することに成功した。さらに、CW 駆動時のビーム制御に向けて、温度の影響をも取り入れた高度化をも実現した。また、フォトリソ結晶レーザー製造の GPS (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を形成) について、高度な 1mmφ 以上のデバイスの特性を高精度に解析可能な RCWA 法等の解析法を導入し、高度化した。

【2022 年度】

- 1) パルス動作 PCSEL の高輝度化 ($>1.5\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) を実現するとともに、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となり、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 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 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総合的に実証することに成功した。さらに、高輝度 PCSEL を搭載した、レンズフリー小型・高分解能 LiDAR (名刺サイズ) を無人搬送ロボットへと適用し、スマートモビリティへの展開の実証にも成功した。それに加えて、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に向けて、量子計算をも活用した設計の高度化を図り、サイドローブ低減や偏光比の向上を実現することに成功した。さらに、信頼性評価も行い、PCSEL が高温動作や温度サイクルに対して高い安定性・信頼性があることを実証することにも成功した。併せて、高速・簡便なナノインプリントリソグラフィ法により PCSEL を開発し、電子ビーム露光によるデバイスと同等の性能を実現し、PCSEL 量産の可能性を示すことに成功するなど、当初の計画を超える成果が得られた。
- 2) 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し、ユーザー企業への MTA 提供も行い、CW 動作フォトリソ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成功した。さらに、ユーザー企業とも連携し、CW フォトリソ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、金属 (ステンレス) 表面の様々な加工デモに成功した。
- 3) さらなる大面積化 (3mm~10mmφ) のための基本方針を体系化し CW100W~1kW への設計指針を確立した (本成果が、Nature Communications 誌に掲載 (2022. 7. 4) され、新聞・雑誌等で多数報道された)。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、まず、パルス動作で、回折限界に近い $\sim 0.045^{\circ}$ という極めて狭い拡がり角を実現した。続いて、単一素子から、高ビーム品質を保ちつつ、世界最大の CW 50W を達成することに成功し、大面積デバイス

の有効性を明らかにすることに成功した。また、将来の kW~10kW 級モジュールの実現に向けた、合波、冷却、電源技術等の重要要素技術の構築をも完了し、合波モジュールのプロトタイプを構築した。

- 4) 電氣的ビーム走査光源および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 PCSEL を深化させた。さらに、これらを用いた非機械式の新たな小型 LiDAR（フラッシュ式とビーム走査式の利点を融合した LiDAR）において、視野範囲（FOV）内の低反射率物体の自動検知による追尾・測距に成功するなど、当初の計画を大きく超える成果が得られた。さらに、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、多点同時出射アレイデバイスの構築や、広 FOV 動作（~100°）の W 級動作に成功した。
- 5) 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した。また、フォトリソ結晶レーザー製造の GPS 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、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のシステムのさらなる深化を図り、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高精度に予測可能な GPS の構築に成功した。

③-4. 光・量子通信の主要成果

【2018 年度】

量子暗号装置の信頼性向上と低コスト化のための課題を洗い出し、基本部品の選定と試作設計を完了した。量子暗号技術の標準化に関しては、国際的駆け引きが活発化していることを受け、ETSI（欧州電気通信標準化機関）と ITU-T（国際電気通信連合/電気通信標準化部門）において主要な作業部会に出席し、勧告草案・改定案の提出、新しい作業項目の提案を継続的に進め、量子暗号ネットワークに関する提案を基本文書化するなど、日本の主導権の確立に向けて大きく前進した。

量子セキュアクラウドシステムに関して、医療分野、製造分野、安全保障分野等における想定ユーザーにヒアリングを実施し、各用途で扱うべき情報資産を、機密性の度合い、データサイズ、利活用の頻度等の観点から分類・優先付けし、システムの要件定義と基本設計指針の導出を完了した。医療データの安全な保管・交換基盤としての活用に関して、ゲノム解析データのリアルタイム伝送を可能とする高速鍵蒸留装置開発に目途を付けた。

【2019 年度】

- 1) BB84 装置に関し、鍵蒸留処理のソフトウェア化、基板点数削減を完了し製造を開始した。安全性評価理論についての成果を Nature Communications に発表、特許申請、報道発表した。

- 2) 2年前倒しで ITU-T にて量子暗号分野で初となる勧告を発刊した。今後全ての勧告が参照する基本勧告で、NICT、日本電気(株)、(株)東芝が主導して実現した。
- 3) 仙台エリアでのゲノム解析データのリアルタイム暗号伝送の実証に成功した。
- 4) 高知から東京にわたる 800 km 圏で患者 1 万人分 (90GB) のデータを広域分散バックアップ保管し、そこから患者 1 人 (約 1MB) のデータを静止衛星経由で 9 秒以内に復元することに世界で初めて成功した。
- 5) ナショナルスポーツチームの使用するサーバー・データを顔認証+量子暗号・量子セキュアクラウド技術を用いて実装した。サービスプロバイダーから引き合いがあった。

【2020 年度】

- 1) BB84 装置に関し、鍵処理のソフトウェア化、基板統合、部品数削減により、従来比 1/2 の小型・低コスト化に目処をつけ、参画企業が事業化した。CV-QKD 装置に関し、技術移転と準製品化向け 1 次試作が順調に進捗した。
- 2) ITU-T にて、量子暗号ネットワークに関する 5 件の勧告が代替承認され、年度内に 5 件発刊された。ISO/IEC (国際標準化機構/国際電気標準会議) にて、量子暗号装置の標準化活動を強化した (日本寄書数は総数の半数を占める)。
- 3) 電子カルテの秘密分散処理を高速化し、320MB 程度の模擬データを 15 分以内に格納することに成功した。約 5000 人の来院患者 1 日分の差分データを迅速に処理できる実用性を確認した。秘匿計算技術開発が計画通りに進んだ。
- 4) 社会実装
 - ・電子カルテデータ：高知医療センターと都内病院でデータ相互参照を実証し、2020. 10. 22 にプレスリリースした。
 - ・ゲノム解析データ：大規模なヒトゲノム解析データの高速・高秘匿伝送に成功し、2020. 8. 7 にプレスリリースした。
 - ・生体認証分野：実データを用いた運用試験を実施し、361 日間での稼働率 98% を実現し、実用性を実証した。
 - ・SIP「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」チームと連携し、電子カルテの秘密分散保管技術を災害時保健医療福祉活動支援に適用する POC について D24H (災害時保健医療福祉活動支援システム) との接続試験に成功した。
さらに、以下の分野に適用領域を拡大し、社会実装を加速した。
 - ・スマート製造分野：廉価化が可能な CV-QKD 装置で CPS 型レーザー加工のデータ秘匿化に適用した。
 - ・金融分野：証券会社と POC を検討した。また、IC カードメーカーと連携を開始した。
 - ・ポストコロナ時代の技術開発：遠隔医療向け 4K 動画の高秘匿伝送技術を開発した。

【2021 年度】

- 1) 光位相同期の高安定化を実装した装置を完成し、敷設ファイバーでの実装・実証を行った。
- 2) ITU-Tにて鍵管理セキュリティ仕様に合意し、日本の技術を骨子とする8勧告体系整備を完了し、量子セキュアクラウドの標準化を加速した。またISO/IECやETSIにおける装置安全性に関する会合で、世界トップの寄書数(40本)を出して貢献した。
- 3) 300Mbps以上のOTP暗号伝送技術を確立し、仙台圏での量子暗号ネットワーク上において80GBのゲノムデータの分散バックアップの実証に成功した。国際会議で成果を発表するとともにプレスリリース(2021.8.26)を実施し、新聞8紙で紹介された。
- 4) 電子カルテデータの分散ストレージシステムH-LINCOSに実装するHPKI(保健医療福祉分野の公開鍵基盤)準拠のカード(RSAバージョン)を用いたアクセス権制御システムを開発し、Pre-shared keyを用いた電子カルテ閲覧機器の機器認証、顔認証を用いたログイン時の本人認証、さらに本人が有するカード情報によるアクセス権の制御デモも成功した。金融では、野村HD・野村証券と共同で主系、副系を用意しての大容量データ伝送実験を実施し、低遅延性を実現するための1Gbpsを超える高速OTP暗号装置の開発に成功し、大容量金融取引データの量子暗号による高秘匿通信・低遅延伝送の検証に成功した(2022.1.14プレスリリース)。また、課題内連携として、(a) 東京大学柏IIキャンパスでのCV-QKD装置の連続稼働に成功し、製造装置への通信の暗号化に貢献、(b) 京都大学-NICT-慶應義塾大学(株)フィックスターズ間の秘匿回線を構築し、高価値データの秘匿伝送に成功した。

【2022年度】

- 1) CV-QKD方式装置に関し、A方式では短時間の受信信号から安全鍵生成速度を見積もり207kbps@10kmであることを確認し、B方式では装置の光学系を簡略化した評価系において短時間の受信信号から安全鍵生成速度を見積もり2.84Mbps@10km、600kbps@20kmを確認した。いずれも目標とする鍵生成速度(A方式:200kbps@10km、B方式:2Mbps@10km、200kbps@20km)を達成し、古典通信との共存動作が可能であることも確認した。また、ユーザー環境で稼働可能な研究試作品も製作し、準製品化が実現できる事を確認した。
- 2) 想定ユーザー環境にBB84型QKD装置を導入した。保守・性能評価をユーザーと共に実施し、運用ガイドライン及びセキュリティ設計仕様案策定を完了した。今後も継続的にアップデートを実施する。
- 3) 2021年度に80GBのゲノムデータの3拠点への高速分散に成功(2021.8.26プレスリリース)したが、2022年度はさらなる高速化に成功した。また全ゲノムデータの安全な解析システムを想定ユーザーと実用性検証を実施し、その結果がScientific Reportsに論文掲載された(2022.11.17プレスリリース)。
- 4) HPKIに親和性のあるSS-MIX*データの分散バックアップシステム構築と医療関係者と共同での有用性確認を完了させ、世界で初めて耐量子公開鍵暗号をHPKI準拠のカー

ドに実装することに成功した(2022.10.24 プレスリリース)。また分散ストレージの技術を AI ホスピタルのチームに技術移転し、想定ユーザーの拡大に成功した。

*…医療機関を対象とした医療情報の交換・共有のための規約

③-5. 光電子情報処理の主要成果

【2018 年度】

世界的な量子コンピュータの開発・活用に関する社会状況や、既存の研究開発プロジェクト(内閣府「ImPACT」、文部科学省「Q-LEAP」、経済産業省・NEDO「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発事業」との関係・連携を踏まえた議論を進める体制(光電子情報処理検討分科会)を構築した。その議論の結果、光電子情報処理では、古典及び量子コンピュータをアクセラレータとして適材適所で活用することを念頭に、Society 5.0 に資するアプリケーションプログラム全体を高速化・高度化することで、従来の計算方法と比較して、格段に処理や解析を高速化・高度化する次世代アクセラレータ基盤の研究開発に取り組む方向性を決定した。

【2019 年度】

光電子情報処理の研究開発活動の実質初年度にあたる 2019 年度は、2019.8.8 にガバニングボードで研究開発計画が承認された。研究開発計画書に記載の開発目標を完遂するのにふさわしい研究責任者を、PD、サブ PD を含まない外部有識者から構成される第三者的な公募審査委員会の判断で選定した。見識の高い審査員の集結に成功したこともあり、最高レベルの研究責任者の採択に成功し、2019.11.21 から活動を開始した。

(A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術

- 1) 次世代アクセラレータ・コデザインの基本アルゴリズムの研究開発では、アプリケーションプログラムの動作を想定し、次世代アクセラレータ・コデザインの問題設定を明確化し問題を解法するアルゴリズムのプロトタイプを設計した。
- 2) 次世代アクセラレータ・コデザインのライブラリ・API の研究開発では、次世代アクセラレータの統合計算機環境の設計とそのプロトタイプを構築し、統合計算機環境におけるコデザイン・ライブラリの基本設計を確立した。また、物流倉庫における作業者最適配置の実証実験の推進と次世代アクセラレータによる最適化・効率化の可能性を検討した。

(B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

- 1) 送信・実行・受信の時間の評価に基づき、イジング型コンピュータのインタフェースの設計指針として「データの送受信については、データサイズに応じた時間が必要(数 MB/s)」などを決定した。また、API のプロトタイプの仕様を決定し、試作を開始した。
- 2) NISQ コンピュータのインタフェース技術の研究開発では、化学計算を行うのに必要な計算手法をアルゴリズムライブラリとして実装したことで、基底エネルギー・励起エネ

ルギー・エネルギー微分に対応し、NISQ を使った基本的な化学計算が可能になった。また、開発したアルゴリズムライブラリを利用した実行時間ベンチマークを実施し、見積精度向上の指針を得た。

- 3) GPU 等古典アクセラレータのインタフェース技術の研究開発では、次世代アクセラレータと同等のインタフェースを有する古典アクセラレータ実装 (HPC/GPU 等) を行った。また、イジングマシンと GPU アクセラレータによる統合計算機環境の実現とその接続インタフェースの設計を行った。

【2020 年度】

A) 次世代アクセラレータ・コーデザイン技術

- 1) 次世代アクセラレータ・コーデザイン問題の入力プログラムに対し、実行時間と解の品質 (近似度) を多目的に最適化する部分プログラムとアクセラレータの割当問題として定式化を完了した。
- 2) 次世代アクセラレータ・コーデザイン問題に取り組むソフトウェアフレームワークを定義し、そのフレームワークの実装となるプロトタイププログラム開発を完了した。
- 3) 次世代アクセラレータの比較検討を行うための統合計算機環境の設計、及び次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームの実証実験を完了し、2020 年度の目標「各種アプリケーションプログラムと次世代アクセラレータを用いたソフトウェアプロトタイプの開発の完了 (第一段階)」を達成した。
- 4) 構築した次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームを用い、物流倉庫における作業最最適配置の実証実験を実施した。この実証実験に際しては、実証実験のためのプロトタイプ API を開発した。

B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

- 1) 各種イジング型コンピュータに対し最適化問題の作成とフォーマット変換器を作成し、パラメータと解の品質の調査を実施し、これらの関係を解明した。
- 2) 各種イジング型コンピュータに対する入力データの転送時間の計測手法のテストを実施し、各種イジング型コンピュータの転送時間の推定式の導出を行えるようにした。また、イジング型コンピュータインタフェースの API のプロトタイプを完成した。

【2021 年度】

- 1) 次世代アクセラレータ・コーデザイン問題に取り組む第一段階のプロトタイププログラムに対し、多段最適化・特定プログラムでの最適化を達成する、さらなる高機能化されたプロトタイププログラム (第二段階) の開発を完了した。既に開発が完了したソフトウェアプロトタイプを用いて、ユーザー企業と位置情報解析 API や基地局配置最適化 API の開発を開始した。また、Amplify SDK や Amplify AE によるイジングマシンでの開発環境を Web 上で公開した (NEDO 連携)。

- 2) イジング型では、二次割当問題および因数分解問題などの各種応用問題に対するインタフェースを整備した。NISQ、誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) ではクラウドインタフェースの API 開発が完了した。Honeywell System Model H1 という 2021 年時点で利用可能な世界最高性能の量子コンピュータで検証し、実際に要求精度を満たした計算が可能であることを確認した。また、GPU 等古典アクセラレータでは、インタフェース設計とコデザイン問題の解法への適用を完了した。
- 3) AI とイジングマシンのハイブリッド手法の既存提案手法を拡張し、多値/連続値の場合について対応可能な方法を構築した。これを用いて GPS スマート製造キーデバイスのフォトニック結晶構造の最適化計算を世界で初めて実施し、PCSEL を高性能化するデバイス構造を提案した。また、イジングマシンを用いた複合物質の安定構造探索を世界で初めて実施した。また、住友商事(株)の QX プロジェクト等企業群と連携し、次世代アクセラレータの社会実装を推進した。

【2022 年度】

- 1) 複数の次世代アクセラレータを協調して動作させるコデザイン基盤となるソフトウェアの実装を達成した。
- 2) 次世代アクセラレータ・コデザインソフトウェアを公開し、オープンテストベッド化を達成した。
- 3) スマート物流の作業配置最適化の社会実装において、コデザインアルゴリズムを適用した最適化計算を実行した。コスト関数、問題サイズ、計算時間、特別な制約条件を加味した計算において最適なソルバーを選択できることを実証した。
- 4) イジングマシン (商用マシン全て)、量子アニーリングマシン (D-Wave)、量子ゲートマシン (IBM-Q)、量子コンピュータシミュレータ、および数理最適化ソルバ (Gurobi/CBC) を利用可能な開発環境を完成し、無償での一般提供を実施した。
- 5) 代表的なアプリケーションとして位置情報アプリケーションと携帯電話基地局配置アプリケーションに対して、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術との比較で次世代アクセラレータ・コデザインソフトウェアが 1 桁以上の高速化を達成した。
- 6) 住友商事(株)と進めてきた物流倉庫における作業配置最適化の問題に対して、上記の研究成果を活用し計算にかかる時間は 1/10 以下、計算精度に関しては人による最適化と比べて大幅な生産性と満足度の向上を実現した。この成果に基づき、住友商事(株)が人員配置計画のビジネスを開始した (2022. 10)。
- 7) 特定の計算課題において誤り耐性ゲート型量子コンピュータが古典アクセラレータに比べて 10~100 倍高速化するアプリケーション要件を定義した。
- 8) PCSEL の高性能化に向けたデバイス設計最適化や SIP 課題間連携による材料安定構造シミュレーションを継続し、次世代アクセラレータの高速性と有用性を高めた。

③-6. GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成の主要成果

「GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成」は、当初は 2019 年度に連携研究課題の「GPS 型レーザー加工機システム研究開発（東京大学）」において蓄積した GPS 化拠点構築のノウハウの提供を受けて、「GPS 型材料改質レーザー加工システムの試作と評価」として開始され、電子デバイス製造の中でも特に半導体材料のレーザー改質プロセスの GPS 化に取り組んだ。2020 年度以降は GPS 型製造技術の社会への波及を加速するための課題を抽出し、解決策を包括的に提示する拠点を形成するためにパイロットプロジェクトとして開始した。以下では 2019 年度の成果も含めて記載する。

【2019 年度】

東京大学から提案された GPS 化ノウハウ（方法論）の POC を受け、企業投資が活発化する半導体デバイス製造のレーザー材料改質分野を具体的対象とし、GPS 化戦略の波及効果を加速することを目的とし、5G、半導体関係で投資が活性化している九州地区の企業を対象としたパイロット拠点である綺羅（KILA: Kyushu University Innovative Laser Application）コンソーシアムを設立した（7 社 3 大学）。GPS 化に向けて構築した加工データ取得ループ（ローカル GPS ループ）の試験運用を実施し、綺羅コンソーシアムの参画企業（ギガフォトン株、東京エレクトロン株、株SCREEN ホールディングス、株タマリ工業など）と協業しながら、社会実装を目指した具体的テーマに着手した。さらに、九州半導体・エレクトロニクスイノベーション協議会等（SIIQ: 約 200 社）との連携にも合意し、具体的な連携内容の構築に着手した。

【2020 年度】

九州大学では、パイロット拠点のさらなる拡充を目的とし光・量子プロセス研究開発センターを設立した。本センターには、企画管理部門、要素研究部門、社会実装部門（綺羅コンソーシアム）が設置されており、GPS 化戦略の波及効果加速に関わる組織体制を大幅に増強した。また、企業と協業しながら取り組んだ複数の具体的テーマから「パワーデバイスレーザードーピング加工装置」を社会実装テーマとして選定し、企業から TRL6 投資判断を獲得するための要件定義を行った。

【2021 年度】

九州大学では、GPS 化に対する投資が活発化する半導体産業をターゲットとし、光・量子プロセス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、及びシステム LSI 研究センターの 3 センターが一体となって活動できる組織運用体制に変更した。この組織体制の変更により、GPS 化のニーズを持つパートナー企業の課題に幅広く取り組むことが可能となり、民間資金により持続的な拠点として発展させ、モノづくり GPS 化の社会実装を効率化する活動を実施した。半導体分野の大手企業である東京エレクトロン株、株SCREEN ホールディングス、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株、キオクシア株、ギガフォトン株

からの投資を受け社会実装に向けた活動を実施しており、民間企業の投資を誘起し、新技術の確立と新たな市場を創出する持続可能な拠点としての活動を実現した。

【2022 年度】

九州大学では、2022.3.1 に量子コンピューティングシステム研究センターを設立し、光・量子プロセス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、及びシステム LSI 研究センターの 3 センター一体の組織連携体制に量子コンピューティングシステム研究センターを加えた 4 センター一体の組織連携体制「CPS 化推進半導体拠点」を整えた。本体制の下、複数の法人の事業部と具体的な商用を想定した連携活動に着手し、企業自己資金によるテーマを実施することで、本課題の最終年度の目標である持続可能な拠点構築を達成した。

上記内容は本 SIP 光・量子課題の成果の一部であるが、本 SIP 光・量子課題の事業期間中は、このように全研究課題で社会実装につながる学術的・技術的に価値の高い世界トップレベルの成果を挙げ、最終目標を達成することができた。

④ 達成度（2） ※社会実装の実現可能性

【各大学拠点が社会実装を通じ SIP 後も自立的に運営していくため、特に企業の事業部門との連携を強化するアウトリーチ活動を積極的に行った結果、複数の企業の事業部と具体的な商用を想定した連携活動が開始された。SIP 終了後の活動体制・活動資金・人材も確保できる見込みであり、本 SIP 光・量子課題で開発された技術が波及効果の大きな分野で社会実装される可能性は高い。】

第 2 章でも研究課題ごとの達成度（2）について述べているが、社会実装責任者を継続配置し、社会実装体制の構築も完了し、各拠点（図 1-3 参照）は、企業の事業部門へのアウトリーチ活動を強化し、本格的な社会実装活動を推進した。コロナ禍にも拘らず研究開発は計画以上のペースで進み、本 SIP 光・量子課題の各拠点の SIP 後の自立的かつ継続的な活動の見込みも立っており、全課題の研究結果が広く社会実装される可能性は高い。

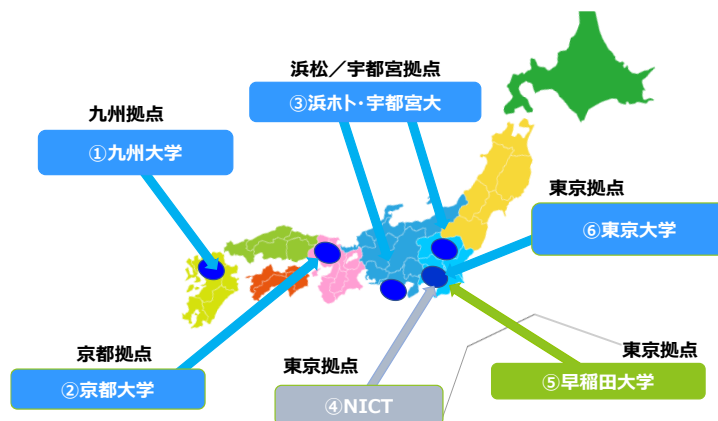


図 1-3. 課題抽出から解決まで一貫して行う SIP 光・量子課題の各拠点

レーザー加工では、市場へのインパクトの高い半導体、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等での社会実装からバックキャストした議論に基づき、社会実装に向けた計画を立案し、参画企業による事業化に加え、全国各拠点整備で構築するプラットフォームによるレバレッジを働かせ、広範囲かつ規模感のある社会実装の実現を狙っている。社会実装の実現可能性に関わる状況は以下の通りである。

④-1. GPS 型レーザー加工機システム

【計画及びその進捗状況】

- ・本 SIP 開始時点から、GPS レーザー加工機システム構築の研究開発を進めながら TACMI コンソーシアムを活用して社会実装を推進する計画としている。コンソーシアムへの加入機関数も 2021 年度より 21 グループ増加の 110 グループへと大幅に増えているほか、マイスターデータジェネレーター（MDG）およびスマートレーザー加工機の有償利用も開始されており、社会実装に向けた活動は計画通りに進んでいる。
- ・SIP 期間中に新たに GPS 化のパイロット拠点設立を計画し、九州大学の GPS 化推進半導体拠点の設立に貢献した。

【体制整備状況】

- ・東京大学では、社会実装拠点型研究開発を推進するため、光量子科学連携研究機構（UTripl）を 2016 年に設立しており、この組織を中核として、本 SIP 事業を含む、レーザー加工に関する各種活動を一元的に運用し、社会実装・事業化を支援する体制を拡充している。また、UTripl が事務局となり、関係する多数のパートナー（企業、大学、国研等）と共に TACMI コンソーシアムを設立し、事業成果の波及・社会実装体制を構築しており、この枠組みで、市場投入前の最先端の設備・技術を実際に多くのユーザー候補・パートナー候補に有償で試用してもらう体制を構築したほか、「コト」を供給する拠点としての整備も行った。

【社会実装と認められる成果】

- ・これら個別の事業の実施期間を超えた継続的な支援体制のもと、様々なパートナー・お客様に対応するべく策定した社会実装計画に則り、TACMI コンソーシアムの機能拡充や会員増加、九州大学パイロット拠点や台湾 ITRI などの拠点間連携の拡大など、幅広いパートナー連携に繋がっている。
- ・半導体製造後工程と EV 用二次電池レーザー溶接工程を主要ターゲット市場と位置付けて社会実装に向けた活動を加速した。半導体製造後工程としては、日本が強みを持つ材料企業を中核としたチームを、TACMI コンソーシアムを活用して組織し、次世代の半導体製造に資する微細穴あけ加工を実証し、プレスリリースを実施した（2022. 10. 24）。これまでも連携していた ITRI および台湾の半導体製造企業と国内チームを接続することによって半導体製造における日本の競争力向上を目指している。
- ・レーザー溶接工程としては、パナソニック ホールディングス(株)の本事業への直接参画

を実現し、MDG にレーザー溶接レーンを構築して、全自動でのデータ取得を開始し、GPS 構築の目的を付けた。本システムを運用してデータを蓄積し、プロジェクト終了後も協働で溶接工程への適用を実証する。

【SIP 後の大学拠点活動の継続性】

CPS 型レーザー加工機システムは、あらゆる製造が CPS 化できることを示す先導実証例である。半導体・電子部品製造向けのマイクロ加工を実演することを皮切りに、他の半導体製造工程の CPS 化、脱炭素関連のモノづくりの CPS 化、スマートモノづくりへと波及し、Society 5.0 の実現を加速することが期待される。モノづくりをはじめとする社会のスマート化はウィズコロナ・ポストコロナのニーズと合致するとともに、生産性の向上に大きく寄与することが期待されている。このため、SIP 終了後も東京大学は本 SIP 光・量子課題の成果を広範に社会実装すべく、表 1-2 に示すように、5 年後に公的資金と民間資金の比率 1:1 で運用できる拠点となるよう体制・財源・人材を確保して、活動を継続する。SIP 事業で開発した技術そのものの社会実装は 5 年後の時点で完全に民間資金ベースとすることを目指す一方、公的機関である大学が中核である拠点全体としては、社会ニーズ、政策ニーズ、科学技術動向などを精査し、常に民間では投資が難しい課題に取り組むために 1:1 の割合を目標としている。この指針に沿って、成熟の進んだ技術の開発・実装については、企業への移管やベンチャー企業設立によって、大学内での活動からパートナー企業の活動へと「卒業」させ、新陳代謝を推進していくことにも取り組む。

表 1-2. 東京大学の SIP 終了後の活動体制

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
東京大学	UTriple ^{*1} の支援の下、スマート製造推進拠点を整備済。	既にスマート製造推進拠点の設備を有償利用を開始している。SIP終了直後は公的資金獲得を目指し、活動財源の75%程度カバーし、残りをパートナー企業資金で補う。5年後にはその比率を1:1にすることを旨とする。	MDGやスマートレーザー加工機の構築に協力したパートナー企業の大多数がTACMIコンソーシアムに参画し、連携して拠点運用に係る体制を構築した。

*1…産学連携を推進する全学組織として設立された光量子科学連携研究機構

④-2. 空間光制御デバイス (SLM)

【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」にて運用を開始している。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。
- ・SLM を活用でき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している。

【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、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。

【社会実装と認められる成果】

- ・2020年度にSIP光・量子で開発した高耐光性SLMを実用化した(2021年度製品登録)。
- ・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。
- ・課題内連携で東京大学のマイスターデータジェネレーターに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。
- ・ドイツブラウンホーファー研究機構(FhG)が、SLMを多点加工などのマルチタスク加工で高い実用可能性があると評価したことで、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。

【SIP後の大学拠点活動の継続性】

今後も高耐光・大面積SLMを用いたデジタルフィードバック制御によるGPS型レーザー加工技術の普及により、自動車産業においては軽量化素材加工・固体電池の製造、半導体分野では5Gを支える多層半導体基板・異種材料積層部品等の加工、医療においては安全性を確保する透明材料へのトレーサビリティ用マーキング加工などに応用され、日本のものづくり競争力向上に貢献することが期待されている。宇都宮大学では、これまでも2018年度以降、企業等と共同研究、学術指導を継続し、その規模も拡大させてきた。宇都宮大学はSIP終了後も本SIP光・量子課題の成果を広範に社会実装すべく、引き続き浜松ホトニクス(株)と連携し、オプティクス教育研究センター内に構築したホログラフィ社会実装拠点(HOLO)にて、ホログラフィとその利用技術に関して学術指導、共同研究開発、共同実装を進める。その一方で、さらなる社会実装を推進するため、マイクロ工業団地*を活用して、企業の既存事業へのホログラフィの活用やホログラフィを用いた新規事業の開拓を支援する。表1-3に示したように、2023年度にはスタートアップ企業を設立し、ホログラフィック光学エンジンの商品化を行うと共に、2025年までにはHOL0とは別に、光計測、通信デバイスおよびディスプレイ技術に特化した社会実装拠点を複数形成し、2025年度にそれらを集積して新しく光工学社会実装拠点を形成し、大学拠点から広く光学技術の社会実装を目指す。

*…空間光制御技術の実用化試験プラットフォームとして、宇都宮大学オプティクス教育研究センター内に設置された、5台の光学定盤それぞれに5台のフェムト秒レーザーが備えられたホログラフィックレーザー加工機群である。企業技術者、宇都宮大学および他大学の研究員や学生を含むユーザーは、レーザー加工機群をタイムシェアリング、スペースシェアリングしながら利用し、大手企業のR&D、中小企業の少量生産品の受託生産、研究・開発委託、施設レンタル

(含むコンサルタント)、試験受託製作・受託加工、人材育成、コンサルタント（技術指導）が実施される。

表 1-3. 宇都宮大学の SIP 終了後の活動体制

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
宇都宮大学	'23にホログラフィ社会実装拠点を作り、'25に光工学社会実装拠点設立を目指す*2。	・既に高耐光性SLMを搭載したホログラフィックレーザ加工拠点の設備を有償利用・共同研究に活用している。 ・SIP終了直後は、公的資金およびパートナー企業資金で運営し、地域企業との人材交流や技術融合による地域産業活性化を目指す。	共同研究やPOC委託の企業先からの技術者の受け入れを積極的に行うとともに、本事業を通してスキルを持った学生や研究員の企業への人材交流、スタートアップ支援などにもつなげる。

*2…宇都宮大学のアクションプランにも正式掲載済。

④-3. フォトニック結晶レーザー（PCSEL）

【計画及びその進捗状況】

- ・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GPS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（PCSEL COE）の整備・強化を図った。
- ・参画機関のローム(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、1000m²以上の拠点スペース確保、PCSEL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人規模の複数研究員の受け入れ）、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（京都 TL0）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。
- ・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。このような活動を通じて、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項参照。）
- ・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。

- ・ローム(株)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による PCSEL 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。
- ・三菱電機(株)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(株)半導体工場に新組織を発足し(2021. 4)、PCSEL プロセス開発の専任者を配置して、工場での PCSEL 試作を行うなど、生産に向けた取り組みを加速している。

【社会実装と認められる成果】

- ・PCSEL そのもの、すなわち“モノ”の社会実装として、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(株)、三菱電機(株)が連携)。具体的な活動の一例として、北陽電機(株)との連携により、高輝度パルス動作フォトニック結晶レーザーを提供して LiDAR への適用に向けた評価を行い、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、PCSEL 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、その先のユーザー企業との連携へと発展し、搬送ロボットへの PCSEL 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、(株)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、同社におけるマーキ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、他の加工に関連する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 FhG、光源の独国企業、医療分野の米国企業へと、幅広くデバイスの提供を行い、PCSEL 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。

- ・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。参画機関であるローム(株)、三菱電機(株)への提供のみならず、モバイル応用に関わる企業、エピウエハ作製技術を有する企業、宇宙通信への展開を目指す企業、3Dプリンタへの展開を目指す企業等と、“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、PCSEL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、多数の企業との共同研究を通じて“コト”の提供を行い、各種PCSELの開発やその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。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PCSELを提供し、PCSEL/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後の大学拠点活動の継続性】

上述の通り、拠点の整備・強化およびエコシステムの構築を進め、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を、前倒しで複数開始(既存の共同研究についても、大型化)し、すでに、多くの人材をも受け入れている。これにより、本SIP光・量子課題の成果を広範に社会実装する拠点として、SIP終了後においても、財源面・人材面において、自立して継続的に運営できる体制が、既に整っているといえる状況である。

今後も、引き続き、大型の共同研究等を推進・拡張し、多くの人材を受け入れつつ、拠点の自律的な運営を継続する(表1-4参照)。それに加えて、公的プロジェクト・資金をも活用しながらスマートモビリティ分野への展開のさらなる加速に加えて、スマート製造、通信、照明などの各種の展開や、宇宙分野なども含めた次世代のPCSELの開発等をも積極的に推進し、PCSELの優位性を将来にわたって確保していく活動を推進する。また、拠点と連携する企業等からの社会実装に先立って、先端的なPCSELの早期の社会実装に向けて拠点を補完するスタートアップ等の組織の構築等についても、検討を行っていく。

表 1-4. 京都大学の SIP 終了後の活動体制

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
京都大学	<ul style="list-style-type: none"> ・京大拠点 (PCSEL COE、1,000m²以上) を整備済。 ・PCSELの広範な社会実装に向け、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、グローバル展開に関わる連携企業群からなるエコシステムを構築中。 ・連携企業からのPCSELの広範な社会実装に先立ち、先端PCSELの早期社会実装に向け、拠点の補完組織 (スタートアップ等) 構築や、拠点設備のビジネス活用を鋭意検討中。 	<ul style="list-style-type: none"> ・事業部門を含めた、億レベルにも達する大規模共同研究が複数進展中 (さらに数千万レベルのものについても、連携研究が複数進展中。なお、これらの一社からは、京大拠点に、「先端スマートセンシング」寄附講座を設置済)。 ・上記の大型共同研究をSIP終了後も、引き続き、推進・拡張していく予定 (すでに複数年の共同研究契約を複数締結済)。また、公的プロジェクト、資金をも活用し、PCSELのスマートモビリティへの展開加速や、次世代の先端PCSEL開発を積極的に推進予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・SIPを通じて行ってきた人材確保・育成を、引き続き推進・強化する。具体的には、 ・エコシステムを形成する多数の連携企業等から、若手人材を受け入れ、多くの有能な人材を確保・育成。 ・拠点での試作・評価等を円滑に行うための、技術者 (装置オペレーションや評価等を担当) の派遣の受け入れ。 ・弁護士、技術移転機関 (京都TLO) 等の活用を継続し、契約に関わる窓口機能等をも引き続き強化。 ・その他、拠点およびその補完組織運営のための優秀な人材をも確保していく。

④-4. 光・量子通信

【計画及びその進捗状況】

- ・HPKI への親和性のある SS-MIX データの分散バックアップシステム構築と医療関係者と共同での有用性を確認した。
- ・量子セキュアクラウド上でのゲノムデータの保管および安全な二次利用の実施と想定ユーザーとの有用性を確認した。
- ・金融分野での量子セキュアクラウド技術の有用性を想定ユーザーと共に検証した。
- ・スマート製造現場での量子暗号技術の有用性を想定ユーザーと共に確認した。

【体制整備状況】

- ・量子暗号チーム全体で POC 及び標準化活動を一体的に実施した。また SIP の課題間連携は国家レジリエンスの強化グループに加え、AI (人工知能) ホスピタルによる高度診断・治療システムチームへの技術移転を実施した。他の国家プロジェクトも活用した国内でのサプライチェーンとテストベッドの充実も進行中である。

【社会実装と認められる成果】

- ・量子暗号装置 (BB84 方式) の小型・低コスト化に目途を付け、2020 年度に事業化した。
- ・小型高速の物理乱数源の企業 (株)YDK への技術移転が完了した (サイズ: 従来比 2 分の 1、速度: 現状比 10 倍)。
- ・量子暗号通信の普及に不可欠な国際標準化活動において、本 SIP 活動期間 (5 年間) を通じて 11 件の勧告を成立させた。
- ・AI ホスピタルチームが取り組む医療 AI プラットフォームの“AI 開発基盤”に、光・量子チームから高速秘密分散ドライバ技術を提供し、高速の秘密分散処理とデータ伝送を実現した。
- ・電子カルテで HPKI への親和性のある SS-MIX データの分散バックアップシステム構築と医療関係者と共同での有用性確認を完了させ、世界で初めて耐量子-公開鍵暗号を HPKI 準拠のカードに実装した。
- ・ゲノム解析データの社会実装に関し、量子セキュアクラウド上でのゲノムデータの保管

および安全な二次利用の実施と想定ユーザーとの有用性確認し、個人情報保護しつつ全ゲノム解析を可能とするシステムが完成した。

- ・金融分野での量子セキュアクラウド技術の有用性を想定ユーザーと共に検証し、Q-STAR（一般社団法人量子技術による新産業創出協議会）に QKD の普及に向けた提言書を提出した。

【SIP 後の大学拠点活動の継続性】

量子暗号技術が取り組む「暗号解読技術が進展してもセキュリティが危殆化しない量子セキュアクラウドサービス技術」は、本 SIP 光・量子課題によって実現される新規性の高い技術であり、世界初となる試みで、医療分野、生体認証分野、製造分野、金融分野、安全保障分野など様々な分野に恩恵をもたらすと期待されている。また強力な計算エンジンを量子セキュアクラウド内に取り込み、データの安全な二次利用を可能とすること、さらには昨今の個人情報を域内でのみ利用する方向での各国の法整備を利用し、安全なデータベースのプラットフォームとして期待されている。このため、SIP 終了後も NICT は本 SIP 光・量子課題の成果を広範に社会実装すべく、表 1-5 に示した体制・財源・人材を確保して、活動を継続する。

表 1-5. NICT の SIP 終了後の活動体制

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
NICT	産学官の協創環境を整備しながら、研究開発、テストベッドでの実装・試験、社会展開、人材育成まで一気通貫で取り組むため、NICTに量子セキュリティ拠点を整備済。	多面展開におけるPOCでは、協業企業への応分の負担を求める（マッチング）ほか、量子セキュリティ拠点の運営は、NICT運営費交付金や総務省補正予算事業なども活用して推進することを検討している。	NICT Quantum Campにおいて産学官の一流の講師陣による実践的プログラムを提供し量子ネイティブを育成し、さらにその修了生から選抜された人材をリサーチアシスタントに雇用し、研究から社会実装まで牽引するリーダーを育成する。

④-5. 光電子情報処理

【計画及びその進捗状況】

- ・本研究開発では、基盤開発、応用開発、社会実装、普及という 4 段階の事業フェーズと、量子技術を活用した次世代アクセラレータの適用領域を 2 軸に据え、段階的に適用領域を拡張しながら、社会実装を進める戦略をとっている。
- ・すでに①物流倉庫における作業最最適配置の実証実験と基盤化、②レーザー加工への応用を見据えた実証実験、③化学計算領域におけるコンソーシアム立ち上げ、④API を通じた開発ライブラリの試験的な公開、および⑤様々なユーザー企業との協業、を開始して社会実装による具体的な成果が出始めている。

【体制整備状況】

- ・社会実装コンソーシアムや実証実験によるパートナー形成を通じて、本研究開発成果のプロトタイプ成果の提供を行い、またフィードバックを受けるエコサイクルにより社会実装の体制構築が進んでいる。
- ・加えて、2021 年度から早稲田大学内部（早稲田大学グリーン・コンピューティング・

システム研究機構)に「量子計算アプリケーションエコシステム」のための拠点作りも進めており、社会実装の体制構築に向けた達成は十分に可能であると考えている。

【社会実装と認められる成果】

- ・通信事業者と共同で、次世代通信に向けた最適周波数割り当て最適化に取り組み、一部、実使用を開始した。
- ・住友商事(株)等と共同で作業配置最適化エンジンを開発し、従来ベテランが数時間かけて配置計画を作成してものを 30 分程度で作成完了するようにした。2022.10 から商用利用を開始した。
- ・物流事業者と共同で、配送計画最適化アプリケーション開発に取り組んでいる。2025 年からの商用利用開始を目指す。

【SIP 後の大学拠点活動の継続性】

次世代アクセラレータ基盤技術は、多くの分野の機械学習、組合せ最適化問題において、より高精度、より高速に最適解をユーザーに提供することができる潜在力を有しており、GPS 型スマート製造、物流・配送、材料開発、センシング・データ解析などでの波及が期待されている。このため、SIP 終了後も早稲田大学は本 SIP 光・量子課題の成果を広範に社会実装すべく、表 1-6 に示した体制・財源・人材を確保して、活動を継続する。本拠点では、すでに大学発ベンチャーが起業され、ここと大学とが連携することにより、SIP 第 2 期後も継続して研究成果等を自律的に社会実装可能となる見込みである。

表 1-6. 早稲田大学の SIP 終了後の活動体制

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
早稲田大学	早大GCS*3内に量子計算アプリケーション拠点を整備済。	公的資金の獲得を目指すほか、技術コンサルティングや共同研究を拡大する。また、WUV*4を活用した大学発ベンチャーの起業も検討し、事業財源の確保を目指す。	大学教員ならびに大学発ベンチャー等を利用し、定常的に人材を確保することを目指す。加えて、企業派遣の研究者の受け入れや、大学TLOの法律家の受け入れを行い、体制を構築すると同時に、人材教育を通じて人材確保する。

*3…早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構、*4…早稲田大学ベンチャーズ。早稲田大学の名を冠するベンチャーキャピタル。

④-6. CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成

【計画及びその進捗状況】

- ・CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点として、半導体表面加工の研究開発を進めながら、綺羅コンソーシアムの拡充を図り、社会実装を推進する計画である。すでに最終年度の目標である 40 社を超え、企業から受け入れたマッチングファンドもマッチング率 70% 以上を達成している。更に活動を強化するため、次項でも述べる CPS 化推進半導体拠点を九州大学総長指示の下、設立した。本拠点では、社会実装活動として、①パワーデバイスレーザードーピング加工装置社会実装、②次世代半導体デバイス・極浅レーザードーピング加工装置社会実装、③リアルタイム観察システム市場投入、④スマートレーザー加工機市場投入に取り組んでいるが、成果事例として、デバイスメーカー S 社から

TRL6 実証実施判断のための資金を受入れ、S 社が企業試作ライン評価として作製したテストパターン付き 300 mm ウエハを用いて TRL6 実証実施判断のためのレーザードーピング加工試験を行う。パワーデバイス製造用のレーザードーピング加工装置の社会実装は、これまでの課題を解決した新システムが企業投資により完成しており、デバイスメーカーM社から量産ライン抜き取りウエハの提供を受けて、新システムによる改善度を確認する。2022.12 現在において、民間資金を誘起して取り組んでいる社会実装テーマ数は 23 あり、受入れ資金のマッチング率は 70%を超えた。

このように世界屈指の半導体製造装置研究開発拠点を目指し、大手半導体デバイス企業群、大手半導体製造装置企業群、アメリカや台湾の関連企業等との連携体制強化を推進する。

【体制整備状況】

- ・九州大学では総長指示の下、九州半導体アイランドの強化に向け、GPS 化推進半導体拠点を設立した。GPS 化推進半導体拠点は、光・量子プロセス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、システム LSI 研究開発センター、量子コンピューティングシステム研究センターの 4 センターの連携体制として運営されており、国内外の半導体関連企業から生じる様々なリクエストに対し、(1)企業のボトルネックに対する解決策の提示、(2)世界中の企業、大学、研究所との共同開発を通じた新規事業開拓、(3)新規事業化への障害の見極めと橋渡し、の 3 つの価値を提供し、ワンストップでソリューションを提供することを目的としている。九州大学だけですべての課題に対応することは非現実的であることから、本 SIP 光・量子課題の参画機関や、オランダ TNO（オランダ応用科学研究機構）や台湾 ITRI 等との連携も強化する。特に、研究開発から社会実装までのエコシステム構築やそれを実現する組織の運営等については、オランダ TNO から指導を受けており、将来的にはフラウンホーファー型拠点となることを目指す。

【社会実装と認められる成果】

- ・レーザー材料改質加工後の Si 薄膜トランジスタの電気特性を光学顕微鏡像の AI 解析により品質推定が可能になり、半導体プロセス開発のリードタイム 9 割削減を実証した。また、パワーデバイス製造装置の研究開発では、ウエハ全面への均一ドーピングに成功し、量産ウエハ抜き取り試験により TRL7 実証を実施することとなった。次世代半導体デバイス製造装置の研究開発では、極浅、高濃度レーザードーピングを達成し、パターン付き 300mm ウエハ試験実施により TRL6 実証を実施することになった。さらに、リアルタイム観察モジュールの研究開発では、ナノ秒時間分解能での温度分布動画自動取得に成功し、企業による市場投入が決定した。

【SIP 後の大学拠点活動の継続性】

九州大学は、半導体関連企業が集まる九州地区の利点を活かし、様々な企業や研究機関との連携を推進し、新技術の確立と新たな市場創出活動を推進するため、GPS 化推進半導体拠点を設立し、GPS 化のニーズを持つパートナー企業の課題に幅広く取り組むと共に、民間

資金により持続的な拠点として発展させ、モノづくり CPS 化の社会実装を効率化する活動を実施している。このため、SIP 終了後も九州大学は本 SIP 光・量子課題の成果を広範に社会実装すべく、引続き表 1-7 に示した体制・財源・人材を確保して活動を継続する。

表 1-7. 九州大学の SIP 終了後の活動体制

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
九州大学	総長承認の元、CPS化推進半導体拠点を整備済。	公的資金の獲得を目指すほか、九州半導体アイランドの中核大学として多くの半導体関連企業と連携やソリューション提供により事業財源を確保する。SIP終了時の企業出資比率は70%を超えており、今後も本水準を持続し活動規模の拡大を目指す。大学への資金還流のため、大学が関与する社団法人の設立も検討している。	CPS化推進半導体拠点として4センター連携体制を実現し、約35名の教員、及び指導学生約100名の人材確保を実現。またギガフォトン、SCREENホールディングス、グルーヴノーツ、タマリ工業など複数企業より人材を受入れ、企業技術者の育成と人材を確保する体制を整備済み。企業出資により2つの共同研究部門を設置し、獲得人材の活動拠点の整備を実現。九州大学 法務統括室と連携してオランダTNOとの契約を締結し、国際契約に関わる人材育成を実施した。

④-7. SIP 終了後の大学拠点活動のまとめ

上記のように、SIP 光・量子課題では、社会実装に向けて整備した各拠点の組織体制がさらに強化され、企業等との研究開発も POC レベルを超えた段階に進み、一部では既に実用化の実績もある。研究開発も計画以上のペースで進んだことや、SIP 終了後も活動を継続する体制が整備されたことから、表 1-8 に示すように多くの民間資金を取り込み活動を継続する。

SIP 期間中は、各拠点の体制構築や研究成果等に関する情報を広く知ってもらうため、研究推進法人の SIP ホームページや LinkedIn でも紹介した。各拠点から企業へ提供できるサービスの紹介や海外との連携強化を意図して、本 SIP 光・量子課題独自の成果活用に関する国際シンポジウムを 2022. 10. 12 に開催し、企業の事業部門とのさらなる連携を呼びかけた。また、社会実装の範囲を拡大するための積極的な海外機関との連携強化を行うと共に、日本の製造業の競争力強化に繋がる研究成果を、ワンストップで利活用するための CPS プラットフォーム構想立案も行い、その内容を一般のビジネスパーソンに届けるための書籍の発刊も行った(2023. 1. 26)。SIP 終了後も睨んだ活動を広く展開しており、さらなる民間投資が SIP 光・量子課題の分野で行われることが期待される。

このように、SIP 終了後も大学拠点を通じて SIP 期間中の研究開発成果を確実に社会実装できる見通しを得ているが、SIP のように社会全体のボトルネックを解消するような取組においては、国の施策も反映することが望まれる。大学拠点の活動が民間資金で自立できる状況であるとしても、フラウンホーファー研究機構のように、あえて国から一定の割合で資金獲得を行う方が良いと考えている。

表 1-8. SIP 終了後の大学拠点活動のまとめ

機関名	SIP終了後の大学拠点の活動
東京大学	すでにスマート製造推進拠点の設備を有償利用を開始し、本SIPで開発した成果の提供は民間資金で実施している。SIP終了直後は公的資金獲得を目指し、活動財源の75%程度カバーし、残りをパートナー企業資金で補う。5年後にはその比率を1:1にすることを旨とする。
宇都宮大学	すでにオプティクス教育研究センター内に構築したホログラフィ社会実装拠点で、本SIPで開発したホログラフィとその利用技術に関して学術指導、共同研究開発等を進め、拠点を維持するための活動財源は確保している。さらに、公的資金獲得の活動も活発化し、パートナー企業やスタートアップを通して、オプティクス教育研究センターの他の事業と連携して拠点事業の拡張し、2年後に光工学社会実装拠点を設立し、5年後には、自立して継続的に運営できる体制を整える。
京都大学	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を、前倒して複数開始（既存の共同研究についても、大型化）し、すでに多くの人材をも受け入れている。これにより、本SIP光・量子課題の成果を広範に社会実装する拠点として、SIP終了後においても、財源面・人材面において、自立して継続的に運営できる体制が、既に整っているといえる。
早稲田大学	すでに大学発ベンチャーを起業し、このベンチャー企業と大学とが連携することにより、本SIPで開発した成果の提供は、SIP第2期後も継続して自律的に社会実装することが可能な見込み。
九州大学	すでにCPS化推進半導体拠点を設立し、多くの企業資金を得てCPS化のニーズを持つパートナー企業の課題に幅広く取り組んでいる。本SIPで開発した成果は、今後も民間資金により持続的に発展させ、モノづくりCPS化の社会実装を効率化する活動を継続する。

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

【課題全体及び各研究開発項目ごとの必要な知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略に基づく活動が、社会実装の実現可能性を高める成果につながっている。】

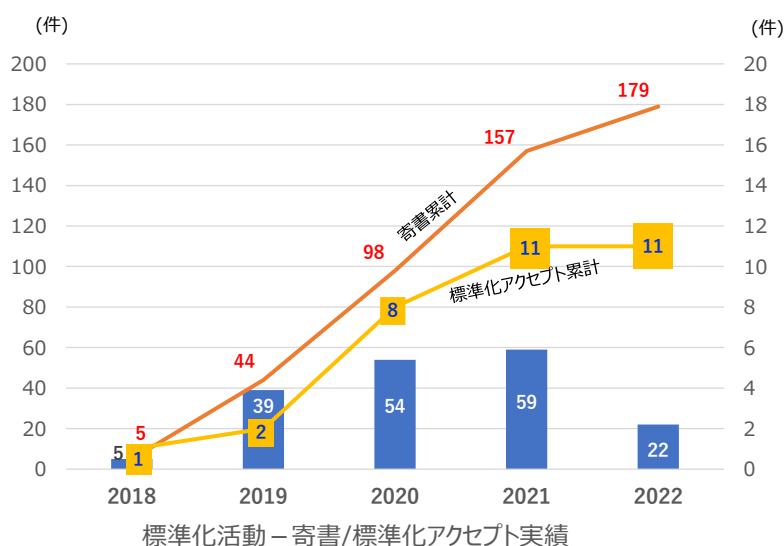
課題全体としての知財戦略は、出口戦略をマネジメントするために、知財委員会を研究推進法人の下に設置し、発明者や産業化を進める者のインセンティブを確保し、かつ、国民の利益の増大を図るべく、適切な知財管理を行っている。知財委員会の下に各研究課題に知財部会を組織し、各知財部会の立案戦略を知財委員会で状況把握し、情勢を考慮しつつ戦略を見直している。

また、「個別の高度なレベルの成果を互いに持ち寄り、一つの目標に到達するというコンセプト」の達成に向けて、本SIP光・量子課題に参画する全ての機関でNDAを締結し、情報共有を障害なく行えるような仕組みづくりを構築し、参画機関間の情報交換・技術交流を促進している。その上で、各研究課題内で独自の戦略を策定して活動している。また、開発するデバイス・モジュールに対して、推定可能な構造については権利化・知財権化を推進し、分析不能な詳細組成や作製条件などのノウハウについては公開せず、技術の流出を防止し（クローズ化）、研究開発の途中段階においても、各種デバイスの光源等として活用することを希望するユーザーへ積極的に提供（試供）する（オープン化）。

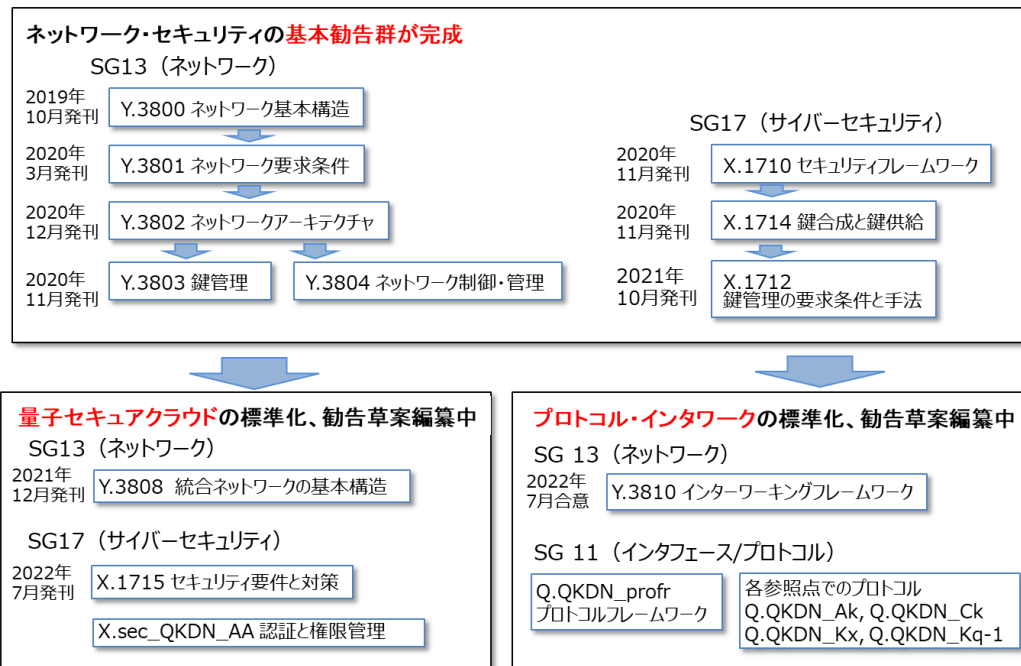
こうした活動当初に立案したオープン/クローズ戦略の下、特許出願やノウハウの秘匿のほか、拠点形成、社会実装に向けての知財・契約専門家の本格的活用を進め、計画以上のペースで進む優れた研究成果、整備した拠点活動も活かし、社会実装の実現可能性を高める成果につながっている。具体的には、CSP型レーザー加工機システムでは参加企業が110グループのTACMIコンソーシアムを活用した技術育成・保管、必要な企業への試用・供給する体制を整備した。空間光制御技術では国内大手企業とのPOCの実施のほか、海外機関との連携

にもつながり、ドイツに SLM 応用ラボを設置し、海外ニーズ情報の取り込みやグローバル展開への活用に進展した。フォトリソグラフィ結晶レーザーでは国内外からの引き合いが 83 機関以上に増加し、多くの機関への試料提供契約 (MTA) ベースでのサンプル提供 (モノの提供)、および PCSEL 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行った。量子暗号技術では、特許調査により中国の特許出願が急増していることを確認した。それを踏まえ、改めて従来のオープン/クローズ戦略を堅持し、侵害検知可能な項目を特許化する一方、QKD モジュールの評価項目は国際標準化を進め、実装性能の実現方法のノウハウは非公開化することを日本チームとして確認している。光電子情報処理では、早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究 (GCS) 機構内に知財アドバイザー、社会実装責任者を含めた「量子計算アプリケーション拠点」を構築し、クローズ戦略で企業との社会実装を促進している。(株)フィクスターズ、(株)QunaSys は本拠点での議論も踏まえつつオープン/クローズ戦略でパートナー企業との活動を促進しつつ、事業の拡大と基礎技術の確保を促進した。(株)フィクスターズは住友商事(株)とのスマート物流プロジェクトの社会実装 (ビジネス開発) を促進した結果、2022.10 のサービス開始に結実した。

国際標準化活動では量子暗号ネットワークの国際標準化を推進し、本 SIP 活動の 5 年間で 179 編の寄書を提出し、11 件の標準化発刊+アクセプトに結実させ、日本の技術を骨子とする基本勧告体系の整備に貢献した (図 1-4 参照)。また、量子暗号装置に求められる要件の国際標準化でも ISO/IEC 規格に日本仕様の反映を完了させたほか、政府調達基準策定に向けた詳細規格 (プロテクションプロファイル) の発刊への目途をつけた。また、2022.1 に (一社) 量子 ICT フォーラム内に評価・検定・認証の準備組織を立ち上げ、規制改革等への働きかけも推進している。



(a) 5 年間にわたる量子暗号技術の国際標準化実績。棒グラフは各年度の寄書数。



(b) 日本の技術を骨子とする基本勧告体系

図 1-4. 量子暗号関連技術の活動成果

⑥ 成果の対外的発信

【幅広く広報活動を実施し、特に社会実装を見据えてこの分野の専門家、企業経営層へ研究活動成果やCPSプラットフォーム構想立案活動を紹介した。】

本 SIP 光・量子課題の広報戦略に基づき参画機関がばらばらな広報活動とならないようにルールを定めた上で、専門家へのアピール、広く国民に理解される広報、社会実装を見据えた企業等に対し、情報を届けるターゲット階層ごとに適切な発信媒体を選択し対外発信を行った。

2022 年度の課題全体の取り組みとしては、新しい仲間づくりを目指し、拠点からの提供サービス紹介、海外連携提案を企画した SIP 光・量子国際シンポジウムを開催した(2022.10.12)。また、世界の研究者に向けた「Nature Focal Point」に活動記事掲載(記事広告)(2022.8) (図 1-5 参照)、経営層へ向けて「日経ビジネス」に社会実装状況を掲載した(2022.9)。また研究推進法人のホームページや SNS でも研究紹介を行うなど、積極的に広報活動を行った。さらに、一般ビジネスパーソンに向けた書籍「超スマート社会」への挑戦～日本の光・量子テクノロジー開発最前線～を 2023.1.26 に発刊した。

5 回目となる本 SIP 光・量子課題主催のシンポジウムは、初めての国際シンポジウムとしてハイブリッド形式で開催し(図 1-6 参照)、2021 年度の 582 名を大きく上回る 1,014 名が参加した(参加登録者は 1,058 名。なおシンポジウムの開催実績情報を p.214 に掲載)。今年は各研究課題責任者とゲストの総勢 19 名による「各拠点の提供サービス内容の紹介」、

また、連携強化を進めているドイツ、オランダ、台湾の各研究機関から海外連携機関幹部 7 名を招待し「光・量子エコシステムと海外連携」をテーマに基調講演をしていただいた。「リアルタイムアンケート結果発表と質疑応答」では、ライブ投票システムを使用したリアルタイムアンケートの結果を見ながら西田 PD、安井サブ PD、佐々木サブ PD がコメントを行い、会場・オンラインの両方から寄せられた質問に回答するなど、ハイブリッド開催ならではの形式で参加者とのコミュニケーションを深めた。また会場では、シンポジウム終了後にネットワーキングが行われた。今回の国際シンポジウムでは、海外から 78 機関以上 (79 名) の参加登録があったほか、民間企業からの参加登録者も約 6 割に達した。さらに事後アンケート調査では 94%の方がシンポジウムを通して本 SIP プログラムへの興味関心・理解が深まったと回答したほか、シンポジウムの様子が OPTRONICS 11 月号 (2022. 11) や Laser Focus World Japan[online] (2022. 11. 4) に記事として掲載された。

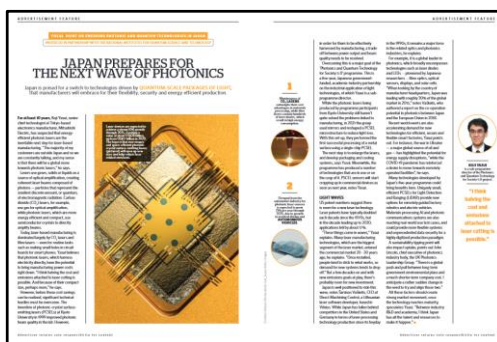


図 1-5. Nature Focal Point (2022. 8. 11 号)



図 1-6. 本 SIP 光・量子課題の国際シンポジウム 2022 の様子

高い学術的価値の発信としては、PCSEL 研究課題が Nature Communications (2022. 7 および 2023. 1) に採択、掲載されるとともに、半導体レーザー国際会議にて Best Paper Award を授与された。また、次世代アクセラレータ基盤研究課題が Physical Review Research (2022. 4) に採択、掲載され、学術成果のアピールにつながった。

2022 年度は 2023. 2. 28 時点で論文掲載 32 件、プレスリリース 16 件やメディア取材 83 件及び展示会への参加などを含むアウトリーチ活動が 198 件に及んでいる（計数情報として 2022 年度単年及び 5 年間の累計を p. 212-213 に掲載）。表 1-8 に最終年度 2022. 4. 1-2023. 2. 28 までのプレスリリース状況をまとめた。

表 1-8. 2022 年度（2022. 4. 1-2023. 2. 28 まで）のプレスリリース状況

	プレスリリース案件	発表機関	発表年月日
1	世界最大級、大面積化で耐熱性向上 高出力CWレーザー装置向け空間光制御デバイスを開発 金属 3Dプリンタへの応用に期待	浜松ホトニクス	2022.4.12
2	量子コンピュータを半導体産業界へ活用 ～九州大学の半導体拠点化構想と㈱グルーヴノーツとの連携による量子コンピュータ社会波及効果の拡大～ ※九州大学/㈱グルーヴノーツ共同発表	九州大学	2022.6.21
3	100W～1kW級単一モードフォトニック結晶レーザーの設計指針の確立 一超スマート社会を支える究極の半導体レーザー光源の実現に向けて～	京都大学	2022.6.27
4	「量子アニーリングを活用したフォトニック結晶レーザーの構造最適化に成功 一量子計算技術を活用したスマート製造分野の発展に向けて～」 ※京都大学/慶應義塾大学/早稲田大学共同発表 ※'22.9.21第83回応物秋季学術講演会で発表	京都大学 早稲田大学 慶應義塾大学	2022.9.9
5	「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期課題「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」国際シンポジウム 2022 の開催について」（2022.9.9）	QST	2022.9.9
6	「世界初、フォトニック結晶レーザーを用いた高出力自由空間光通信の実証に成功 ～Beyond 5G/6G 時代における宇宙空間での通信利用を目指して～」（2022.9.22）	京都大学	2022.9.22
7	「量子セキュアクラウドシステムを使って次世代レーザー設計の最適化の処理・高秘匿伝送・分散保管を実現 ～次世代アクセラレータと連携した量子セキュアクラウドによりスマート製造分野における適用可能性を確認～」（2022.10.4） ※NEC/NICT/京都大学/慶應義塾大学共同発表	NEC NICT 京都大学 慶應義塾大学	2022.10.4
8	「巨大量子系シミュレーション用の量子回路設計法を構築 ～物性・材料・化学計算への効率的・高精度な大規模量子計算を加速～」（2022.10.6）	QunaSys	2022.10.6
9	「フィックスターズと住友商事、Fixstars Amplify のパートナー契約締結 量子コンピューティング技術の活用で、物流倉庫の課題を解決、実運用を開始」（2022.10.12） ※フィックスターズ/住友商事/㈱共同発表	フィックスターズ	2022.10.12
10	「次世代半導体製造向けの極 微細穴あけ加工を実現 一業種横断の協働拠点で先端半導体をけん引」（2022.10.24） ※東京大学/味の素ファインテック/㈱/三菱電機/㈱/スベクトロニクス/㈱共同発表	東京大学	2022.10.24
11	「凸版印刷とNICT、世界初、米国政府機関選定の耐量子計算機-暗号をICカードシステムに実装する技術を確認 保健医療用の長期セキュアデータ保管・交換システムで有効性を確認」（2022.10.24） ※NICT/凸版印刷/㈱共同発表	NICT	2022.10.24
12	「青色GaN系フォトニック結晶レーザーの高出力・高ビーム品質動作に成功 一次世代の高品位レーザー加工、高輝度照明、高精度LiDAR等の実現に向けて～」（2022.11.4） ※京都大学/スタンレー電気/㈱共同発表	京都大学	2022.11.4
13	「量子セキュアクラウドによる高速安全なゲノム解析システムの開発に成功 ～従来不可能だった情報理論的安全な全ゲノム解析の高速処理を実現～」（2022.11.17） ※NICT/東芝/ZenmuTech/京都大学 共同発表	NICT 東芝 ZenmuTech	2022.11.17
14	「量子セキュリティ技術と個人認証を連携させ、セキュアな個別化ヘルスケアユースケースの実証に成功～多数の個人のゲノムデータを情報理論的に安全に保管・伝送し、個人の許諾に応じて活用できるシステムを構築～」（2022.12.8） ※東芝/NICT/東北大学東北メディカル・メガバンク機構/東北大学病院共同発表	東芝 NICT	2022.12.8
15	「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 一超スマート社会を支える高精度光センシングやレーザー微細加工応用に向けて～」（2023.1.27 19時解禁予定） ※記者レク：2023.1.27 14時～	京都大学	2023.1.27
16	「NICTと凸版印刷、耐量子計算機暗号に対応したプライベート認証局を構築 保健医療用の長期セキュアデータ保管・交換システムで有効性を確認インターネットのセキュリティを担保し、安全・安心な社会インフラ実現を目指す」（2023.3.7予定） ※NICT/凸版印刷共同発表	NICT	2023.3.7予定

各研究課題別の 2022 年度の主な対外的発信（プレスリリース、海外論文、アウトリーチ活動など）は、以下の通り（一部 2021 年度末で未報告のものを含む）。

【CPS 型レーザー加工機システム研究開発】

[プレスリリース]

- ・量子コンピュータを半導体産業界へ活用 ～九州大学の半導体拠点化構想と(株)グループノーツとの連携による量子コンピュータ社会波及効果の拡大～ [九州大学] (2022. 6. 21)
- ・次世代半導体製造向けの極微細穴あけ加工を実現 —業種横断の協働拠点で先端半導体をけん引— [東京大学] (2022. 10. 24)

[展示会出展]

- ・Optics and Photonics International Exhibition 2022 (OPIE2022) 展示会出展 (TACMI コンソーシアムブース設置) [東京大学] (2022. 4. 20-22)
- ・SEMICON Taiwan 展示会 [九州大学] (2022. 9. 14-16)

【空間光制御技術に係る研究開発】

[プレスリリース]

- ・世界最大級、大面積化で耐熱性向上 高出力 CW レーザー装置向け空間光制御デバイスを開発 金属 3D プリンタへの応用に期待 [浜松ホトニクス(株)] (2022. 4. 12)

[海外論文掲載]

- ・“In-process monitoring in laser grooving with line-shaped femtosecond pulses using optical coherence tomography” Light: Advanced Manufacturing (2022) 3:33 (2022. 5. 17 Published) [宇都宮大学/浜松ホトニクス(株)]

【フォトニック結晶レーザーに係る研究開発】

[プレスリリース]

- ・100W～1kW 級単一モードフォトニック結晶レーザーの設計指針の確立 —超スマート社会を支える究極の半導体レーザー光源の実現に向けて— [京都大学] (2022. 6. 27)
- ・量子アニーリングを活用したフォトニック結晶レーザーの構造最適化に成功 —量子計算技術を活用したスマート製造分野の発展に向けて— [京都大学/慶應義塾大学/早稲田大学] (2022. 9. 9)
- ・世界初、フォトニック結晶レーザーを用いた高出力自由空間光通信の実証に成功— Beyond 5G/6G 時代における宇宙空間での通信利用を目指して— [京都大学] (2022. 9. 22)
- ・量子セキュアクラウドシステムを使って次世代レーザー設計の最適化の処理・高秘匿伝送・分散保管を実現 ～次世代アクセラレータと連携した量子セキュアクラウドによりスマート製造分野における適用可能性を確認～ [日本電気(株)/NICT/京都大学/慶應義

塾大学] (2022. 10. 4)

- ・青色 GaN 系フォトニック結晶レーザーの高出力・高ビーム品質動作に成功 ―次世代の高品位レーザー加工、高輝度照明、高精度 LiDAR 等の実現に向けて― [京都大学] (2022. 11. 4)
- ・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 ―超スマート社会を支える高精度光センシングやレーザー微細加工応用に向けて― [京都大学] (2023. 1. 27)

[海外論文掲載]

- ・“General recipe to realize photonic-crystal surface-emitting lasers with 100-W-to-1-kW single-mode operation “ Nature Communications <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30910-7> (2022. 7) [京都大学]
- ・“Wide-bandgap GaN-based watt-class photonic-crystal lasers” COMMUNICATIONS MATERIALS (2022. 10. 7) online <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00288-6> [京都大学]
- ・“Self-evolving photonic crystals for ultrafast photonics” Nature Communications online DOI:10.1038/s41467-022-35599-2 (2023. 1. 27) [京都大学]
- ・“Non-mechanical three-dimensional LiDAR system based on flash and beam-scanning dually modulated photonic crystal lasers” Optica online DOI: 10.1364/OPTICA.472327 (2023. 2. 9) [京都大学]

[展示会出展]

- ・Optics and Photonics International Exhibition 2022 (OPIE2022) 展示会出展 [京都大学] (2022. 4. 20-22)
- ・International Semiconductor Laser Conference 展示会 [京都大学] (2022. 10. 16-19)
- ・Photonic Device Workshop 2022 展示会 [京都大学] (2022. 12. 8-9)

【量子暗号技術】

[プレスリリース]

- ・量子セキュアクラウドシステムを使って次世代レーザー設計の最適化の処理・高秘匿伝送・分散保管を実現 ～次世代アクセラレータと連携した量子セキュアクラウドによりスマート製造分野における適用可能性を確認～ [日本電気株]/NICT/京都大学/慶應義塾大学] (2022. 10. 4)
- ・凸版印刷と NICT、世界初、米国政府機関選定の耐量子計算機-暗号を IC カードシステムに実装する技術を確立 保健医療用の長期セキュアデータ保管・交換システムで有効性を確認 [NICT] (2022. 10. 24)
- ・量子セキュアクラウドによる高速安全なゲノム解析システムの開発に成功 ～従来不

可能だった情報理論的安全な全ゲノム解析の高速処理を実現～ [NICT/(株)東芝/(株)ZenmuTech] (2022. 11. 17)

- ・量子セキュリティ技術と個人認証を連携させ、セキュアな個別化ヘルスケアユースケースの実証に成功 ～多数の個人のゲノムデータを情報理論的に安全に保管・伝送し、個人の許諾に応じて活用できるシステムを構築～ [(株)東芝/NICT] (2022. 12. 8)
- ・「NICT と凸版印刷、耐量子計算機暗号に対応したプライベート認証局を構築 ～保健医療用の長期セキュアデータ保管・交換システムで有効性を確認インターネットのセキュリティを担保し、安全・安心な社会インフラ実現を目指す～ [NICT] (2023. 3. 7 予定)

[海外論文掲載]

- ・“Secure secondary utilization system of genomic data using quantum secure cloud” Scientific Reports (2022. 11. 2 Published online) DOI: 10.1038/s41598-022-22804-x [(株)東芝/(株)ZenmuTech]

[展示会出展]

- ・第2回量子コンピューティング EXPO【春】展示会 [NICT] (2022. 5. 11-13)
- ・CEATEC2022 展示会 [NICT] (2022. 10. 18-21)
- ・第3回量子コンピューティング EXPO【秋】展示会 [NICT] (2022. 10. 26-28)

[次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発]

[プレスリリース]

- ・巨大量子系シミュレーション用の量子回路設計法を構築 —物性・材料・化学計算への効率的・高精度な大規模量子計算を加速— [(株)QunaSys] (2022. 10. 6)
- ・フィックスターズと住友商事、Fixstars Amplify のパートナー契約締結 量子コンピューティング技術の活用で、物流倉庫の課題を解決、実運用を開始 [(株)フィックスターズ] (2022. 10. 12)

[海外論文掲載]

- ・“Continuous black-box optimization with quantum annealing and random subspace coding” Physical Review Research 2022 vol. 4 023062-1-9 (2022. 4) [慶應義塾大学]
- ・“A phase-field model by an Ising machine and its application to the phase-separation structure of a diblock polymer” Scientific Reports, 12, 10794 (2022) (2022. 6. 24) [慶應義塾大学/(株)フィックスターズ/早稲田大学]
- ・“Local variational quantum compilation of a large-scale Hamiltonian dynamics” PRX Quantum 3, 040302 (2022. 10. 6) [(株)QunaSys]

⑦ 国際的な取組・情報発信

【社会実装実現に向けて海外研究機関との緊密な連携関係を深化させたほか、海外向けに

本 SIP 光・量子課題の活動を広く情報発信した。】

2020 年度に光・量子分野の技術（特にレーザー加工）のベンチマーキングを海外研究機関（ドイツ：フラウンホーファー研究機構（FhG）、台湾：工業技術研究院（ITRI）、オランダ：オランダ応用科学研究機構（TNO））に依頼した結果、各機関とも本 SIP 光・量子課題が研究開発する技術レベルを国際競争力があると高く評価したことが契機となり、彼らとの共同研究や協業開始などへと進展し、その関係を深化させている。

具体的に 2022 年度は、

- 1) GPS 型レーザー加工機システムでは、東京大学が次世代半導体パッケージ用ガラス基板の穴あけ加工を実施し、台湾 ITRI による評価に進展した。また、TACMI コンソーシアムにおいて先端半導体材料を核に企業と協調体制を構築し、今後これらの活動を東京大学がつなぎ、台湾の半導体企業群との連携を目指すフェーズに進んだ。九州大学は SEMICON Taiwan 展示会に出展を行った。
- 2) 空間光制御デバイス（SLM）では、SLM を実評価したドイツ FhG の好反応を受けてドイツに SLM 応用ラボを設置し、FhG のネットワークやユーザーとの連携関係を活かし、海外ニーズ情報を取込みやグローバル展開に活用することに進展した。
- 3) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）では、海外からの PCSEL への引き合いが 29 機関以上にもなり、国際連携が加速している（国内を含めると 83 件以上にも達する）。特にオランダとは、駐日オランダ大使館で皇族・大使臨席のもと、PhotonDelta 代表と MOU を締結した。また、ドイツ FhG との共同研究においては、IMS 研究所に加えて、新たに ISTI 研究所が加わり、連携が拡大している。さらに、半導体レーザーの有力な研究機関との連携も開始するなど、PCSEL のポテンシャルの高さに、国際的な関心が高まっている。
- 4) 光・量子通信では ITU-T SG13 にて勧告案 Y. 3810 が Consent になるなど、引続き日本の技術をベースにした国際標準化を推進している。さらに(株)東芝は、個社として本 SIP で取り組んだ BB84 方式の量子暗号装置技術等を活かして、欧州、米州、韓国などで POC を展開するなど、実績作りを進めている。
- 5) 光電子情報処理では(株)QunaSys がハッカソンイベントを開催し、約 40 カ国から 170 名以上のエントリーを得たほか、IBM チューリッヒ研究所での取組の紹介、QPARC (Quantum Practical Application Research Consortium) で International Event を開催するなど、積極的に海外への発信や海外からの情報取得を行った。また、米国 QCWare に協力し、量子計算に関するビジネス会議 Q2B を米国以外で初めて日本で開催するなど、海外でのビジネス面でも存在感を示した。
- 6) サブ PD も引続き海外への発信を積極的に行い、安井サブ PD は台湾、オランダとの国際会議で web 講演などを行い、スマート製造における GPS 化の必要性と日本との連携の意義を広めた。佐々木サブ PD は光・量子通信の国際標準化活動を主導し、14 回の国際標準化会議への参加、22 編の日本寄書のとりまとめを実施、主導した。

以下にサブ PD の主な国際情報発信や取組を記載する。

- ・ 安井サブ PD、佐々木サブ PD が OPIE 2022: Quantum Technologies for Quantum Communication & Laser Technologies for Battery Research and Manufacturing で講演 (2022. 4. 22)
- ・ 安井サブ PD が量子コンピュータビジネスカンファレンス Q2B 2022 で講演 (2022. 7. 14)
- ・ 安井サブ PD が 2022 台日 EV 国際セミナー「臺日 EV 国際研討會」で講演 (2022. 9. 27)
- ・ 安井サブ PD がオランダ政府主催のイベント「Netherlands-Japan QUANTUM-PHOTONICS-NANO ROADSHOW」で講演 (2022. 10. 11)
- ・ 佐々木サブ PD が国際会議 Quantum Innovation 2022 のパネスディスカッションでモデレータとして登壇 (2022. 11. 30)

第2章 各研究課題の内容と課題目標の達成度

本課題で取り組むレーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理、社会実装加速プロジェクトでは、以下の研究課題に取り組んでいる。レーザー加工では、(a) CPS型レーザー加工機システム研究開発、(b) 空間光制御技術に係る研究開発、(c) フォトニック結晶レーザーに係る研究開発に、光・量子通信では量子暗号技術に、光電子情報処理では、次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発に取り組み、社会実装加速プロジェクトでは CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成に取り組んでいる。以下では、2022.5.20に承認された研究開発計画に基づき、各研究課題で取り組む具体的な研究開発内容、事業終了時点アウトプット目標（2022年度の設定目標）、工程表を研究課題毎に記載し、それぞれの課題目標の達成度を記述する。

(a) CPS型レーザー加工機システム研究開発

研究責任者：小林 洋平（東京大学 物性研究所 教授）

参画機関：東京大学、パナソニック ホールディングス株式会社

1) 研究内容

研究開発の全体像：

最先端の電子機器に搭載される電子デバイスの製造分野では、半導体の露光、半導体素子の基板加工のほか、レーザーを代表とするビーム加工が多用されてきている。また、最先端製造ラインではレーザー加工なくしては成立しない状況も生まれつつあり、さらに広範囲な用途へのレーザー加工適用の要望が高い。一方で、これらの加工において、所望の加工を実現するための加工パラメータの抽出は、人間の経験と勘に頼る部分が依然として大きく、要望されている速度で新たなプロセスが開発されているとはいえない。本研究課題では、このパラメータ抽出に要する時間を大幅に短縮することを目的とした CPS 型レーザー加工機システムの実証を行う。具体的には、最新の光源技術、光学素子技術、光操作技術、加工システム技術、計測・評価技術、演算技術などを組み込んだ自動的にパラメータを変更可能なレーザー加工システム（自動パラメータ可変レーザー加工システム）、実績収集・学習用レーザー加工・計測システム、パラメータ抽出システムをそれぞれ構築する。初期の加工対象としては、Society 5.0 推進におけるキーデバイスである電子デバイス部品の高度化・低製造コスト化におけるボトルネックの解消に資する材料を対象に選定して実証を行う（電子部品製造分野における難加工材料など）。その後、さらに他の材料・加工へと対象を拡大するために必要な基盤を整備する。また、レーザー加工の CPS 化の実現と進展を支える、加工の物理モデルの構築および検証の手法の深化にも取り組む。

より具体的には、実績収集・学習用レーザー加工・計測システムとして、多機能・高速・その場観察機能を備えた「マイスターデータジェネレーター」を構築する。現場での加工を行う自動パラメータ可変レーザー加工システムとしては、「スマートレーザー加工機」を構

築する。パラメータ抽出システムは上記 2 者を連携させてレーザー加工に必要なパラメータを抽出するシステムであり、本研究課題では「マイスターデータジェネレーター」と「スマートレーザー加工機」の両者のシステムインテグレーションとして実現し、これを中核として、GPS を搭載するレーザー加工機のシステム化を促進する拠点を形成する。

また、上記過程で開発集積する、GPS 化を推進するための拠点形成のノウハウを、産業的に GPS 化のニーズを持つ他のレーザー加工プロセスの基盤要素技術を持つ機関へ展開（POC）することで、そのレーザー加工による GPS 化拠点の形成（社会実装）を効率化し、ネットワーク型製造システム実現を加速することを目指す。

具体的な実施計画（内容）：

CPS 型レーザー加工機システムの基盤として、物理モデルや AI 技術などに基づく、パラメータ探索プログラムを導入する。このために、パラメータ変更、加工、観察、記録を自動で行うベースマシンを構築する。当装置は、パラメータ可変の光源、パラメータ可変域が大きな加工操作ユニット、各種の詳細観察・評価ユニット、リアルタイム観察ユニットおよび全体を一元的にコンピュータ制御するシステムによって構成される。

光源としては、経済産業省・NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」事業（NEDO レーザー事業）等関連するプロジェクトによって実用化された最新技術の動向も考慮の元、非線形光学素子などを用いた波長変換方式も含め、レーザー加工において今後需要が高まることが想定されていて、日本が強みを持つ、短波長領域の光源を重要なターゲットに見据えつつ、赤外から紫外までの範囲で、実用稼働可能な範囲で広く動的にパラメータ変更できるシステムを評価・導入する。光源パラメータとしては、波長、輝度*、パルス幅、繰り返し周波数などを基本とし、パルス内波形、パルスバーストパターンなど、評価の進展に応じて、検討の幅を広げる。加工操作ユニットとしては、光操作系として高輝度・短パルス化・短波長化する光源に対応する最新の技術を導入するとともに、スキャン速度、スキャンパターンなどについて制御範囲を広く取り、機械学習などに適した広いパラメータ空間におけるデータ取得を可能とするように設計する。上記について、基盤部分をモジュラーな設計とし、運用・評価に基づき、複数の有望な光源、詳細観察・評価ユニットおよびリアルタイム観察ユニットの組み合わせについて順次評価実証機を構築し、その全体によって「実績収集・学習用レーザー加工システム・パラメータ抽出システム」として「マイスターデータジェネレーター」を構成する。本システムの運用成果を後述の、可用性を重視する実証機に展開するためには、リアルタイム観察ユニットから得られる簡便な情報を詳細観察・評価ユニットから得られる詳細な情報と結びつけることが重要となる。これは、相互の相関情報のみでは必ずしも十分ではないことが予想されるが、文部科学省「Q-LEAP」等のプロジェクトによって得られる、基盤的物性研究に基づく光と物質の相互作用の学理と情報を活用して解決できるよう、連携体制を整備して進める。

*…単位面積、単位立体角あたりの光出力

上記システムを運用し、ターゲット材料・ターゲット加工（電子部品製造分野における難加工材料など、市場インパクトの大きいものを選定）について、広範なパラメータ領域における、加工データ取得を行い、機械学習などの手法により、加工パラメータと結果の相関が取れるデータベースの構築を行う。市場需要の高い特定のアプリケーションについては、GPS 化のために必要な物理モデルの構築を目的とした、光-材料相互作用の定量化に必要な研究開発にも取り組む。

さらに、取得した知見を元に、学習ではなく、想定される実際の加工にチューンした実証用のサブセット構成のユニット設計を行い、「自動パラメータ可変レーザー加工システム」として「スマートレーザー加工機」を実装する。本システムは、光源や加工操作ユニットのパラメータ可変範囲について必要十分な範囲に限定し、一方で可用性、安定性などを重視した構成とする。また、必要なリアルタイム観察システムのデータに基づいて、学習用システムにて加工対象に応じて学習・構築されたデータベースとアルゴリズムを用いて、自動で最適化されたパラメータによる加工ができる構成となることを目指す。

より具体的なターゲット材料・ターゲット加工の選定としては、まずは IoT 時代の超高速・高密度電子回路基板として有望視されているガラスに着目する。基板用ガラスのスルーホール（TGV）は加工によるクラックが適用のボトルネックとなっている。また、同じく電子回路に用いられるセラミックや、EV 用電池の電極材料、CFRP、複合材への展開も評価・検討を行う。その他、需要が見込まれるアルミニウム、ステンレススチール、銅、チタン等から早期に対象材料を選定することを目指す。

また、更なる適用範囲の拡大として、脱炭素/カーボンニュートラルに向けた EV 用二次電池等に用いられるレーザー溶接加工にも着目する。EV 用二次電池の製造においては、電極と集電板の接合工程やモジュール化工程にレーザー溶接が用いられているが、安全性を確保するために、高速・高品質な溶接が求められており、材料や形状に応じた加工条件の最適化が必要である。そこで、溶接加工で用いられるパラメータ領域における加工データを取得できるシステムを構築し、機械学習などの手法により加工パラメータと結果の相関が取れるデータベースの構築を行い、適切な GPS 化手法の開拓につなげる。

また本研究課題では、まずは穴あけ GPS を搭載するシステムを研究開発し、その後の展開として溶接 GPS、さらには切断 GPS を搭載するシステムを目指す。

以上を実施する上でのより具体的な体制として、本研究課題の成果の社会実装と、将来のネットワーク型製造システムの構築検討への基盤としての活用を想定し、マイスターデータジェネレーターを東京大学の柏Ⅱキャンパスに、スマートレーザー加工機を本郷キャンパスに導入し、両者をネットワーク回線にて接続することとする（図 2-1-1）。この中で、拠点のフィジカルシステムには「空間光制御技術」、「フォトリック結晶レーザー」で開発する技術を糾合していくこととし、拠点の全体システムには「光・量子通信」、「光電子情報処理」で開発する技術と接続するよう取り組む。同時に、耐量子一公開鍵暗号技術を用いた通信の可用性評価についても検討を進める。

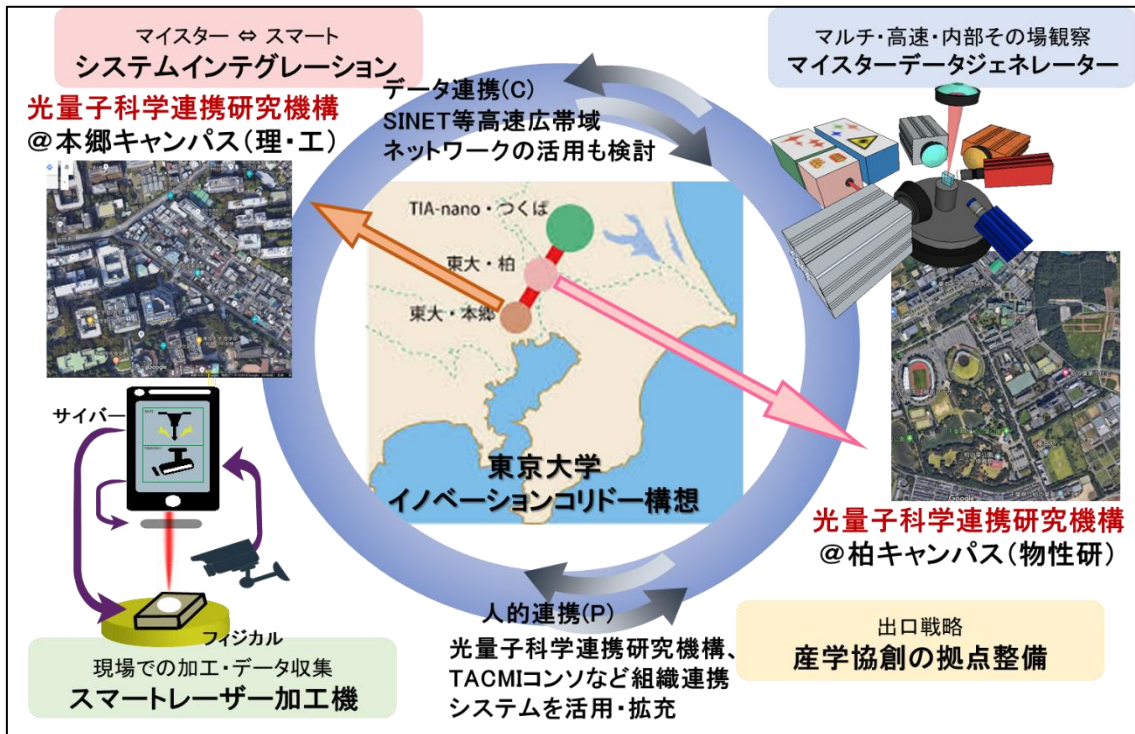


図 2-1-1. スマート製造推進拠点全体構成

社会実装（計画）：

社会実装にあたっては、NEDO レーザー事業等とも連携する。具体的には、同事業参画法人が中心となって設立した TACMI コンソーシアム等、広くユーザー企業との連携を図るために構築されたコミュニティ等との連携を推進する。そこに本研究課題で開発したシステムを提供し、ユーザー企業等に試用してもらい、加工パラメータ抽出等の評価を開発にフィードバックする。この過程でこれにかかわる人・材料・ニーズ情報・評価情報の形で民間からの資源を広く受け入れて、いち早く成果を提示しつつマーケティング活動を加速する。

一方、「Q-LEAP」等とも連携し、加工実績データを提供することにより、産業ニーズの高い加工に対する最適パラメータ推定のアルゴリズムの開発の推進に寄与する。「Q-LEAP」等の成果に基づき、本システムのソフトウェアも更新できる体制を構築することで、ニーズに対応しつづける体制を整備する。

このほか、文部科学省・科学技術振興機構「COI-STREAM」事業等の、先行して実施されている産学連携事業における関連するテーマを実施している拠点との連携についても検討し、重要課題の抽出、社会実装や出口戦略の立案などの共有と、成果のシナジー効果が得られるよう留意する。

モノづくり工程全体の CPS 化のボトルネックであるレーザー加工において CPS 型システムを実証することで、スマート製造全体への投資を喚起するかたちで本成果の社会での認知を図る。具体的には、CPS 化の要望が強く今後の成長分野とみなせる分野において、従

来のレーザー加工では最も実現が困難でありながら、レーザー加工の高速性、フレキシブル性からレーザー適用の要望が強く、従って産業界へのインパクトが大きな、例えば電子部品製造分野での難加工材料の加工を実証する。また、市場として大幅な成長が見込まれる EV 用二次電池のレーザー溶接に対する導入に向けた検証及び課題整理を通じて、溶接分野への社会実装を目指す。ターゲットプロセスを除去加工以外へと広げることで、CPS 化技術の展開活動を加速し、CPS 化拠点の波及展開能力の拡充を図る。併せて持続的運営を可能とするために、拠点活用を拡大する事業開発を IT ベースで強化する人的体制を拡充する。さらに、従来の産業分野で応用されている切断などの分野や、今後市場の立ち上がり期待される 3D プリンタや表面改質などの新用途についても関連プロジェクトと連携して本プログラムの成果を適宜提供することにより、レーザー加工を要求する産業全体の底上げに貢献するよう展開に取り組む。

公的機関が開発する技術のスムーズな産業界への受け渡しを実現するための方策として、より具体的には、既存の民間企業やベンチャー企業（大学や研究機関から生まれるスタートアップ企業）等をパートナー企業としてビジネスベースで活用する。本研究課題において設計・実証する主要なモジュールをあらかじめパートナー企業に業務委託して実装しておくことにより、成果のユーザーとなる企業がコンソーシアムなどの場で本研究課題の成果技術の評価を実施した後に、そのまま同じ技術を商品として受け取ることができる体制の構築を推進し、中小企業も含め研究成果の普及を展開していく。

本研究課題で蓄積した“CPS 化拠点構築のノウハウ”は社会実装を見据え、九州大学が持つ半導体材料のレーザー改質プロセスへ展開し、CPS 化されたシステムへと発展させることで CPS 化ノウハウの効果を検証する。ユーザーニーズに対応するレーザー改質プロセスの拠点化を推進することで、CPS 化における課題の抽出と解消に向けた活動を拡充するとともに、東京大学拠点と連携することで、Society 5.0 におけるモノづくりのあるべき姿としての、モノづくり全体がスマート化されたネットワーク型製造システムの構築の加速に貢献する。これにより、レーザーを用いるモノづくり技術の CPS 化を複数のプロセスに対して実証し、スマート製造への民間の投資誘起を加速することで、本研究開発成果の社会実装を加速する。

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）

スマートレーザー加工機の実証として TRL7 を目指すとともに、マイスターデータジェネレーターの実証として TRL5 を目指し、当システムで収集したデータを基に、さらに加工性能を向上させるシステムの検証を実施する。これらの成果により、パラメータ抽出に要する時間を大幅に短縮し、加工方式の初期選定時におけるリードタイムを 9 割削減することを目指す。溶接工程対応拡張の開発においては、リードタイムの 9 割削減に目途を付けることを目指す。

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
(研究開発項目1)レーザー加工							
①CPS型レーザー加工機システムに係る研究開発							
システム開発	<ul style="list-style-type: none"> 実績収集・学習用の加工・計測システムの基本設計 システム設計に基づく光源等要素技術評価 実用化に向けたプロトタイプ設計 実績収集・学習用の加工・計測システムの試験装置開発 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細観測の要素技術評価に基づく加工過程観測の手法の検証 実績収集・学習用の加工・計測システムの試験装置の検証 特定用途向け自動パラメータ探索型加工機の実装 	<ul style="list-style-type: none"> 加工過程観測手法の検証に基づくリアルタイム観察要素技術の検証 特定用途向け自動パラメータ探索型加工機の実装 	<ul style="list-style-type: none"> コンソーシアム試用からのフィードバックに基づく優先事項抽出と対応する要素技術のブラッシュアップ 実績収集・学習用の加工・計測システム本装置の実装と試用 自動パラメータ探索型加工機のチューニング 	<ul style="list-style-type: none"> 実績収集・学習用の加工・計測システム本装置の運用によるデータ蓄積の高速化 加工方式の初期適用 自動パラメータ探索型加工機の実装 自動パラメータ探索型加工機の実装によるデモンストレーション 	<ul style="list-style-type: none"> コンソーシアム加工プラットフォームにおける運用による評価・ニーズ情報の収集に基づく可用性の拡張 パラメータ抽出サービスの自体の事業化設計 製造装置企業への要素技術移転・販売のための業務委託によるモジュラーパッケージング 	<ul style="list-style-type: none"> コンソーシアム加工プラットフォームにおける加工対象に対する加工パラメータ提供サービス (試用価格：2021～、商業価格：2023～) 製造装置企業へCPSコアモジュール提供 (2025～)
体制整備評価・フィードバック、社会発表	<ul style="list-style-type: none"> TACMIコンソーシアムとの連携体制整備 TACMIコンソーシアム加工プラットフォームへの装置提供・運用ルール整備 	<ul style="list-style-type: none"> TACMIコンソーシアム加工プラットフォームにおける試験装置の試運用準備・開始 	<ul style="list-style-type: none"> 試験装置運用に基づく試用評価・ニーズ情報の設計へのフィードバック 特定用途向け自動パラメータ探索型加工機の加工プラットフォームでの運用準備・開始 	<ul style="list-style-type: none"> 開発機器のコンソーシアム資金(※1)による運用 ユーザー企業等に有料(※2)で加工パラメータ抽出等に試用提供 試用評価・ニーズ情報の設計へのフィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> 自動パラメータ探索型加工機の加工プラットフォームでの運用準備・開始 ユーザー企業等への有料提供 試用評価・ニーズ情報の設計へのフィードバック 		
民間からの出資(人材、物資、資金等)	(0%)	(0%)					
<small>※1 利用者が負担する費用を原資とする ※2 維持費、消耗品、運用人件費等に相当する費用</small>							
実装した機器をTACMIコンソーシアム等の加工プラットフォーム等に提供し、コンソーシアムの会員に対して、コンソーシアムの枠組みにて試用提供 利用するユーザー企業等に有料(維持費・消耗品・運用人件費等に相当)で加工パラメータ抽出等に試用してもらい、その評価・ニーズを開発にフィードバック							

3) 課題目標の達成度(成果)

① 国際競争力

グローバルベンチマークによって、我々の「データを中核としたGPS化戦略」が世界的に見ても独自で、新しい試みであることを確認している。また、グローバルベンチマークにおいて課題として指摘されたコストや市場性に関して積極的にコミットし、既存の産業用加工機自体をスマート化する方針を追加するなどの改善を図った(図2-1-2参照)。これら取り組みの中における成果として2022.10.24にプレスリリースした半導体後工程用の微細穴あけ加工は台湾ITRI(工業技術研究院)や台湾の半導体製造関連企業における評価も非

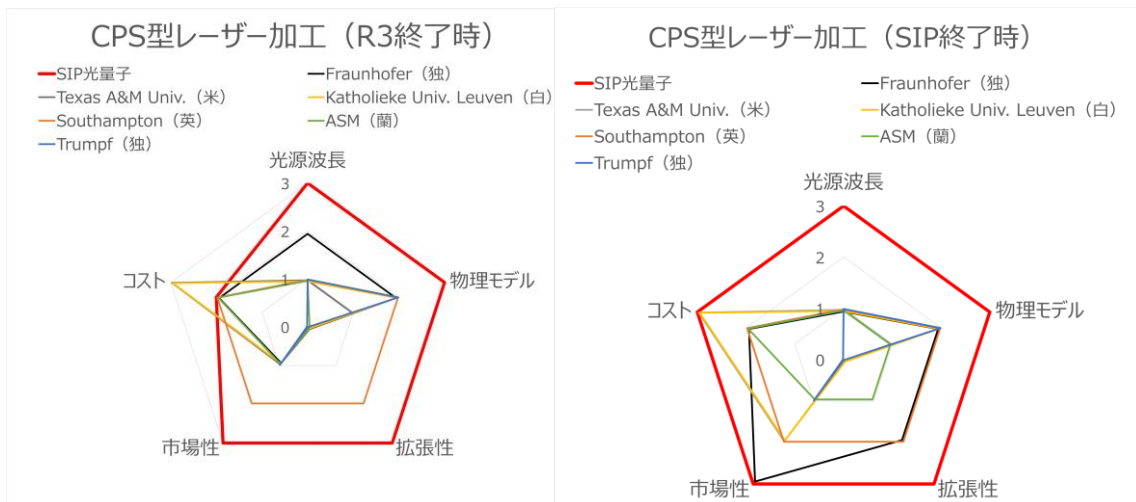


図 2-1-2. グローバルベンチマーク調査結果

常に高く、国際的な展開体制の構築を進めている。また、コンセプト論文の出版なども通じて、海外からの我々の取り組みへの認知度や評価も向上しており、今後も世界に先駆けてモノづくりをGPS化する拠点として確立していく。

一方で、諸外国のGPS化・Digital Twin化プログラムにおいては、「研究期間終了まで情報開示ナシ」という対応が散見されており、非常に競争の激しい技術開発分野であることから、引き続き動向を注視していく。

② 研究成果で期待される波及効果

本研究課題で半導体・電子部品製造向けのマイクロ加工をGPS型レーザー加工によって実演することを皮切りに、他の半導体製造工程のGPS化や、すでに開発を開始しているEV用二次電池溶接工程への適用（カーボンニュートラルニーズに対応）への波及に取り組んでいる。今後さらに、モノづくりのGPS化、スマートモノづくりへと波及させていき、Society 5.0の実現を加速することが期待できる。すでにTACMIコンソーシアムではGPS化に関連するニーズが集まっており、GPS化拠点として研究成果の波及を最大化するよう引き続き取り組んでいく。

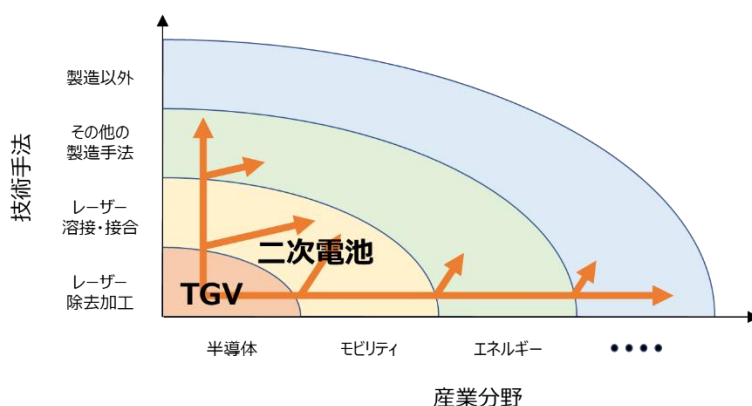


図 2-1-3. ターゲット展開と波及戦略

③ 達成度（1） ※5年間の設定目標に対する達成度

本研究課題では、「実績収集・学習用の加工・計測システム」及び「自動パラメータ探索型加工」を主たる研究開発要素として、整備した拠点を活用したユーザーによるフィードバックなども受けながらGPS型レーザー加工の社会実装に向けて研究開発を行った。GPS型レーザー加工機システムを構成する要素として、「実績収集・学習用の加工・計測システム」の役割を担う全自動・自律的にレーザー加工のデータを収集するマイスターデータジェネレーター（MDG）、「自動パラメータ探索型加工」の役割を担うMDG及びMDGで取得されたデータやシミュレータを基に動作するスマートレーザー加工機としてブレークダウンした。

また、MDGは提案当初は統合設計・統合構築を行う予定であったが、最先端の技術と実

績のある技術を適切に組み合わせつつ更新を続けていけるよう、2018 年度にモジュラー設計へとブレークダウンした。これにより、課題内連携が容易になり、実際、量子暗号装置や空間光制御装置などのいち早い組み込みが実現した。MDG は当初、ユーザーフィードバックを元にプロトタイプと実証機の 2 世代構築する計画であったが、このモジュラー設計によって、実際にはプロトタイプを順次更新することが可能となり、研究開発を計画以上に加速して進展させることができた。

図 2-1-4 に構築したレーザー加工 CPS の概念図を示した。現場の加工機であるスマートレーザー加工機からサイバー上に構築したエージェントシステムを介してレーザー加工 CPS の知の源泉となるバックエンドリソース（MDG・データベース・シミュレータ）に容易にアクセスできるシステムを構築した。レーザー加工 CPS は製造現場の加工機からネットワーク越しに利用することができ、すでにパートナー企業や TACMI コンソーシアム会員企業による利用が始まり、これを基にした成果も出ている。したがって、構築したレーザー加工 CPS 全体としても、TRL7 の水準まで到達している。それぞれの構成要素に関して、代表的な成果を以下に示す。

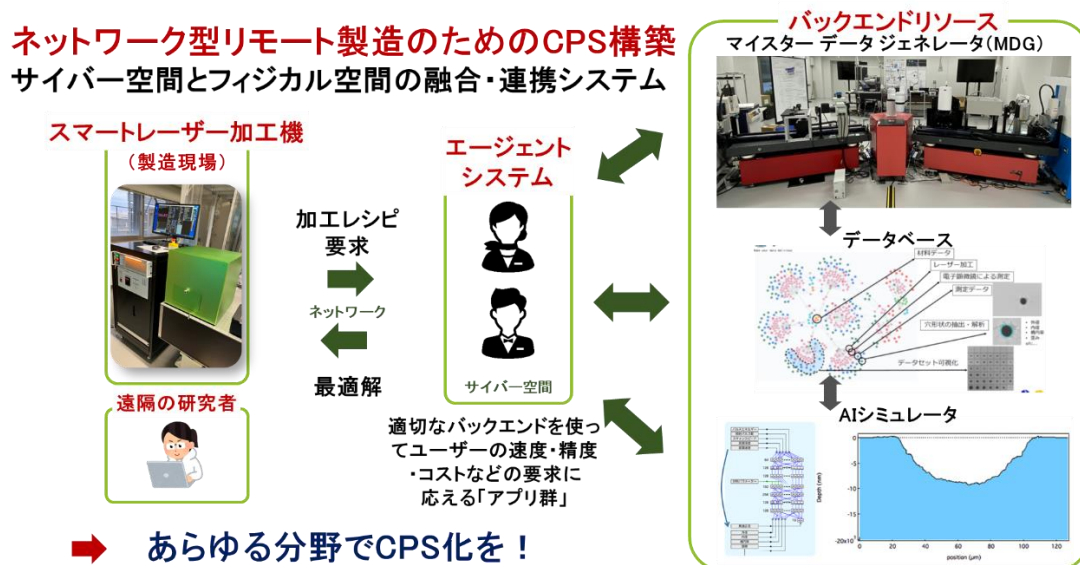


図 2-1-4. 構築したレーザー加工 CPS の概念図

(1) マスターデータジェネレーター (MDG) 開発

・全自動かつ自律的にレーザー加工のデータを取得し、データベースへ蓄積する MDG の写真を図 2-1-5 示した。全自動でデータを取得するためのサンプルローダーを搭載し、4本のラインはそれぞれの目的に合った加工機・計測機を搭載し、並列動作も可能とすることによって人力とは質的に異なる領域となる 1000 data cycle/day を達成した。データ蓄積を高速化と全自動で動作すること、また高品位なデータを取得できることから、レーザー加工 CPS の中心として稼働している (TRL5 以上に相当)。

ることによって AI（深層学習等）を用いたレーザー加工シミュレータの構築が可能になった。図 2-1-7 に 2 つ例示した。それぞれ、ガラスの深穴加工やシリコンのトレパニング加工のシミュレータを構築し、その予測結果と実際の加工結果を比較している。高精度な予測が非常に難しいといわれるレーザー加工においても、シミュレータで非常に精度よく予測できていることがわかる。

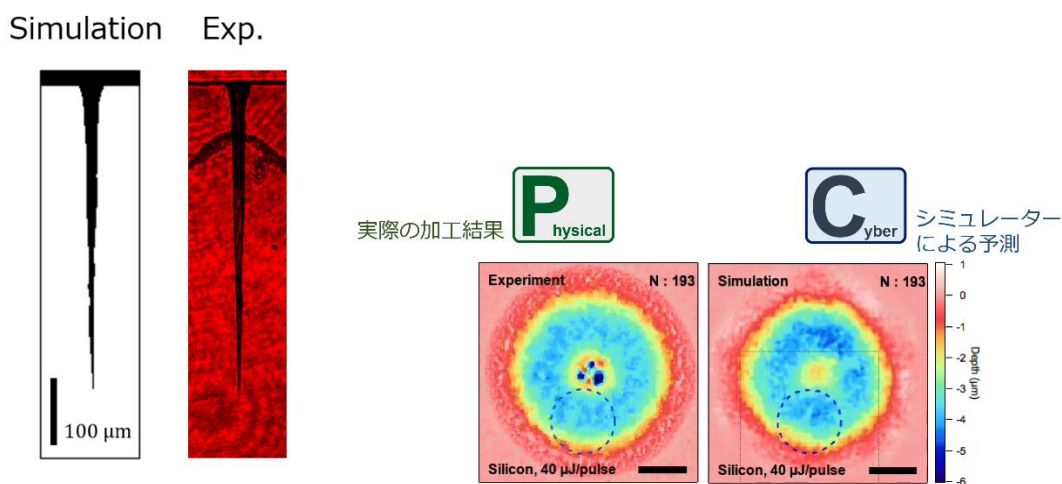
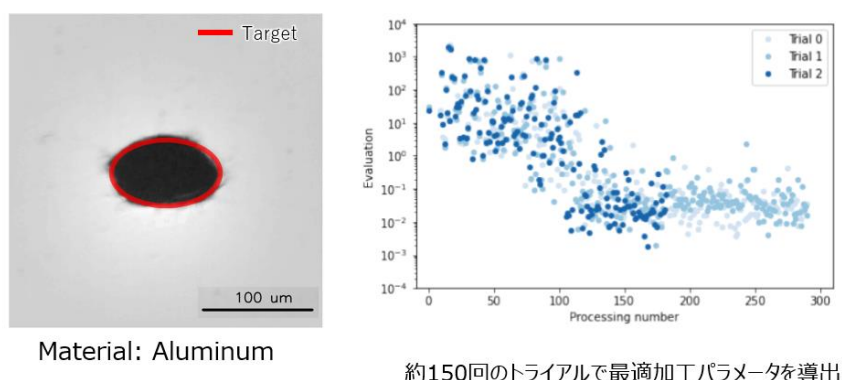


図 2-1-7. MDG の大規模高品位データを用いて構築した AI（深層学習）を用いたレーザー加工シミュレータ（右：ガラスの深穴加工 左：シリコンのトレパニング加工）

・ MDG が自律的に次に取得するデータを判断することによって、データの高品質化、取得の効率化も実現した（AI による探索の効率化）。図 2-1-8 には、MDG が自動的に最適な加工パラメータを探索した結果の一例を示した。目的とする加工形状を実現するために AI が加工パラメータを最適化し、150 回ほどの試行でほぼ最適なパラメータを見つけるに至っている。この最適化には「空間光変調器」課題で開発された SLM（空間光制御デバイス）を用いており、課題間連携により計画を上回る成果が得られた。



約150回のトライアルで最適加工パラメータを導出

図 2-1-8. マイスターデータジェネレーターを用いたレーザー加工パラメータ最適化の例

・レーザー加工 CPS の適用領域を拡大し、成果の波及を進めるため、パナソニック ホールディングス株の参画のもと、レーザー溶接工程への拡張対応を実証中である。すでに全自動でレーザー溶接のデータ取得・蓄積が進んでおり、レーザー溶接工程も CPS 化可能であることに目途を付けることができた。蓄積したデータの評価を行い、CPS を現場で適用する上での課題を整理した。

このように MDG およびその蓄積したデータから最適化した加工パラメータを用いて実際の現場で加工を実施するのがスマートレーザー加工機である。

(2) スマートレーザー加工機開発

・現場での加工を担うスマートレーザー加工機は、市場ニーズを受けて、1 台ですべての加工を担うような構成ではなく、それぞれの目的・用途に合わせてチューニングした、スマートレーザー加工機群として、開発を行った。特に、すでにある産業用加工機を CPS 型レーザー加工機システムへ接続することによって、MDG 等で得られたデータを基にスマートに加工ができることを実証したことは、社会実装に向けて CPS 型レーザー加工機システムを大きく汎用化することができた成果である。

スマートレーザー加工機開発においては、いくつかのマイルストーンとなる成果を達成しつつ、最終目標である加工リードタイム 9 割削減およびスマートレーザー加工機の TRL7 を実証した。以下にそのマイルストーンとなった成果を示す。

・MDG が自律的にデータを取得できるようになったことにより、大規模かつ高品位なデータを蓄積した「データベース」、スマートレーザー加工機による加工予測を行う「シミュレータ」、必要なデータをリクエストベースで取得する「マイスターデータジェネレーター」と主要な要素技術が大きく進展した。これにより、現場レベルでの動作確認するスマートレーザー加工機プロトタイプを達成した (TRL5 : 2020 年度)。

・難加工材料加工のデモンストレーションとして、図 2-1-9 に示す CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) の微細加工 (Society 5.0 科学博の展示) を行った。SIP 第 2 期課



図 2-1-9. 難加工材料 CFRP の微細加工デモンストレーション (Society 5.0 科学博展示)

題「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」より提供された CFRP 材料の加工条件を通常数か月要するところ、MDG を用いてスマートレーザー加工機における加工までを含めて 10 日ほどで実現した。本研究課題が目標とする、開発リードタイム 9 割削減を実際に確認した 1 つのデモンストレーションである。

・スマートレーザー加工機システムのプロトタイプを汎用化し、パッケージ化された実証機を構築した（図 2-1-10）。所望の加工形状の CAD ファイルを投入するだけで、レーザー加工 GPS に問い合わせ、レーザー加工レシピをダウンロードし、実際の加工を実現するスマートレーザー加工機システムを実現した（TRL6 相当）。

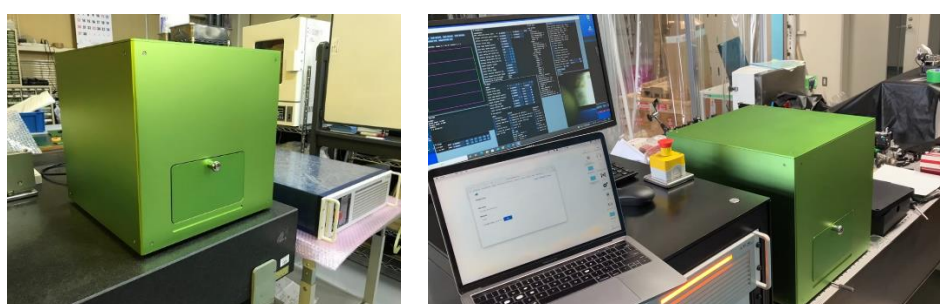


図 2-1-10. CAD データの投入のみで最適なレーザー加工が可能なスマートレーザー加工機システム

・これらスマートレーザー加工機をユーザーへ提示したところ、そのフィードバックとして、既存の産業用レーザー加工機との関係を示す必要があることが判明した。そこで、市場で実績の高い産業用加工機をベースとして、この企業と協働で拡張・スマート化したスマートレーザー加工機を構築した。

・そのデモンストレーションとして、半導体製造後工程に向けた層間絶縁材料 ABF (Ajinomoto Build-up Film) への次世代微細穴あけ加工を実施した（図 2-1-11）。この例題における加工リードタイム 9 割削減を実証するために、MDG および加工の専門家による

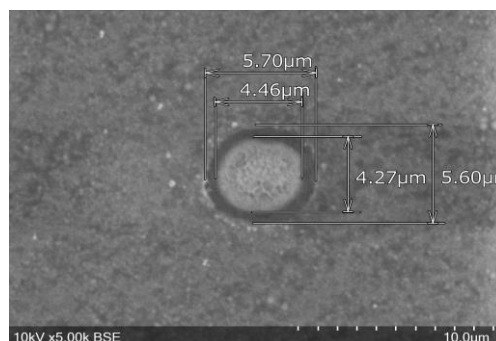


図 2-1-11. 半導体後工程用層間絶縁材料 ABF の微細穴あけ加工結果（穴を上面から観察した電子顕微鏡写真）

加工最適化を同時に開始し、MDGにおいては4時間、専門家は3日間を要した。さらに導出された加工パラメータによる加工結果はMDGによる最適化の方が優れた特性を示した。このように実施した微細穴あけ加工は、すでに実績のある産業用加工機をベースとすることで、十分な加工スループットとレーザー加工CPSによるスマート加工を両立し、社会実装に向けた大きな成果を上げることができた。このデモンストレーションは開発リードタイム9割削減のもう一つの例となっており、現実の産業課題をターゲットとすることで、当初の本研究課題の目標であるTRL7を達成した。

④ 達成度（2）※社会実装の実現可能性

【社会実装へ向けた計画と進捗】

大学が主体となって開発している本研究課題においては、システムは発注ベースでモジュラーに構築することによって、モノはパートナー企業から供給できる体制とし、コトは大学から直接提供できる体制を目指して、体制整備を進めた。特に、当初計画では本事業独自のスマートレーザー加工機のみを構築する予定であったところ、ユーザーのフィードバックに基づいて、既存の産業用加工機をレーザー加工CPSへ接続することによってスマートレーザー加工機としての機能を獲得できることを実証した。これは、開発したCPS型レーザー加工機システムの汎用性を大きく拡張するとともに、社会実装を大きく加速した成果である。

様々なパートナーやお客様に対応するべく、図2-1-12のように連携体制を整理し、それぞれのマーケットアクセスごとに戦略立案を行い、社会実装を進めた。①主にTACMIコンソーシアムを活用した、間口を広げ展開を見据えた幅広い対応、②設備を手掛ける大手・中小企業、③自社でシステム開発を行う大手・プラットフォーマーまで幅広く対応できる体制を構築した。図の6類型をベースとして、幅広くアウトリーチ活動を行った結果、現時

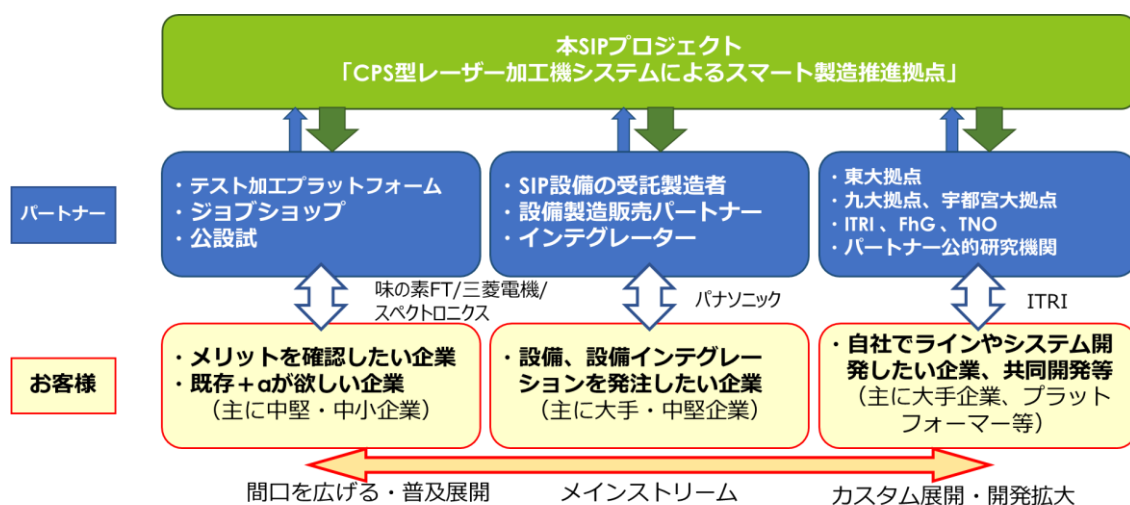


図 2-1-12. パートナーとの展開体制

点では、① TACMI コンソーシアム内の連携によって次世代の半導体後工程を実証するチームを構築、② パナソニック ホールディングス(株)との協業を開始し、レーザー加工 CPS をレーザー溶接工程へ展開、③ 台湾 ITRI との連携によって、台湾の半導体企業群との連携、及び我々のパートナーとの連携体制構築が進んでいる。本 SIP 光・量子課題が終了後も引き続き本体制を見据えた展開を進めていく。

上記活動から抽出された、社会実装に向けたターゲットの戦略として、特に 2022 年度は、半導体製造後工程と EV 用二次電池レーザー溶接工程を主要ターゲット市場と位置付けることとし、活動を重点的に実施した（図 2-1-13）。一方で、TACMI コンソーシアムを通じた広範囲のニーズ探索・連携構築も継続して実施し、広く産学協創体制が構築されている。

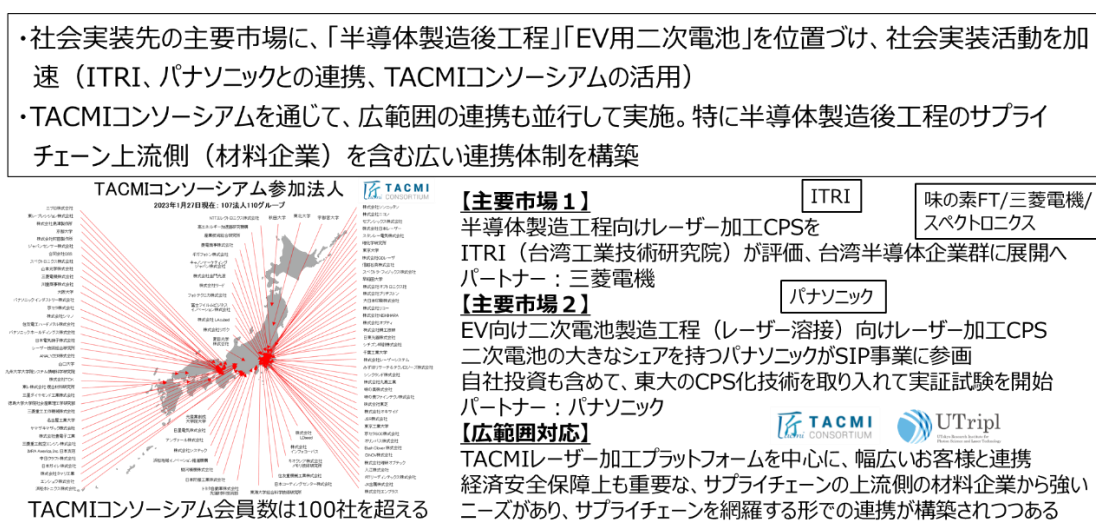


図 2-1-13. 主要ターゲット市場と TACMI コンソーシアムを通じたサプライチェーンを網羅する連携の構築

半導体製造後工程としては、日本が強みを持っている材料を中核とした連携を、TACMI コンソーシアムを活用して構築し、次世代半導体製造に資する微細穴あけ加工を実証した。この成果を 2022. 10. 24 にプレスリリースした（図 2-1-14）。市場で実績の高い産業用加工機をベースとして、この企業と協働で拡張・スマート化し、かつ非常に高品質な微細穴あけを実現したことによる反響は非常に大きく、本プレスリリースは 20 以上の著名なサイトで紹介され、それを起点としてさらに連携が広がっている。また、連携する台湾の工業技術研究院（ITRI）および台湾の半導体製造企業と国内チームを接続することによって今後も半導体製造における日本の競争力向上を目指す。

レーザー溶接工程としては、パナソニック ホールディングス(株)が直接本事業に参画することで、マイスターデータジェネレーターにレーザー溶接レーンを構築し、自動データ取得が順調に進捗した（図 2-1-15）。プロジェクト終了後も協働で本システムを運用してデータを蓄積し、溶接工程の CPS 化やその社会実装、製造ラインへの適用検証などを進めていく

ことで合意しており、より連携を深めた。

次世代半導体製造向けの極微細穴あけ加工を実現 ―業種横断の協働拠点で先端半導体をけん引―

研究成果

国立大学法人東京大学
味の素ファインテクノ株式会社
三菱電機株式会社
スペクトロニクス株式会社

- ▶ 次世代の半導体製造に資する10マイクロメートル以下を満たす、6マイクロメートル以下の穴あけを高品質かつ高生産性を維持し実現できることを実証
- ▶ 東京大学を産学官協創の拠点として、各法人が強みを持つ半導体に関連する最新の基盤技術を集結し開発
- ▶ 半導体パッケージ基板のさらなる微細化や高品位化を目指すことで、次世代半導体産業における日本の競争力強化に貢献

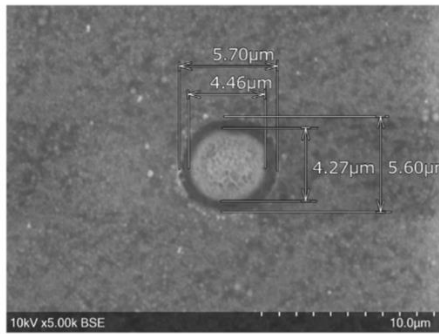


図 2-1-14. 次世代半導体後工程に向けた微細穴あけ加工のプレスリリース（プレスリリース Web サイト：日本経済新聞 Web 版、Yahoo News ほかに多数のメディアで紹介された）

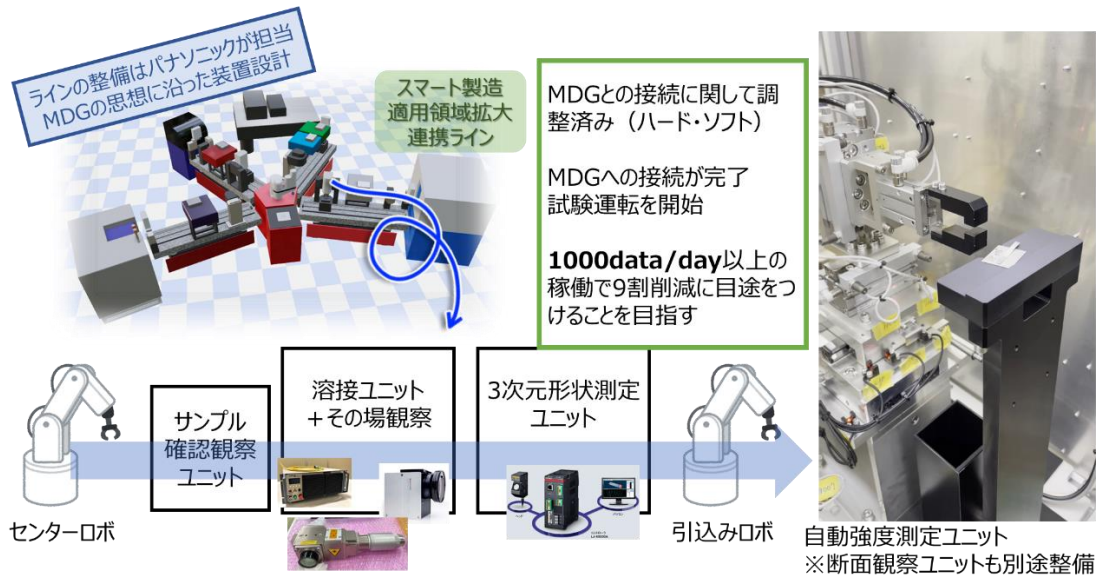


図 2-1-15. レーザー溶接工程への GPS 型レーザー加工の適用範囲拡張

【体制整備・成果】

社会実装に向けた体制としては、企業の自己投資拡大の促進や個別共同研究拡大に対応するため、TACMI コンソーシアムを中核とするパートナー企業、顕在・潜在ユーザーとの連携強化や、産学連携を推進する全学組織として東京大学に設立した光量子科学連携研究機構(UTripl)を中核として学内制度の改革や、体制の整備をロードマップに従って進めた(図 2-1-16)。

会員企業 100 社を超える TACMI コンソーシアムを中核として、そこに本事業を含む、会員企業の様々な先端技術を集約するレーザー加工プラットフォームを活用することで、産学協創連携の構築を進め、レーザー加工プラットフォームにおいては本事業成果の有償利用も開始した。ユーザー企業による試用は着実に拡大しており、本事業の成果を展開する上で有用な多くのフィードバックを得ているほか、パートナー企業との協働、企画・運営機能の拡充等、適切な人的体制の補強などを行っている。引き続き 2022 年度終了まで、社会実装に必要な企画や改革を積極的に進めることで、事業終了後の自律的運用を目指す。

大学側の体制としては、UTripl のもとで体制整備を進めた。公的拠点として、公的投資と民間投資のベストミックスモデルケースを確立するべく、TACMI コンソーシアムとの役割分担なども含めて、今後も活動が拡大するよう、引き続き適切な体制整備を進める。

レーザー加工プラットフォームにおける有償利用や学内に整備をした共同研究設備利用制度、および共同研究契約の拡大などにより、事業終了時に目標とする活動規模を達成できる見込みであり、5 年後、10 年後を見据えて拠点体制の強化や拡大を図る。

時期	展開イメージ	狙う市場分野と市場規模
事業終了時	パートナー企業が積極的に拠点設備を活用	東大拠点の活動として、10億円(レーザー加工・製造)
5年後	パートナーの自己投資を拡大・個別共同研究の拡大	パートナー企業の事業規模として、500億円(製造・モビリティ)
10年後	効果的な産学の役割分担に基づく研究開発エコシステム	パートナー企業の事業規模として、4,000億円(製造・モビリティ)
30年後	研究開発エコシステムとCPS化技術波及の拡大	パートナー企業の事業規模として4兆円、製品製造企業への波及効果として40兆円(製造・モビリティ・エネルギー)

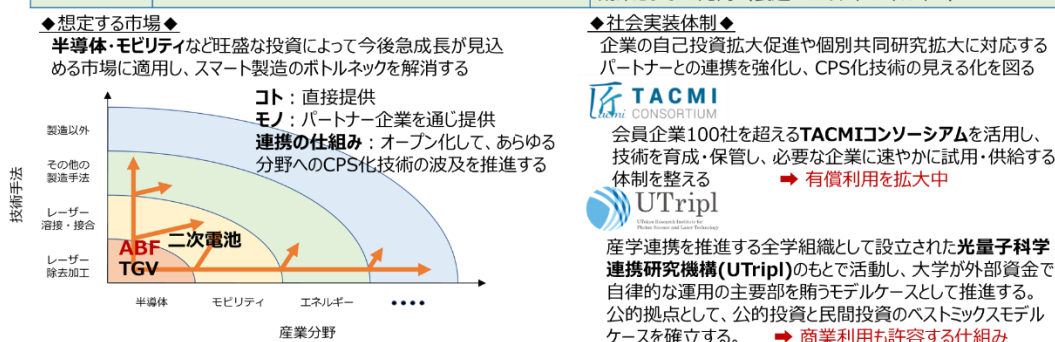


図 2-1-16. レーザー加工 CPS の社会実装に向けた体制整備

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

大学を拠点化し、コトとモノの開発エコシステムを構築した。材料・デバイス・装置などの「モノ」は構築を受託したパートナー企業から市場へ。価値の源泉となる高品質なデー

タから得られる学習済み AI やプログラム等の「コト」をパッケージ化して有償提供していく。中核となるビッグデータを直接活用する仕組みは戦略的に囲い込む。「コト」をクラウドベースで提供する仕組みも実証した。社会実装推進の枠組みについては、オープン化、デファクトスタンダード化を進め、ビジビリティを確保するとともに、知財・標準化戦略に関しては、専門家とも継続的に議論しており、引き続き適切に対応できる体制を構築している。

⑥ 成果の対外的発信

マイスターデータジェネレーターの稼働やレーザー加工 GPS の成果など、重要な成果の際に新聞記事やプレスリリースなどを効果的に実施した。社会実装へ向けた活動として実施した、レーザー微細穴あけ加工のプレスリリース（パートナー企業と共同）は、インターネット上でリーチ数 140M を超えるメディアへ展開された。オプトロニクス誌や Nature Focal Point や MURC 社が主導する書籍、関連学会誌などでも広く発信するとともに、その他、各種招待講演や幅広いテーマ設定の公開セミナーも精力的に実施した（TACMI 会員企業からも多数参加）。結果、TACMI 会員数も順調に伸びている。

⑦ 国際的な取組・情報発信

グローバルベンチマークでも明らかとなった、「データを中核とした GPS 化戦略」が世界的に見ても独自で、世界に先駆けてモノづくりを GPS 化する拠点として確立させることを明確化するために、コンセプト論文の出版や英語でのビデオ配信などを実施し、海外の認知度や評価向上のための広報を実施した。

グローバルベンチマークを実施した台湾工業技術院（ITRI）は台湾の半導体企業群とも連携しており、本研究課題の主要なターゲットの一つである半導体後工程の社会実装に向けた連携を進めている。2022.10.24 のプレスリリースや台湾での半導体製造関連国際会議 IMPACT2022 での発表などを機に連携活動が急速に進展しており、IMPACT2022 での発表などを機に連携活動が急速に進展しており、今後 ITRI の幹部クラスの来訪も予定している。これを基点に主に半導体メーカーへの国際展開体制を構築し、半導体製造における日本の競争力強化に貢献する。