

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 27 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) CPS 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) CPS 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) CPS 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) CPS 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るか。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 S I P 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リソ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)「フォトリソ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 フォトリソ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)	フォトリソニック結晶により、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ホ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（ユーザー環境で稼動可能な研究試作品）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、H-LINCOS*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 の成果を反映し、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) ディスプレイ用多結晶 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积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GPS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、フォトリソ結晶レーザー（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)フォトリソ結晶レーザー（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取り組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。

CPS 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。

CPS 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、CPS 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、CPS 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て設計されており、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が見込まれる。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。

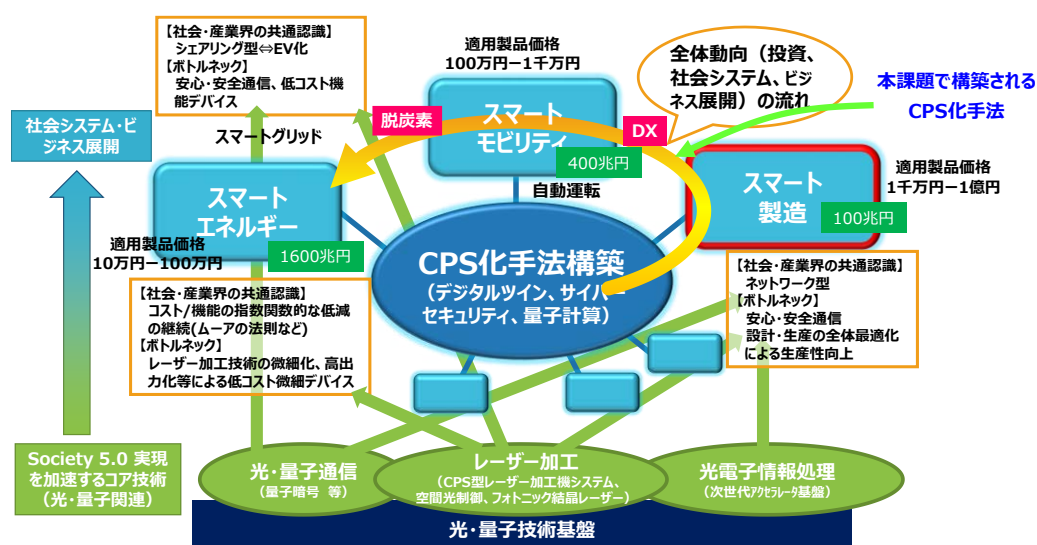


図 1-2. 研究成果で期待される波及効果

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・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が期待される。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力学・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。研究課題ごとでの 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 CPS 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) CPS 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 CPS 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 CPS 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、CPS 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 CPS 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、CPS 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℃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ることで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 1mm Φ 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 1mm Φ の大面積デバイスでの安定発振を実現し、出力 ~ 70 W、拡がり角 $\sim 0.1^\circ$ (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、3mm Φ 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、 $500\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ の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) 3mm のデバイスで、 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 1mm のデバイスで、 10W 級かつ $\text{M}^2\sim 2$ 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射出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、多点を同時に射出し、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 CPS (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 CPS 化（機械学習や 3 次元結合波理論等の高度解析法を用いた、フィジカル空間でのデバイス作製工程のデジタルツインの形成）において、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 CPS 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800km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GPS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・コデザイン技術

- 1) 次世代アクセラレータ・コ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リソ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. CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成の主要成果

「CPS 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「CPS 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 CPS 化拠点構築のノウハウの提供を受けて、「CPS 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 CPS 化に取り組んだ。2020 年度以降は CPS 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 CPS 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、CPS 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）。CPS 化に向けて構築した加工データ取得ループ（ローカル CPS 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㈱、東京エレクトロン㈱、㈱SCREEN ホールディングス、㈱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、CPS 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、CPS 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、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 CPS 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㈱、㈱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㈱、キオクシア㈱、ギガフォトン㈱

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。

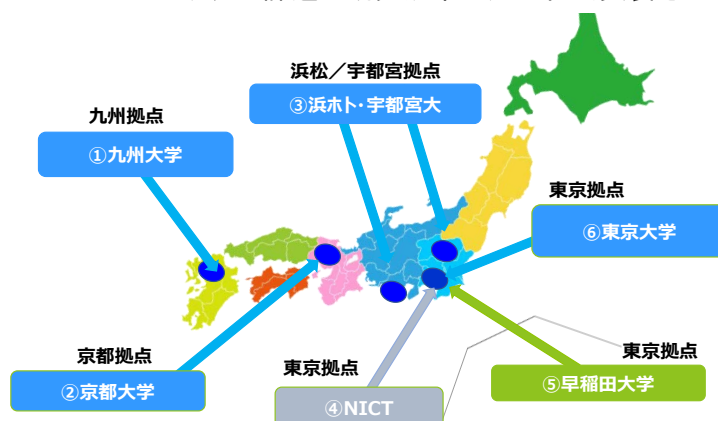


図 1-3. 課題抽出から解決まで一貫して行う SIP 光・量子課題の各拠点

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. CPS 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、CPS 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 CPS 化のパイロット拠点設立を計画し、九州大学の CPS 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、CPS 構築の目途を付けた。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ミ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	UTrip 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光制御を用いたレーザー加工の技術サポート体制を整えた。情報発信に繋がるようにバーチャル展示室を準備し、コンテンツの充実を継続的に図っている。

【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。
- ・ドイツフ라운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 HOLO 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 台の光学定盤上それぞれに 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㈱・三菱電機㈱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リソ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リソ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リソ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リソ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リソ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 動作高輝度フォトリソ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リソ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、ドイツのフラウン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。

機関名	社会実装体制	事業財源	人材確保
京都大学	・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。	・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。	- 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)等と共同で作業者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、CPS 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にすることを目指す。
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。
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。】

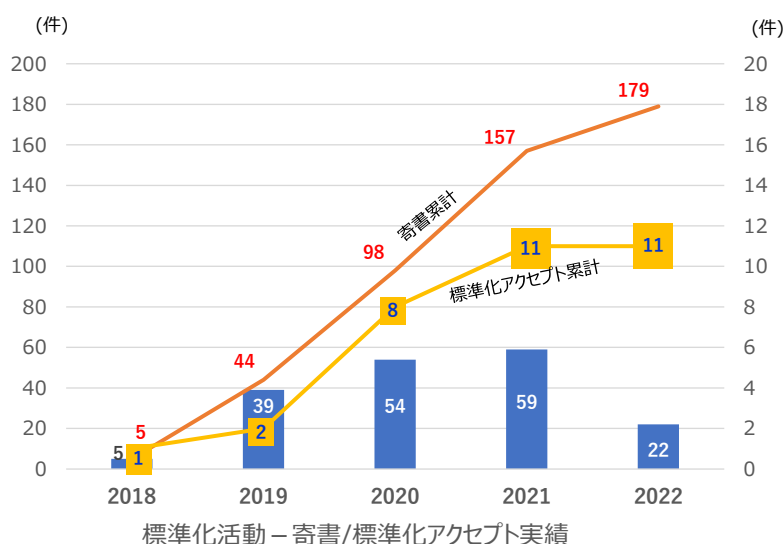
課題全体としての知財戦略は、出口戦略をマネジメントするために、知財委員会を研究推進法人の下に設置し、発明者や産業化を進める者のインセンティブを確保し、かつ、国民の利益の増大を図るべく、適切な知財管理を行っている。知財委員会の下に各研究課題に知財部会を組織し、各知財部会の立案戦略を知財委員会で状況把握し、情勢を考慮しつつ戦略を見直している。

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）。

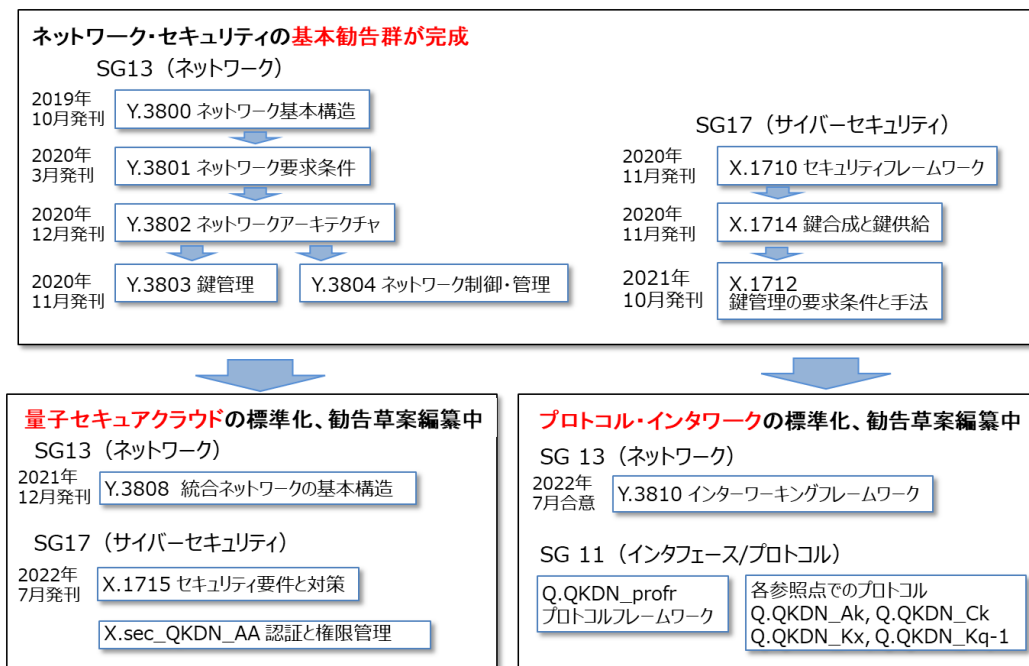
こうした活動当初に立案したオープン/クローズ戦略の下、特許出願やノウハウの秘匿のほか、拠点形成、社会実装に向けての知財・契約専門家の本格的活用を進め、計画以上のペースで進む優れた研究成果、整備した拠点活動も活かし、社会実装の実現可能性を高める成果につなげている。具体的には、CSP 型レーザー加工機システムでは参加企業が 110 グループの TACMI コンソーシアムを活用した技術育成・保管、必要な企業への試用・供給する体制を整備した。空間光制御技術では国内大手企業との POC の実施のほか、海外機関との連携

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 プリントへの応用に期待	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/味の素ファインテクノ(株)/三菱電機(株)/スベクトロニクス(株)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(株)共同発表	NICT	2022.10.24
12	「青色GaIn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(株)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] (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 [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 [NICT/(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 がハッカソニイベントを開催し、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、CPS 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、CPS 化を推進するための拠点形成のノウハウを、産業的に CPS 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 CPS 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、実用稼動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、相互の関連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、CPS 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 CPS 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 CPS 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 CPS、さらには切断 CPS 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」、「フォトリソグラフィ」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。

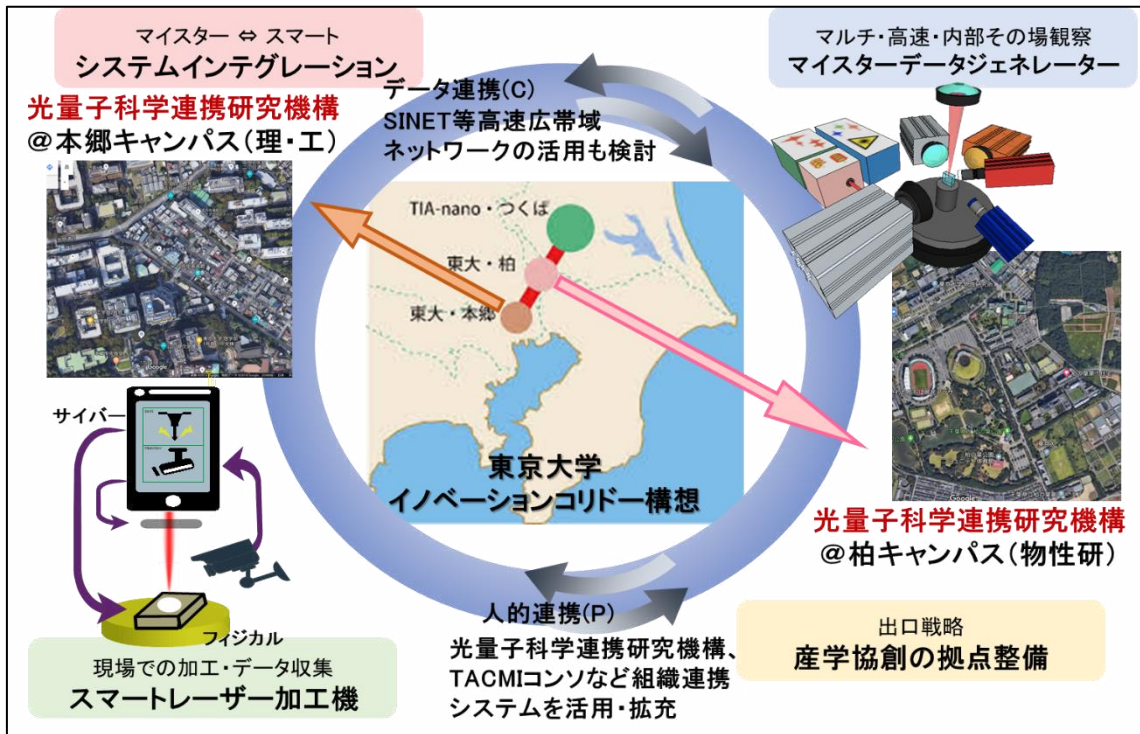


図 2-1-1. スマート製造推進拠点全体構成

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が期待される 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)レーザ加工							
①CPS型レーザ加工機システムに係る研究開発							
システム開発	- 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 - 要素間連携方式のプロトタイプ設計 - 実績収集・学習用の加工・計測システムの試験装置開発	- 詳細観望の要素技術評価に基づく加工過程観望の手法の検証 - 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証	- 加工過程観望手法の検証に基づくリアルタイム観望要素技術の検証 - 特定用途向け自動パラメータ探索型加工機の実証 - 実績収集・学習用の加工・計測システムの試験装置の設計	- 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項目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運用 - 自動パラメータ探索型加工機のチューニング	- 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段階におけるリードタイムを9割程度削減することに貢献 - 自動パラメータ探索型加工機の実証、難加工材料の加工によるデモンストラレーション	- 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	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化コアモジュール提供 (2025～)
体制整備評価・フィードバック、社会実装	- TACMIコンソーシアムとの連携体制整備 - TACMIコンソーシアムの加工プラットフォームへの装置提供・運用ルール整備	TACMIコンソーシアムの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	- 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	- 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	- 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%) ※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 ✓ 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

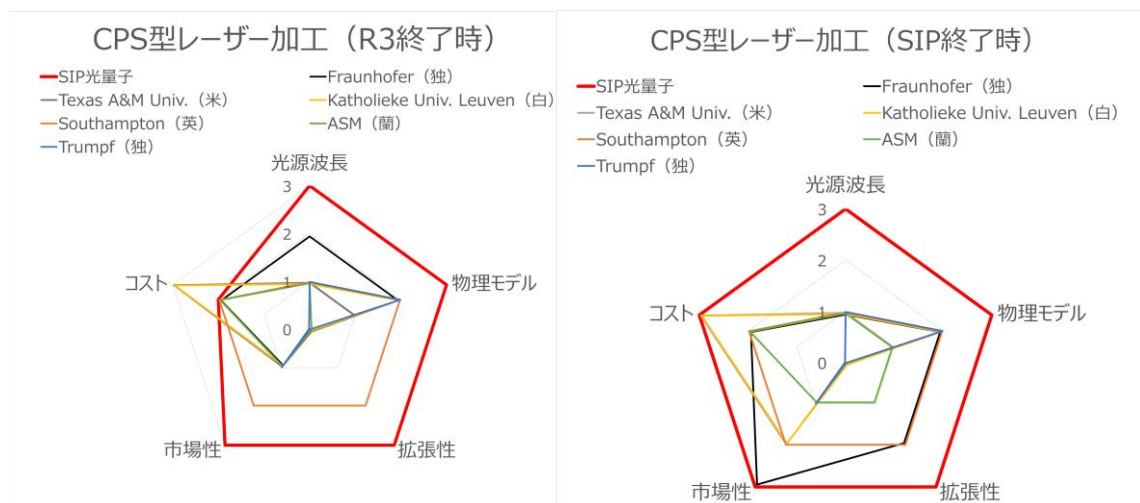


図 2-1-2. グローバルベンチマーク調査結果

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 CPS 化する拠点として確立していく。

一方で、諸外国の CPS 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 CPS 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 CPS 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 CPS 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 CPS 化に関連するニーズが集まっており、CPS 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。

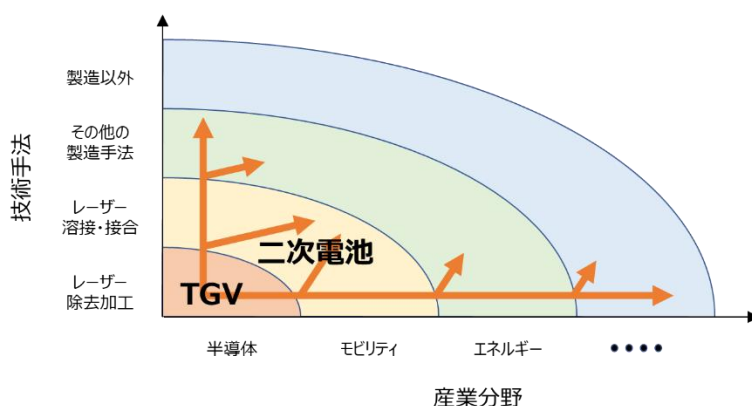


図 2-1-3. ターゲット展開と波及戦略

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 CPS 型レーザー加工の社会実装に向けて研究開発を行った。CPS 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。

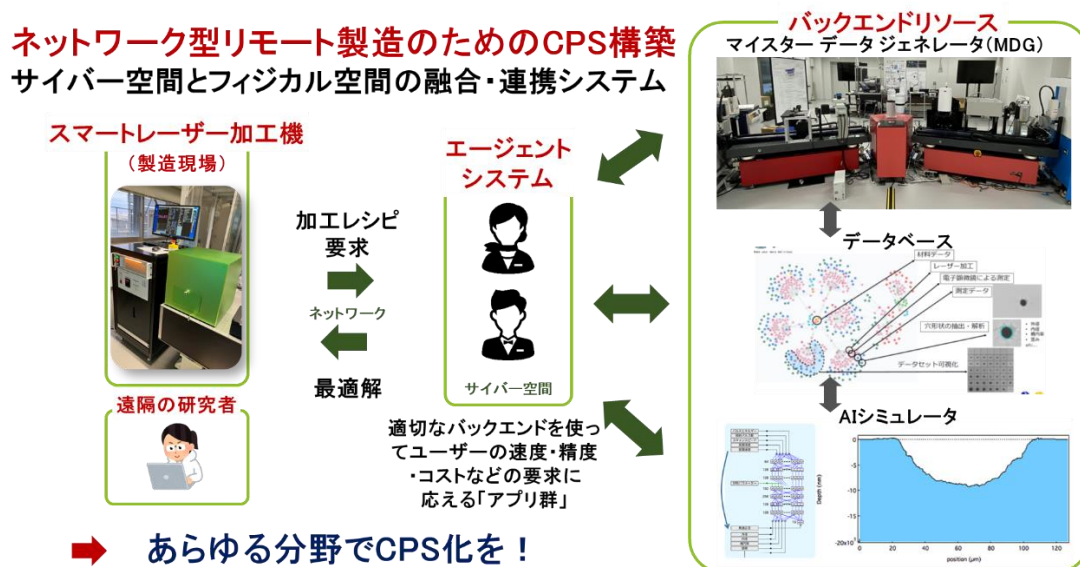


図 2-1-4. 構築したレーザー加工 CPS の概念図

(1) マイ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)。



図 2-1-5. マイスターデータジェネレーター (MDG) の写真

・ MDG による全自動データ取得とその性能向上は図 2-1-6 のように計画を立てて実施した。2018 年度にコンセプトの構築を実施し、2019 年度には完全に人の手を介さずに全自動でデータ取得ができることを達成した。2020 年度には職人とほぼ同等の性能を達成し、得られた高品位のデータから高精度なシミュレータを構築できるようになった。2021 年度には MDG の自律的なデータ取得が本格稼働し、81 種類のサンプルを自動で運用可能なローダーを設置した。これにより、全自動で大規模なデータ取得をできるようになり、前倒しでデータ取得性能を達成した。2022 年度には 1000 data cycle/day と人間ではスケールしない領域へと到達することができた。



図 2-1-6. マイスターデータジェネレーターの可用性拡大により、データの量的変化から機能の質的変化を生み出した (計画と達成データ取得性能)。

・ MDG による全自動、高品位なデータ取得が可能となったことにより、そのデータを用い

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。

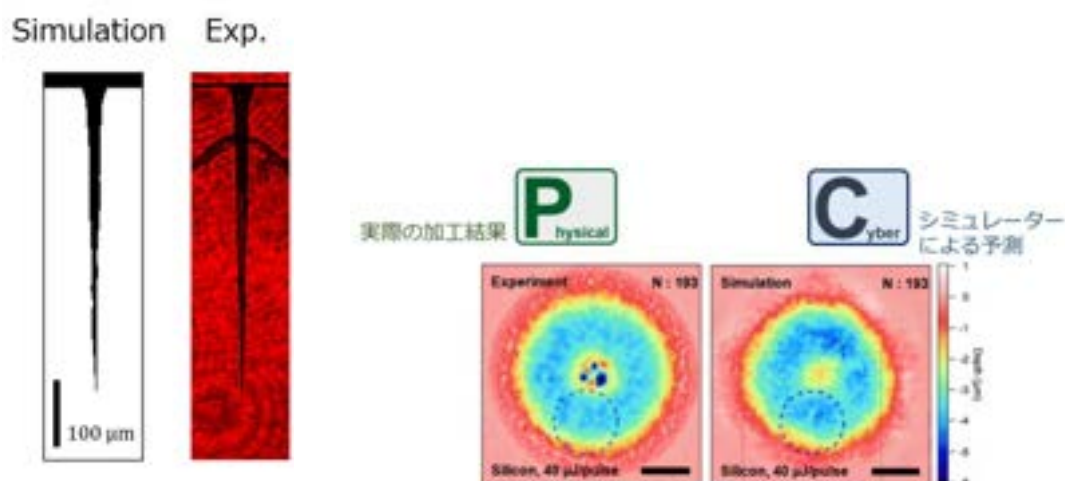


図 2-1-7. MDG の大規模高品位データを用いて構築した AI（深層学習）を用いたレーザー加工シミュレータ（右：ガラスの深穴加工 左：シリコンのトレパニング加工）

・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。

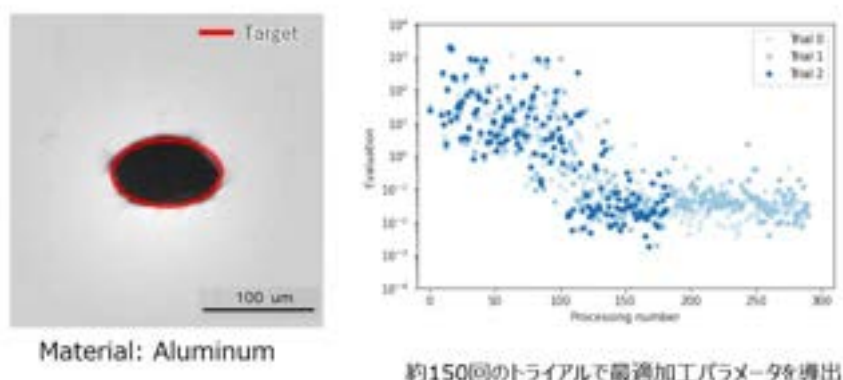


図 2-1-8. マイスターデータジェネレーターを用いたレーザー加工パラメータ最適化の例

・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）。

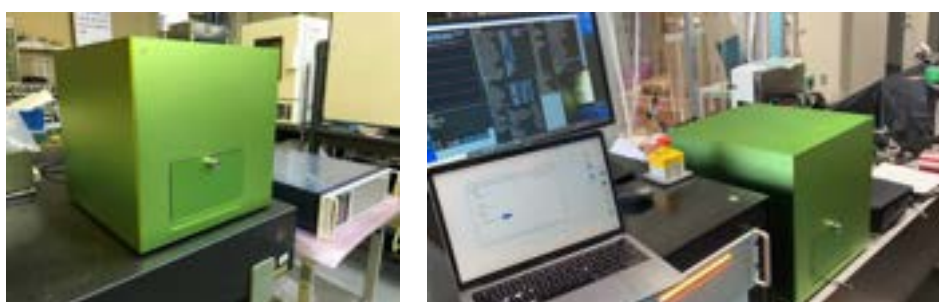


図 2-1-10. CAD データの投入のみで最適なレーザー加工が可能なスマートレーザー加工機システム

・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

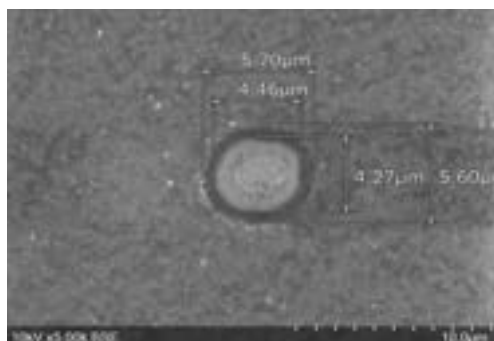


図 2-1-11. 半導体後工程用層間絶縁材料 ABF の微細穴あけ加工結果（穴を上面から観察した電子顕微鏡写真）

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

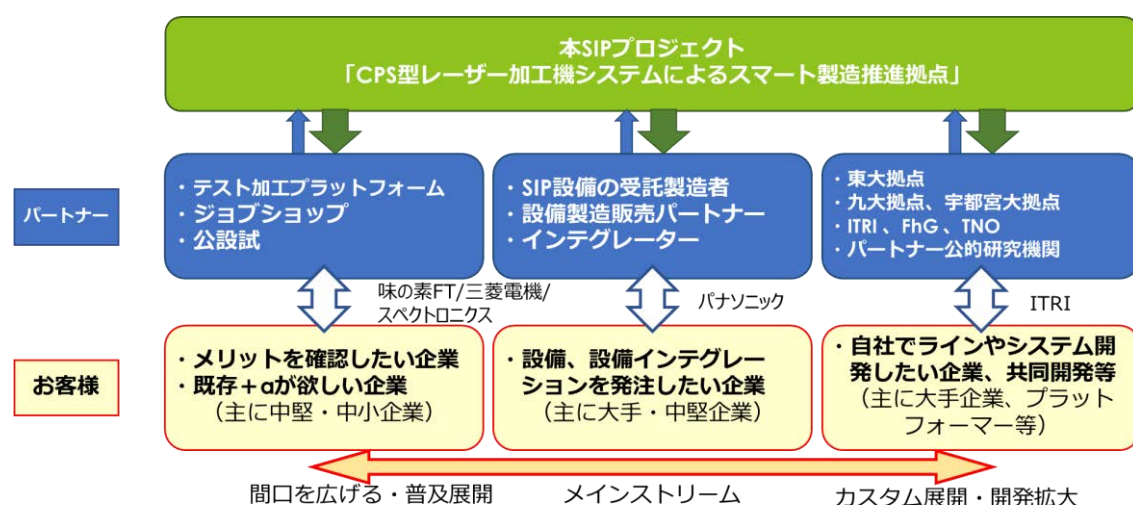


図 2-1-12. パートナーとの展開体制

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。

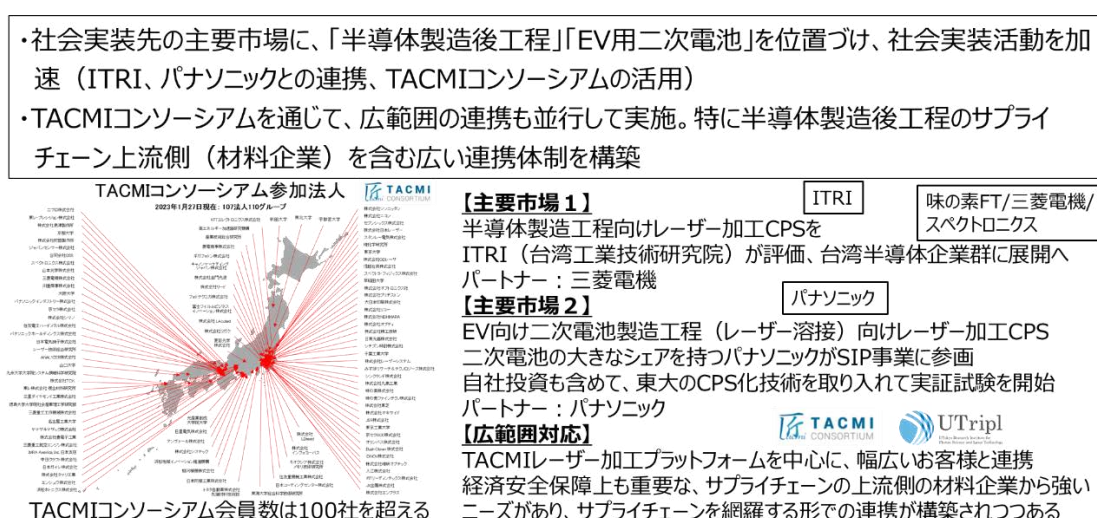


図 2-1-13. 主要ターゲット市場と TACMI コンソーシアムを通じたサプライチェーンを網羅する連携の構築

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

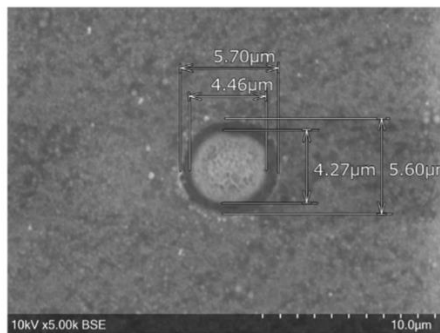


図 2-1-14. 次世代半導体後工程に向けた微細穴あけ加工のプレスリリース（プレスリリース Web サイト：日本経済新聞 Web 版、Yahoo News ほかに多数のメディアで紹介された）

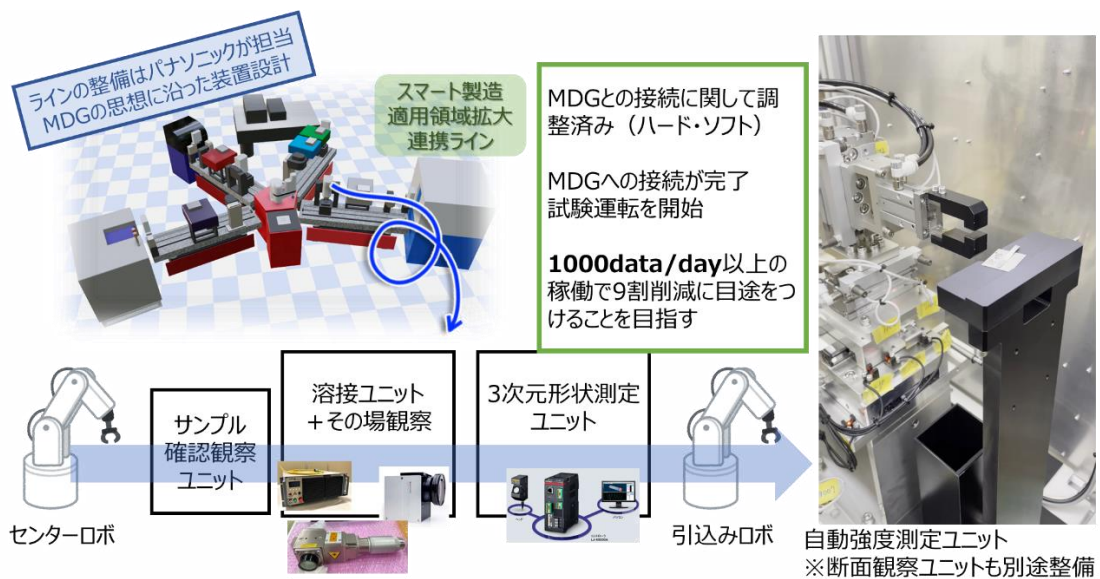


図 2-1-15. レーザー溶接工程への GPS 型レーザー加工の適用範囲拡張

【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)

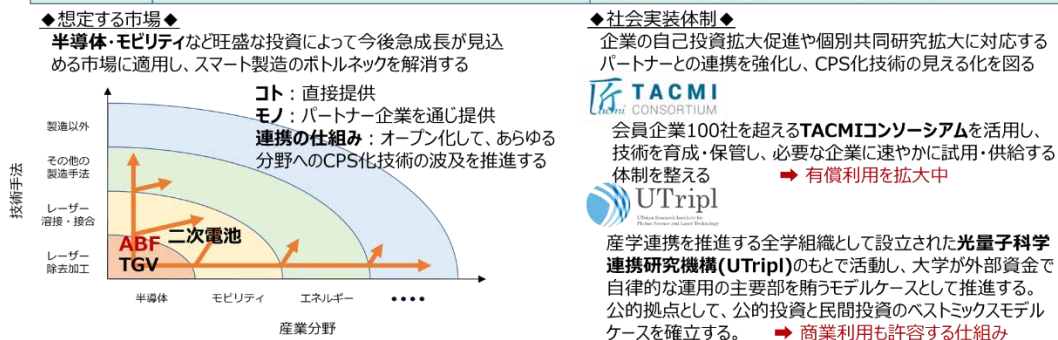


図 2-1-16. レーザー加工 CPS の社会実装に向けた体制整備

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 CPS 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 CPS 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 CPS 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。

(b) 空間光制御技術に係る研究開発

研究責任者：豊田 晴義（浜松ホトニクス株式会社 執行役員 中央研究所長）

参画機関：浜松ホトニクス株式会社、宇都宮大学

1) 研究内容

研究開発の全体像：

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

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

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

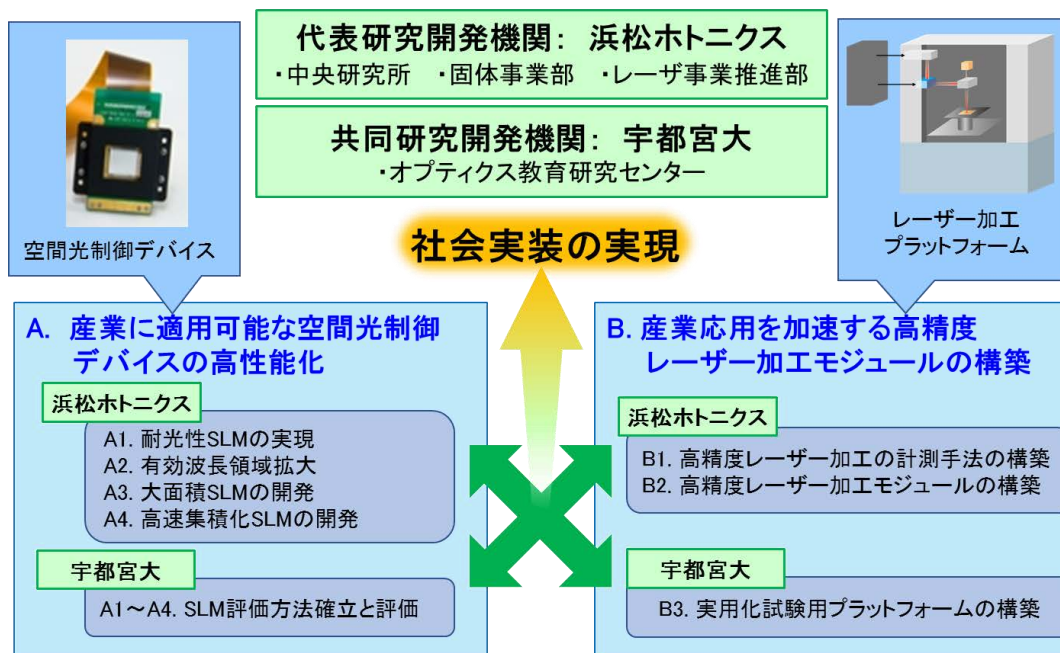


図 2-2-1. 研究開発の概要と実施体制

具体的な実施計画（内容）：

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

A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化

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

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

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

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

社会実装（計画）：

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

2) 技術的目標（計画）

事業終了時点アウトプット目標（2022年度の目標）

A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化

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

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

・高スループットでのレーザー加工の実現。「実用化試験用プラットフォーム」における、ニーズに連動した加工試験を実施（これらにより、高出力レーザー加工の実用化を推進する）(TRL5)。

・東京大学等との外部連携を拡大し、レーザー加工実証実験とユーザービリティ向上(TRL3)。
「実用化試験用プラットフォーム（浜松拠点・宇都宮拠点）」での外部ユーザーとのレーザ

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

以下に 5 年間の工程表を示す。

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
②空間光制御技術に係る研究開発							
1) 産業に適用可能な空間光制御デバイス(SLM)の高性能化	● レーザー加工ニーズ収集 ● 耐光性SLMデバイス作製・評価に関する基礎評価実施 ● 大面積SLMの試作条件出しのための基礎評価 TRL1	● 薄膜製膜技術の最適化による平面度向上による高精度化 ● 大面積SLM製造の平面度向上の最適化 TRL3	● 高耐光SLMの実現 (平均強度: 100W レベル、位相制御精度: 1/100波長以下) ● ユーザーの使用環境に関する情報や要求仕様等に適合するデバイス評価 TRL5	● 紫外耐光・高精度位相変調機能を両立したSLMの試作・評価・改良 ● 大面積SLMの平面度向上、最適化 TRL5	● 大面積かつ高耐光性の広波長領域SLMの実現 ● 3桁以上の高速応答性SLMの実現 (高出力レーザー加工の高性能化に必要なSLMデバイス製造技術を獲得し、100~1000倍程度の生産性向上実証) TRL7	・ 研究参画企業による上市 ・ 研究参画企業での継続開発 (SLMデバイス、顕微モジュール等) ・ レーザーメーカーへの技術供給・モジュール供給 ・ 顕微イメージングメーカーへの技術供給・モジュール供給 ・ 実用化試験用プラットフォームの整備、試用機会提供 ・ ユーザーおよび産学官と連携した新規ニーズの開拓とソリューションの創出	高耐光液晶SLM (2020~) 大面積高機能SLM (2023~) 高精度・高スループット型加工モジュール (2023~) 高速高集積SLM (2025~) 最適制御型加工モジュール (2025~)
2) 産業応用を加速する高精度レーザー加工モジュールの構築	● 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自指した設計、仕様策定、評価実験 ● 既存のレーザー加工システムを用いた加工試験 TRL1	● 高性能化SLMによるパラメータ可変加工・評価技術の確立 ● レーザー光源の高出力化の検討	● 一般産業用途用レーザーにSLMを組み合わせたモジュールによるレーザー加工実施 ● ニーズに合致した加工試験によりSLMを用いたレーザー加工の有効性を実証 TRL3	● 実用化試験用プラットフォームの構築 ● プラットフォーム用レーザー光源の開発	● 高スループットでのレーザー加工実現 ● ニーズに連動した加工試験の実施 ● 外部ユーザーとの連携によるレーザー加工実証実験とユーザービリティ向上 TRL5 TRL3		
民間からの出資 (人材、物資、資金等)	(10%程度)	(35%程度)	(50%以上)	(50%以上)	(50%以上)		

3) 課題目標の達成度 (成果)

① 国際競争力

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

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

事業開始時 2018年度
研究開発計画

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

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



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

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

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

図 2-2-2. 空間光制御デバイスのベンチマーク結果

(左 : SIP 事業開始時、右 : SIP 事業終了時)

空間光制御デバイス (SIP終了時)

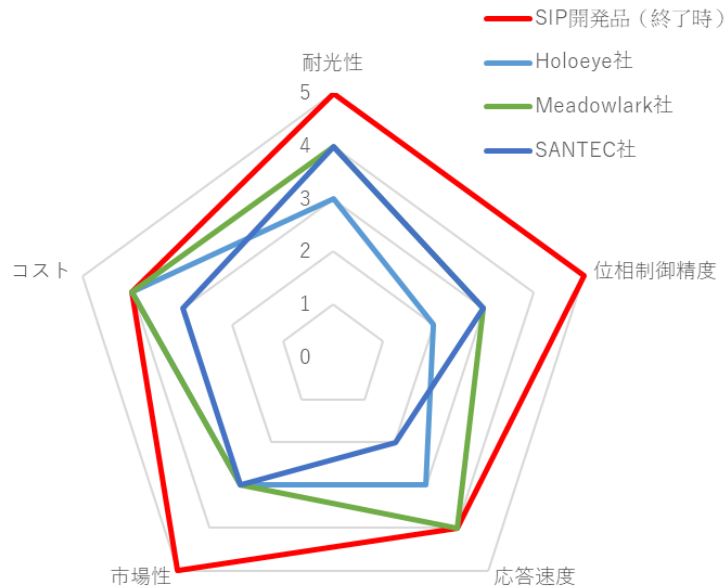


図 2-2-3. 空間光制御デバイスのベンチマーク結果 (SIP 終了時)

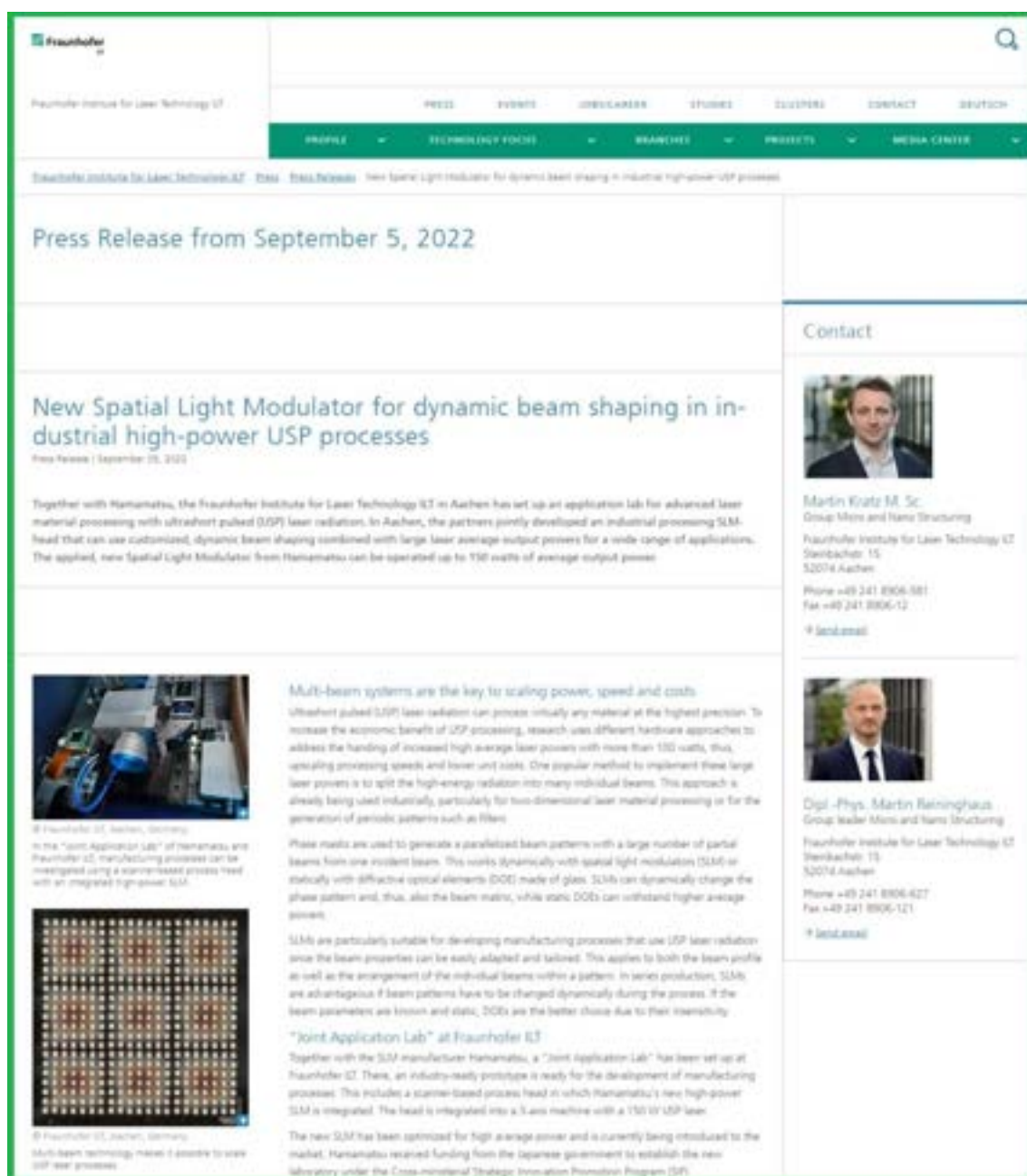


図 2-2-4. フラウンホーファー研究機構 ILT 研究所からのニュースリリースの HP 写真

② 研究成果で期待される波及効果

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

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

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

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

③ 達成度 (1) ※5 年間の設定目標に対する達成度

A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス (空間光制御デバイス) の高性能化

この項目の SIP 第 2 期 5 年間の設定目標は以下の通りである。

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

この目標に対して、成果状況は以下の通りである。

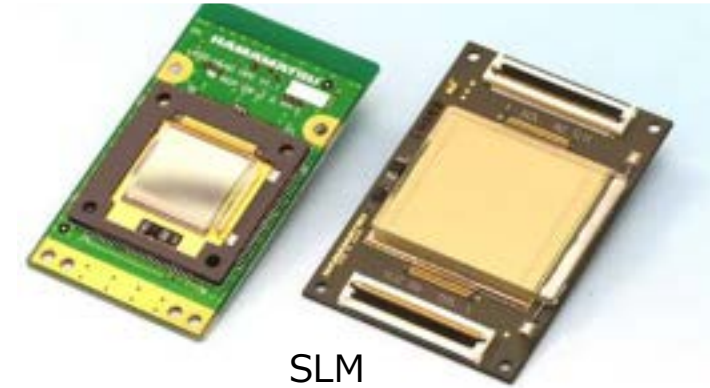
1) 大面積かつ高耐光性の広波長領域 SLM の実現

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

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

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

従来サイズでSLMの高耐力化に成功、大面積化で用途拡大



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

主な仕様			
項目	従来開発品	本開発品	単位
対応波長	3650 (±50)	1050 (±50)	nm
画素数	1272 × 1024	1008 × 1024	pixels
有効エリアサイズ (W×H)	15.9 × 12.8	30.24 × 30.72	mm
画素ピッチ	12.5	30.0	μm
開口率	96.8	96.7	%

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

2) 3 桁以上の高速応答性 SLM の実現

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

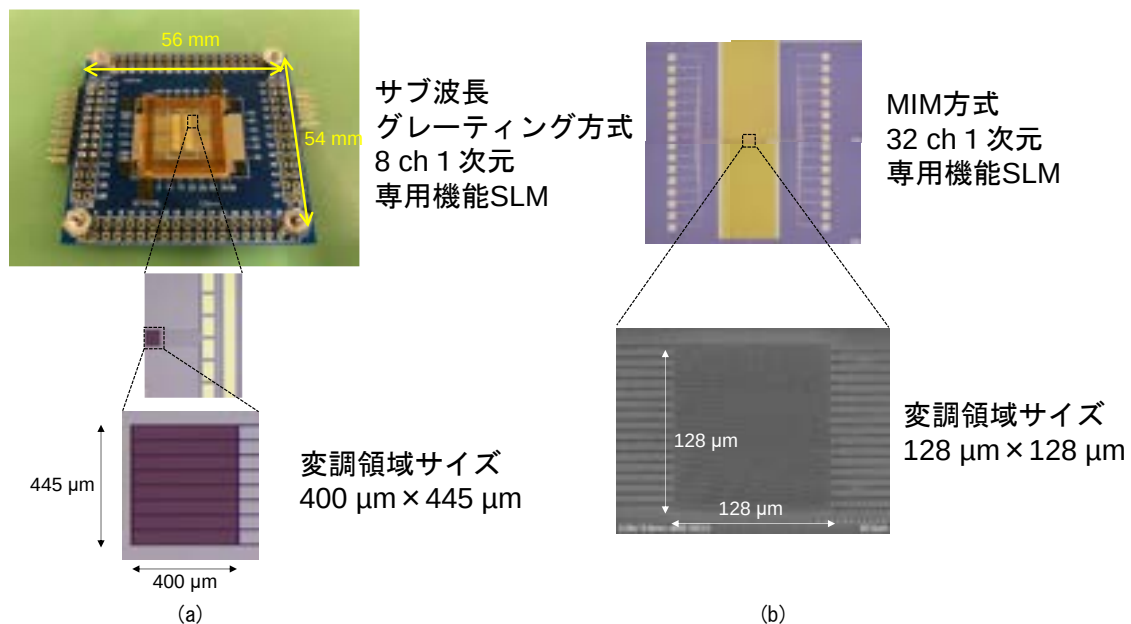


図 2-2-6. 高速応答 SLM : (a)サブ波長グレーティング方式、(b)MIM 方式

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

この項目の SIP 第 2 期 5 年間の設定目標は以下の通りである。

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

この目標に対して、各年度の目標と成果状況は以下の通りである。

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

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

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

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

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

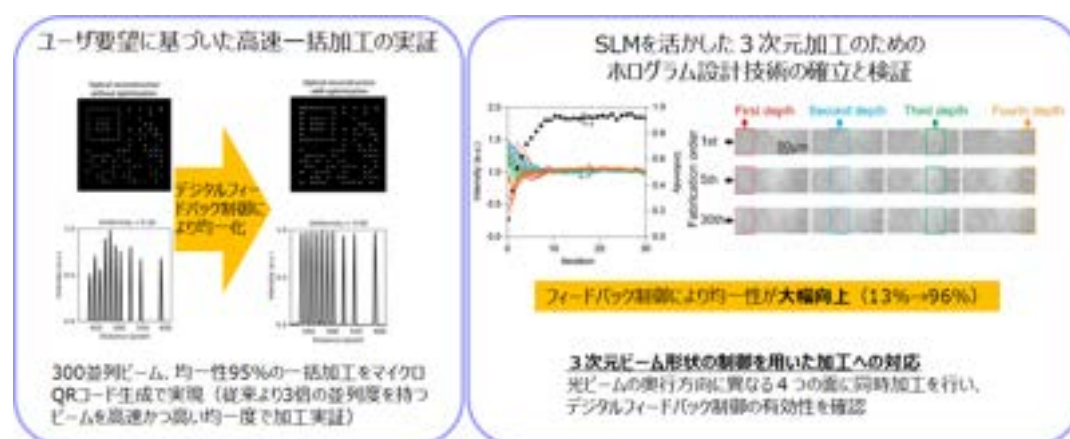


図 2-2-7. 高速一括加工の実証と 3 次元加工のための設計技術の確立と検証

④ 達成度（2）※社会実装の実現可能性

【計画及びその進捗状況】

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

【体制整備状況】

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

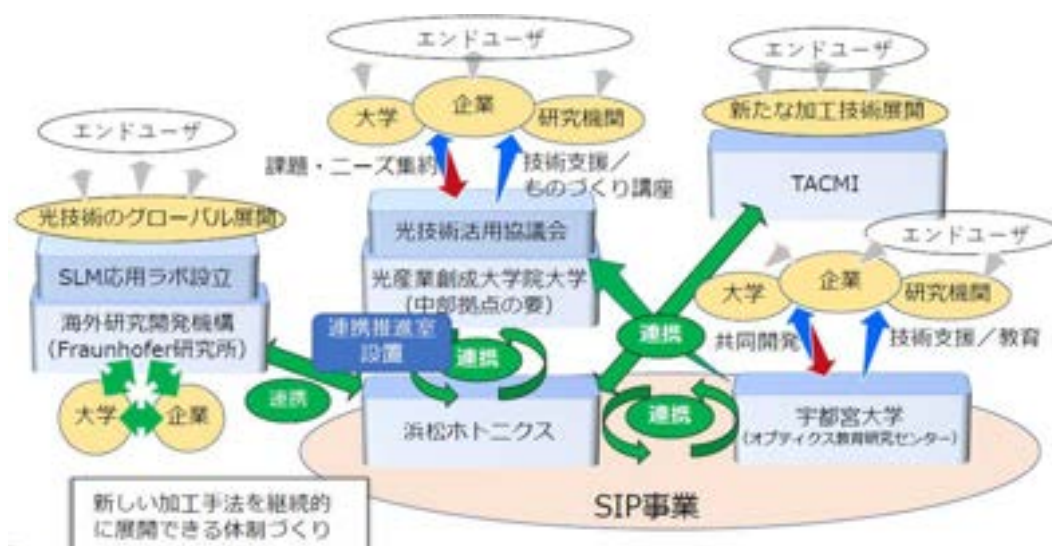


図 2-2-8. 浜松・宇都宮拠点の社会実装に向けた体制整備状況

【社会実装と認められる成果】

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

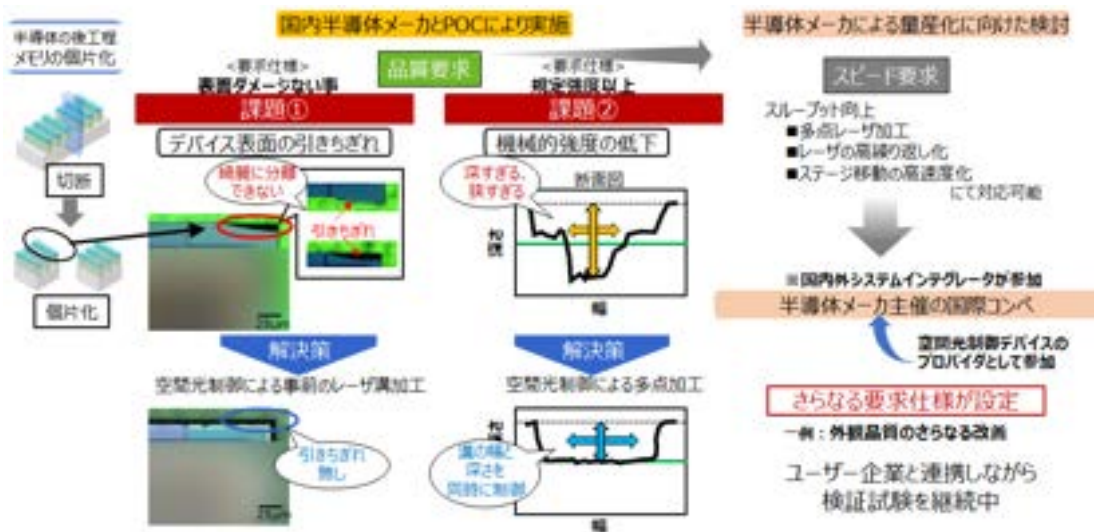


図 2-2-9. 国内半導体メーカーとの POC

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

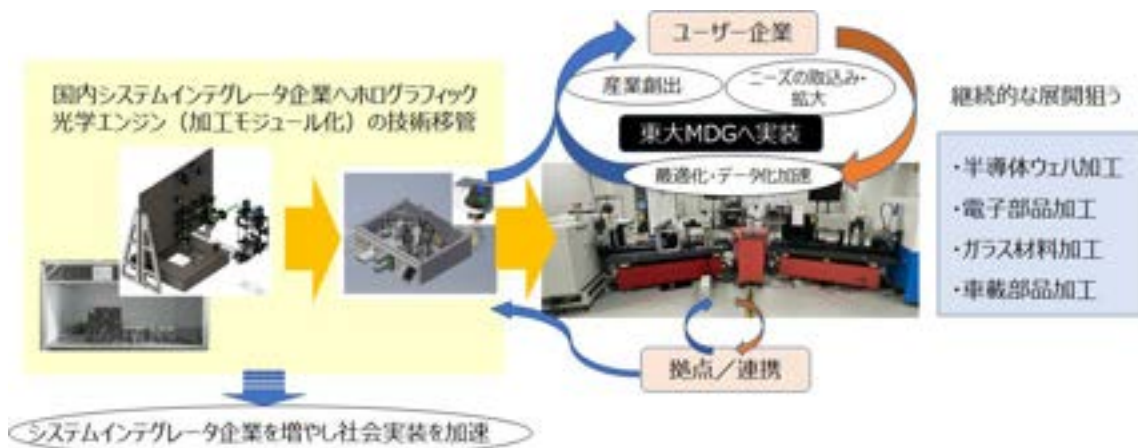


図 2-2-10. デジタルツイン実現に向けて東京大学 MDG へのレーザー加工エンジンの実装

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

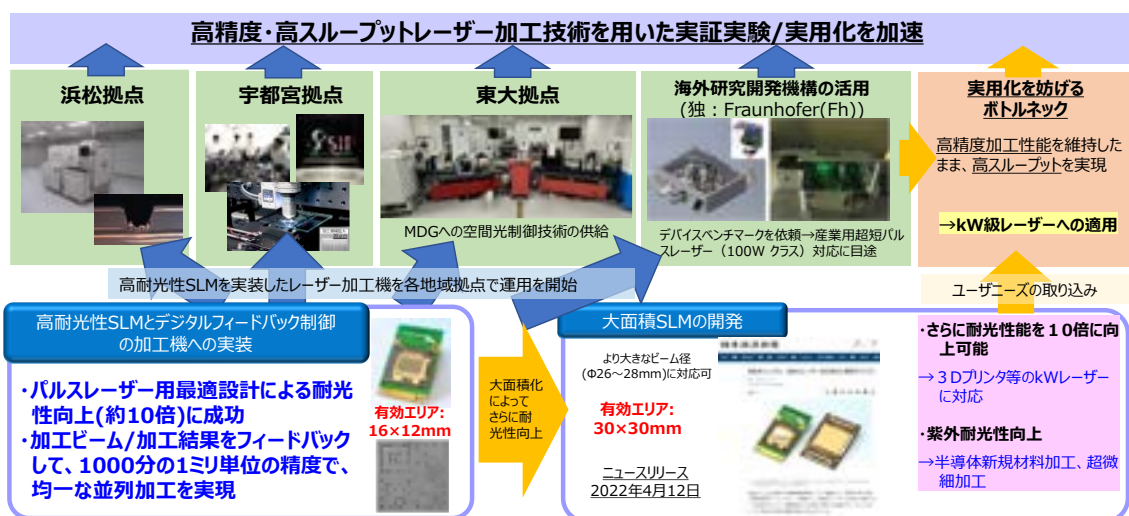


図 2-2-11. 浜松ホトニクス(株)の社会実装計画と進捗

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

2022 年度は、「高出力レーザー位相変調器」(特願 2022-149927) の国内出願を行った他、「レーザー加工装置及びレーザー加工方法」(特願 2020-070001) 及び 「レーザー加工装置及びレーザー加工方法」(特願 2020-070002) を優先権主張とする 2 件の外国出願を行った。これらは SLM を利用した三次元レーザー加工法に関する特許で競争力強化の上で重要な特許である。また、2020. 10. 23 に出願した特許「レーザー装置」が登録となった。空間光変調器 SLM については数多くの特許を持ち合わせており、SLM、レーザー加工方法のいずれにおいても知的財産はしっかり取得しており、今後の SLM を搭載した CPS 型レーザー加工技術の社会実装にしっかりと対応している。

⑥ 成果の対外的発信

耐光性を向上させるために開発した世界最大級の大面積 SLM の開発に成功したことを 2022. 4. 12 にプレスリリースを行った。この SLM は 2021 年度に開発し上市した高耐光性 SLM 技術をベースに、実効的な有効面積を約 1 桁広げたもので、さらに約 1 桁の耐光性の向上を図ったものである。この大面積 SLM は高出力 CW レーザーに対応できることから金属 3D プリンタの高精度加工分野への適用が期待される。また、Nature Focal Point(2022. 8. 11 号) で SLM を用いたレーザー加工技術の紹介を行った。また、FhG ILT 研究所から、超短パルスレーザー光による先端特殊レーザー加工向けのアプリケーションラボ (SLM 応用ラボ) を浜松ホトニクス(株)とともに開設したことに対し news release を行った(2022. 9. 5)。この SLM 応用ラボを通じ、欧州、特にドイツにおいて FhG の幅広いネットワークを活かし社会実装先の探索に利用する。この他、hamahot(浜松ホトニクス(株)技術紹介誌)(2022. 8)、日経クロステック(2022. 10. 7)、Laser Focus World Japan(2022. 11)、オプトロニクス(2022. 12. 9、WEB セミナー)の各誌を通じての積極的な情報発信を行うとともに、SLM ワークショップ

(2022.12)を開催し、レーザー加工へのSLMの応用を紹介した。

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

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

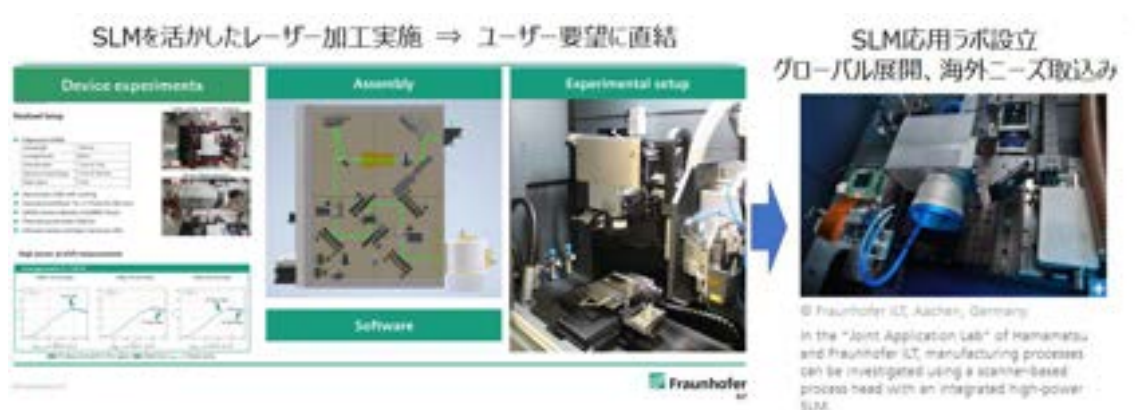


図 2-2-12. FhG ILT 研究所とのアプリケーションラボ (SLM 応用ラボ) 開設

⑦ 国際的な取組・情報発信

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

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

(c) フォトニック結晶レーザーに係る研究開発

研究責任者：野田 進（京都大学大学院工学研究科 教授）

参画機関：京都大学、三菱電気株式会社、ローム株式会社

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

1) 研究内容

研究開発の全体像：

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

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

具体的な実施計画（内容）：

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



図 2-3-1. 研究開発の概要と実施体制

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

(A) フォトニック結晶レーザーの高輝度化（CW およびパルス動作型の高輝度フォトニック結晶レーザー光源の開発）として、

A1：高輝度化に向けたデバイス基盤技術の構築

- ① 大面積で高出力かつ高ビーム品質動作を可能とするフォトニック結晶構造（＝2 重格子構造）の深化・最適化
- ② 安定した高ビーム品質動作のための電流注入分布制御
- ③ 高効率動作のための上方への光取り出し効率の向上および不要な吸収損失の抑制

A2：将来的なスマート加工（レーザー加工）への展開に向けた、実装・放熱・合波技術の確立、大面積ワンチップ高出力デバイス技術等の要素技術の構築

A3：LiDAR 等のセンシングシステム応用に向けた、ナノ秒動作技術の確立等の要素技術の開発を行い、それによる高輝度フォトニック結晶レーザー光源の実現、さらに、（直近の出口の 1 つとして）LiDAR 等のセンシング光源の実現を目指す。

(B) フォトニック結晶レーザーのスマート化に関しては、

B1：2 次元全面に渡る電子的ビーム走査に向けた、望む方向へのビーム出射を可能とする

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

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

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

社会実装（計画）：

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

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

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

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

2) 技術的目標（計画）

事業終了時点アウトプット目標（2022 年度の目標）

(A) フォトニック結晶レーザーの高輝度化

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

(B) フォトニック結晶レーザーのスマート化

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

以下に 5 年間の工程表を示す。

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
③フォトニック結晶レーザー(PCSEL)に係る研究開発							
(1) CWおよびパルス動作型の高輝度フォトニック結晶レーザー光源の開発	(基礎技術) ●高輝度化のための2重格子点フォトニック結晶構造の深化 ●電流注入分布制御のための電極構造の第一次設計 ●スロープ効率向上のためのDBRや基礎吸収抑制構造の探索 (CW動作・合波) ●放熱治具の第一次試作 ●安定したCW動作のための課題抽出 ●合波系設計 ●大面積ワンチップ高出力デバイス設計に着手 (パルス動作) ●ナノ秒パルス駆動回路設計に着手 TRL1	(基礎技術) ●2重格子点構造の詳細設計 ●電流注入分布制御構造の試作 ●DBR構造等の設計・作製法の確立 (CW動作・合波) ●放熱治具の最適化、実装技術の構築 ●安定したCW動作を可能とするフォトニック結晶の設計指針の確立 ●合波の要素技術確立 ●大面積ワンチップ高出力デバイス設計完了、作製法構築 (パルス動作) ●ナノ秒パルス駆動回路設計	(基礎技術) ●2重格子点構造最適化、電流分布制御、上方取り出し最適化・基礎吸収抑制の要素技術確立、狭発散角<0.2°、スロープ効率0.8~1W/A等を達成 (CW動作・合波) ●放熱・実装の要素技術確立 ●安定したCW動作を可能とするフォトニック結晶構造の設計完了 ●合波系の構築 ●大面積ワンチップ高出力デバイスの第二次試作 (パルス動作) ●ユーザー企業からのフィードバックに基づくデバイス深化、性能向上と第二次試作、信頼性評価	(CW動作・合波) ●放熱治具へと実装し、安定したCW動作可能なフォトニック結晶レーザー光源の構築 ●フォトニック結晶レーザーを用いた合波システムの構築 ●大面積ワンチップ高出力デバイスの高輝度化、放熱・実装技術の構築 (パルス動作) ●ユーザー企業と連携したLiDARシステムの深化・発展、PCSEL技術の高輝度化 TRL4	(CW動作・合波) ●高輝度(1GW cm⁻²sr⁻¹) CW動作やその合波に目標をつける ●大面積ワンチップ高出力デバイス有効性を明らかにする (パルス動作) ●高輝度(1GW cm⁻²sr⁻¹)：ビーム品質(M²)<2、出力10W超級) ナノ秒パルス動作を達成し、ビーム整形光学系不要、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 TRL5	・高輝度PCSELの設計技術、デバイス作製技術、各種評価技術及びデバイスの制御技術等の民間企業への技術移転および、そのための拠点整備 ・センサや加工機等のシステムそのものを開発している各種の企業への提供および、そのための拠点整備 各種企業に提供した結果のフィードバックによる、フォトニック結晶レーザーの性能向上の促進により普及が加速される	加工システム用CWフォトニック結晶レーザー (2025~) センシング用ナノ秒パルスフォトニック結晶レーザー (2023~)
(2) フォトニック結晶レーザーのスマート化	(基礎技術) ●ビーム走査のためのフォトニック結晶構造の設計・試作 ●電流注入制御法の基礎構築 TRL1	●設計したフォトニック結晶構造の作製法の確立 ●検討した電流注入法の試作と機械学習の検討開始	●様々な方向へのビーム射出技術の確立、ユーザー企業との連携による新たなLiDARコンセプトの有用性検討 ●機械学習法の要素技術確立(電流注入とビーム形状の相関関係の学習) TRL3	●アプリケーションに応じたビーム拡がり角や解像点数をもつ、ビーム走査デバイスの開発 ●機械学習を活用したビーム形状制御	●フォトニック結晶レーザーのスマート化により、電気的制御による狙った方向へのビーム射出、さらに機械学習によるビーム形状制御の開発完了 TRL4		
民間からの出資(人材、物資、資金等)	(10%程度)	(30%程度)	(55%程度)	(60%程度)	(64%程度)		

※TRLや民間からの拠出比率は計画策定時の期待値であり、今後の研究に応じて変更がありうる。

3) 課題目標の達成度(成果)

① 国際競争力

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

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

ンズフリー、アライメントフリーで、高分解能かつ小型・低コストな LiDAR の実現が可能なナノインプリン
憂位性がある。

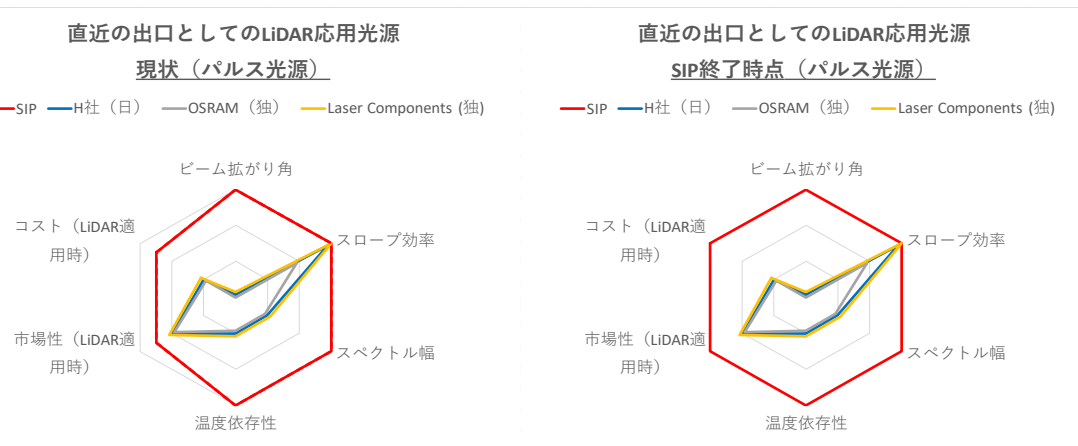


図 2-3-2. 直近の出口としての LiDAR 応用光源における他機能との比較

- 加工応用に向けた光源に関して、SIP 終了時点のレーダーチャートを、図 2-3-3 に示す。フォトリソ結晶レーザー（CW 動作型）は、 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ という極めて高い輝度を実現可能であり、ビーム形状も円形で扱いやすいという特長を有しており、10W 級および 100W 級の出力において、他機能のファブリ・ペロー型半導体レーザー（FP-LD）や垂直共振器面発光レーザー（VCSEL）と比べて、圧倒的な優位性がある。また、良好な効率であり、サイズも小型である。FP-LD および VCSEL アレイ等の既存の半導体レーザーでは実現不

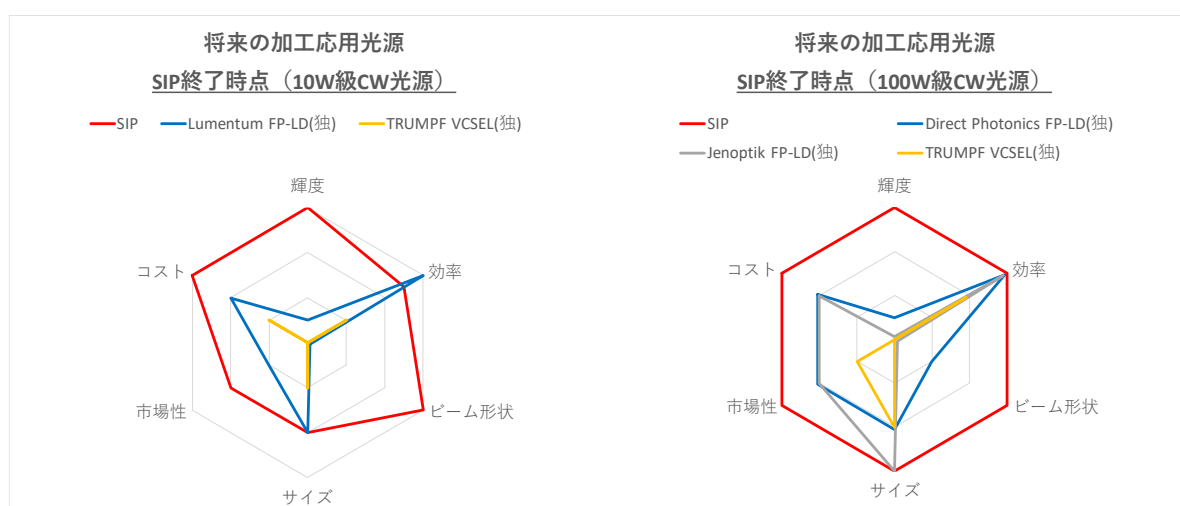


図 2-3-3. 将来の加工応用光源における他機能との比較

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

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

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

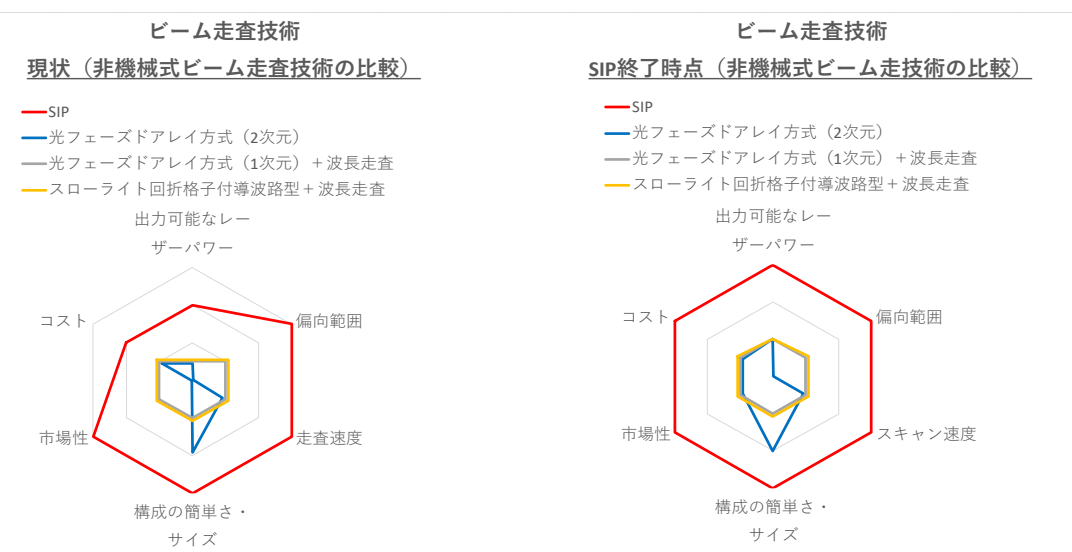


図 2-3-4. ビーム走査技術（スマート化）における他機関との比較

② 研究成果で期待される波及効果

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

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

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

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

③ 達成度（１）※5 年間の設定目標に対する達成度

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

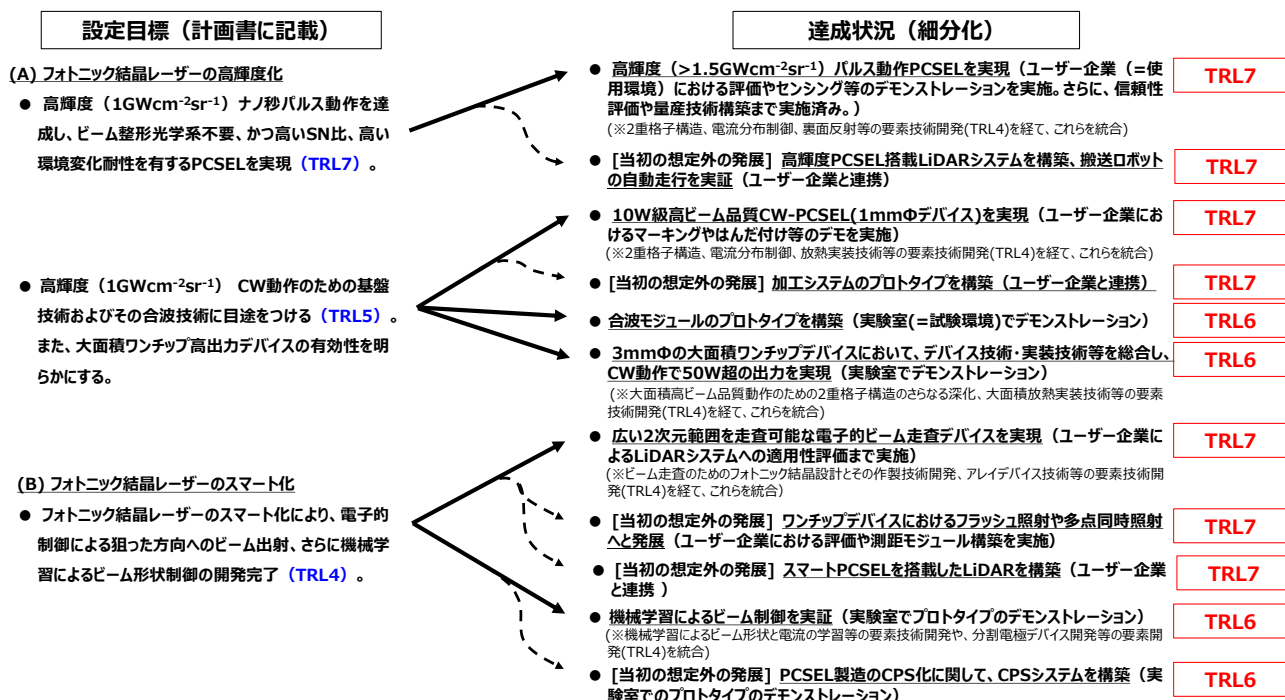


図 2-3-5. 目標の達成状況（TRL の観点）

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

以下に、SIP 第 2 期 5 年間を通じて得られた代表的な成果を示す。

(A) フォトニック結晶レーザーの高輝度化

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

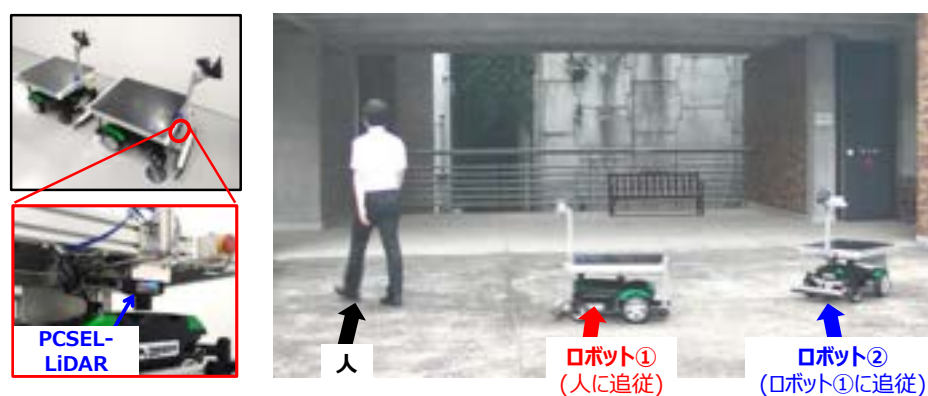
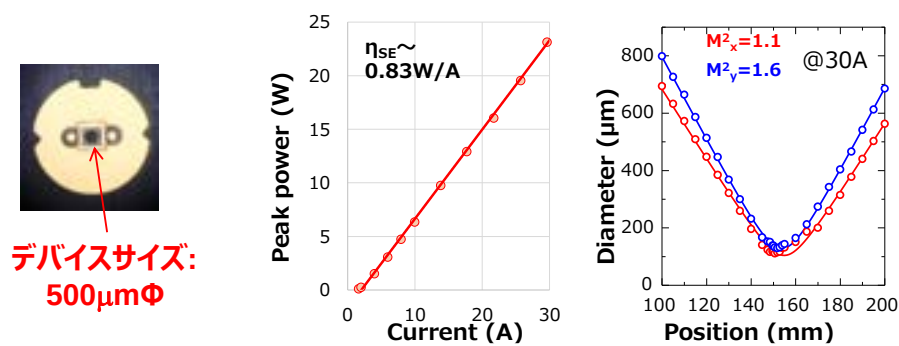


図 2-3-8. 小型 LiDAR のスマートモビリティへの展開

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

向上を実証することにも成功した。また、信頼性評価を行い、フォトニック結晶レーザーが、高温動作や温度サイクルに対して高い信頼性があることを実証することにも成功した（図 2-3-10）。さらに、高速・簡便なナノインプリントリソグラフィ（Nano Imprint Lithography: NIL）法によりフォトニック結晶レーザーを開発し、電子ビーム（EB）露

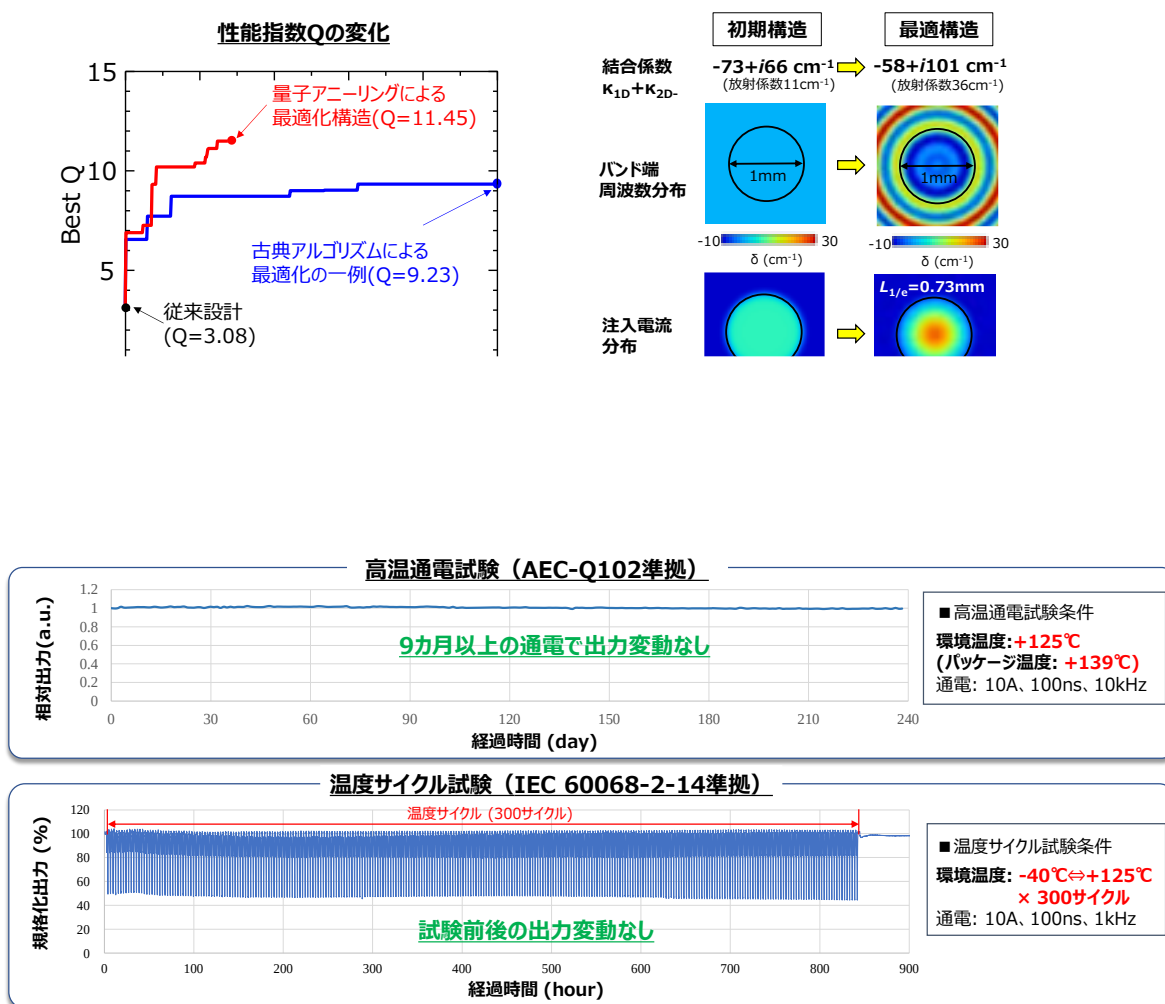


図 2-3-10. 高輝度パルス動作フォトニック結晶レーザーの信頼性評価（高温通電試験、温度サイクル試験）

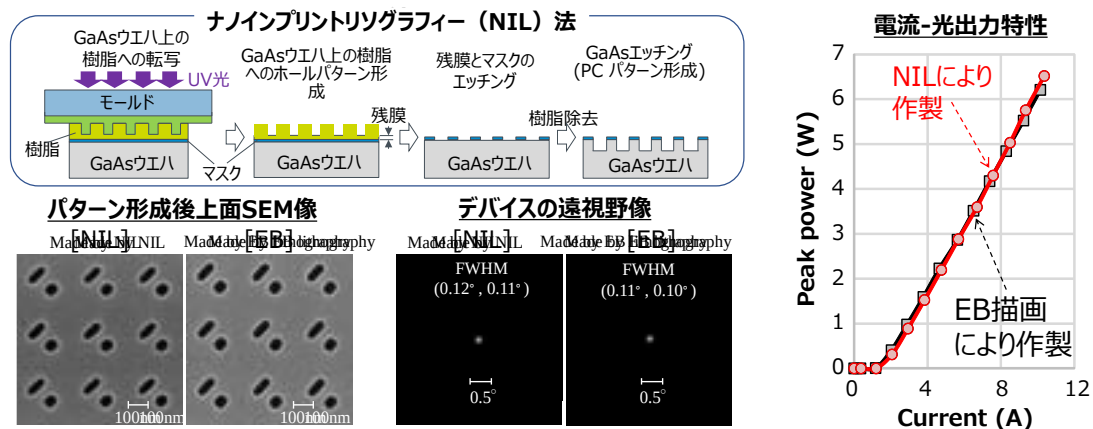


図 2-3-11. ナノインプリントを用いたフォトニック結晶レーザーの開発

- ・ CW 動作において、1mmφデバイスで 5~10W 級の高ビーム品質動作を実現(図 2-3-12 左)し、ユーザー企業への MTA 提供をも行い、CW 動作フォトニック結晶レーザーの加工分野(はんだ付けやマーキング等)への適用性の検証にも成功した(当初目標とした TRL5 を超えて、TRL7 を達成したと位置づけられる)。さらに、ユーザー企業と連携し、CW フォ

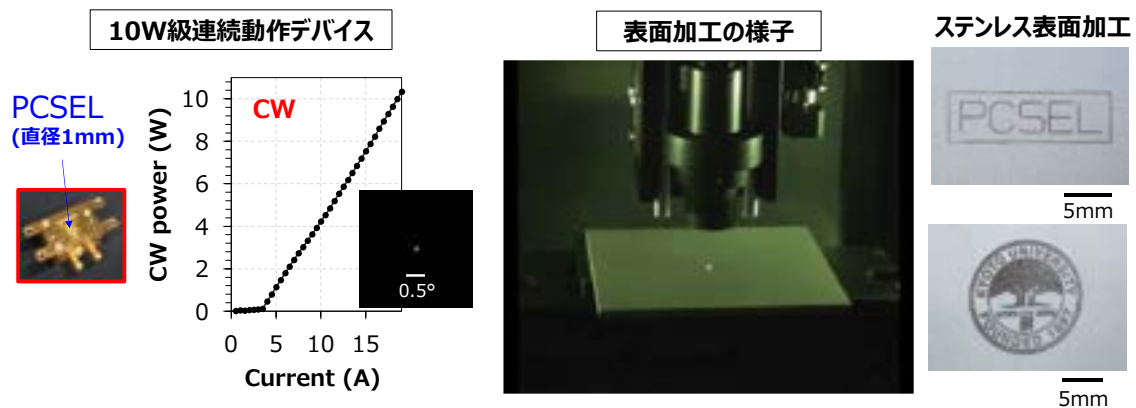


図 2-3-12. 1mmφCW フォトニック結晶レーザーの高度化(左)と金属表面加工への展開(右)

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



図 2-3-13. 3mmφのデバイス（2mm×10mm内）のための指針の確立（Nature）

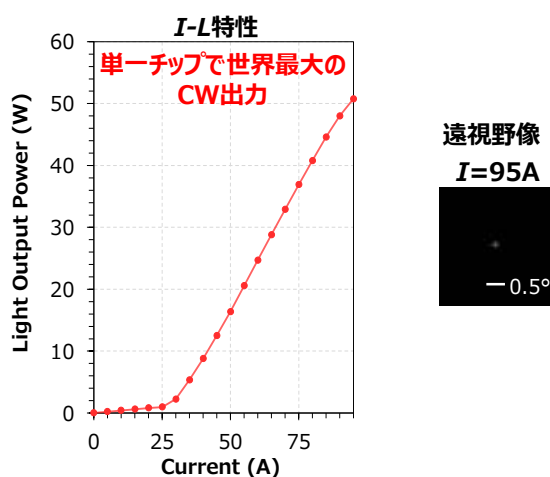


図 2-3-14. 3mmφデバイスにおける、単一素子からの出力として世界最大となる 50W を超える高輝度 CW 動作の実現

- ・ 将来の kW~10kW 級モジュールの実現に向けて、合波、冷却、電源技術等の重要要素技術
- え



図 2-3-15. 重要要素技術の開発と合波モジュールの構築

(B) フォトニック結晶レーザーのスマート化

- ・ 電子的ビーム走査光源を開発し、狙った方向へのビーム出射を実現するとともに、それを発展させたフラッシュ照射可能な光源等も含めて、スマート化フォトニック結晶レーザーを深化させた(当初目標としたTRL4を超えて、TRL7を達成したと位置づけられる)。これらを用いた非機械式の新型 LiDAR (フラッシュ式とビーム走査式の利点を融合した



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

- ・ 当初想定していなかった展開として、モバイル応用に向けた、多点同時出射デバイス等へと展開し、ユーザー企業と連携して多点同時出射アレイデバイスを用いた測距モジュ

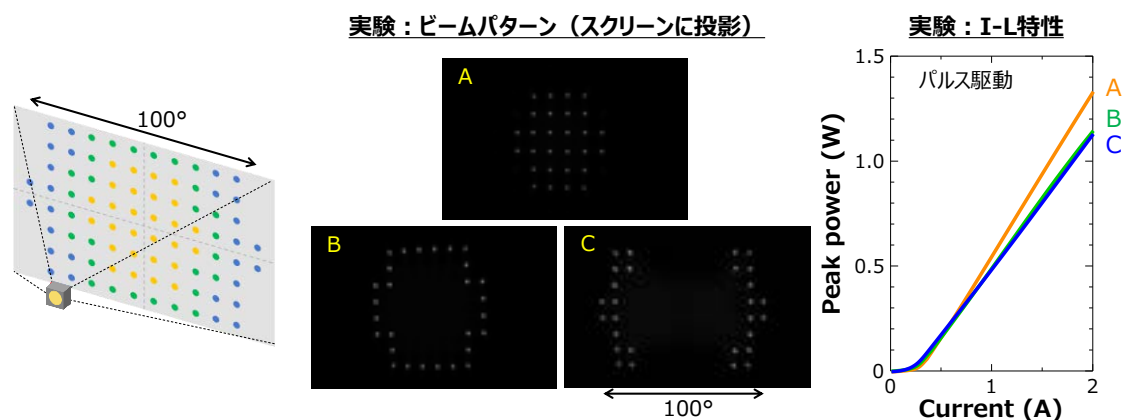


図 2-3-17. 外部光学系フリーのワンチップデバイスにおける、多点ビームの広 FOV (～100°)・W 級動作の実現

- ・機械学習（AI）との融合による、電流分布-ビームパターンの関係の学習とビーム制御の実現に成功するとともに、本技術を発展させ、CW/QCW 動作におけるビーム制御を実証することにも成功（図 2-3-18）した（目標とした TRL4 を十分に達成し、TRL6 へと発展）。また、フォトニック結晶レーザー製造の CPS 化（機械学習や 3 次元結合波理論等の高度解析法を用いた、フィジカル空間でのデバイス作製工程のデジタルツインの形成）において、高精度 RCWA 法等の解析法の導入や、構造抽出精度の向上のための新たなネットワ

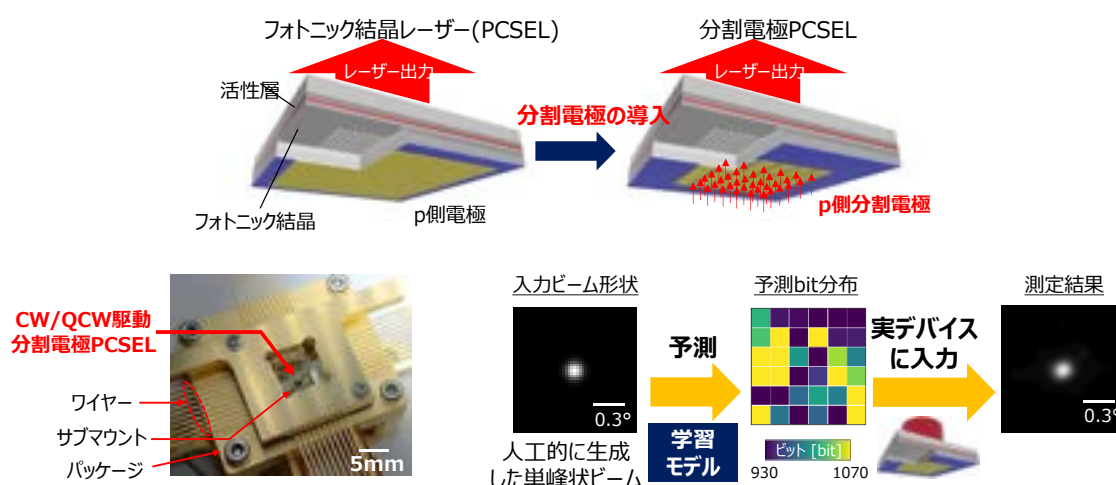


図 2-3-18. 電流分布-ビームパターン関係の学習とビーム制御の実現（上）電流分布制御のための分割電極構造、（左下）開発したデバイス、（右下）CW/QCW 動作における、所望のビーム形状を実現する電流分布の予測とその実証。

④ 達成度（2）※社会実装の実現可能性

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

【計画および進捗状況】

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

を推進するための核として、京都大学拠点の整備・強化を図った。

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

【体制整備状況】

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

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

さらに、PCSELの広範な社会実装に向けて、本拠点を核とした、ナノ構造形成、結晶成長、デバイス製造・応用、さらにはグローバル展開に関わる連携企業や機関からなるエコシ

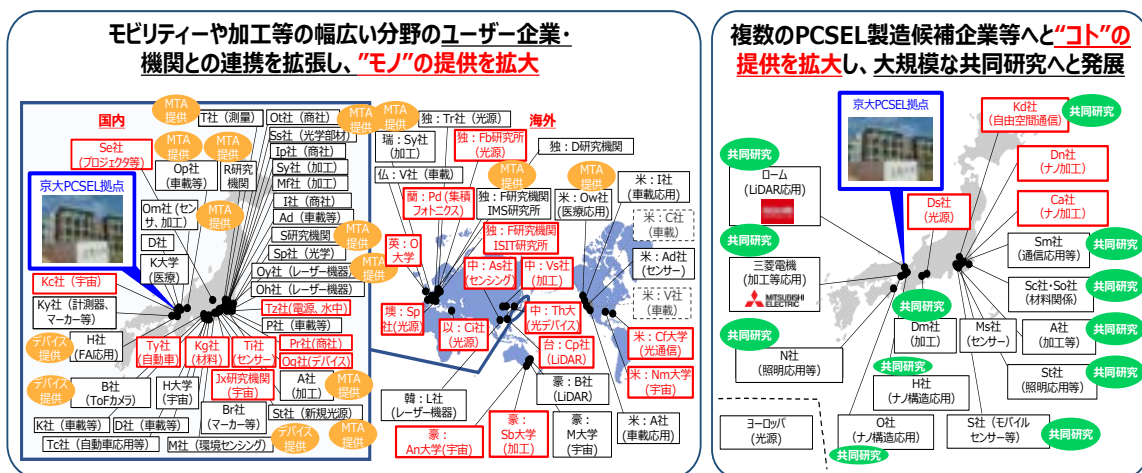


図 2-3-19. 京都大学拠点における社会実装活動の拡がり

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

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

【社会実装成果】

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

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

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

【SIP 終了後の「事業の財源・人材の確保の方法」】

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

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

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

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

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

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

⑥ 成果の対外的発信

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

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

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

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

高輝度PCSEL搭載LiDARの実現

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



電子的ビーム走査の実現

NHK (NHK NEWS等)
2020/7/20-21



短パルス・高ピーク出力化

クラス最小LiDARの実現、Society5.0科学博での展示

100W~1kW級高出力動作の指針確立



量子アニーリングの活用

自由空間通信への展開

量子セキュアクラウド活用



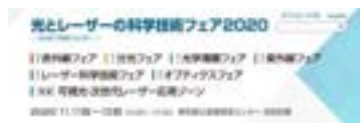
青色高出力PCSEL

高速自己変化可能なフォトニック結晶



図 2-3-20. テレビ、新聞、雑誌等での報道の例

光とレーザーの科学技術フェア2020



オーテックス (株)

レーザー科学技術フェア No. 3F-04

● 出展の目どころ

殺菌、消毒用高出力UVLEDや、体内深部温度測定機など、コロナ関連製品コーナーを設け展示します。また、京都大学発の画期的なレーザーで「光」を展示します。これはフォトンエッジ効果を用いた、極モードシングルモードの高出力レーザーが実現できる等の成果です。その他、分光分析、イメージング、加工と幅広い分野に対応する多種多様なレーザーとともにM2メーター、厚み計、照度計などの測定器を展示します。

SPIE Photonics WEST



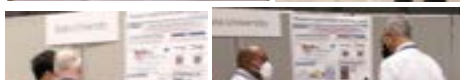
OPIE 2021



Society 5.0科学博



ISLC2022 展示会



Photonics Device Workshop 展示会



図 2-3-21. 展示会への出展の様子の一例



図 2-3-22. Nature Focal Point への記事掲載



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

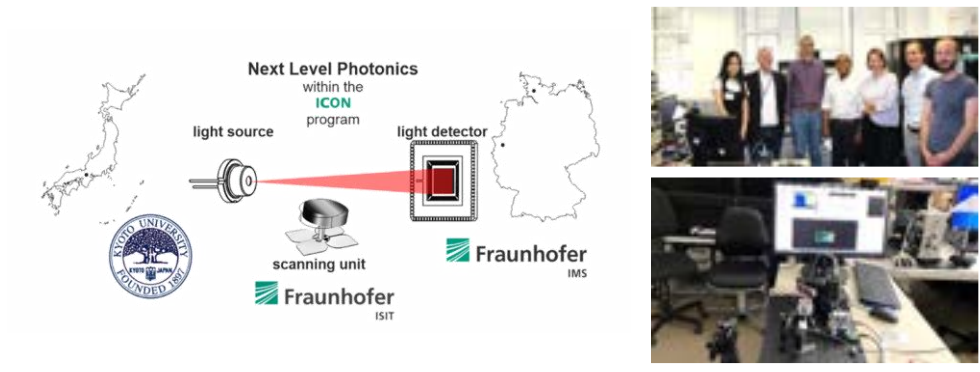
⑦ 国際的な取組・情報発信

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

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

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

- ・ 重要な国際連携の一つとして、ドイツのフラウンホーファー研究機構 IMS 研究所とは、量子的な光検出器（GSPADs）と高輝度/スマート（ビーム走査）フォトニック結晶レーザーとを組み合わせた、世界的に例のない LiDAR を目指した本格的な共同研究を、2021. 8 より開始した。さらに、2022. 8 からは、MEMS 技術を得意とする ISIT 研究所を交えた体制へと拡張し、より強固な連携体制を築いている（図 2-3-24）。また、半導体レーザーの有力な研究機関との、MTA によるデバイス等を介した連携をも開始した。
- ・ イノベーション先進国であるオランダとの連携に向けた活動を、加速的に進展させた。駐日オランダ大使館を介して、オランダの研究開発拠点との会合をもち、フラウンホーファー研究機構とも連携しつつ、High Tech Campus での会議やデモ展示（2022. 7～11）、さらに Automotive Campus での展示（2022. 11～12）を行うとともに、Photon Delta とは今後の連携に向けた MOU を締結（2022. 10. 11）した。また、京都大学拠点にオランダ代表団（およそ 30 名）を受け入れ、フラウンホーファー研究機構および拠点関係企業を交えた総勢 70 名以上でのネットワーキング（2022. 10. 14）を行い、連携体制を強化した（図 2-3-25）。さらに、オランダ ブラバント州が開催する Smart, Green And Healthy Life Innovation Summit（2022. 11. 16）での講演・ディスカッション等を通じて、より一層交流を深めた。
- ・ その他、米国の企業とは、MTA に基づいたフォトニック結晶レーザーの提供を通じて、医療応用に関する連携を推進している。また、商社等も通じて、欧州・米国の LiDAR メーカー等ともミーティングし、情報交換を行った。さらに、米国や豪州の大学等からは、高出力フォトニック結晶レーザーの宇宙における推進エネルギーとしての応用において、引き合いがある。これらを含めて、世界中から、フォトニック結晶レーザーの様々な応用に向けた引き合いが増加している。
- ・ 国際的にフォトニック結晶レーザーに関わる拠点形成とそこでの開発成果を広く発信するために、前項⑥でも述べたように、拠点のホームページ（英語版：<https://pcsel-coe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>）を開設し、ホームページを閲覧した、海外の企業・機関からの問い合わせが増加している。



High Tech Campusにおける会議、デモ・展示



Photon Deltaとの連携に関わる
MOU締結



オランダ代表団の京大拠点訪問
(フ라운ホーファー・拠点関係企業含めた交流)



図 2-3-25. オランダとの連携

(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、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

1) 研究内容

研究開発の全体像：

量子暗号は、どんな計算機でも解読できないことを証明できる現在唯一の暗号通信技術であり、重要デジタル情報の通信を保護する手段として期待される。しかし、既存の暗号技術に比べて割高であり暗号装置市場での競争力が低く、推奨標準の整備が遅れているなどの課題がある。また、量子暗号自体は通信の安全性を保証するものでデータ保存の安全性までは保証できない。そこで、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。実施体制を図 2-4-1 に示す。

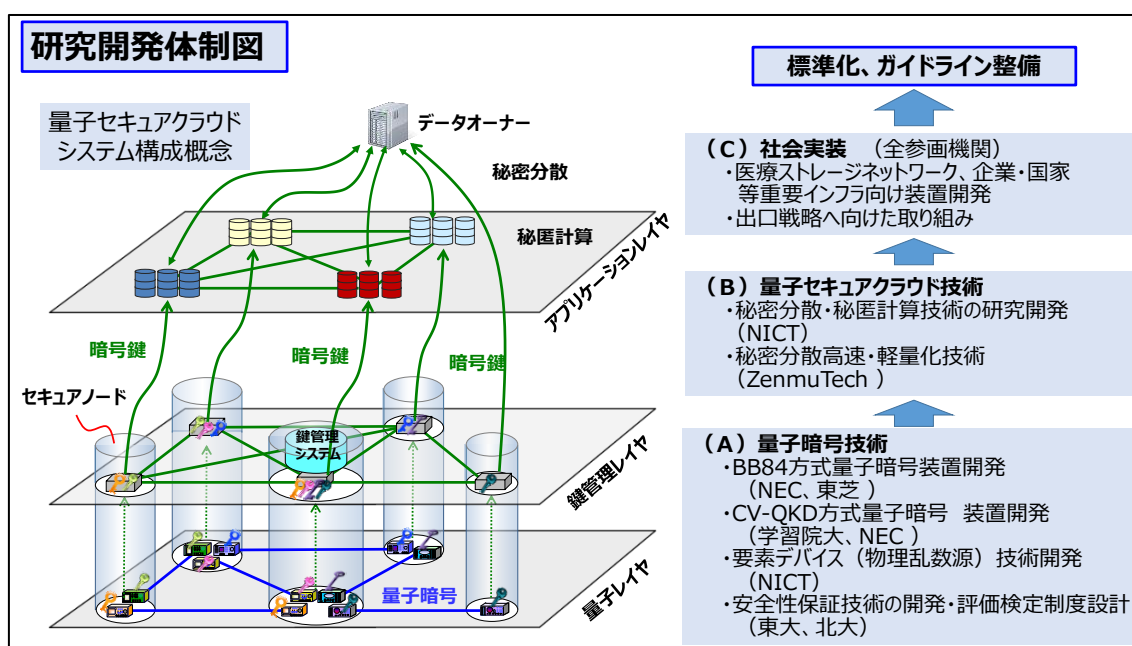


図 2-4-1. 研究開発の概要と実施体制

具体的な実施計画（内容）：

A) 量子暗号技術

量子暗号には、使う検出器のタイプに応じて、BB84 方式^{※1}と CV-QKD 方式^{※2}という2つ

の方式があり、本研究開発では、両方式を使用して研究開発を行う。

BB84 方式は、現在、一部の部品を海外から調達して製造しているため、部品から装置製造までの国産化を目的として、高い鍵配送性能を維持した上で、部品の集約、モジュール化、ソフト化及び市販品の活用等により、市場競争力のある量子暗号装置を開発する。BB84 方式については 2020 年度までに事業化の目途を得たことで、ガバニングボードより SIP の最終年度を待たずに目標を達成したと判断されたため、2021 年度以降、小型化・低コスト化に関する項目については本プロジェクトの所掌範囲外となった。

CV-QKD 方式を使用しての研究開発では、大学－企業間連携により、企業へ CV-QKD 技術の移転を図るとともに、雑音耐性と光多重度を向上させ、さらにユーザー環境で安定かつ高信頼動作させるための技術開発を行い、研究試作品を完成させる。

また、両方式に共通の課題となっている下記の事項についても、研究開発を進める。

i) 安全性保証技術の標準化

量子暗号の情報理論的安全性を実環境で保証するために、基礎理論、実験、対策実装、検証のサイクルを継続的に実施し、耐タンパー対策やサイドチャネル攻撃対策を実装する。これらの取組みを着実に実施し、安全性保証技術の継続的な高度化を行い、順次標準化する。

ii) 物理乱数源の小型化

量子暗号の鍵生成の根幹となる物理乱数源について、高速化するとともに、量子暗号装置内での占有体積を従来比 2 分の 1 まで小型化する。

iii) 検定基準・推奨方式リストの整備

メーカーが適正な物理乱数源、量子暗号装置を製造・販売し、ユーザーがそれらを安心して利用するためには、検定基準や推奨方式リストの整備が必要となる。我が国には、まだその体制が無いため、将来の運用に向けた予備調査と運用に必要な基礎データの蓄積、エコシステムとして機能する制度設計提案を取りまとめる。

※1 BB84 方式

光の粒である光子を検出するための単一光子検出器を用いる量子暗号の代表的なプロトコル。物理法則が許すあらゆる盗聴攻撃、あらゆる計算能力を持つ計算機でも解読不可能なことが証明されている。以前より最も研究開発されてきており、現在、企業が試験稼働させている方式である。あらゆる盗聴の可能性を完全に排除する必要がある安全保障分野等のハイエンド用途が想定される。

※2 CV-QKD 方式

光の位相・振幅を検出するホモダイン検出器を用いる量子暗号のプロトコル。通信路への攻撃手法があるクラスの物理操作に限定されるが、その攻撃も当面の技術では実装が極めて困難であり、かつあらゆる計算能力を持つ計算機でも解読できないことが証明されている。光通信用の光ファイバー内でも、共存して動作可能であるため、既存光通信インフラへの適用が期待できるというメリットがある。BB84 方式よりも低コストでの開発が可能であるため、主に民生のハイエンド用途が想定される。

B) 量子セキュアクラウド技術

量子セキュアクラウド機能を実現するため、秘密分散技術、物理乱数源・量子暗号技術、電子署名・認証技術、秘匿計算技術を統合する。その際、量子セキュアクラウド機能を実現するためには、処理量の爆発的増加への対処と暗号鍵の非可逆性の担保が不可欠である。これらの解決に向けて、高速かつ軽量の秘密分散・秘匿計算技術と暗号鍵管理を統合運用するための最適なミドルウェアアプリケーションインタフェースを開発する。

C) 社会実装

代表的なアプリケーションとして、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。

特に、それぞれの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、ユーザーが必要とするデータに適時にアクセスし必要な処理やデータ復元が可能なアプリケーションを開発する。また、データ保管の際には、異なる組織間でもデータを相互参照できるよう、共通のデータフォーマットに変換するゲートウェイ機能も開発する。

国家等重要インフラ網を扱う潜在ユーザーとの連携を強化し、量子暗号装置の安全性・信頼性を向上させて国際市場競争力・ブランド力を高める。

民生分野でのビジネス拡大に向け、国民一人一人に係る医療情報分野や生体認証分野において、潜在ユーザーとの連携による量子セキュアクラウド技術の実証試験を加速する。特に、医療情報分野での POC では、量子暗号の要素技術と組み合わせた共通鍵暗号と、量子暗号をニーズ/導入コスト要件に応じて選択できるシステム設計や医療従事者のアクセス制御・管理機能の実装などを進め、現場ニーズへの適応性を高めつつ高秘匿通信サービスの導入モデルを確立する。「国家レジリエンスの強化」など SIP の他課題とも連携し、社会実装の多様化を図る。

これらの成果をもとに、プログラム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。特に、既存のアクセス系の光ファイバーを利用した実装が可能で、光ファイバー利用料や装置コストの低減を可能とする CV-QKD 装置を用いて POC に取り組む。

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ユースケースを設定し、ユーザーと共同で実証環境を構築して金融アプリケーションによる POC を実施し、量子暗号の導入による金融セキュリティの強化モデルの導出と有効性確認を実施する。

上記の社会実装の取り組みをさらに広範な用途へ普及させるために、本格的なインフラ化に向けて通信事業者とも連携を強化し、コンソーシアム活動なども活用しながらビジネスエコシステムのモデルを提案する。

2) 技術的目標 (計画)

事業終了時点アウトプット目標 (2022 年度の目標)

A) 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 (ユーザー環境で稼動可能な研究試作品) 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、ISO/IEC や ETSI 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、企業へ技術移転を達成する。
- ・ 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を実施する。

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、H-LINCOS 上で動作を検証。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。

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 の成果を反映し、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構築を完了する。

以下に 5 年間の工程表を示す。

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
(研究開発項目 2) 光・量子通信							
① 量子暗号技術							
1) 量子暗号技術	TRL2		TRL4		TRL7		
BB84方式（超高速専用線向け）	●耐タンパー・低コスト化のための試作課題対策／仕様策定の完了	●耐タンパー性を保証しつつ部品調達コストを従来比で半減化	●自社内サービスプラットフォームへの適用と1か月連続稼働試験の完了	●量子暗号装置の保守運用技術の確立とガイドライン作成	●運用ガイドライン及びセキュリティ設計仕様案を完成	政府機関・医療等の重要通信インフラへの導入へ向け、事前営業活動により開発完了から普及へシームレスに移行 ・マーケティング（～2019） ・ビジネス可能性検証（～2020） ・運用ノウハウ蓄積・啓蒙（～2022） ・QKD普及開始（2023頃～）	BB84方式によるQKD装置の実用化（2021～）達成 CV-QKD方式によるQKD装置の実用化（2025～）
CV-QKD方式（既存光回線秘匿化向け）	●標準品化のための要件定義と主要部品の選定完了	●光学系及び制御装置の試作と動作検証 ●基本設計の完了	●プロトタイプ試作 ●商用回線環境での動作検証	●部品手配、製造 ●試作評価／検証 ●標準品化装置の試運転、安定性と耐障害性テストの完了	●標準品化完了 ●通信キャリア商用回線での稼働試験 ●200kbps@10kmを実現		
要素デバイス技術	●物理乱数源の高速化検討 ●光子検出器等のサブライチチェーン検討	●物理乱数源の高速化実装 ●部品ベンダーの調査	●物理乱数源の現状比10倍高速化 ●部品ベンダーとの交渉	●物理乱数源の小型化 ●部品サプライチェーン構築	●小型高速の物理乱数源の企業への技術移転（サイズ：従来比2分の1、速度：現状比10倍） ●部品サプライチェーンの確立		
安全性保証技術、評価検証制度	●安全性評価項目の網羅的リスト作成 ●評価手法の開発 ●ETSIにてAPI標準化方針の合意形成 ●量子鍵配送技術推進委員会の活動開始	●評価手法の実機検証 ●評価基準の更新手法確立 ●ETSIにてAPI標準化達成	●安全性保証基準書を作成し（社）量子ICTフォーラム等に技術文書として提案 ●ETSIとの連携調整 ●ISO/IEC、ITU-Tへの寄稿提出	●社会実装の結果を踏まえ、評価検証基準、推奨方式リストのドラフト作成、（社）量子ICTフォーラム等との調整を継続 ●評価、検証システムのモデル提案	●実機の安全性保証評価の達成 ●国内外の標準化組織より勧告の発行 ●制度設計提案書の作成、及び関係省庁・機関への提案		

BB84方式についてGBの判断では令和2年度まで達成とし、以降小型化・低コスト化に関する項目については本プロジェクトの所管範囲外とする。

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
2) 量子セキュアクラウド技術	TRL3 ●量子暗号鍵管理と高効率秘分散の統合設計指針の確立（使い捨て鍵管理、データ機密性・利用頻度に応じた高効率アクセス法） ●秘分散計算の軽量化方式の検討（安全性・速度・バランスに関する複数候補の比較評価）	●100km圏量子暗号ネットワーク上での高効率秘分散の実装、基本機能検証 ●秘分散計算の軽量化方式の試作と様々なデータによる性能比較評価、最適方式の選定完了	TRL5 ●10Mbps以上の速度での秘分散計算機能検証を完了 ●電子カルテ等模擬テキスト情報の高速秘分散の実証（320MBのデータを標準ストレージに3時間以内に格納）	●ゲノムデータTB級のデータに対し50Mbps以上の速度での分散ストレージの実証 ●秘分散ネットワーク上に秘分散計算機能およびデータフィルタリング機能を実装	TRL7 ●秘分散・秘分散計算、鍵管理技術、アクセス権管理技術のフィールドテストベッド上に実装しゲノムデータ解析（80GB）に対しての有効性を検証 ●災害時等1Mbps程度の低容量回線を用いても支障なく電子カルテデータの相互参照を実証	1) 量子暗号技術、2) 量子セキュアクラウド、に同じ出口戦略 政府機関・医療等の重要通信インフラへの導入へ向け、事前営業活動により開発完了から普及へシームレスに移行	量子セキュアクラウド技術のアプリケーションを製品化（2025～） QKD装置量産化（2025～）
3) 社会実装	●秘分散情報資産の分類と要件定義の完了（種別、サイズ、優先度、利用頻度等） ●ゲノム解析データリアルタイム伝送の実証（10km圏）	●SS-MIX等の標準化医療データ向けのアプリケーションの設計、試作 ●ゲノム情報の秘分散システムの構築（3拠点、10km圏）	●10km圏3拠点ネットワーク上でのゲノム解析データの50Mbpsでの秘分散の実装 ●800km圏の電子カルテ秘分散保管システム（H-LINCOS）のD24Hと連携 ●100km圏ネットワークでのカルテデータ、生体認証用データの分散保管の長期安定性実証	●数10GBのSS-MIX準拠電子カルテ模擬データの2Mbpsでの高速秘分散 ●HPKI準拠のアクセス制御の構築、認証と連動した多要素認証の実証 ●レーザー加工関連の重要データの秘分散通信の実現と連続稼働	●ゲノム/医療分野や製造分野等での試験運用を継続 ●ビジネスモデルの構築、用途拡大、ユーザ獲得に向けた営業活動	・マーケティング（～2019） ・ビジネス可能性検証（～2020） ・運用ノウハウ蓄積・啓蒙（～2022） ・QKD普及開始（2023頃～）	
医療・ストレージネットワーク、企業・国家等重要インフラ							
レーザー加工工ソリューションとの連携		●レーザー加工プラットフォームへの導入に向けた基礎検討と要件定義					
出口戦略へ向けた取り組み	●潜在顧客向けマーケティング活動、デモ ●製造、評価、検証のエコシステム化検討						
民間からの出資（人材、物資、資金等）	(30%程度)	(35%程度)	(50%程度)	(50%以上)	(50%以上)		

3) 課題目標の達成度（成果）

① 国際競争力

図 2-4-2 に欧米中とベンチマーク実施した結果を示す。参画機関の(株)東芝、日本電気(株)が開発している量子暗号装置は、海外製品と比較して同じ距離での鍵生成レートが 10 倍、配送可能距離も 2 倍程度の性能を実現している。性能が桁違いで高いことは EU における Open testbed Graz においても検証されている。そこで、装置単体の価格ではなく、価値・課金の源泉である鍵ビット単価を海外製品と比較すれば、1/10 を達成することが期待できる。言い換えれば鍵ビット単価に換算したサービス価格競争力は海外勢の 5～10 倍を持つとみなすことができる。

現在は、市場展開とその規模でスイスの ID Quantique が先行している。また運用ネッ

トワークの規模では中国が 4,600 km 網（日本の 40 倍）の規模で展開しており、我が国より進んでいる。しかしながら日本は 2022 年度に装置製造コストを従来比 1/4 まで低減し、サービス価格競争力をさらに向上させることで、市場シェアの挽回が可能と考える。また米中摩擦の影響で中国製品は西側市場への参入障壁があるため、今後の新たな市場展開において我が国の量子暗号製品には十分な商機がある。

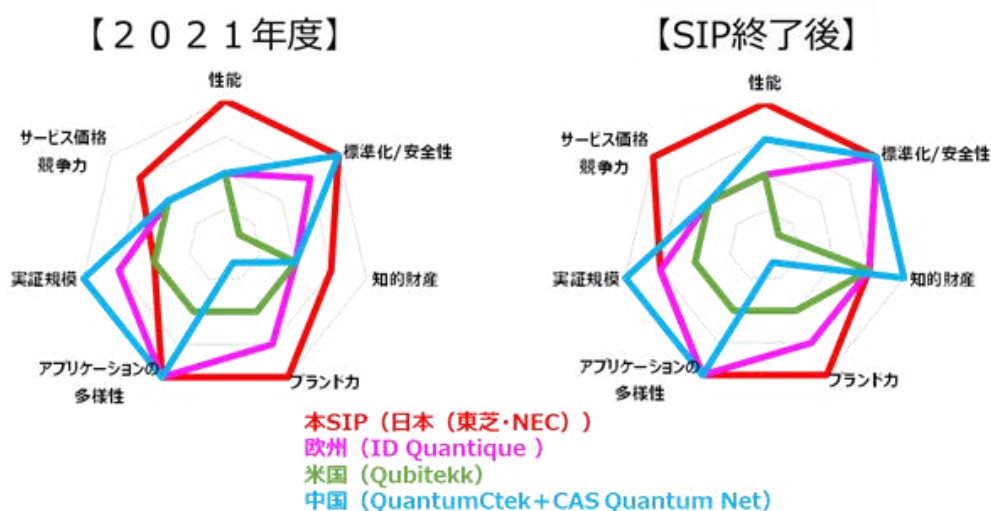


図 2-4-2. 欧米中との量子暗号装置のベンチマーク

② 研究成果で期待される波及効果

光・量子通信における研究開発の成果は、特に情報を秘匿し、安全に通信することが求められる医療分野、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る。医療分野では電子カルテの管理・運用を、生体認証分野ではアクセス管理上の重要な個人情報を、製造分野では企業秘密を、金融分野では顧客取引データを、安全保障分野では外交・防衛などの情報を取り扱う際に、光・量子通信の成果を活用することが想定される。現在、量子暗号技術のみならず、その要素技術を用いてセキュアな VPN を構築し、現行システムのセキュリティを強化するという極めて実用に近い実証から、遠隔手術等の安全かつ低遅延通信の実現などの中長期にわたる応用まで、様々なフェーズでの共同実証が進捗している。また上記分野でインフラ構築に必須となる通信キャリアとの連携にも着手し、量子暗号に関するビジネスモデルの構築に向け議論も進めている。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での法整備を利用し、安全なデータベースとしてのプラットフォームとして期待される。その有効性は、ゲノム解析での実証やレーザー加工チームと次世代アクセラレータとの組み合わせた POC で実証した。さらに量子暗号の POC に関する共同実証の申し出などを多数頂いており、光・量子通信の成果活用への期待が高いと考えている。

③ 達成度（１）※5 年間の設定目標に対する達成度

量子暗号・量子セキュアクラウド・社会実装について、その達成度について以下に記述する。過去 4 年間及び最終年度の達成目標に対する達成度は以下の通りである。

(A) 量子暗号技術

- ・BB84 装置の製品化が完了したため、SIP を円満卒業した。低コスト化実装が可能なセルフホモダイン方式である CV-QKD 装置は A 方式、B 方式とも、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、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：200 kbps@10km、B 方式：2Mbps@10km、200 kbps@20km）を達成した。さらに、ユーザー環境で稼働可能な研究試作品を製作し、準製品化が実現できる事を確認した。
- ・物理乱数源の高速化（生成速度 4Gbps）と従来比 1/2 の小型化を 2021 年度に実現し、企業への技術移転も完了し、目標を達成した。
- ・ITU-T において、日本の技術を骨格とする 11 編の標準勧告体系の整備を完了し、ETSI、ISO/IEC では、装置の評価・検定・認証に向けた規格作りに主導権を取りながら推進し、2022 年度内に日本版 Protection Profile の事前評価を完了した。
- ・別の国家プロジェクトにおいても本 SIP 光・量子課題で培われた技術を用いて、量子暗号技術の実証環境による評価が進んでいる。その活動を通じ、想定ユーザーの協力を得て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を完成させ、目標を達成した。
- ・物理乱数源の乱数性はあらゆる暗号技術のトラストアンカーといえる。それに対し、すでに NIST が先行してクライテリアを設定している SP800-90B の妥当性を検証するとともに、本 SIP 光・量子課題で開発した高速量子物理乱数源が SP800-90B で求める性能を満たしていることを確認した。また本 SIP 光・量子課題で開発した高速量子物理乱数源を民間企業に技術移転し、製品化に向けた活動が開始されており、目標を達成している。

(B) 量子セキュアクラウド技術

- ・秘密分散技術、鍵管理・運用技術、アクセス管理技術が完成し、(株)東芝による 80GB ゲノムデータの高速分散バックアップのデモに成功しており、目標を達成した。
- ・秘匿計算技術とデータ 2 次利用技術の開発、及びゲノム解析での検証を京都大学の協力の下で進め、Tokyo QKD Network 上に実装したシステムにおいて、ゲノム解析結果に対し、研究に不必要な個人情報をフィルタリングできる機能も実装した上で 400Mbps 以上のスループットを実現し目標を達成した。いわゆる信頼できるサーバーを想定した秘匿計算の実現であり、全ゲノムデータのような大容量かつ非構造化データを高効率に実施できるコンセプトとなっており、量子セキュアクラウドの高機能化に成功した。（図 2-4-3）本成果は 2022.11 Scientific Reports 誌にて発表し、2022.11.17 にプレスリリースも実施した。

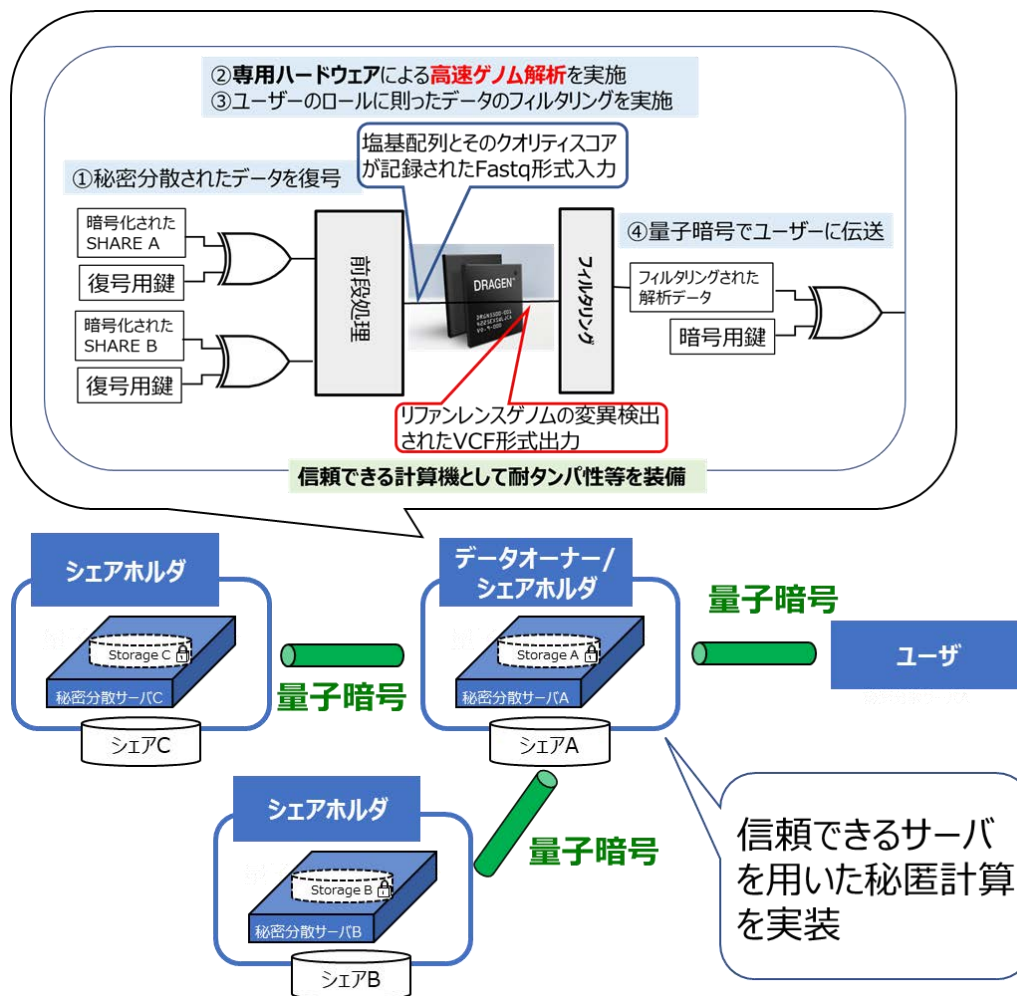


図 2-4-3. 信頼できるサーバを用いたゲノム解析用秘匿計算実装

・東京都内公的医療機関（系列 6 病院）のトランザクションデータ 320MB を 15 分以内に更新を実証した（2020. 10 プレスリリース）。また、世界初となる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確立し、H-PKI 準拠のカードシステムにおいてデモに成功した（凸版印刷と共同 2022. 10. 24 プレスリリース）。さらに、本 SIP 光・量子課題間連携において、秘密分散のファイルシステム（ソフトウェア）を SIP 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”における安全なデータ伝送に応用することができた。

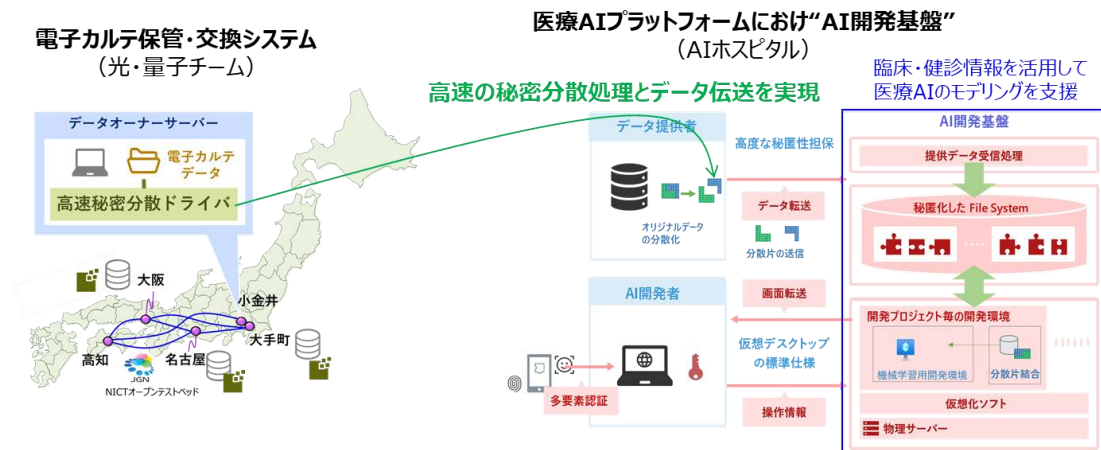


図 2-4-4. SIP 課題間連携 “AI ホスピタル” における高速の秘密分散処理とデータ伝送に応用

(C) 社会実装

電子カルテデータやゲノム解析データを扱う医療情報分野、および生体認証分野、スマート製造分野、金融分野等の重要インフラ分野において都市圏ネットワーク上での社会実装を着実に進めている。生体認証に関しては日本代表選手を有するスポーツ団体のカルテ情報の保護に活用し現在も稼働中である。また、金融分では野村證券・野村 HD とともにパフォーマンステストを継続実施中であり、様々な機関から注目を集めている。

さらに量子 ICT フォーラム等の産学官連携体制を積極活用し、ビジネスモデルの構築も進捗している。本 SIP 光・量子課題の技術を用いた別プロジェクトで公官庁での評価も実施中であり、目標を達成した。

④ 達成度（２）※社会実装の実現可能性

【計画及びその進捗状況】

目指す社会実装のロードマップを図 2-4-5 に示している。以下そのロードマップに従って進めている各分野での POC の結果をまとめる。

- ・HPKI と親和性のある 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による有用性を確認した。
- ・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（図 2-4-4 参照）。また、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が進行中である。

【社会実装と認められる成果】

- ・ 参画機関が BB84 方式の量子暗号装置を 2020 年度から事業化した。
- ・ 小型高速の物理乱数源の企業 (YDK) への技術移転が完了（サイズ：従来比 2 分の一、速度：現状比 10 倍）した。
- ・ 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 光・量子課題活動期間（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・量子通信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し、HPKI 準拠のカードに耐量子公開鍵暗号を世界で初めて実装し、その成果を 2022. 10. 24 にプレスリリースを実施した。
- ・ 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現と想定ユーザーと共同で有用性を確認し、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を完成させた。その成果を論文発表 (Scientific Reports 誌 図 2-4-3 参照) するとともに 2022. 11. 17 プレスリリースを実施した。
- ・ 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 に QKD の普及に向けた提言書を提出し、2 度の講演依頼を頂いた。

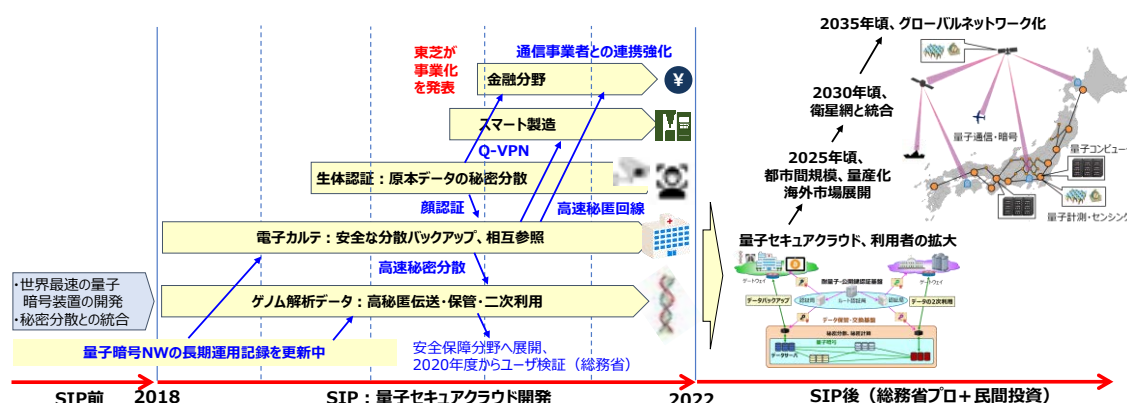


図 2-4-5. 社会実装のロードマップ

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

2017 年付近から中国等の出願が急増しており、出願件数での日本の優位性は担保されなくなっている。しかし、そのための挽回戦略として、国際標準化戦略に基づく知財戦

略、open/close 戦略を確実に推進し、国際市場での競争優位性を早期に確保する。具体的には、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の国際標準化を進めつつ、評価法のノウハウは非公開とする。一方、事業化に係る知財戦略については、個社別に強化する。現在、各参画機関では多様な POC を通じて偏りの無い実装技術の充実を図っており、周辺分野の応用技術を生かした市場拡大を目指している。

国際標準化戦略の活動成果として、2022 年度は、11 月現在、標準化会合参加回数 14 回（ITU-T: 7 回、ESTI: 7 回）、のほか、22 編の寄書を提出した。図 2-4-6 に示すように、5 年間の活動では 178 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、量子暗号ネットワークの国際標準化を推進し、日本の技術を骨子とする基本勧告体系の整備と、量子セキュアクラウドの標準化に貢献した。

一般的に暗号技術の普及のためには認定制度やガイドラインの整備と、導入による利用者のメリットを設定し、導入インセンティブを向上させる必要がある。それを実現するためには公平性・公共性のある機関による検定制度と、量子暗号・量子セキュアクラウド利用についてのブランドイメージを醸成し、利用者メリットとして成長させることが重要である。現在、（一社）量子 ICT フォーラムや TTC（情報通信技術委員会）とも連携し、セミナー開催、省庁関係者を招いたブレインストーミングなどを実施し、国際標準化活動とも同期した運用ガイドラインの策定を進めている。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た。

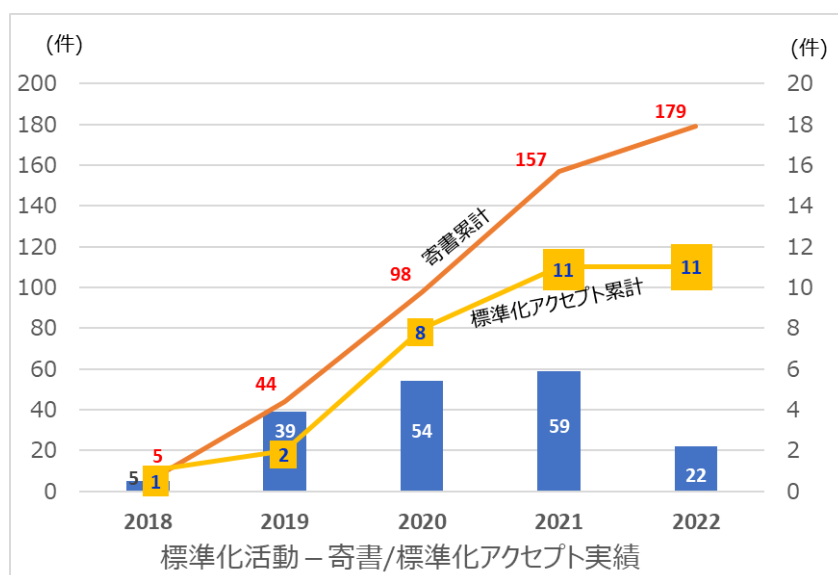


図 2-4-6. 5 年間の標準化活動状況 (棒グラフは各年度の寄書数)

⑥ 成果の対外的発信

2022 年度はこれまでに、論文等 6 本、学会等 10 件の成果発表を行った。また、量子セ

キュアクラウドシステムを使った次世代レーザー設計の最適化の処理・高秘匿伝送・分散保管の実現（京都大学、慶應義塾大学と課題内連携）（2022. 10. 4）、HPKI 準拠のカードに耐量子公開鍵暗号を世界で初めて実装に成功（2022. 10. 24）、量子セキュアクラウドにゲノム解析専用装置を装備し、全ゲノムデータの安全な伝送・保管・解析をリアルタイムで実施できるシステムの開発（2022. 11. 17）、量子セキュリティ技術と個人認証を連携させた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（2022. 12. 8）についてのプレスリリースを行った。これら成果は新聞、電子メディア等でも報道された。

さらに、アウトリーチ活動の一環として春・秋の量子コンピューティング EXPO 展示会（2022. 5, 2022. 10）及び CEATEC 展示会（2022. 10）で成果展示を行った。

⑦ 国際的な取組・情報発信

先にも述べた通り、国際標準化活動においては、これまでに日本の技術を骨子とする基本勧告体系整備を完了した。また ISO/IEC や ETSI における装置安全性に関する会合において、2021 年度に世界トップとなる 40 編の寄書を出し、安全性保証技術の標準化においてもイニシアティブを取ると共に活動に貢献している。

国際的な取組みとしては、2021. 7 に US-Japan Quantum cooperation Workshop や EC-Japan Meeting on Quantum でパネリストとして発表や議論に参加するなどして、日本の取組を国際的にも紹介したほか、今後の国際連携推進などに関する議論に加わった。また 2021. 8 の Qcrypt2021 Industry Session 参加も踏まえ、2021. 12. 7～9 にオンラインで開催された国際シンポジウム QUANTUM INNOVATION 2021 を SIP 光・量子課題として共催し、SIP での活動成果を世界に発信した。2022 年度も同様に 2022. 11. 28～30 の QUANTUM INNOVATION 2022 を共催した。

このように国際的な取組や情報発信を積極的に実施している。さらに㈱東芝は、個社として本 SIP 光・量子課題で取り組んだ 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。

(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

1) 研究内容

研究開発の全体像：

Society 5.0 の実現にはサイバー空間とフィジカル空間の高度な融合が不可欠であり、これを達成するには大規模かつ困難なデータ処理等、多くの計算ボトルネックが存在する。例えば、天文学的な多数の選択肢の中から「最適な答え」あるいは「準最適な答え」を瞬時に見つけ出すことが必要となる（組合せ最適化問題）。組合せ最適化問題は、ネットワーク型製造システムをはじめ自動運転、MaaS（Mobility as a Service：サービスとしての移動分野）等、Society 5.0 の実現に必要な多くの社会課題の解決にとって重要である。また、Society 5.0 の実現には、膨大なデータを高速・高精度に学習し、なおかつ学習結果に基づき、膨大なデータから実時間で推論する必要がある、機械学習の高速化・高度化も Society 5.0 の実現のために不可欠な構成要素となる。さらに、材料やエネルギーの領域においても、単純な性能追求だけでなく、環境負荷や資源枯渇などの社会課題への対応も求められており、トレードオフの関係にある場合には、これらの要求を高度に両立させることが必要となる。この実現のためには、これまでのような実験偏重・職人芸に頼った開発から脱却し、対象となるミクロな物理系をサイバー空間上でモデル化し、シミュレーションを通じて最適な解（分子構造や反応条件など）を導き出す必要性が高まっている。

こうした数多くの Society 5.0 実現に不可欠な計算ボトルネックの解決に期待されるのが、(1) イジング型コンピュータ（量子アニーリングマシンや古典技術を用いたアニーリングマシン）、(2) NISQ コンピュータ、(3) 誤り耐性ゲート型量子コンピュータと呼ばれる「次世代アクセラレータ」である。(1)～(3)の次世代アクセラレータは、既存の古典計算機と組み合わせることで、上述のような組合せ最適化問題の解法や機械学習、量子化学計算など古典計算機の計算ボトルネックを解消し、極めて高速・高精度にアプリケーションプログラムの実行が可能になると期待される。次世代アクセラレータを効果的に利活用することで、Society 5.0 の実現が加速する。

一方、Society 5.0 を実現するアプリケーションプログラムの特定部分に次世代アクセラレータを適用するには、(ア)アプリケーションプログラムから次世代アクセラレーションを呼び出すための入力データの準備、(イ)次世代アクセラレーションの実行、(ウ)次世代アクセラレーションからアプリケーションプログラムへの結果の受取り、の 3 段階より構成される。つまり、次世代アクセラレータの適用が優位となるのは、(イ)に要する時間に比較して、(ア)・(ウ)の時間が相対的に短く、また(イ)による効果（高速化や解の高精度化等）が期待される場合である。しかも、アプリケーションプログラムの特定部分の「動作」と、適用される次世代アクセラレータの組合せによって、(ア)・(イ)・(ウ)の時間ならびに動作

全体の精度は動的に変化する。

入力データの準備や出力データの取出しがいかに最適かつ効率的にできるかによって、次世代アクセラレータの適用の可否が変化することになる（次世代アクセラレータインタフェース技術）。Society 5.0の実現には、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、古典計算機による解法ならびに各種次世代アクセラレータの解法を同時に考慮した上で、アプリケーションプログラムを最適に実行するしくみの構築が不可欠である（次世代アクセラレータ・コデザイン技術）。実施体制を図 2-5-1 に示す。

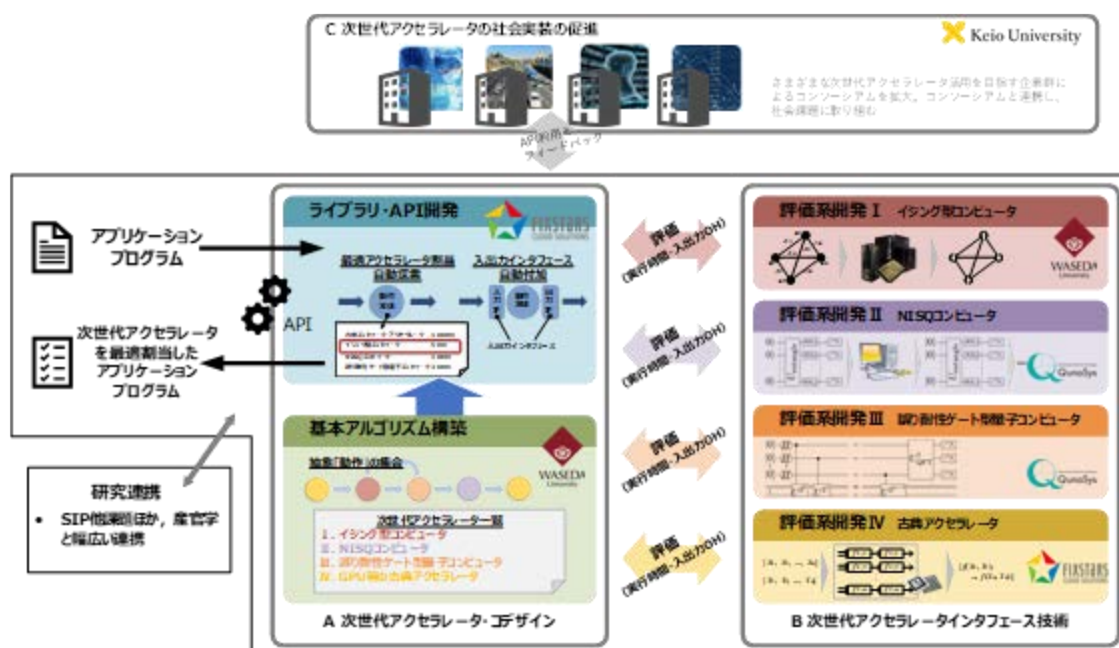


図 2-5-1. 研究開発の概要と実施体制

以上の背景のもと、本研究開発では(1)イジング型コンピュータ、(2)NISQ コンピュータ、(3)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（図 2-5-1）。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。研究開発全体を、(A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術、(B) 次世代アクセラレータインタフェース技術、(C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進、に分け、これらを同時並行して進めることで効率的・効果的に研究開発を進める。

具体的な実施計画（内容）：

（A） 次世代アクセラレータ・コデザイン技術

Society 5.0 では、膨大なデータを高速かつ高精度に計算する必要があり、これを実現するための次世代アクセラレータとして、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ等が研究開発されている。これらは、それぞれ得意・不得意な分野を持ち、またアクセラレータを活用するためには、アプリケーションプログラムによって、アクセラレータに投入するデータを準備し、これをアクセラレータに投入、アクセラレータによる処理の後、計算結果を取り出し、これをもとに、元のアプリケーションプログラムの実行を継続する必要がある。アクセラレータの成否は、アクセラレータの処理時間だけでなく、アクセラレータへの入力データ準備・入力データ投入、さらに出力データ取り出し・出力データの解釈等、一連の処理全体で決まると言っている。さらに、最適な出力結果を得るために、パラメータや条件を適宜変化させながら、入力データの準備・投入や出力データの取り出し・解釈が複数回必要になる場合も考えられる。

アプリケーションプログラム全体を高速化・高度化するためには、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ、これらに加え GPU などの古典アクセラレータを前提に、プログラム中のどの部分に対して、どのようなアクセラレーションが適切か、また実際にアクセラレータとして何を使うべきかを考え、アプリケーションプログラムの最適化と、アクセラレータの最適化を同時に実行することが不可欠になる（次世代アクセラレータ・コデザイン）。上記を踏まえ、本研究開発では、次世代アクセラレータ基盤技術として次世代アクセラレータ・コデザイン問題を定式化し、これを最適解法するしくみを研究開発する。

具体的な研究開発事項として以下のものを取り上げる：

実施内容 A1： 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

アプリケーションプログラムの動作を抽象化し「動作」の集合とする。そして、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータ、GPU 等の古典アクセラレータのうち、動作集合を構成するどの動作に対して、どのようなアクセラレーションが適切か、また実際に次世代アクセラレータとして何を使うべきかを考え、アプリケーションプログラムの最適化と、次世代ならびに古典アクセラレータの最適化を同時に実行する基本アルゴリズムを研究開発する。

実施内容 A2： 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

次世代アクセラレータと既存コンピュータとを相互にやり取りするための共通インタフェースを設計・開発し、次世代アクセラレータ・コデザインのライブラリ・API を研究開発する。特に、共通インタフェースを抽象化し、アクセラレータ間の差異を意識させない相互利用を可能とすることにより、次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を用いたアプリケーション開発エコシステムの構築を実現する。

(B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータ、GPU を使った古典アクセラレータなど、各種アクセラレータについて、アプリケーションプログラムに対するインタフェース技術を研究開発する。

まず入出力データに関して調査し、これを最適化する技術を開発する。さまざまなアプリケーションプログラムにおいて、アプリケーションプログラムに必要なデータの実量を評価し、データ準備・データ入力・データ出力・原問題の解取出しのすべての工程において、これらの最適化を図る。その上で入出力オーバーヘッドを評価する。

また各種アクセラレータと、これを利用して解く問題の関係性を評価し、実施内容 (A) による次世代アクセラレータ・コデザインに適用する。アクセラレータと諸問題との性質を調査した上で、問題を次世代アクセラレータで解く際の実行時間を評価する実行時間評価系を構築し、実施内容 (A) による次世代アクセラレータ・コデザインに適用する。

最終的に入出力オーバーヘッド、実行時間評価を次世代アクセラレータ・コデザイン技術にフィードバックすることで次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現する。

また上記と合わせて、各種次世代アクセラレータについて、実施内容 (A) と連携しながら、対象とする問題やこれらに対する入出力形式等を定義するものとする。

具体的な研究開発事項として以下の 4 つを取り上げる：

実施内容 B1： イジング型コンピュータのインタフェース技術の研究開発

イジング型コンピュータと諸問題との性質を調査した上で、イジング型コンピュータを対象に、入出力オーバーヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

実施内容 B2： NISQ コンピュータのインタフェース技術の研究開発

NISQ コンピュータと諸問題との性質を調査した上で、NISQ コンピュータを対象に、入出力オーバーヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

実施内容 B3： 誤り耐性ゲート型量子コンピュータのインタフェース技術の研究開発

誤り耐性ゲート型量子コンピュータと諸問題との性質を調査した上で、誤り耐性ゲート型量子コンピュータを対象に、高速シミュレータ等を利用して入出力オーバーヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

実施内容 B4： 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

GPU 等古典アクセラレータと諸問題との性質を調査した上で、GPU 等古典アクセラレータを対象に、入出力オーバーヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

(C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進

次世代アクセラレータの社会実装の促進の研究開発では、以下の二点を実施する。

第一に、GPS スマート製造領域における次世代アクセラレータ活用の加速を行う。GPS スマート製造領域におけるボトルネック要因を定式化し、これを次世代アクセラレータで解法可能な形式に変換した上で、プロトタイププログラムを開発する。これをもとに GPS ス

マート製造領域のステークホルダーからフィードバックを得て、産業側ニーズを反映する。

第二に、さまざまな次世代アクセラレータの活用を検討する企業群からなる社会実装コンソーシアムを拡大する。昨今、さまざまな次世代アクセラレータを利用できるようになりつつあるため、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータ、GPU 等古典アクセラレータのどれか一種類のみに注目している企業は少なく、いずれの次世代アクセラレータについても注目している企業が多い。そのため、複数種の次世代アクセラレータの組合せ活用のプロトタイププログラムを開発し、それをもとに企業からフィードバックを得て、産業側ニーズを反映する。複数種の次世代アクセラレータの組合せ活用のプロトタイププログラムを基に産業界ニーズを汲み上げることで、イジング型コンピュータ並びに NISQ コンピュータの社会課題活用を目指す企業群からなる社会実装コンソーシアムを拡大する。

上記を受け、実施内容 C は以下の通りである：

実施内容 C： 次世代アクセラレータの社会実装の促進の研究開発

GPS スマート製造領域における次世代アクセラレータ活用を加速し、さまざまな次世代アクセラレータの活用を検討する企業群からなる社会実装コンソーシアムを拡大する。

社会実装（計画）：

本研究開発の社会実装に向けた戦略と取組みとして、以下のような段階的な戦略を想定する。まず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まもなくの時期に、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公開することにより、世界でデファクトスタンダードを目指す。システムインテグレータがより迅速に社会実装を展開し、事業化のために本研究開発技術を利活用することが期待される。そしてその後、順次クローズ戦略として、本研究開発を主体的に進める産業界を中心に、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、研究開発されたソフトウェア群のライセンスリングなど競争領域にて事業展開を図る。

本研究開発では、社会実装の姿として、NEDO 事業や Q-LEAP 事業等と連携し、ネットワーク型製造システムや物流、材料、エネルギー・環境産業等からいくつかを想定し、これらの潜在ユーザーと、社会問題の抽出ならびに定式化／最適解法について連携しながら社会実装を進めるものとする。一部の次世代アクセラレータを用いた研究開発を既に行っているアーリーアダプタ層の企業群との強力な連携だけでなく、アーリーマジョリティ層となり得る企業群に対し、次世代アクセラレータの価値を明確化することにより、アーリーマジョリティ層の早期取り込みを行い、次世代アクセラレータ活用の早期拡大を目指す。レーザー加工分野においても、ネットワーク型製造システムに関するアプリケーションプログラムを想定し、研究開発技術を社会実装することを目指す。これらの研究開発成果のもと、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。

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)

- ・次世代アクセラレータ・コデ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)。

以下に 5 年間の工程表を示す。なお 2018 年度は研究計画策定期間である。

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 3) 光電子情報処理							
① 次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発							
・ 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・次世代コンピュータの技術開発事業」の状況を踏まえ、今後詳細を決定する。 ・ 上記検討にあたって、必要な調査を実施する。		1) 次世代アクセラレータ・コデザイン ・ 各種アプリケーションプログラムのボトルネック調査 ・ ボトルネックと次世代アクセラレータとの相関性調査 ・ 調査結果を踏まえた設計指針の確定 TRL2	・ 次世代アクセラレータ・コデザイン問題の解法を確定 ・ 各種アプリケーションプログラムとアクセラレータを用いたプロトタイププログラム開発完了 (第1段階) TRL5	・ 次世代アクセラレータ・コデザイン問題の解法を確定 ・ 各種アプリケーションプログラムとアクセラレータを用いたプロトタイププログラム開発完了 (第2段階) TRL5	・ 次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装完了とオープンテストベッド化の完了 TRL7	・ 次世代アクセラレータ・コデザインソフトウェアのオープン化による試用拡大	アプリケーション最適化サービス (ユーザ試用: 2023～ 商用利用: 2025～)
		2) 次世代アクセラレータインタフェース技術 ・ 各種アクセラレータの入出力調査 ・ 各種アクセラレータの入出力計画・データ量調査 ・ 調査結果を踏まえた設計指針の確定 TRL2	・ 各種アクセラレータと問題との性質調査 ・ 各種アクセラレータインタフェースのプロトタイプ設計完了 TRL5	・ 各種アクセラレータとコデザイン問題の解法への適用完了 TRL5	・ 代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典アクセラレータのみの技術と比べ10～100倍の高速化し、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 TRL7	・ アプリケーション最適化サービスの事業化への貢献	
	民間からの出資 (人材、物資、資金等)	(25%)	(50%)	(50%)	(50%)		

3) 課題目標の達成度 (成果)

① 国際競争力

本研究開発は(1)イジング型コンピュータ、(2)NISQ コンピュータ、(3)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するものであり、競合技術に比較して高い優位性を持つ。ここでは、本研究開発と競合技術とをグローバルベンチマークし、現時点での本研究開発を位置づけ、さらに研究開発が完了し後の本研究開発を位置づけることで、本研究開発の国際競争力を評価した。

グローバルベンチマーキングにあたり次世代アクセラレータとして、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータを対象とし、さらに、GPU を利用した古典アクセラレータを含め、次世代アクセラレータを活用し、(2)インタフェース開発要素を含むもの (図 2-5-2 参照) を焦点とした。

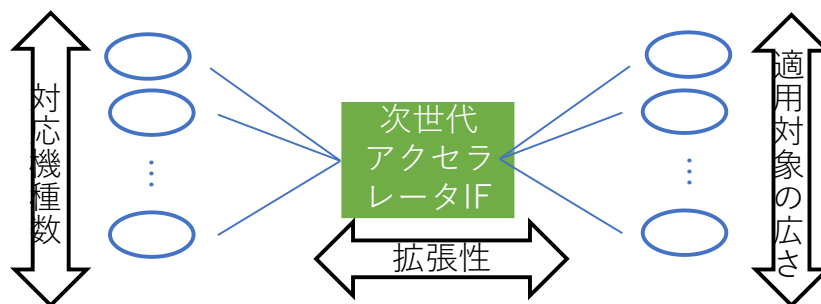


図 2-5-2. 次世代アクセラレータインタフェースの果たすべき役割

SIP 終了時のベンチマーク結果を表 2-5-1 に、これをレーダーチャートにしたものを図 2-5-3 に示した。

まず、次世代アクセラレータとして、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータ、加えて GPU による古典アクセラレータを開発対象に含み、企業が提供するサービスを評価対象とした。具体的には、欧米ならびに日本から幅広く、CUDA (米・NVIDIA)¹、次世代アクセラレータ導入コンサルティングサービス (米・QCWare)²、AWS braket (米・Amazon)³、tket (英・Cambridge Quantum Computing)⁴、次世代アクセラレータ導入コンサルティングサービス (加・1QBit)⁵、次世代アクセラレータ導入コンサルティングサービス (加・SoftwareQ)⁶、次世代アクセラレータ導入コンサルティングサービス (日本・NTT データ)⁷、PyQUBO (日本・リクルート)⁸、Microsoft Azure Quantum (米・Microsoft)⁹、Jij-Zept (日本・Jij)¹⁰ とした。それぞれ以下の情報をもとに評価した。

評価軸として、「次世代アクセラレータ向けのインタフェース」が幅広い市場に普及してこそ価値が出るものであるため、研究開発の価値を大きく、

- 市場性
- 社会貢献性
- コスト

1 <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>

2 <https://www.qcware.com/research>

3 <https://aws.amazon.com/jp/braket/>

4 <https://cambridgequantum.com/our-publications/>

5 <https://1qbit.com/products/>

6 <https://www.softwareq.ca/products>

7 <https://www.nttdata.com/jp/ja/services/quantum/>

8 <https://pyqubo.readthedocs.io/en/latest/>

9 <https://azure.microsoft.com/ja-jp/products/quantum/>

10 <https://www.jijzept.com/>

の3つの観点とした。さらに市場性はより細分化して評価項目を設定した。

- 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

以上の評価軸によって、現状のベンチマーク結果を見ると、本研究課題は、組合せ最適化問題、機械学習、量子化学計算をはじめ古典アクセラレータの全対象領域に適用可能であり、適用範囲の広さで大きな優位性を持つ。さらに、現状、実利用可能な次世代アクセラレータのすべてを対応可能とし、対応可能なアクセラレータの数においても優位性を持つ。一方、拡張性や社会貢献度、コストについては、ソフトウェア、API (Application Program Interface)、ライブラリの充実ならびに社会実装コンソーシアムの充実が求められる。

2021年度に比較して、2022年度においても本研究開発に継続した進捗があった。その部分については、表 2-5-1 において赤枠で示し、また図 2-5-3 では矢印で示した。

2019年度～2021年度の本研究開発の研究期間を通して、特筆すべき成果として例えば、以下のようなものがあり、最終的にこれらの成果を反映したものとなっている。

【拡張性】京都大学・フォトリック結晶レーザーチームとの連携によるフォトリック結晶レーザーの性能指数 Q を向上させる結晶構造探索高速化がある。フォトリック結晶レーザーシミュレータ、古典計算機による機械学習、加えて次世代アクセラレータによる推論の3段階による量子・古典ハイブリッド手法を構築し、実際にフォトリック結晶レーザーの性能指数 Q を大幅に向上させることに成功している。さらに、NICTの研究開発成果を活用し、京都大学・NICT・慶応義塾大学を秘匿通信によって接続し「秘伝の書」を仲介したフォトリック結晶レーザーの構造最適化に成功している。製造分野に量子計算技術を適用可能とする好例となっている。

【拡張性】加えて、2021年度に引き続き、物流倉庫における作業員最適配置では、これまでの成果を活用し、2022.10より実サービスが開始された。物流倉庫の実際のオペレーションに必要な制約事項を種々取り入れ、実仕様に対応するための作業員配置最適化エンジンが利用されている。また、作業員配置最適化エンジンの結果検証に向けた、現場における生産性のデータ化及び分析を行うことにより、物流倉庫のDX化が達成された。

【社会貢献度】さらに、研究開発したソフトウェア(ライブラリやAPI)の普及のためには、実際にユーザー企業が使用し、ユーザーニーズに則した機能実装を進めることが肝要と考えており、本研究開発では、各種ユーザーコンソーシアムと連携した社会実装を志向している。(株)フィックスターズはAmplify SDKにより、多くのユーザー企業に量子計算のためのソフトウェアツールキットを提供している。一方、QPARCは(株)QunaSysが2020.4に立ち上げたコンソーシアムであり、国内の主要材料メーカー、及び、自動車・エレクトロニクス関連企業50社超から計算技術者が集まっている。最終的にSIPで開発するソフトウェアの社会実装の一環として、QPARCはAmazon AWSとの連携を通じ、QPARC参加企業が量子コンピュータ実機を活用できる場を提供した。

表 2-5-1. 次世代アクセラレータ基盤のグローバルベンチマーク

評価軸	研究開発										
	SIP光量子 (日本)	CUDA (米・NVIDIA)	次世代アクセラレータ導入 コンサルティン グ (米・QCWare)	AWS braket (米・Amazon)	Azure Quantum (米・Microsoft)	tket (英・Cambridge Quantum Computing)	次世代アクセラレータ導入 コンサルティン グ (加・1QBit)	次世代アクセラレータ導入 コンサルティン グ (加・SoftwareQ)	次世代アクセラレータ導入 コンサルティン グ (日本・NTT データ)	PyQUBO (日本・リ クルート)	JijZept (日本・Jij)
市場規模	適用対象の 広さ	◎ 組合せ最適化 機械学習 量子化学計算 古典アクセラレータ の対象領域	○ 古典アクセラ レータの対象 領域	△ 機械学習 量子化学計算	○ 最適化計算 機械学習 量子化学計算	◎ 組合せ最適化 数理最適化 機械学習 量子化学計算	△ 量子化学計算	△ 組合せ最適化	△ 量子化学計算	△ 組合せ最適化	△ 組合せ最適化
	対応可能な アクセラレータ 機種数	◎ 現状のイジング 型コンピュータ、NISQ 型コンピュータ、将来 開発される誤り耐 性型量子コンピュータ	× 古典アクセラ レータ	△ 古典アクセラ レータ、一部の NISQコン ピュータ	○ 一部のイジ ング型コンピ ュータ、一部の NISQコン ピュータ	◎ 複数のイジ ング型コンピ ュータ、複数の NISQコン ピュータ	△ 複数のNISQ コンピュータ	△ 一部のイジ ング型コンピ ュータ	△ 複数のNISQ コンピュータ	△ 一部のイジ ング型コンピ ュータ	△ 複数のイジ ング型コンピ ュータ
	拡張性 (自 動化、コデザ イン性)	◎ 自動化、コデザ イン	× 手動、コデザ イン非対応	△ 特定の量子・ 古典ハイブリ ッドアルゴリズム のみ対応	△ 特定の量子・ 古典ハイブリ ッドアルゴリズム のみ対応	◎ 特定の量子・ 古典ハイブリ ッドアルゴリズム のみ対応	× 手動、コデザ イン非対応	× 手動、コデザ イン非対応	× 手動、コデザ イン非対応	× 手動、コデザ イン非対応	× 手動、コデザ イン非対応
	社会貢献度 (オープン開発、 コミュニティ育 成)	○ オープン開発要素 を含む開発、コン ソーシアム活動による コミュニティ育成	○ 古典アクセラ レータのみに 絞ったコミュニ ティ育成	× 個社対応	△ 研究用途、市 場拡大のための コミュニティ 育成	○ コンソーシアム 活動によるコ ミュニティ育成	× 個社対応	× 個社対応	× 個社対応	△ 個社対応 (複数の大 企業への対 応)	△ 研究用途、市 場拡大のため のコミュニティ 育成
	コスト (導入、運用)	◎ 膨大な業種からなる コンソーシアム参 画企業との対話から 得られたユーザ フィードバック、PoC 取り組みを通じた導 入コスト低減	○ 古典アクセラ レータ市場展開 実績有り	△ ごく小数の ユーザ企業 のため新規 顧客参入に 対する障壁大	○ 古典アクセラ レータ市場展開 実績有り	○ 古典アクセラ レータ市場展開 実績有り	△ ごく小数の ユーザ企業 のため新規 顧客参入に 対する障壁大	△ ごく小数の ユーザ企業 のため新規 顧客参入に 対する障壁大	△ ごく小数の ユーザ企業 のため新規 顧客参入に 対する障壁大	○ 古典アクセラ レータ市場展開 実績有り	△ 研究用途の OSSであり当 該項目に該当 しない

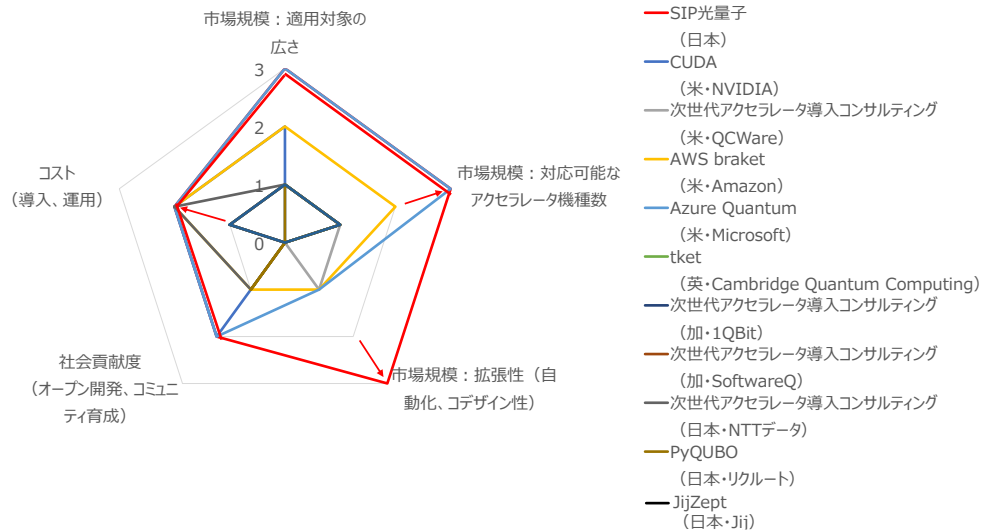


図 2-5-3. 次世代アクセラレータ基盤の他機関との比較。矢印は 2021 年度から 2022 年度にかけて、本 SIP 光・量子課題事業の進捗部分。

評価対象となる企業ならびにサービスについて、ソフトウェアやサービスの充実が予想されるが、利用する次世代アクセラレータの種類が限られ、またその活用技術が、手動や特定の量子・古典ハイブリッドアルゴリズムに限られるなど、拡張性（自動化、コデザイン性）の範囲が極めて限られる。社会貢献度やコストについても、本研究課題に比較すると、進歩は限定的になると予想する。

これに対して、本研究課題における開発技術は、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）にも優れることになる。加えて、研究開発の初期の段階からオープン/クローズ戦略に基づき研究開発を実施し、社会貢献度（オープン開発、コミュニティ育成）にも優位性を持つ。さらに、50 社超の様々な業種からなる QPARC 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を図り、コスト面でも同等かそれ以上のものとなっている。

結果的に、すべての評価項目において、競争力を持った研究開発を実施することが可能となっている。ここまで 2019 年度から 2022 年度までの研究開発を通して、SIP 終了時のグローバルベンチマークをほぼ達成したと考えている。

② 研究成果で期待される波及効果

本研究開発の成果は、Society 5.0 を構成するさまざまな分野に波及可能である。具体的に、本 SIP 光・量子課題では以下の 4 項目を社会課題の例として社会実装を試みる。さらに、2019 年度～2022 年度までにこれらの各分野において、具体的な社会実装が達成されつつあり、研究成果の波及効果は大きいことが分かる。本研究開発によって、当該分野の科学技術が大きく進展するばかりでなく、社会実装を通じて新技術が確立され、量子計算技術を活用した新製品・新機能への展開、新たな海外市場を含む新たな市場創出が期待される。

CPS 型スマート製造：

従来の製造業は、少品種大量生産を前提とした一連のワークフローによって成立し、いくつかの工程では人の経験と勘に頼ってきた側面がある。一方で現在の製造業では、多品種少量生産に対するニーズに応えるためのさらなる高効率化が課題である。これに対応する鍵が次世代アクセラレータを駆使した CPS 型スマート製造である。スマート製造における重要な技術である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力学・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り実行すること等が次世代アクセラレータの対象となる。また、製造全体では、複雑化され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が次世代アクセラレータの対象となる。

物流・配送：

e コマースの飛躍的な進展を受け、B2C 物流の絶対量が年々増加している。また、物流業界における労働人口の不足や高齢化問題も指摘されている。さらに、省エネルギー等環境に配慮した持続可能な社会に向けた取り組みも求められている。これらに対応するには、フィジカル空間で集められたデータを積極的に活用した物流のさらなる効率化、配送の共同

化等を推進する必要があると指摘されている。これらの課題に対し、想定される次世代アクセラレータの対象としては、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等が挙げられる。

材料：

材料やエネルギーの領域では、従来の単純な性能追求（耐熱性、強度、変換効率、等）だけでなく、環境問題や資源枯渇などの社会課題への対応が求められており、通常トレードオフの関係にある要求を高度に両立させることが必要となる。このため、これまでのような実験偏重・職人芸に頼った開発から脱却し、対象となるミクロな物理系をサイバー空間上でモデル化し、シミュレーションとハイスループット実験を通じて膨大な可能性空間の中から最適解（分子構造や反応条件など）を導き出す必要性が高まっている。想定される次世代アクセラレータの対象としては、例えば、革新材料の発見や量子化学計算などがある。

センシング・データ解析：

IoTに代表されるビッグデータ分析、衛星データの視覚化、医療画像など、大規模データにおけるデータマイニングや統計解析では、特徴量の抽出やデータ分類、推定などが行われる。大量のデータを社会課題に役立てるには、実世界のリアルデータを高精度かつ膨大に取得することが求められる。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は、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が行われる。このようなデータの最適化に対し、高速かつ高精度に処理することが可能になれば、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、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。想定される次世代アクセラレータの対象としては、位置データの解析や画像データの解析等があげられる。

2019年度～2022年度の研究開発を通じて、以下の項目について、社会実装が成果を上げている（詳細は、③達成度(1)ならびに④達成度(2)を参照）：

(A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術

上述のセンシング・データ解析について、最適周波数割当ならびに位置情報解析を実現している。最適周波数割当では通信事業者と連携し、次世代アクセラレータの適用により次世代通信を対象とした周波数割当問題を解法し、最適な周波数割当を実現した。位置情報解析では、大規模位置情報解析業者と連携し、点群データを扱うアプリケーションソフトウェアを創出した。点群を自動で切り出すことで、これまでデータを個別に見ては出来なかった人的行動を抽出し、新たに多くの人間のデータを抽象化された行動傾向として地理情報と紐づいた解析への展開が期待される。

上述の物流・配送では、物流倉庫での実作業に対応するため、作業者配置最適化エンジンを開発し、さらに合わせて作業者配置最適化エンジンのサービスインが2022.10に実現し、実利用されている。結果検証に向けた現場における生産性のデータ化およびその分析を

行うことで、さらに作業者配置最適化エンジンを改良すると同時に、エンジンのプラットフォーム化を行った。これにより、当該現場に限らず福祉、研究開発への展開などへの波及を目指す。

(B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

上述の材料について、NISQ コンピュータ実機をアクセラレータとして用い、量子化学向け計算時間推論のエンジンなどのインタフェース技術の開発を進め、革新的材料開発への応用を行っている。量子コンピュータ上で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、開発中のアルゴリズムエンジン、及び計算時間推論エンジンの有効性検証のため、Microsoft の Azure Quantum の量子コンピュータ実行プラットフォームを経由し、Honeywell System Model H1（イオントラップ型）という現時点で利用できる世界最高性能（Quantum Volume512）の量子コンピュータを利用して検証を実施した（分子の振動数解析を行った本計算は世界初の試み）。量子化学計算は、太陽電池・CO₂吸着・人工光合成触媒等への貢献余地が大きく、量子コンピュータによる開発加速が期待できる。

さらに GPS 型スマート製造と材料を融合した実応用例として、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、レーザー照射時の電子状態の時間依存ダイナミクスを、古典コンピュータと量子コンピュータを組み合わせで計算する手法など、量子ダイナミクス計算のための理論構築を推進した。量子コンピュータは励起状態計算や量子ダイナミクス計算を得意とし、従来行なえなかった現象の解析が可能となることで、新たな光源開発や加工条件の精密制御が可能となる。

(C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進

特に、GPS 型スマート製造に注目し、フォトリック結晶レーザーの性能を向上させる結晶構造探索に成功した。人工知能と次世代アクセラレータ（イジング型コンピュータ）のハイブリッドアルゴリズムを活用し、性能指数 Q を高める非自明なフォトリック結晶構造を高速に発見することに成功した。この成果により、今後さらに先端半導体の最適設計に広く活用が期待される。

また、複合材料の安定構造探索シミュレーションの高速化にも取り組み、材料組織の安定構造探索計算を次世代アクセラレータ（イジング型計算機の実機）を用いて網羅的に実施し、高速計算にも成功しており、（例）脱炭素化に貢献する材料探索を早め、地球温暖化防止に役立つことが期待される。さらに、NICT の研究開発成果を活用し、京都大学・NICT・慶應義塾大学を秘匿通信によって接続し「秘伝の書」を仲介したフォトリック結晶レーザーの構造最適化に成功している。製造分野に量子計算技術を適用可能とする好例となっている。

③ 達成度（１）※5 年間の設定目標に対する達成度

(A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術

実施内容 A1：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

実施内容 A1 では、複数の次世代アクセラレータを協調的に動作させる基本アルゴリズム

ムを構築することを目的とする。構築する基本アルゴリズムは、対象とするアプリケーションプログラムの計算ボトルネックとなり得る各動作に対し、次世代アクセラレータならび古典アクセラレータから動作に最適なものを選択するものであり、アプリケーションプログラム全体を協調動作させる一連の仕組みを与える。2019 年度から 2022 年度にかけて次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装を完了し、オープンテストベッド化を完了した。代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術と比べ 10-100 倍の高速化を実現し、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した。2019 年度から 2022 年度にかけての取り組みにより以下の成果を得た。

1) アプリケーションプログラムのボトルネック調査

対象となるアプリケーションプログラムを想定し、ボトルネックとなる計算に時間がかかる処理を部分プログラムとして抽出した。いま Society 5.0 に資する典型的なアプリケーションプログラムの実例として、宅配業者が複数のトラックを使用して効率的に倉庫内の荷物を各家庭に配送するアプリケーションプログラムを考える。この場合に、倉庫内の荷物をデータとして入力する部分プログラムは次世代アクセラレータを使う必要がなく、通常の古典のコンピュータで実行することが望ましい。一方で荷物をトラックに割り当て、各家庭に配送する順序を決める部分プログラムは計算量が大きく、次世代アクセラレータを使うことが望ましい。

2) 次世代アクセラレータ・コデザイン問題を定式化し、各アクセラレータを協調的に動作させる最適化アルゴリズムを実現

対象となる部分プログラムを次世代アクセラレータで実行する「向き／不向き」を調査した。先の宅配アプリケーションプログラムの例では、次世代アクセラレータの適用の対象となる部分プログラムは容量制約付き配送問題 (Capacitated Vehicle Routing Problem; CVRP) と呼ばれる最適化問題となる。この最適化問題に向く次世代・古典アクセラレータとしてはイジング型コンピュータ、NISQ、古典アクセラレータが考えられる。一方で誤り耐性量子コンピュータは、この最適化問題に不向きであり協調動作する場合は使用しないことが望ましい。さらに検討を重ねると次世代アクセラレータの対象となる部分プログラムは、さらに細かい部分プログラムに分解可能であることが判明した。この CVRP の場合はクラスタリング問題と巡回セールス問題に分解可能である。分解された部分プログラムにも次世代アクセラレータ適用の向き不向きがある。

次世代アクセラレータを使用するにあたり実行時に最適化したい項目は異なる。部分プログラムの出力を解の品質と定義し、この解の品質と実行時間を多目的に最適化することを考えた。多目的関数を 1 次元の評価指標に落とし込む優先度というハイパパラメータを定義し、その 1 次元の評価指標の最適化が多目的関数の最適化に結びつく変換方法を構築した。次世代アクセラレータ・コデザイン問題を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（図 2-5-4）。

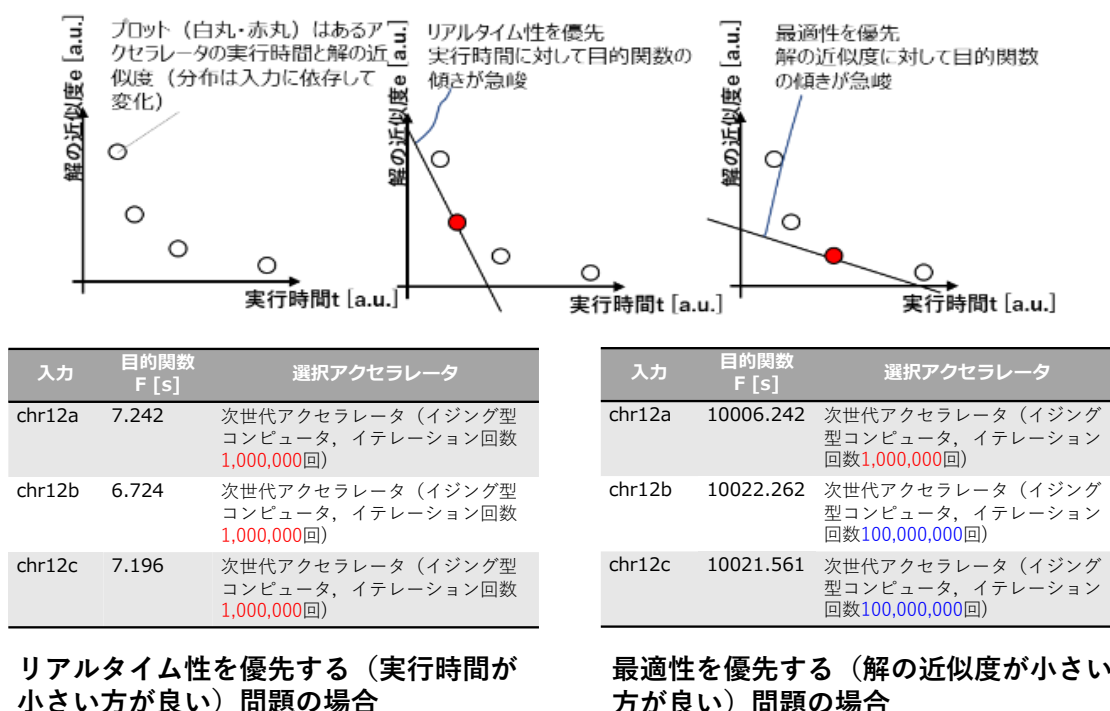


図 2-5-4. 実行時間と解の品質（近似度）を多目的に最適化するアルゴリズム（上）とベンチマークに対する最適化結果（下）

3) 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と、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

次世代アクセラレータ・コデザインの最適化アルゴリズムを実現するソフトウェア（図 2-5-5）を実装した。プログラムは API を通じてクラウドサーバーと通信するが Wrapper API を用意することで複数の部分プログラムをまとめ、効率的な処理を可能とする。Wrapper API が実際に、部分プログラムごとにプリミティブな API で計算するか、あるいは部分プログラムをまとめた状態で計算するか、はシステム内で決定される。推定モジュールとして部分プログラムのパラメータに対する実行時間をプロファイルしておき、ソフトウェアは各種アプリケーションの API として与えられ、基本構造となるプリミティブな API とそれらを複合して動作する API として与えられる。

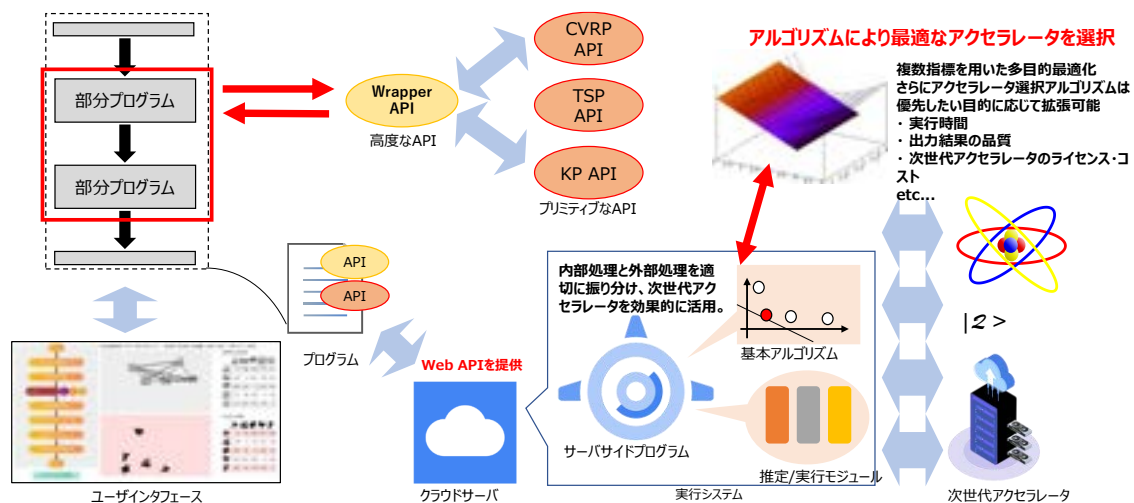


図 2-5-5. 次世代アクセラレータ・コードデザインソフトウェア

4) 位置情報アプリケーションと周波数割当最適化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・コードデザインソフトウェアが1桁以上の高速化を達成

位置情報アプリケーションは入力された複数の位置情報からノイズを除去し意味あるまとまりを出力するアプリケーションである（図 2-5-6）。人間の行動を解析するにあたりモバイル端末から GPS データを取得するとそれは時間と位置座標のペアとして得ることができる。大量の時間と位置座標のペアはそれだけでは意味をなさないため、注目すべき位置座標群を時空間上のまとまりを検出して解析結果として出力する。

周波数割当最適化アプリケーションは周波数干渉を起こさないように複数の時間枠における基地局と周波数との割当を最適化するアプリケーション（図 2-5-7）である。近い位置にある基地局が同時刻に干渉する周波数を用いることは避けなければならないハードな制約となる。基地局には通常複数の周波数を割当てることが可能であるが、なるべく連続した周波数領域を割当てることが望まれており、これがソフトな制約となる。ハードな制約を満たしつつ複数のソフトな制約に相当するコスト関数を最小化する問題を、次世代アクセラレータを用いて解法する。

位置情報アプリケーション（2パターン）の高速化スキームを構築

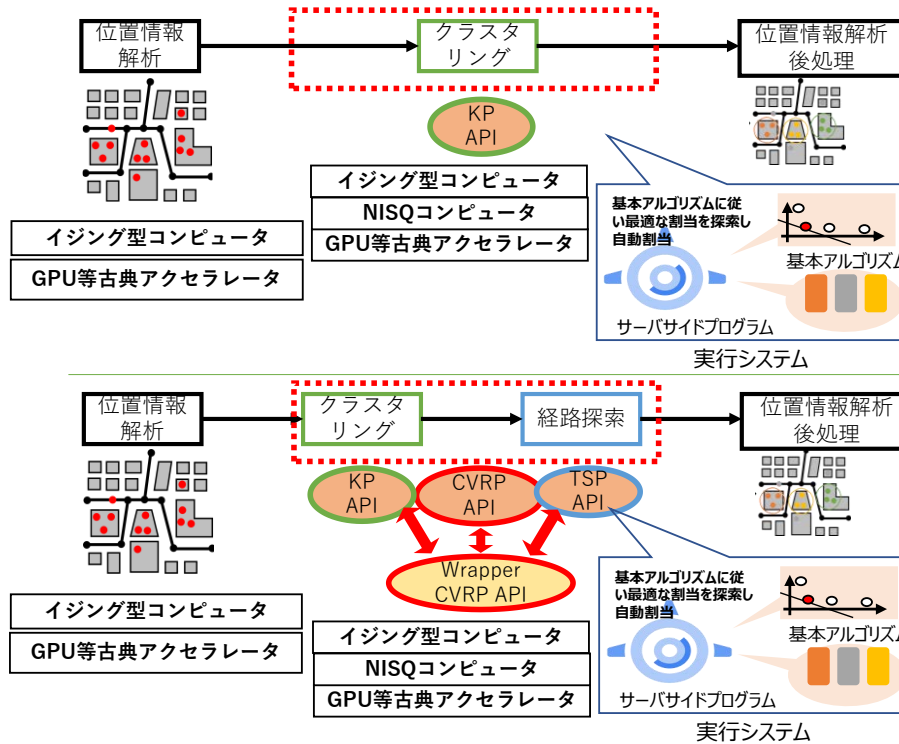


図 2-5-6. 位置情報アプリケーション

周波数割当最適化アプリケーションの高速化スキームを構築

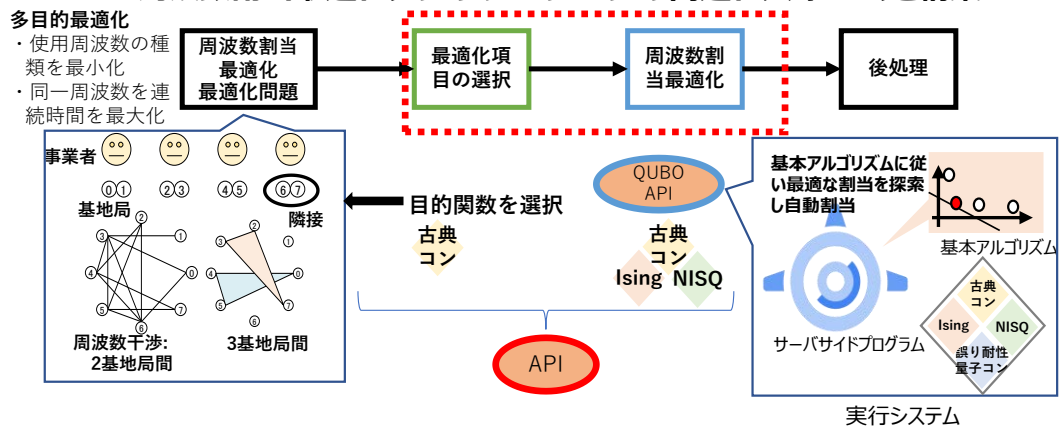


図 2-5-7. 周波数割当最適化アプリケーション

これらのアプリケーション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。(表 2-5-2)

表 2-5-2. 周波数割当最適化アプリケーションで 1 桁以上の高速化

5.7x~32x

(m,n,f,t) m:事業者数、 n:基地局数、 f:チャネル数、t: タイムスロット	古典ヒューリスティック		次世代アクセラレータ Fujitsu DA PT mode		次世代アクセラレータ・コデザイン		
	時間 [s]	品質 [a.u.]	時間 [s]	品質 [a.u.]	時間 [s]	品質 [a.u.]	選択された アクセラレータ
(4,8,4,2)	0.54	-14.38	5.81	-14.38	0.23	-14.38	Amplify AE
(4,12,5,2)	1.04	-15.52	3.87	-16.24	0.18	-16.24	Amplify AE
(4,16,15,2)	6.49	-116.50	11.87	-118.59	0.20	-112.93	Amplify AE
(4,20,15,2)	9.37	-99.22	29.20	-103.11	4.12	-102.36	Fujitsu DA EX mode
(4,24,15,2)	15.33	-80.15	40.43	-53.47	3.34	-74.12	Fujitsu DA EX mode

5) ポストコロナ時代の働き方に対応する次世代アクセラレータ活用的人员計画最適化基盤ソフトウェアの有効性を確認。一部の企業とのサービスイン合意をとり企業による準製品化を完了し、社会実装コンソーシアムにおける活用を達成

次世代アクセラレータ（量子計算技術）を活用することで、新型コロナウイルスの影響を加味した柔軟な人員計画最適化ソフトウェアを作成した。新型コロナウイルスの影響による職場環境における新たな制約を遵守し、生産現場や介護現場等の人員計画最適化の有効性を確認した。これまで人手により朝・昼・夕の合計で数時間を越える多大な時間が割かれた人員計画最適化が、配置調整を行いたいタイミング（予定外の欠勤、急な帰宅者発生、生産進捗の状況等）に随時・何度でも行うことができ、人員計画最適化の処理時間も数十分程度と大幅に短縮できるようになった。さらに、100 名あまりの人員配置に際しての公平性（作業場所、チームの組合せ、担当外の業務割り当て等）を最適化要素に組み込むことで職場の満足度向上も期待される。新型コロナウイルスの影響が緩和される新時代においても、世界規模での生産性向上を実現し、SDGs の「8. 働きがいも経済成長も」に対応する多様な働き方を達成かつ生産性を高めることが見込まれる。

[SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）]

- ・アプリケーションプログラムを構成する部分プログラムの一部を次世代アクセラレータ・古典コンピュータ上で部分的に実行し、各種アプリケーションプログラムのボトルネックを調査した。ボトルネックと次世代アクセラレータとの相関性を調査した。
- ・次世代アクセラレータ・コデザイン問題を定式化し、各アクセラレータを協調的に動作させる最適化アルゴリズムを実現した。
- ・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。次世代アクセラレータ・コデザインソフトウェアを部分公開し、オープンテストベッド化を達成した。
- ・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周波数割当最適化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。
- ・ポストコロナ時代の働き方に対応する次世代アクセラレータ活用の人員計画最適化基盤ソフトウェアの有効性を確認できた。一部の企業とはサービスインの合意をとり、企業による準製品化を完了し、社会実装コンソーシアムにおける活用を達成した。

実施内容 A2：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

本実施内容 A2 における具体的な研究開発事項は、次世代アクセラレータと既存コンピュータとを相互にやり取りするための共通インタフェースを設計・開発し、次世代アクセラレータ・コデザインのライブラリ・API を研究開発することを目的とする。特に、共通インタフェースを抽象化し、アクセラレータ間の差異を意識させない相互利用を可能とすることにより、次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を用いたアプリケーション開発エコシステムを構築することを目指す。

2019 年度～2020 年度の研究活動においては、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を実施した。具体的には、以下の研究・開発を行うことにより、次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームを構築した。

- ・イジング型コンピュータ/NISQ コンピュータへのアクセス手段の確立、および GPU/HPC 上で動作する誤り耐性ゲート型量子コンピュータ環境の構築を行った。
- ・次世代アクセラレータの比較検討を行う統合計算機環境の設計を行った。
- ・イジング型コンピュータ共通プラットフォーム向けインタフェースの開発を行った (NEDO との連携)。
- ・種々のアクセラレータで実行可能なライブラリ・API のプロトタイプの開発を行った。

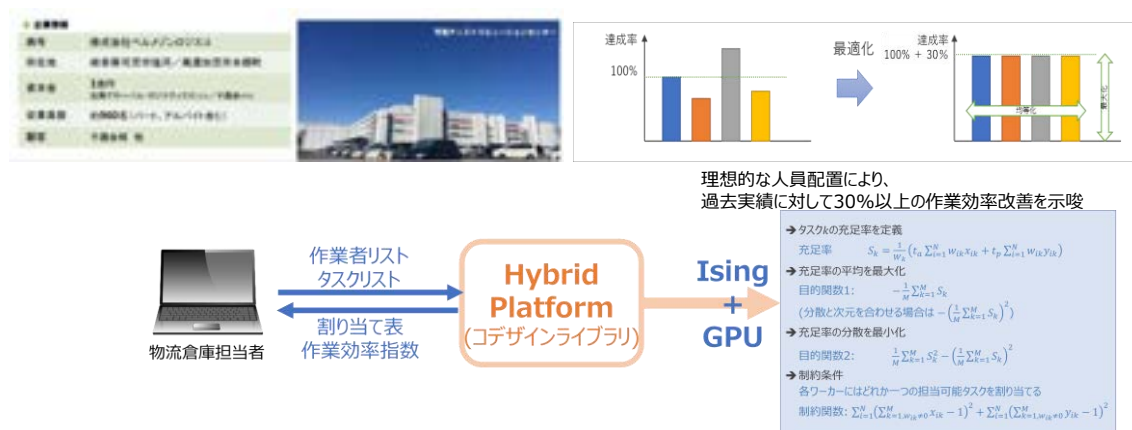


図 2-5-8. 物流倉庫における作業最配置の実証実験

また、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、住友商事グループの物流倉庫における作業最配置の実証実験を実施した。この実証実験に際しては、実施内容 B4 と連携して実証実験のためのプロトタイプ API を開発した。この実証実験の目

的は最適化問題をコデザイン・ライブラリで実行することであった。本実験では、作業員 100 名の 4 種類のタスクについて、イジング型コンピュータ及び GPU を実行環境として実行したところ、70 ミリ秒の計算時間で、理想的な人員配置により、過去実績に対して 30%以上の作業効率改善を示唆する結果が得られた（図 2-5-8）。

2021 年度～2022 年度の研究活動においては、次世代アクセラレータの比較検討を行う統合計算機環境の設計を継続し、以下 2 項目を実行できる環境を完成させた。図 2-5-9 に次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームを示す。

- ・イジング型コンピュータを選択的に実行可能とするインターフェースを構築した。
- ・NISQ コンピュータと誤り耐性ゲート型量子コンピュータのシミュレータと接続して、需要の高い組合せ最適化問題対応ができる環境を実現できた。

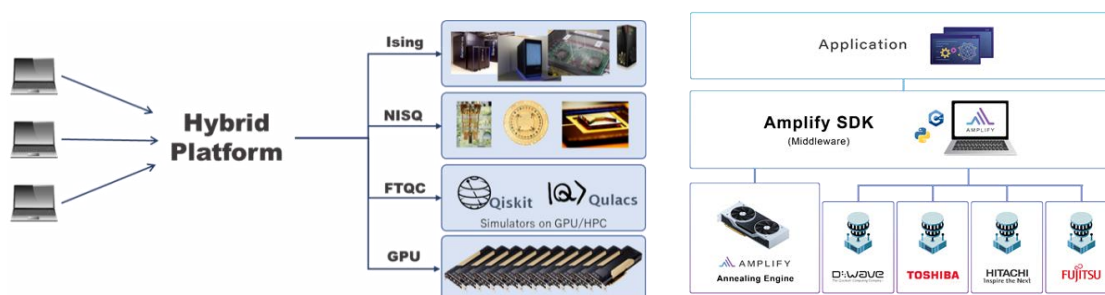


図 2-5-9. 次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームと Amplify SDK の開発

更に 2022 年度の研究活動においては、2021 年度の次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームを発展させ、次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装完了とオープンテストベッド化を完了し、代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術との比較評価を実施した。

- ・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（図 2-5-10）を完成し、無償で一般に提供した。

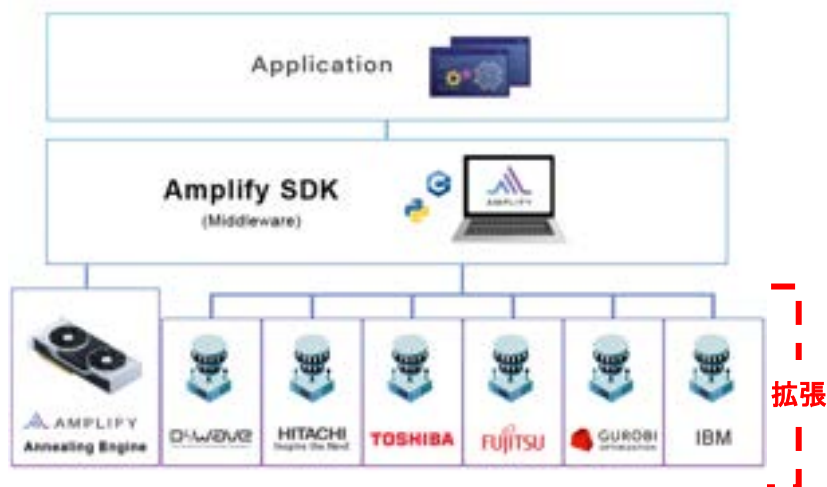


図 2-5-10. 次世代アクセラレータ統合実行環境で最適マシンを選択できる開発環境の拡張

- ・(株)フィックスターズで無償提供しているイジングマシン（Amplify Annealing Engine）の大幅な性能向上も実施した（2021 年度の最大 64 倍：(株)フィックスターズ比）。
- ・また住友商事(株)と進めてきた物流倉庫における作業配置最適化問題に対して、上記の研究成果を活用し、計算速度は 10 倍以上を実現し、計算精度に関しても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。

[SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）]

2022 年度の設定目標である、次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装を完了し、オープンテストベッド化を完了する目標、および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 10-100 倍の高速化を達成し、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目標に対して、以下を実施し目標を達成できた。

- ・A1 のコデザインアルゴリズムとの連携により、次世代アクセラレータ統合実行環境で最適なマシンを選択できる開発環境（図 2-5-11）を実現できた。

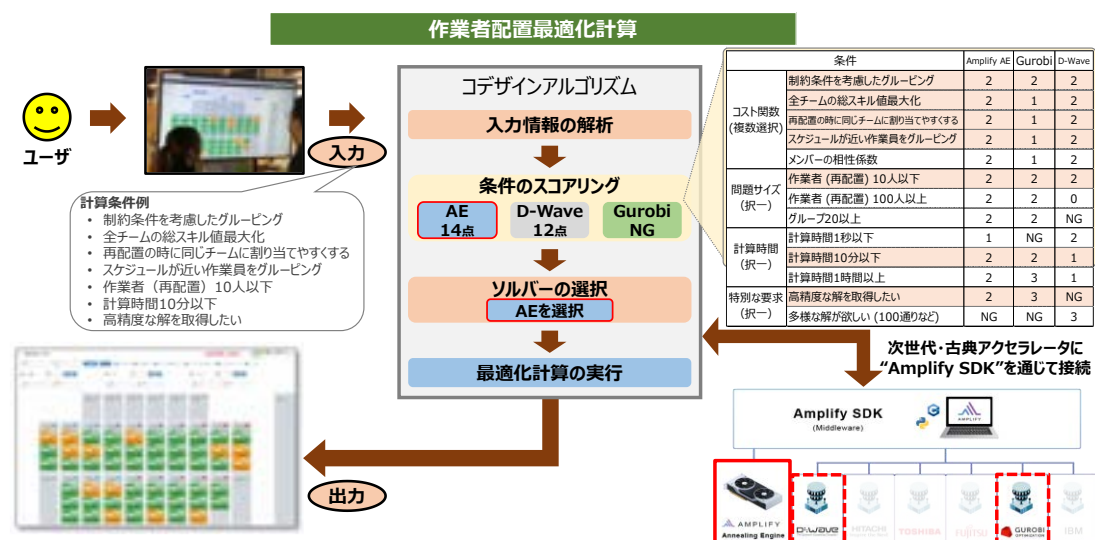


図 2-5-11. 最適な次世代アクセラレータを選択

- ・ 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た。
- ・ Amplify SDKにより、多くのユーザー企業に量子計算を容易に実現できるためのソフトウェア開発ツールの提供を実現した。2022. 9 時点で、ユーザーの累計実行回数は、1,300 万回を突破した。
- ・ 住友商事(株)と進めているスマート物流の社会実装において、問題に応じた適切な実行マシンの調査・検討が可能になり、計算速度・計算精度の向上を実現するための開発が完了した。
- ・ さらに、住友商事(株)と進めているスマート物流の社会実装において、物流倉庫における作業員最適配置でのこれまでの成果を活用し、(株)ベルメゾンロジスコにおいて 2022. 10 より実サービスが開始された。本研究成果の活用により計算速度は 10 倍以上を実現し、計算精度も人による最適化とくらべて大幅な生産性と満足度の向上を実現した。

(B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

実施内容 B1: イジング型コンピュータのインタフェース技術の研究開発

イジング型コンピュ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の一つとして期待されているイジング型コンピュータを効率よく利用するためのインタフェース技術の研究開発を行った（図 2-5-12）。イジング型コンピュータでは、相互に関係を有する-1 または 1 の値をとるスピンの集合（イジングモデル）が 2 つのスピン間の相互係数と自分のエネルギーの二次式で表された総エネルギーを最小化するようにスピンの向きを決めるという物理現象に基づいている。このため、本インタフェースでは解きたい問題

を制約条件やイジングモデルに変換する機能も含めて基本ソフトウェアを構築している。なお、問題によっては、イジングモデルと等価である 0 または 1 の値をとる変数の二次式を最小化する QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) モデルが用いられる。

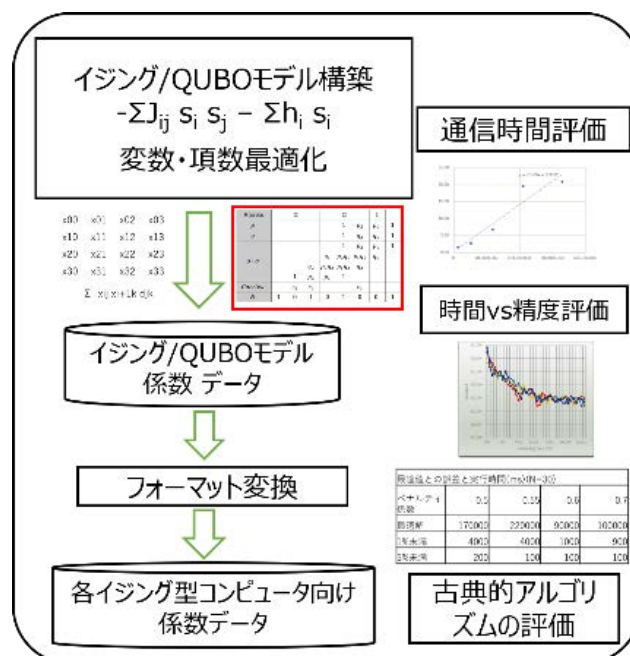


図 2-5-12. イジング型コンピュータのインターフェース

1) 組合せ最適化問題に対するインターフェースの整備を行い、問題をイジング/QUBO モデルへ変換するとともに、個別のイジング型コンピュータのフォーマットへ変換する環境の構築を行った。

代表的な組合せ最適化問題であるグラフのマックスカット問題、巡回セールスマン問題、二次割り当て問題について、イジング/QUBO モデルに変換する環境を構築した。また、イジング型コンピュータ毎で入力のフォーマットが少しずつ異なるので、いくつかのイジング型コンピュータに対してフォーマット変換を行うと同時に、イジング型コンピュータに独自のパラメータを問題ごとで決める方式を示した。

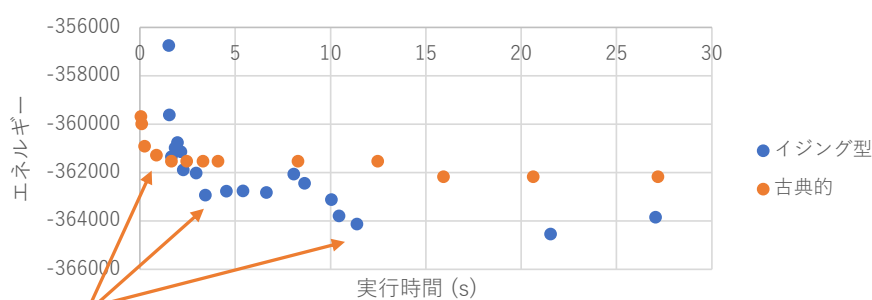
2) 組合せ最適化問題以外に対するインターフェースとして、因数分解に対するイジング/QUBO モデルの構築環境および古典的アルゴリズムと組み合わせる解く手法の提案を行い、60 ビットまでの二進数の因数分解を可能とするインターフェースを構築した。

因数分解は公開鍵暗号の基礎となるなど、計算量的に困難な問題として知られている。二進数の因数分解は二つの二進数の乗算の結果が因数分解したい二進数になるとして定式化でき、二進数の乗算を部分積の加算として表すことでイジング/QUBO モデルに変換できることが知られていた。しかし、既存手法では 30 ビット程度の二進数しか因数分解できなかった。それに対し、部分積の加算部の制約を一部しか使わないことと、古典的なアルゴリズム

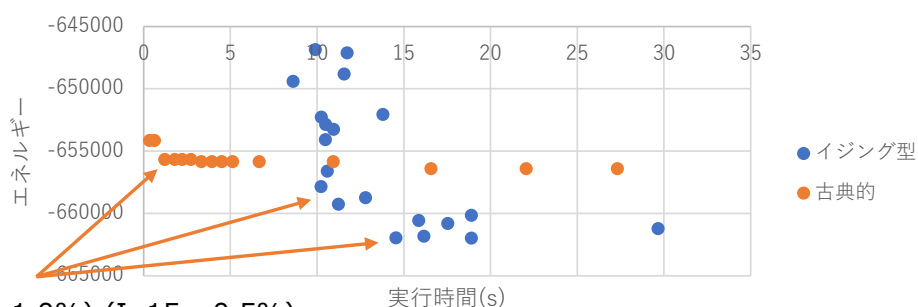
ムの組み合わせで、60 ビットの二進数の因数分解ができる手法の提案を行い、提案手法を用いるためのインタフェースを構築した。

3) イジング型コンピュータの実行時間、ペナルティ定数と解品質の評価をランダムに生成した巡回セールスマン問題および二次割り当て問題について行い、問題サイズと解品質に対して必要な実行時間の関係を明確化した。

いくつかのイジング型コンピュータに対して、ランダムに生成した巡回セールスマン問題や二次割り当て問題などについて実行時間と解の品質の調査を行った。また、同時にこれらの組合せ問題をイジング/QUBO モデルに変換するときに導入するペナルティ定数についても調査を行い、問題ごとに最適なペナルティ定数の決定方法を求めた。ローカルの計算機で実行することができるイジング/QUBO モデルのエネルギーを小さくする古典的なグリーディアルゴリズムを実現し、それを用いて問題を解く場合との比較を行った(図 2-5-13)。イジング型コンピュータを用いることで、古典的アルゴリズムに比べ、1/10 の実行時間でより品質の良い解が得られることが分かった。



(C, 1s, 1.5%), (I, 5s, 0.5%) (I, 15s, 0.2%)



(C, 1s, 2%), (I, 10s, 1.0%) (I, 15s, 0.5%)

50工場の二次割当問題 (サイズ 104MB)

図 2-5-13. 実行時間と得られたエネルギーの関係

4) イジング型コンピュータの実行時間について、入力データの転送時間を含めた総実行時間の推定手法を確立した。

イジング/QUBO モデルの構築においては、多項式変換などにより、入力である係数データのサイズが大きくなることもある。サーバーとして運用されているイジング型コンピュータを利用するには、入力データをサーバーまで送る必要があり、それがオーバーヘッドとなる。サーバーまでの通信環境はユーザーごとで異なるので、サーバーまでの通信時間をサンプルデータの転送で評価し（評価結果の一部を図 2-5-14 に示す）、それを用いてイジング型コンピュータを用いて問題を解くのに必要な総実行時間の事前推定を行う手法を確立した。イジング型コンピュータは短時間の実行で比較的良好な解を得られるため、データの転送時間が総実行時間に占める割合は小さくない。ローカルの計算機で実行できる古典的なグリーディアルゴリズムでの実行時間を考慮し、ユーザーがイジング型コンピュータの利用の最適化を行えるようにした。

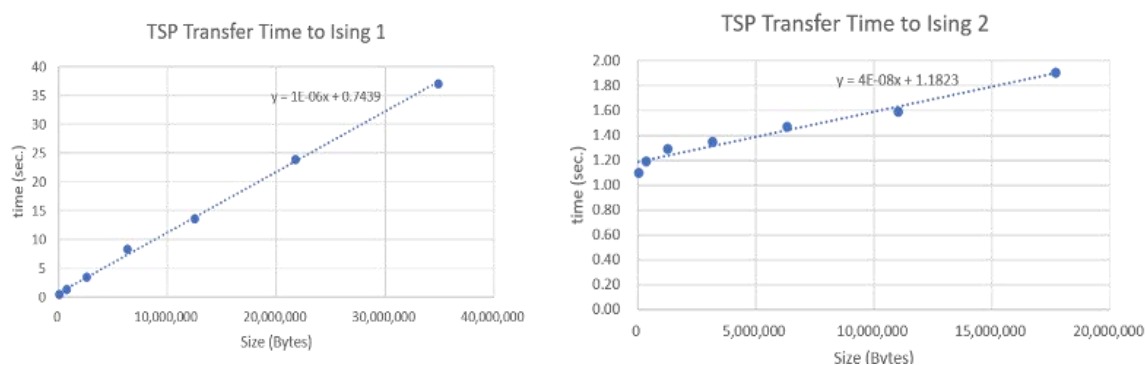


図 2-5-14. イジング型コンピュータサーバーに対する通信時間評価

5) イジング型コンピュータに関するインタフェースをいずれも API としてローカルコンピュータあるいはサーバーで動作するように実現し、配布できる形で整備を行った。

イジング型コンピュータ向けのイジング/QUBO モデルの作成とパラメータ値の推定、各種イジング型コンピュータフォーマットへの変換、データ通信時間を含む総実行時間の推定、イジング/QUBO モデル上の古典的アルゴリズムはいずれも API として実現し、古典的なローカルコンピュータあるいはサーバー上で動作する形で整備した。なお、サンプルデータを用いたイジング型コンピュータサーバーへのデータ通信時間は、データの存在するローカルコンピュータで行う必要があり、その結果を API で登録し、総実行時間の推定に用いる形で実現した。

[SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）]

- ・ 組合せ最適化問題に対するインタフェースの整備を行い、問題をイジング/QUBO モデルへ変換するとともに、個別のイジング型コンピュータのフォーマットへ変換する環境を構築した。
- ・ 組合せ最適化問題以外に対するインタフェースとして、因数分解に対するイジング/QUBO モデルの構築環境および古典的アルゴリズムと組み合わせて解く手法の提案を行い、60 ビ

- ットまでの二進数の因数分解を可能とするインタフェースを構築した。
- ・ イジング型コンピュータの実行時間、ペナルティ定数と解品質の評価をランダムに生成した巡回セールスマン問題および二次割り当て問題について行い、問題サイズと解品質に対して必要な実行時間の関係を明確化した。
- ・ イジング型コンピュータの実行時間について、入力データの転送時間を含めた総実行時間の推定手法を確立した。
- ・ イジング型コンピュータに関するインタフェースをいずれも API としてローカルコンピュータあるいはサーバーで動作するように実現し、配布できる形で整備した。

実施内容 B2: NISQ コンピュータのインタフェース技術の研究開発

実施内容 B2 では、量子化学計算を対象とし、NISQ 上で量子化学計算を行うためのライブラリの実装、及び、(左記ライブラリを利用した) 実行時間見積インタフェースの実装を目的とする。NISQ コンピュータのインタフェース (実行時間の評価系) を考える上では、NISQ コンピュータがヒューリスティックであり、計算精度とアルゴリズム実行時間の関係は理論的には求まらない点を認識する必要がある。これに対して、本研究開発では、「経験的に」計算実行時間を求めるというアプローチを採っている。つまり、実際に様々な問題で計算した結果 (実行時間) をデータとして蓄積し、既存のデータ点の内外挿により対象問題の実行時間を推計するという機械学習的なアプローチで実行時間見積機能を実装している。このアプローチを採るためには、実際に計算を実行してその結果を蓄積するための計算手法 (ライブラリ) の充実が不可欠である。

2019 年度から 2022 年度にかけて次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装を完了し、オープンテストベッド化を完了した。代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術と比べ 10-100 倍の高速化を達成し、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した。具体的な取組は以下の通り。

1) 次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装完了とオープンテストベッド化の完了

(1-1) 実問題適用に向けた量子化学向けアルゴリズムエンジンの拡充

本研究開発では、多くの量子化学計算技術者が実際に研究開発の現場で使用する物性を計算できるライブラリの実現を目指し、革新的なアルゴリズム開発を行うプレイヤーとの連携体制を構築し研究を進めた。2019 年度から 2022 年度にかけて以下の機能の実装を完了した。

- ・ 分子動力学: 第一原理電子状態計算で得られたポテンシャルエネルギーと原子核にかかる力を用いて古典軌道を追跡する手法で、化学反応や電子励起状態など多様な化学現象を高精度に記述できる。量子コンピュータ上で動作するエネルギーの核座標微分アルゴリズム

を用いて、第一原理分子動力学計算やその発展である Surface hopping 計算などを実施する機能を実装した。

- ・ 振動数解析：化学物質解析における重要な手法の一つ。振動数解析で得られる分子振動スペクトルは、分子の「指紋」のようなものであり、石油精製や水素製造プロセスにおける触媒反応解析等で重要な解析となっており、量子コンピュータ上で動作するアルゴリズムを実装し、潜在顧客への試験的公開を行った。
- ・ 光吸収スペクトラム：電子状態遷移に伴う可視光吸収スペクトルの計算が可能なアルゴリズムを実装し、潜在顧客への試験的公開を行った。
- ・ 構造最適化：よりエネルギーの小さい構造を算出し分子の安定構造を求める手法で、平衡状態の分子特性予測に有用とされている。量子コンピュータ上で動作するエネルギーの核座標微分アルゴリズムを実装し、潜在顧客への試験的公開を行った。
- ・ 周期系バンド構造計算：半導体やエネルギー変換材料等、あらゆる無機機能材料の機能設計に活用可能であり、高精度計算ニーズが高い。系の基底状態のエネルギーだけでなく、多体効果を取り入れたバンド構造の計算ができるアルゴリズムを実装し、潜在顧客への試験的公開を行った。
- ・ 相対論量子化学計算：相対論効果を含む 相対論的量子化学は重元素を含む分子の正確な物性予測に欠かせない。量子計算アルゴリズムでは相対論効果を（古典計算機とは異なり）ほぼ追加コスト無しで取り入れることができ、量子コンピュータ上で動作する相対論的効果を取り入れたアルゴリズムを実装し、潜在顧客への試験的公開を行った。

(1-2) NISQ コンピュータの計算時間推論エンジンの API 公開と古典アクセラレータとの比較インタフェース開発及びオープンテストベッド化の完了

計算時間推論エンジンの API 公開と古典アクセラレータとの比較インタフェース開発として、様々なサイズの分子の基底状態計算でアクセラレータ別（NISQ：計算エラーの由来としてショットノイズのみを仮定した VQE、古典コンピュータ：FCI 計算）の計算時間を見積もり、比較できるインタフェースを開発した（図 2-5-15）。

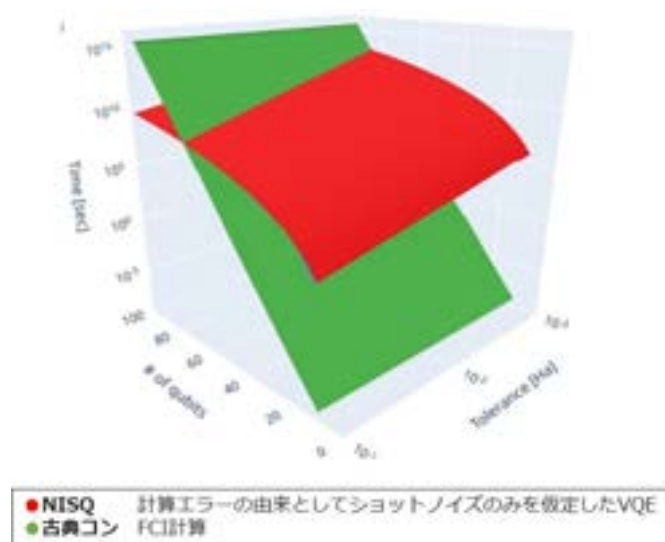


図 2-5-15. NISQ-古典アクセラレータの比較インタフェース

開発したライブラリ及び実行時間見積インタフェースは、(株)QunaSys が運営する社会実装コンソーシアム QPARC との連携の中で参加企業に実際に活用頂くことで、オープンテストベッド化を完了した。またオープンテストベッド的に活用して頂く中で、学術的・産業的な成果も得ることができた。具体的には以下の通りである。

- ・構造最適化：(株)豊田中央研究所との論文を出版した。原子核と電子の波動関数の虚時間ダイナミクスに基づいた分子の構造最適化手法を提案した (Hirotoishi Hirai, et al. Molecular Structure Optimization Based on Electrons-Nuclei Quantum Dynamics Computation, ACS Omega 2022, 7, 23, 19784-19793.)。
- ・光吸収スペクトラム：三菱ケミカル(株)・IBM と論文を出版した。量子コンピュータを用いて光化学で重要な量である「遷移振幅」を精度良く計算する手法を提案した (Yohei Ibe, et al. Calculating transition amplitudes by variational quantum deflation, Phys. Rev. Research 4, 013173 - Published 3 March 2022.)。
- ・振動数解析：ENEOS との取組が Microsoft の事例として公開された。上記に加え、分子軌道が縮退した際の数値不安定性を回避するような改良も実施した (アセチレン分子で安定して振動解析が可能に)。

<https://customers.microsoft.com/ja-jp/story/1536149625843093498-eneos-energy-azure-quantum-japanese>

また本取組は、Honeywell System Model H1 という取組時点で利用できる世界最高性能 (Quantum Volume512) の量子コンピュータを利用し、実機上でも、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。計算時間見積誤差は±20%に収まり、計算時間のばらつき等のデータも収集ができた。

2) 代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術と比べ 10-100 倍高速化し、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。
(2-1) 特定の計算課題（分子など）において NISQ コンピュータが古典アクセラレータに比べて 10-100 倍高速化するユースケースの明確化

(1)にて開発を行った計算時間推論エンジンの API 公開と古典アクセラレータとの比較インターフェースを用いて、NISQ コンピュータが古典アクセラレータに比べて 10-100 倍高速化するユースケースを探索した。具体的には、分子の基底エネルギー計算の手法・マシン毎に実行コストを比較するための算出フローを整理するとともに、ベンゼンを対象にした計算を実行した。以下の通り、古典コンピュータよりも NISQ 計算が高速化するという見積結果が得られた（図 2-5-16）。

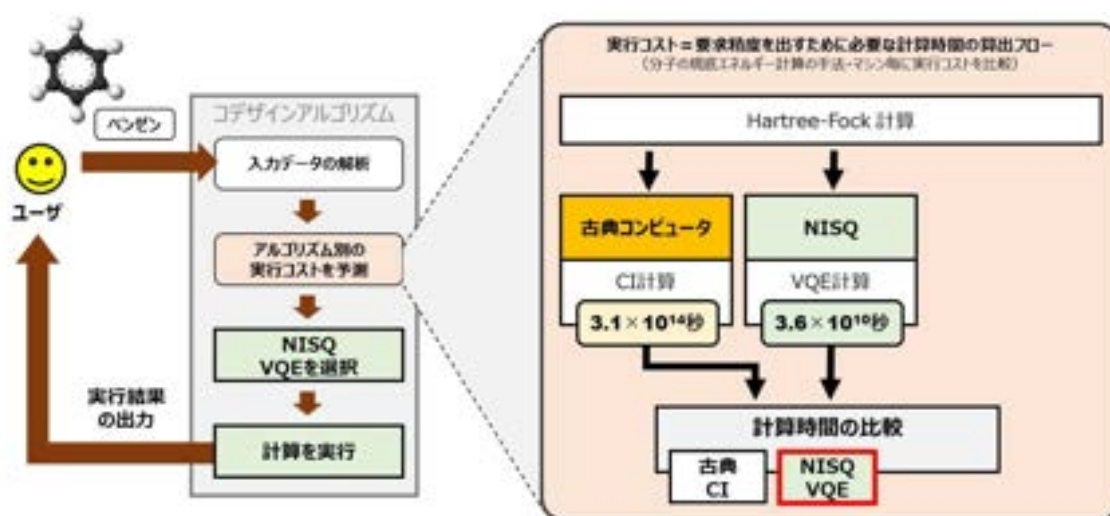


図 2-5-16. NISQ-古典コードデザインのデモ計算（ベンゼン）。古典コンピュータ： 3.1×10^{14} の 14 乗秒、NISQ： 3.6×10^{10} の 10 乗秒。

(2-2) 社会実装したソフトウェアをコンソーシアムを通じて提供

コードデザインのデモ計算は、(株)QunaSys が運営する社会実装コンソーシアム QPARC にて、民間企業に公表するとともにソフトウェアの利用意向及びフィードバックを獲得した。また、アルゴリズムライブラリを活用したハッカソンを開催し、世界中からオンラインで集まった参加者へチュートリアルを実施することでアウトリーチを推進した。

【SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）】

- ・実問題適用に向けた量子化学向けアルゴリズムエンジンを拡充した（分子動力学・振動数解析・光吸収スペクトラム・構造最適化・周期系バンド構造計算・相対論量子化学計算）。
- ・NISQ コンピュータの計算時間推論エンジンの API 公開と古典アクセラレータとの比較インターフェース開発し、オープンテストベッド化を完了した（構造最適化：豊田中央研究所との論文を出版・光吸収スペクトラム：三菱ケミカル(株)・IBM との論文を出版・振動数解析：ENEOS との取組が Microsoft の事例として公開）。

- ・ 特定の計算課題（分子など）において NISQ コンピュータが古典アクセラレータに比べて 10-100 倍高速化するユースケースを明確化した（ベンゼンを対象にしたコデザインのデモ計算実施）。
- ・ 実装したソフトウェアをコンソーシアムを通じて活用を推進した（QPARC を通じたフィードバックの獲得やグローバルなハッカソンの実施）。

実施内容 B3: 誤り耐性ゲート型量子コンピュータのインタフェース技術の研究開発

実施内容 B2 の NISQ コンピュータとは異なり、誤り耐性ゲート型量子コンピュータは理論的な背景が強固であり、計算精度とアルゴリズム実行時間の関係を理論的に導出可能である。実問題という観点では、B2 で対象としている量子化学計算向けに、分子のエネルギーを求める「位相推定アルゴリズム」が提案されており、このアルゴリズムに基づいて実行時間を求めることが可能である。誤り耐性ゲート型量子コンピュータについては、現在世界的に開発が加速化しているものの、その実現は 10 年以上先となることが見込まれている。従って、本研究開発においては、古典計算機上のシミュレータを活用し、当該インタフェースの検証を進めた。

2019 年度から 2022 年度にかけて次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装を完了し、オープンテストベッド化を完了した。代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術と比べ 10-100 倍高速化し、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した。具体的な取組は以下の通りである。

1) 次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装完了とオープンテストベッド化の完了

(1-1) 位相推定アルゴリズムを分子のエネルギー計算に応用した際の計算コストを推定するためのプログラムの実装

本研究開発では、実行時間見積インタフェースとして、位相推定アルゴリズムを分子のエネルギー計算に応用した際の計算コストを推定するためのプログラムの実装を完了した。誤り耐性ゲート型量子コンピュータで分子のエネルギーを求めるのに用いられる「位相推定アルゴリズム」について、いくつかの実装方法が提案されている。

- ・ トロッター分解に基づく手法 : M. Reiher et. al., Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 114, No. 29, pp. 7555-7560 (2017).
- ・ Qubitizationに基づく手法 : D. W. Berry et. al., Quantum 3, 208 (2019).

2019 年度から 2022 年度にかけて先行研究を基にした実装及び最終年度は実際のハードウェアを開発しているベンダーと連携し、より精緻な時間見積を実現する実装を行った。

2020 年度はトロッター分解に基づく手法での実装を完了した。先行研究のトロッター分解による手法を基にプログラムを実装し、下記を行うことで実行時間推論エンジンのプロトタイプを開発した。

- ・ 計算コスト=必要な T ゲートの数
- ・ 種々のエラー量に対する最適化(最小化)

2021 年度は前年度に開発したプロトタイプの開発をさらに進めるため、前年度に実施した Trotter 分解よりも低コストで FTQC 実装が可能とされ、有力視されている手法である Qubitization を基にしたコスト推定の実装を行った。分子のエネルギーを求めた場合の計算時間見積を定式化し、API 向けに実装を完了した。

さらに 2022 年度は、光量子コンピュータのハードウェアベンダーである PsiQuantum と連携し、ハードウェアに即した、より精緻な実行時間予測を検討した。PsiQuantum のハードウェアを前提とした場合の計算リソース見積もり（特に、必要な計算時間と物理量子ビット数）について、プログラミングコード作成を実施した（PsiQuantum による論文 <https://arxiv.org/abs/2104.10653> と同等の手法を使用）。

PsiQuantum の提唱する Fusion based quantum computing に基づく光量子コンピュータハードウェアを用いた場合の予想計算時間および必要な論理量子ビット数・物理量子ビット数を算出するプログラムを作成し、実際の分子に対する検討も実行した（表 2-5-3）。

表 2-5-3. 水分子 H₂O に対する見積もり基底関数・論理量子ビット数・物理量子ビット数・推定実行時間

basis	logical qubits	physical qubits	time
STO-3G	1.0×10^3	2.0×10^6	4 m
DZ	2.1×10^3	4.5×10^6	30 m
6-311G	5.3×10^3	1.3×10^7	1 h 30 m
cc-pVDZ	6.9×10^3	1.8×10^7	5 h
cc-pVTZ	7.3×10^4	2.6×10^8	17 d

(1-2) 計算時間推論エンジンの API 公開と古典アクセラレータとの比較インタフェース開発

実施内容 B2 における取組内容（図 2-5-16. NISQ-古典アクセラレータの比較インタフェース）に対して、本実施内容の成果を実装する開発を行った（図 2-5-17）。

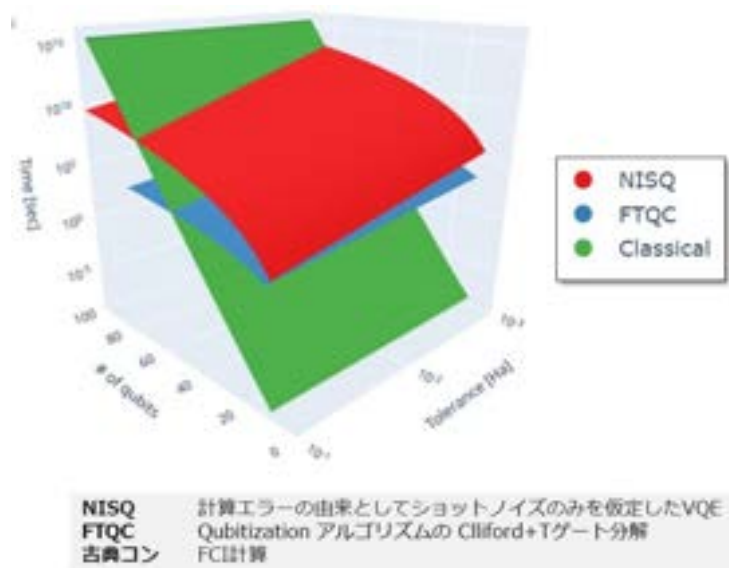


図 2-5-17. FTQC-NISQ-古典アクセラレータの比較インタフェース

2) 代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術と比べ 10-100 倍高速化し、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
(2-1) 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の定義

実施内容 B2 における取組内容（図 2-5-16. NISQ-古典コデザインのデモ計算（ベンゼン））に対して、本実施内容の成果を実装する開発を行った。ベンゼンを対象にした計算を実行した。以下の通りで、FTQC 計算が古典コンピュータ及び NISQ よりも高速化する見積結果が得られた（図 2-5-18）。

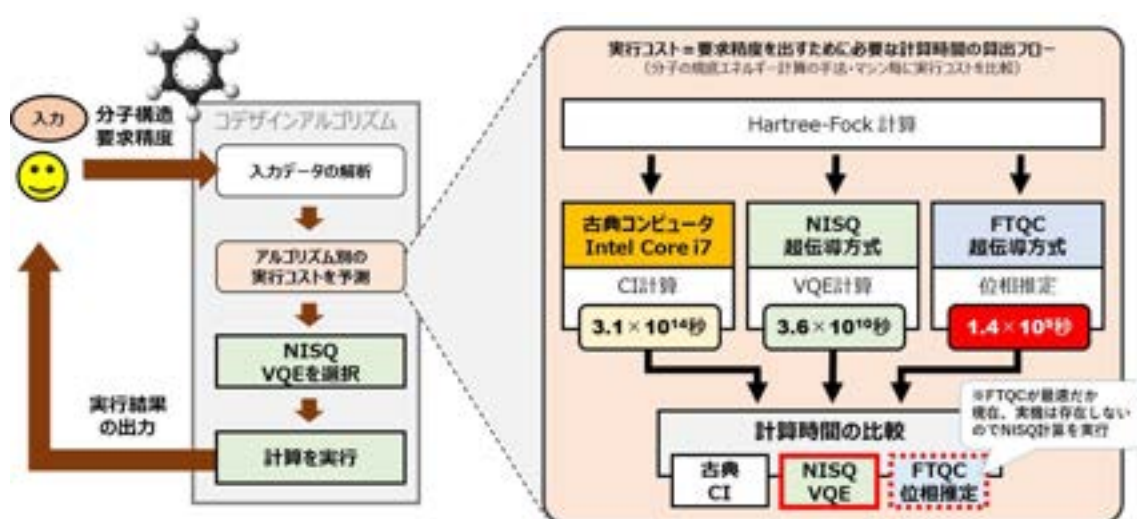


図 2-5-18. コデザインの計算過程（ベンゼン）。古典コンピュータ： 3.1×10 の 14 乗秒、NISQ： 3.6×10 の 10 乗秒、FTQC： 1.4×10 の 5 乗秒。

(2-2) 実装したソフトウェアをコンソーシアムを通じて提供

本実施内容の成果は、上述の(株)QunaSys が運営する社会実装コンソーシアム QPARC にて、民間企業に公表するとともにソフトウェアの利用意向及びフィードバックを獲得した。それらの結果を踏まえ、SIP 開発期間終了翌年（2023 年度）より、本実施内容の成果を活用し 民間企業と共同事業開発を実施する。

[SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）]

- ・ 位相推定アルゴリズムを分子のエネルギー計算に応用した際の計算コストを推定するためのプログラムの実装を完了した（ Trotter 分解に基づく手法・ Qubitization に基づく手法・ Fusion based quantum computing に基づく手法）。
- ・ 計算時間推論エンジンの API 公開と古典アクセラレータとの比較インタフェースを開発した（実施内容 B2 の成果と連携し、NISQ・古典アクセラレータと本実施内容で実装した手法で計算時間を比較できる API を開発した）。
- ・ 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（実施内容 B2 の成果と連携しベンゼンを対象にしたコデザインのデモ計算を実施した）。
- ・ 実装したソフトウェアをコンソーシアムを通じて提供した（民間企業における活用意向を踏まえ、SIP 終了後にプログラムとして活用する準備を行った）。

実施内容 B4: 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

本実施内容 B4 における具体的な研究開発事項は、GPU 等古典アクセラレータと諸問題との性質を調査した上で、GPU 等の古典アクセラレータを対象に、入出力オーバーヘッド、実行時間の評価系を研究開発することである。

2019 年度～2020 年度の研究活動においては、特に GPU 等古典アクセラレータのインタフェース技術の構築のために以下の研究開発を行った。

- ・ イジング型コンピュータと GPU アクセラレータによる統合計算機環境の実現、およびその接続インタフェースの設計を実施した。
- ・ 古典アクセラレータによる古典対抗アルゴリズムの検討、および一部の実現を完了した。

これらの成果により、古典アクセラレータの性能を最大限に引き出す最適化コアアルゴリズムに適用でき、かつ統合計算機環境を実現できた(図 2-5-19)。



図 2-5-19. 統合計算機環境

2021 年度～2022 年度の研究活動においては、特に GPU 等古典アクセラレータのインタフェース技術の構築のために以下の研究開発を行った。またスマート物流の社会実装の実運用、GPS 型スマート製造の社会実装において、先進的成果の実現を行った。

- ・古典アクセラレータの性能を最大限に引き出す最適化技術をコアアルゴリズムに適用する研究の開発、および古典アクセラレータによる連携・補完・対抗アルゴリズムの開発を完了した。
- ・GPU 等古典アクセラレータの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。
- ・また、次世代アクセラレータ研究開発プラットフォームの社会実装に向けた取組みにおいては、2020 年度より住友商事(株)および住友商事グループの(株)ベルメゾンロジスコとのスマート物流プロジェクトでの協業を継続してきた。実際のオペレーションに必要な制約事項を反映した作業員配置最適化エンジンの開発を完了するとともに、現場における生産性のデータ化・分析を進めた。図 2-5-20 に物流倉庫における作業員最適化配置の社会実装開発の状況を示す。



図 2-5-20. 物流倉庫における作業員最適化配置の社会実装開発

- ・住友商事(株)と進めてきたスマート物流の社会実装の実運用に向けて開発した作業員配置

最適化エンジンをクラウドシステムと連携させ、2022.10より物流倉庫（株）ベルメゾンロジスコ）においてサービスを開始した（図 2-5-21）。



図 2-5-21. 物流倉庫（ベルメゾンロジスコ）にて作業配置最適化サービスの運用開始

- ・ GPS 型スマート製造の社会実装の取組として、慶應義塾大学の田中先生・関先生とのレーザー設計条件最適化、慶應義塾大学の村松先生との材料安定構造シミュレーション計算開発に協力し、先進的成果を実現することができた。

[SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）]

2022 年度の設定目標である、次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装を完了し、オープンテストベッド化を完了する目標、および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 10-100 倍の高速化を達成し、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目標に対して、以下を実施し目標を達成した。

- ・ QUBO で表される組合せ最適化問題が、GPU 等古典アクセラレータおよび商用イジングマシンで統合的に実行可能なインタフェースの設計と実装を完了した（NEDO 連携）。
- ・ 住友商事(株)と進めているスマート物流の社会実装において問題に応じた適切な実行マシンの調査・検討が可能になり、10 倍以上の計算速度・計算精度の向上を実現できた。
- ・ 住友商事(株)と進めているスマート物流の社会実装の実運用に向けた取り組みをクラウドシステム連携により加速させ、2022.10より(株)ベルメゾンロジスコにて実サービスを開始できた。
- ・ GPS 型スマート製造に関しても社会実装に向けた取り組みを加速し、慶應義塾大学の田中先生・関先生とのレーザー設計条件最適化、慶應義塾大学の村松先生との材料安定構造シミュレーション計算開発研究において先進的成果を実現できた。

(C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進

本実施項目では次世代アクセラレータの社会実装の促進を行うため、産業界から課題として認知されている、あるいは、産業界における幅広い課題につながる具体的な問題を設定し、それを次世代アクセラレータで処理するための定式化を行い、次世代アクセラレータを活用して解法した。

第一に、本 SIP における京都大学・フォトニック結晶レーザーチームとの連携による、フォトニック結晶レーザーの性能を向上させる結晶構造探索の定式化を行った（図 2-5-22（左））。この手法は、既利用のソフトウェア（フォトニック結晶レーザーシミュレータ、京都大学提供）、AI による学習、次世代アクセラレータ（イジングマシン）による推論の 3 段階から構成される。この手法について、次世代アクセラレータ・コデザインによる有効性評価を行った。推論部分について、従来計算機を用いた最急降下法、従来計算機を用いたメタヒューリスティクス、イジングマシンの三種類をもとに有効性評価を行ったところ、探索範囲が狭い場合には、従来計算機を用いたメタヒューリスティクスが有効、探索範囲が広い場合には、イジングマシンが有効であることを発見した。この結果をもとに、フォトニック結晶レーザーの性能を向上させるための最適化計算を行った。その結果、フォトニック結晶レーザーが有する多様な設計自由度を活用することにより、レーザーの性能を表す重要な指標である「光出力」「ビーム拡がり角」「直線偏光比」の 3 つ全てを向上することが可能な新たな構造を見出すことに成功した（図 2-5-22（右））。比較対象として用いた、従来コンピュータを用いたメタヒューリスティクスに比べ、少ない計算回数で高い性能が得られることが確認された。本成果は、製造分野への量子計算技術の適用可能性を示唆する重要な一歩である。また、この最適化計算を横展開した方法に基づく共同開発を社会実装コンソーシアムの企業とともに進めた。

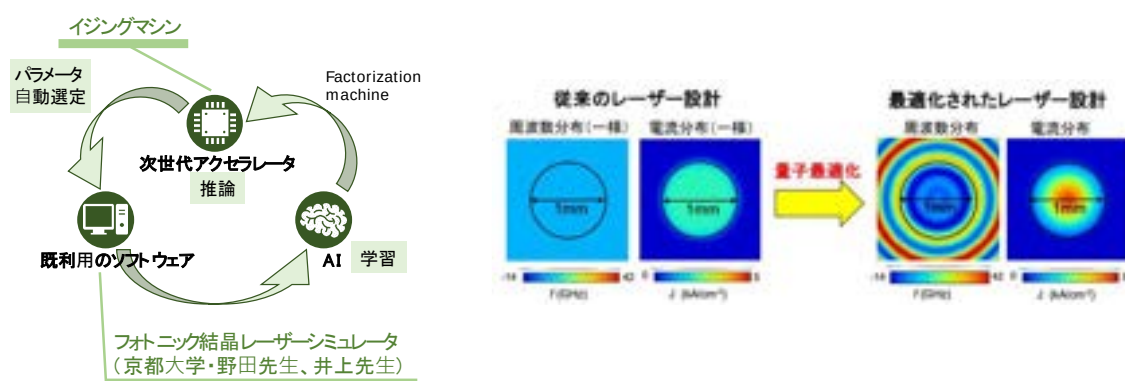


図 2-5-22. 左図はフォトニック結晶レーザーの性能を向上させる結晶構造探索高速化の定式化の概念図で、右図は提案手法によって得たレーザーの性能を表す重要な指標である「光出力」「ビーム拡がり角」「直線偏光比」の 3 つ全てを向上できるフォトニック結晶構造。

第二に、次世代アクセラレータの有用な用途として知られており、化学産業からも注目を集めている分子の基底状態計算について、次世代アクセラレータの一種であるイジング

マシンによる解法での解精度と近似度の関係について調査した。特に、分子の基底状態計算をイジングマシンで行う際に必須の近似度パラメータと解精度の関係を解析的に導出し、その結果をイジングマシン実機（Fixstars Amplify）で検証した。

第三に、各種産業界からのニーズの高いブラックボックス連続最適化について、イジングマシンを用いて解法する方法の定式化を、SIP 第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」と連携して実施した。イジングマシン実機（D-Wave Advantage）を利用して定式化の実証を行った。その結果、従来手法に比べて解精度の面で優位であることを見出した。

第四に、化学メーカーや素材メーカーからのニーズが高い複合材料の安定構造探索計算の定式化を、SIP 第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」と連携して実施した。またその定式化をイジングマシン実機（Fixstars Amplify）で実証した。図 2-5-23 にあるように、網羅的なパラメータ依存性を調査することに成功した。また、提案手法は従来手法に比べ、3 桁程度の高速化が確認できた。また、この最適化計算を横展開した方法に基づく共同開発を社会実装コンソーシアム (QPARC) の参画企業とともに進めている。

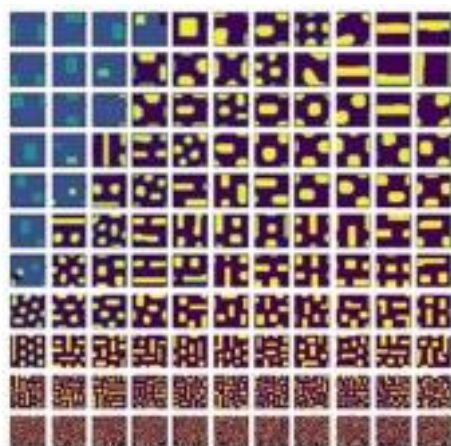


図 2-5-23. 複合材料の安定構造探索計算をイジングマシン実機（Fixstars Amplify）で実行し、様々な物理パラメータ領域において安定構造を得ることに成功した。

第五に、第一で述べたフォトニック結晶レーザーの最適化計算について、量子セキュアクラウドシステムを用いた実証実験を実施した（図 2-5-24）。本実証実験では、量子計算技術を利用した次世代アクセラレータによって最適化された次世代レーザー（フォトニック結晶レーザー）の高度な設計情報を、今回初めてインターネット回線を用いて離れた拠点間で安全に送受信できることを確認した。

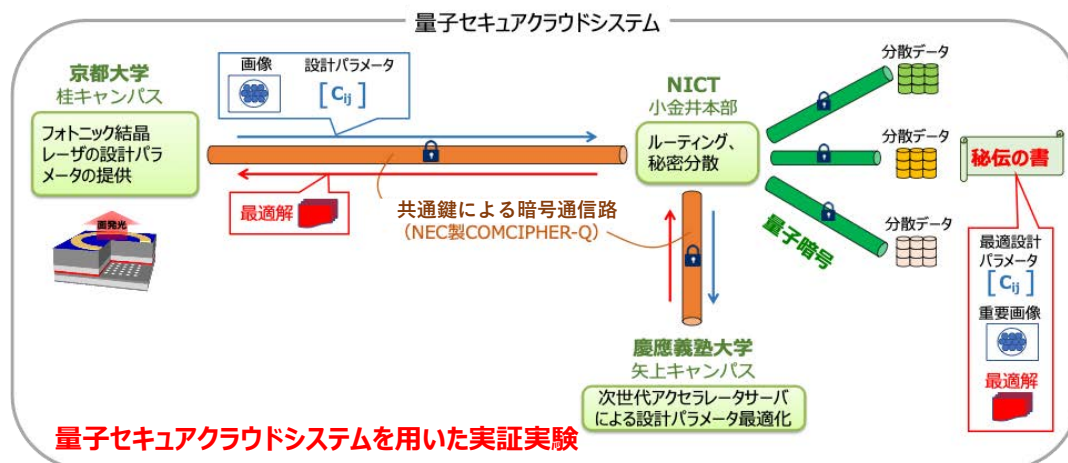


図 2-5-24. 量子暗号技術と秘密分散技術を融合した量子セキュアクラウドシステムを適用した検証試験の概念図

[SIP 第 2 期の研究開発実績（まとめ）]

- ・ フォトニック結晶レーザーの高性能化を目的とした最適化計算を、次世代アクセラレータ・コデザインによる有効性評価に基づき実行し、従来コンピュータによるメタヒューリスティクスに比べ、少ない計算回数で高い性能が得られることが確認された。さらに、この最適化計算を横展開した方法に基づく共同開発を社会実装コンソーシアムの企業とともに進めた。
- ・ 分子の基底状態計算について、次世代アクセラレータの一種であるイジングマシンによる解法での解精度と近似度の関係について調査した。
- ・ ブラックボックス連続最適化について、イジングマシンを用いて解法する方法の定式化を実施した。この定式化を元にイジングマシン実機を用いたところ、従来手法に比べて解精度の面で優位であることを見出した。
- ・ 複合材料の安定構造探索計算の定式化を実施し、これをイジングマシン実機で実行したところ、従来手法に比べ 3 桁程度の高速化が確認できた。この最適化計算を横展開した方法に基づく共同開発を社会実装コンソーシアム (QPARC) の参画企業とともに進めている。
- ・ 量子セキュアクラウドシステムを用いた実証実験を実施した。

[達成度（1）のまとめ]

SIP 第 2 期 5 年間の設定目標に対する達成度（進捗状況）について得られた成果の新規の学術的・技術的価値、国際的な優位性を以下にまとめる。

実施項目	SIP第2期の目標	現状の達成度
A. 次世代アクセラレータ・コデザイン B. 次世代アクセラレータインタフェース技術 C. 次世代アクセラレータ活用社会実装	● 次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアの実装完了とオープンテストベッド化の完了 (→ 達成) ● 代表的なアプリケーションへ適用評価し、古典計算機や古典アクセラレータのみの技術と比べ10-100倍の高速化し、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 (→ 達成)	● 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 ● 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 ● 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の実行を実施。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 ● 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、および数値最適化ソルバ（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済 ● 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 ● 住友商事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10倍以上、計算精度に関しては人による最適化とくらべて大幅な生産性と満足度向上を実現

④ 達成度（２）※社会実装の実現可能性

1. 社会実装に向けた計画と進捗状況

本研究開発では、社会実装の考え方として適用領域（アプリケーション）と事業フェーズを2軸に、コアとなる基盤技術を確立しつつ、適用領域と事業フェーズを拡大することを狙う（図2-5-25）。また、CPS型スマート製造をはじめ、物流・配送、材料、センシング・データ解析など、さまざまな分野に適用領域を拡大しながら、Society 5.0社会の実現を図る。SIP第2期終了後にも継続的な社会実装創出を行うべく、早稲田大学に量子計算アプリケーション拠点を構築する。これにより、SIP事業期間内に加入の社会実装コンソーシアム企業（アーリーアダプタ層）との社会実装実例をもとに次世代アクセラレータに興味を抱くアーリーマジョリティ層の呼び込みやレイトマジョリティ層の取り込みを積極的に進めていく。いま着手できる社会実装対象から順次、社会実装対象を拡大していくという計画で進めている。

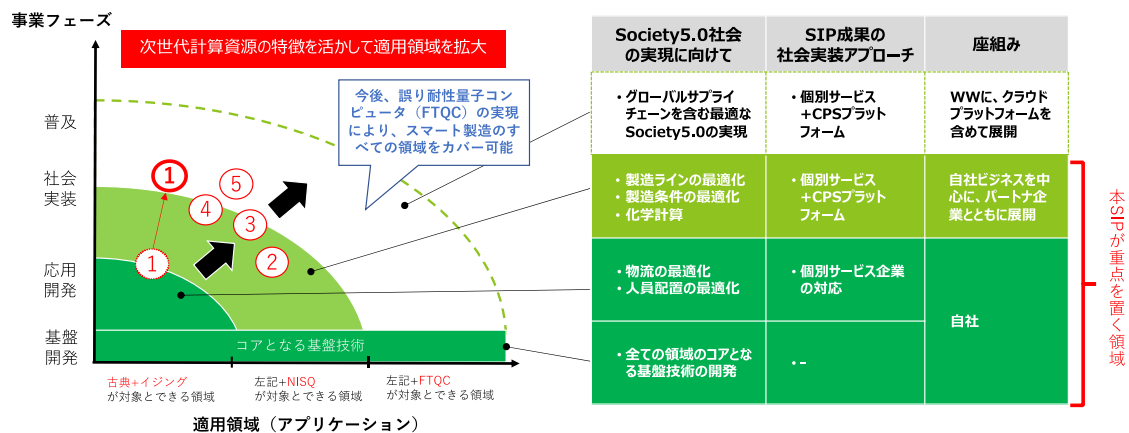


図 2-5-25. 本事業の社会実装の考え方

上記の計画をもとに、2022 年度までに、すでに

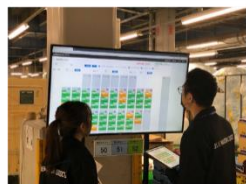
- ① 物流倉庫における作業員最適配置の実証実験と基盤化
- ② レーザー加工への応用を見据えた実証実験
- ③ 化学計算領域におけるコンソーシアム立ち上げ
- ④ API を通じた開発ライブラリの試験的な公開
- ⑤ 様々なユーザー企業との協業

を実施しており、後述する社会実装の体制等も活用し、順調に進展している。特に、①物流倉庫における作業員最適配置の実証実験と基盤化においては、2021 年度の成果を活かし、更にユーザー企業との緊密な議論により、ユーザー企業のニーズを取り込んだ研究開発を実施し、2022.10 には商用化が実現し、実工場現場で利用が開始された。以下、各項目について述べる。

① 物流倉庫における作業員最適配置の社会実装開発

2020 年度から POC が行われてきた、物流倉庫における作業員最適配置の社会実装開発（スマート物流プロジェクト）でのこれまでの成果を活用し、㈱ベルメゾンロジスコ（住友商事グループ）において 2022.10 より実サービスが開始された（図 2-5-26）。物流倉庫の実際のオペレーションに必要な制約事項を種々取り入れ、実仕様に対応するための作業員配置最適化エンジンが利用されている。また、作業員配置最適化エンジンの結果検証に向けた、現場における生産性のデータ化及び分析を行うことにより、物流倉庫の DX 化が達成された。

■ 実仕様に対応するための作業員配置最適化エンジンの開発



※『実際のオペレーションに必要な制約事項』を反映

- ・ 1人1タスク
- ・ 3人で1チーム
- ・ 手動で固定配置
- ・ 相性ボーナス・ペナルティ
- ・ 出荷予測値最大化
- ・ 班ごとにグルーピング
- ・ 出勤時間でグルーピング
- ・ 一括配置・部分配置

本年10月より住友商事グループのベルメゾンロジスコで、作業員配置最適化サービスを開始



解を瞬時に出力してくれるので、状況の変化にすぐに対応できる！

3人組のスキルまで考慮してくれるから、生産性が上がった！

人の配置を決めるのは負担が大きかったが、今は気持ちが楽になった。

■ スキルデータを元に、工程進捗状況の可視化による当日の物流生産量に対する実管理をリアルタイムに行えるSaaSとの連携

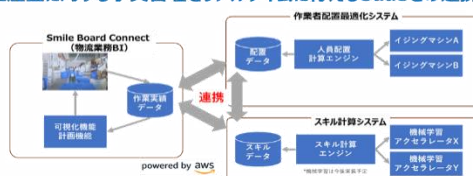


図 2-5-26. 物流センター現場での利用風景

② フォトニック結晶レーザーの構造最適化

フォトニック結晶レーザーの性能を向上させる結晶構造探索の定式化を行った。この手法は、既利用のソフトウェア（フォトニック結晶レーザーシミュレータ、京都大学提供）、AI による学習、次世代アクセラレータ（イジングマシン）による推論の 3 段階から構成さ

れる。この手法について、次世代アクセラレータ・コデザインによる有効性評価を行った。推論部分について、従来計算機を用いた最急降下法、従来計算機を用いたメタヒューリスティクス、イジングマシンの三種類をもとに有効性評価を行ったところ、探索範囲が狭い場合には、従来計算機を用いたメタヒューリスティクスが有効、探索範囲が広い場合には、イジングマシンが有効であることを発見した。この結果をもとに、フォトリック結晶レーザーの性能を向上させるための最適化計算を行った。

その結果、フォトリック結晶レーザーが有する多様な設計自由度を活用することにより、レーザーの性能を表す重要な指標である「光出力」「ビーム拡がり角」「直線偏光比」の3つ全てを向上することが可能な新たな構造を見出すことに成功した。比較対象として用いた、従来コンピュータを用いたメタヒューリスティクスに比べ、少ない計算回数で高い性能が得られることが確認された。本成果は、製造分野への量子計算技術の適用可能性を示唆する重要な一歩である。また、この計算スキームを用いた量子セキュアクラウドシステムを用いた実証実験を実施した（図 2-5-27）。本検証試験では、量子計算技術を利用した次世代アクセラレータによって最適化された次世代レーザー（フォトリック結晶レーザー）の高度設計情報を、今回初めてインターネット回線を用いて離れた拠点間で安全に送受信できることを確認した。

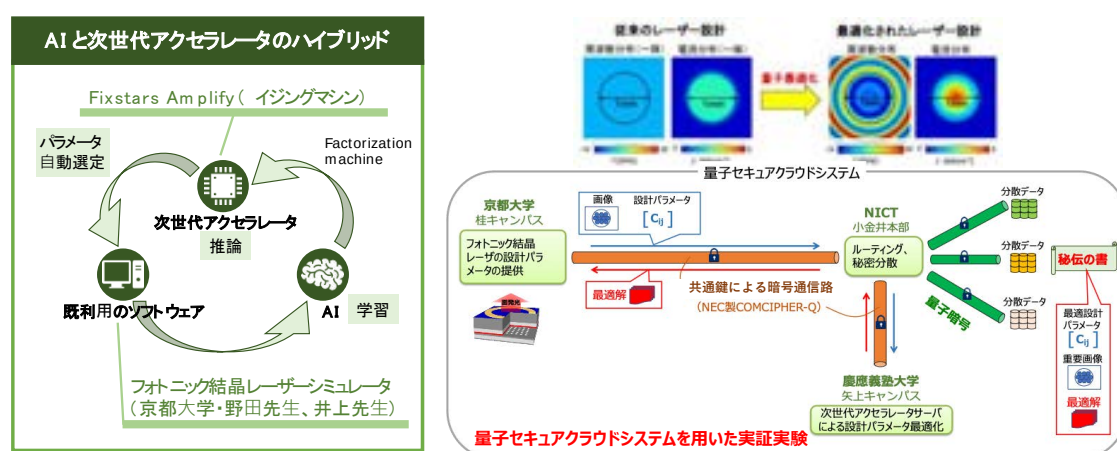


図 2-5-27. フォトリック結晶レーザーの最適化計算を題材とした量子暗号技術と秘密分散技術を融合した量子セキュアクラウドシステムを適用した検証試験の概念図

③ 化学計算領域における社会実装コンソーシアム QPARC

インタフェースの普及のためには、実際にユーザー企業が使用し、ユーザーニーズに則した機能実装を進めることが肝要と考えており、本研究開発では、各種ユーザーコンソーシアムと連携した社会実装を志向している。QPARC は株式会社QunaSys が 2020.4 に立ち上げたコンソーシアムであり、国内の主要材料メーカー、及び、自動車・エレクトロニクス関連企業 50 社超から計算技術者が集まっている。

QPARC を通じて、SIP の研究開発成果について、将来ユーザーとなる民間企業の研究者からフィードバックを得つつ、研究開発を推進した。

2022 年度においては、次世代アクセラレータ基盤の研究開発と社会実装をアウトリーチするため、早稲田大学・(株)フィックスターズ・慶應義塾大学・(株)QunaSys の 4 社で QPARC を活用したセミナーを実施した。

量子技術の社会実装における産学連携の課題と重要性をユーザー企業にも強く理解して頂くことを狙いとし、約 40 社から約 100 名が参加した。(図 2-5-28)



図 2-5-28. QPARC を通じた社会実装イベントの実施

量子コンピュータの産業化という観点から社会実装の課題を討議し、参加企業への社会実装に関するアンケートも実施し、次世代アクセラレータの取組に対して関心があるというフィードバックを得られた。(図 2-5-29)

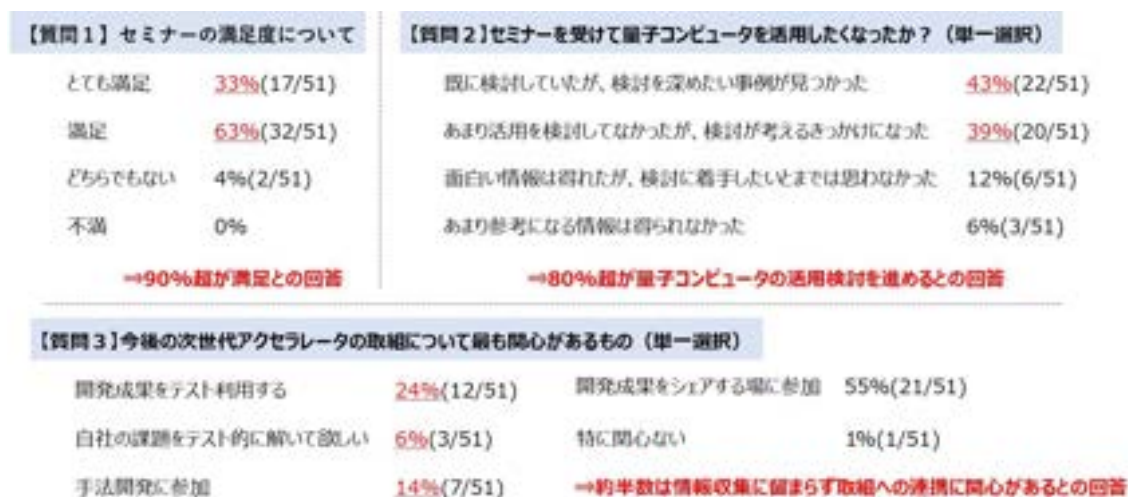


図 2-5-29. 参加企業へのアンケート結果

④ API を通じた開発ライブラリの試験的な公開

本研究開発においては、インタフェースの幅広い普及と収益化の双方を実現するため、コアとなるアルゴリズムライブラリを秘匿化し、API を通じて早い段階から潜在ユーザーに提供する方針で進めている。2020 年度に試験的な提供を開始した量子化学計算クラウドサービス Qamuy™として上述の QPARC 参画企業の方々が活用することで、ユースケース探索を実施してきた。Qamuy™は、量子化学計算のインプットを量子回路に翻訳し、シミュレータや実機上での計算をシームレスに行うことができる量子化学計算クラウドとしてパブリックベータ化も完了した（図 2-5-30. Qamuy™の全体概要）。2022 年度には、QPARC 参加企業から Qamuy™を活用した論文も出版された^{[1], [2]}。

[1] Hirotooshi Hirai, et al. Molecular Structure Optimization Based on Electrons-Nuclei Quantum Dynamics Computation, ACS Omega 2022, 7, 23, 19784-19793.

[2] Yohei Ibe, et al. Calculating transition amplitudes by variational quantum deflation, Phys. Rev. Research 4, 013173 - Published 3 March 2022.



図 2-5-30. Qamuy™の全体概要

⑤ 様々なユーザー企業との協業

・広域ジオメトリ構造を持つ課題に対する最適化ソフトウェアの開発

広域ジオメトリ構造を持つ課題として周波数利用効率向上に向けた取組と位置情報解析に向けた取組の最適化ソフトウェアを開発した。

周波数利用効率向上に向けた取組は移動通信サービスにおいて、複数事業者が同一周波数帯を共用することで、限られた周波数資源の利用最大化が求められる。共用周波数帯の中に設けられた複数の周波数ブロックと数十ミリ秒程度のタイムスロット毎に、基地局間の電波干渉を避けながら、トラヒック需要に応じてそれぞれの事業者にリソースを最適割り当てする必要がある。これをアクセラレータ・コデザイン問題とみなし、リソース割当ソフトウェアを開発している（図 2-5-31）。

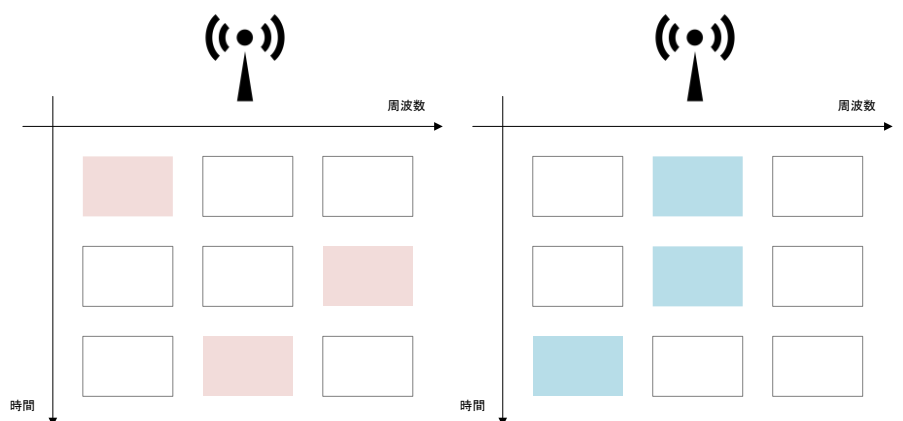


図 2-5-31. 広域ジオメトリ構造を持つ課題に対する最適化ソフトウェアの開発:周波数利用効率向上に向けた取組 (K 社と協業)

位置情報解析に向けた取組は、モバイル端末を使い位置情報を取得する位置情報解析業者がその位置情報データから価値のある情報を取り出すことが課題となっている。その膨大な位置情報=点群データから効率よく意味のあるデータを抽出しなければならない。次世代アクセラレータ・コーデザイン問題への取り組みとして位置情報解析ソフトウェアを開発している (図 2-5-32)。

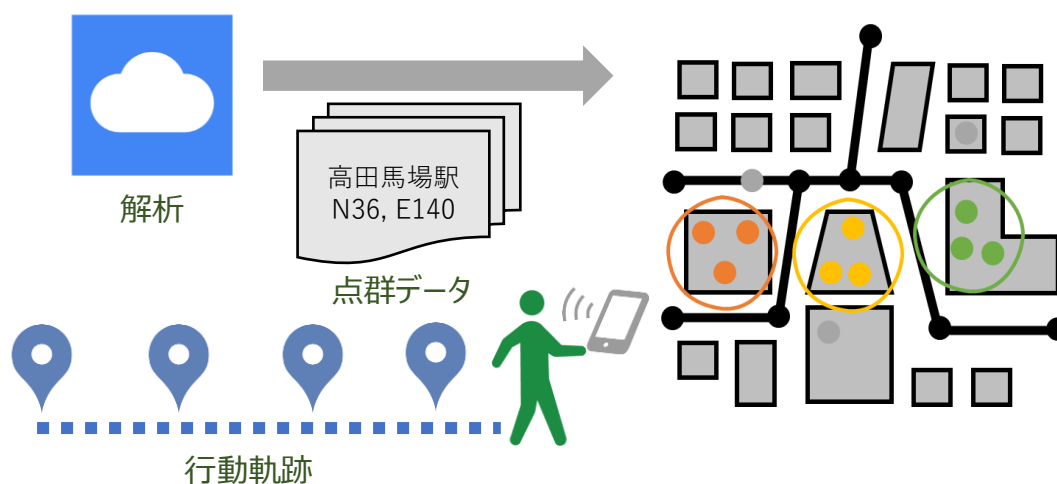


図 2-5-32. 広域ジオメトリ構造を持つ課題に対する最適化ソフトウェアの開発:位置情報解析に向けた取組 (B 社と協業)

・ 配送事業者と連携し配送計画最適化アプリケーションを取り組み

配送事業者と連携し配送計画最適化アプリケーションを取組んでいる。配送最適化アプリケーションは配送条件の制約を満たしつつ車両の距離・使用時間コストを最小化するアプリケーションである。本取組において、目的関数は配送に必要な全車両の移動距離の最

小化と配送に必要な全車両の時間の最小化として与えられる。アプリケーションが満たすべき制約として、全ての配送地点に 1 回ずつ訪問、全ての配送地点は配送指定時間内に訪問、全車両の経路の始点と終点は出発地点と帰着地点であることを基本として複合的かつ実用的な制約を事業者と連携し与えている。実際の地理情報・配送情報を用いたデータセットに適用し配送計画最適化の可能性を確認した。2025 年のサービスインを目指している（図 2-5-33）。

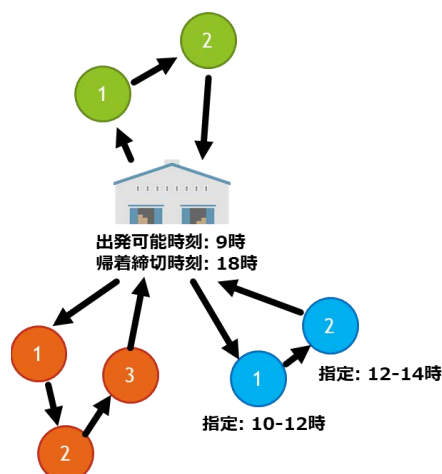


図 2-5-33. 配送計画最適化アプリケーション（S 社と協業）

・住友商事(株) Quantum Transformation (QX) プロジェクトとの連携

世界にさきがけて Quantum Transformation (QX) を提唱した住友商事 QX プロジェクトと発足当時から緊密な連携を行ってきた。住友商事(株)の経営層に対する量子技術に関する講演会や、住友グループ水会（住友グループに所属する技術者からなる親睦団体）にて、量子ビジネス創出のワークショップの開催、住友商事(株)QX チーム・デロイトトーマツコンサルティング（合）・三菱地所(株)と共同で行っている「量子サークル」との連携により、先行事例紹介や事例創出のコツについて参加者と議論した。

・産学協同

・3 の取り組み・既存コンソーシアム等団体との連携

次世代アクセラレータのポテンシャルユーザー企業（自動車部品メーカー、電気機器メーカー、HR・広告関連企業、化学メーカー、飲食品メーカー等）の様々な業種の企業と連携を行ってきた。また、量子 ICT フォーラムの量子コンピュータ技術推進委員会（慶應義塾大学 田中准教授が幹事）や、モバイルコンピューティング推進コンソーシアム（慶應義塾大学 田中准教授が顧問）において、次世代アクセラレータの活用を企業とともに考えるワークショップを企画した。

・アウトリーチ活動を通じた次世代アクセラレータへの興味喚起

Innovation Japan 2022 や KEIO TECHNO-MALL 2022 等の各種イベントにおいて、わかりやすい情報発信に努め、次世代アクセラレータの社会実装に取り組むパートナー探索を実

施した。アウトリーチ活動がきっかけで連携を開始した企業も出てきた（電気機器メーカー等）。

SIP 第 2 期終了後、これらの社会実装活動を継続して運営するため、社会実装の体制整備についても具体的に計画を進めている。図 2-5-34 にあるように、早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構内に量子計算アプリケーション拠点を整備し、慶應義塾大学、(株)フィックスターズ、(株)QunaSys と連携し、オープン/クローズ戦略で事業の拡大と基礎技術の確保を行い、かつ、様々な企業群を呼び込み、クローズ戦略で社会実装を促進するという仕組みである。技術コンサルティングや共同研究・事業化を拡大し、自活可能なエコシステムの形成をすすめるとともに、企業で技術を活用するのに不可欠な人財育成も並行して実施する。この仕組みにより、図 2-5-35 にあるような戦略的なユーザー獲得を狙う。すなわち、現在進行中のアーリーアダプタ層（QPARC 参画企業をはじめとした SIP 事業期間内に加入の社会実装コンソーシアム企業）との協同での社会実装実例をもとに、アーリーマジョリティ層（SIP 事業で開発したデファクトスタンダード基盤の試用企業）やレイトマジョリティ層（SIP 事業で開発したデファクトスタンダード基盤未試用企業）へのアプローチを進める。

さらに、SIP 第 2 期終了後早い段階で、早稲田大学拠点を活用しながらパートナー企業と手を結び、クライアント企業の量子関連ビジネスの促進するエコシステムを構築し、持続的に拠点を運営する（図 2-5-36）。同時に、公的資金の獲得のほか技術コンサルティングや共同研究を拡大し、また、WUV（早稲田大学ベンチャーズ）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。人材確保について、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、大学技術移転機関（TL0）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。

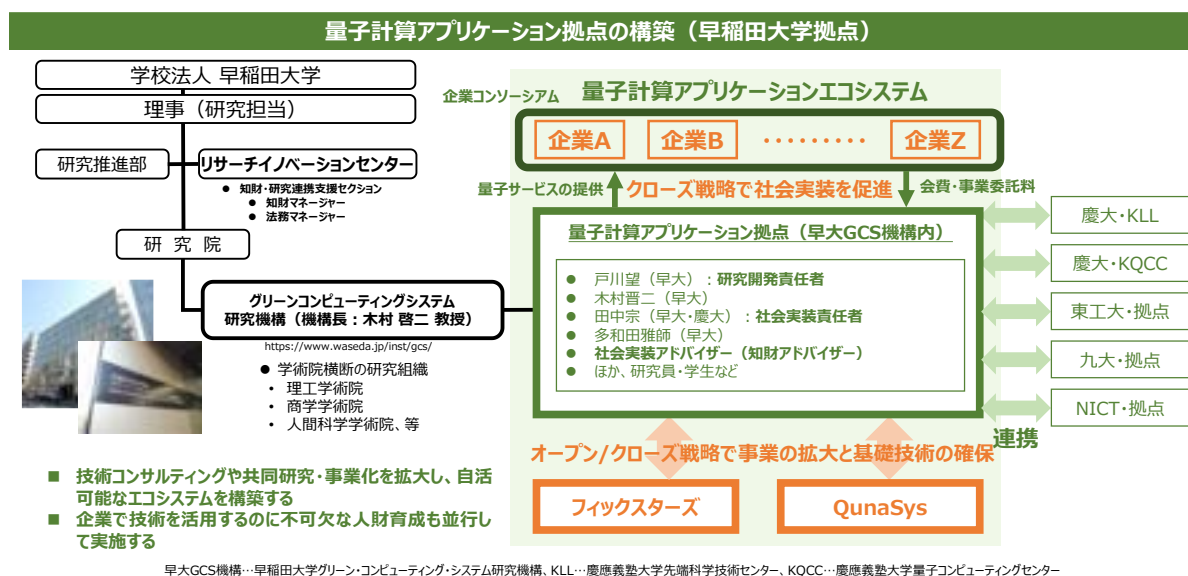


図 2-5-34. 量子計算アプリケーション拠点（早稲田大学拠点）の構築

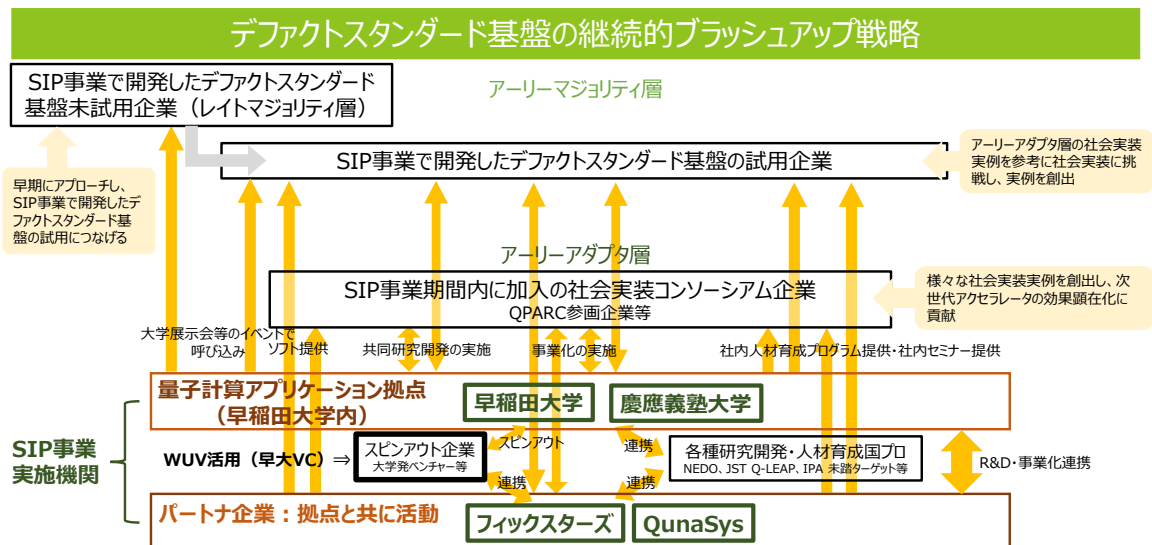


図 2-5-35. 次世代アクセラレータのデファクトスタンダード基盤の継続的ブラッシュアップ戦略

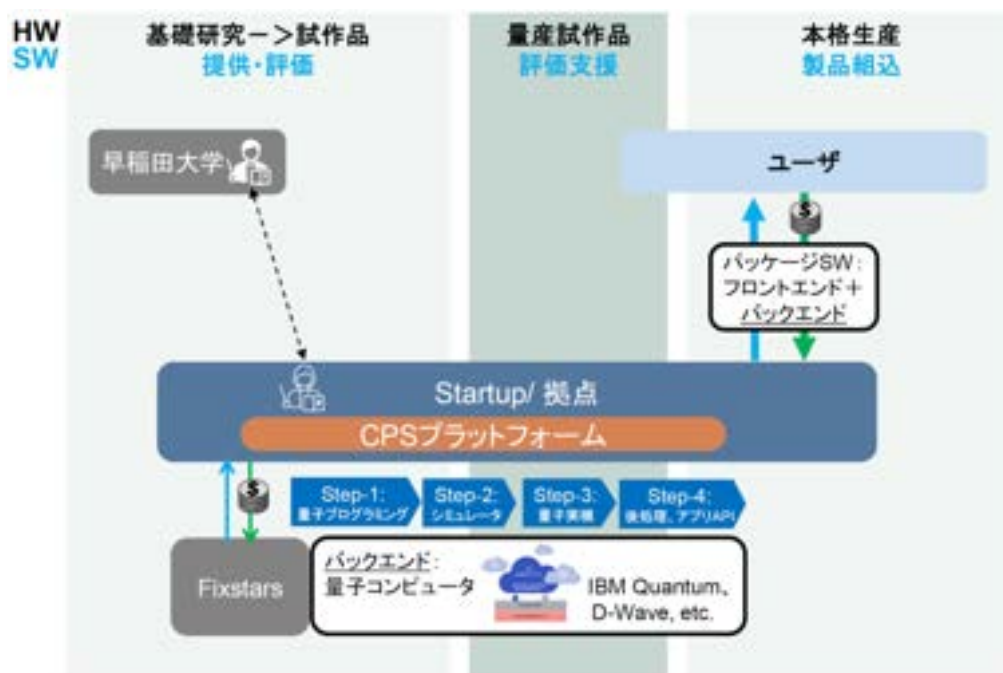


図 2-5-36. CPS プラットフォームの構築と持続可能な拠点の運営

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

本研究開発では社会実装に向け、研究計画の提案当初より、以下のような段階的な戦略を想定している。

- 1) 研究開発の最終段階あるいは研究開発終了後まもなくの時期に、まず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って、世界でデファクトスタンダード化する。

- 2) この際、次世代アクセラレータ開発事業者と共同し、自治体との協調を築きながら、本研究開発成果を利用したプログラムコンテストを開催する等、利用促進を図ると同時に量子ソフトウェア人材育成に取り組む。
- 3) その後、本研究開発を主体的に進める産業界ならびに関与した産業界を中心に、順次クローズ戦略として、競争領域にて事業展開を図る。
 - A) 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
 - B) 研究開発されたソフトウェア群のライセンス等

上記の出口戦略は、図 2-5-37 のように、技術戦略、事業戦略、知財戦略が三位一体となり進めている。

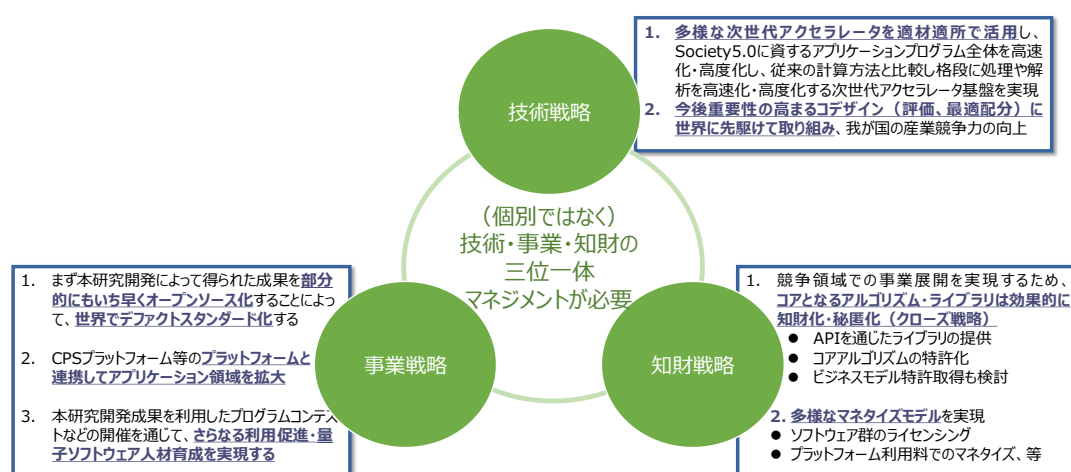


図 2-5-37. 本事業の出口戦略

2022 年度までの研究開発を通して、すでに (A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術ならびに (B) 次世代アクセラレータインタフェース技術、(C) 次世代アクセラレータの社会実装、の促進の成果として上記の出口戦略にもとづき、社会実装コンソーシアム向けに、量子計算クラウドサービス「QunaSys Qamuy™」を公開し、メンバー企業が活用している。量子計算クラウドサービス「QunaSys Qamuy™」では、API を公開とし、積極的にメンバー企業が活用するとともに、API の元となるライブラリやアルゴリズムはクローズとして知財やアルゴリズムを守る。このようなオープン/クローズ戦略 (図 2-5-38 参照) により、本研究開発の広い普及とデファクトスタンダード化を図っている。Qamuy™は社会実装コンソーシアムでメンバー企業が計算化学領域に量子コンピュータを活用するユースケース探索に活用している。ユースケース探索プログラムは 2022 年度前期と後期の 2 タームで実施しているが、後期タームの参加企業は前期タームに比べて 2 倍近く増加しており、こうした戦略が社会実装の加速に貢献していると考えている。本研究開発では、すでに出口戦略の一部の実践を開始していることになる。

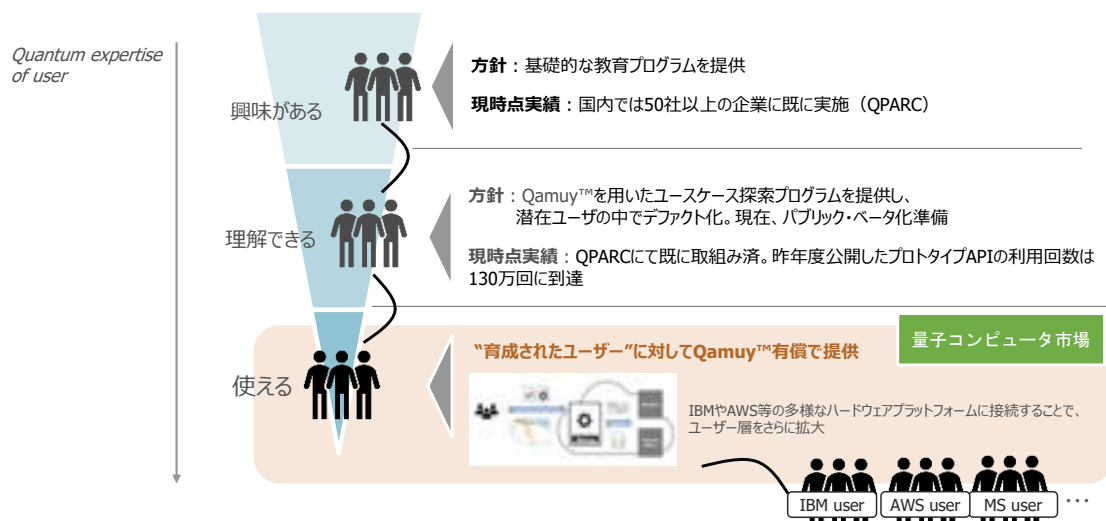


図 2-5-38. Qamuy™ を活用したオープン/クローズ戦略

さらに、(株)フィックスターズでは、NEDO 事業と連携することで Fixstars Amplify と呼ぶソフトウェア環境を構築し、さまざまなイジング型コンピュータに対応したアプリケーション開発プラットフォームをオープン展開している。次世代アクセラレータを利用して、大規模問題の入力と高速実行が可能で、POC や実問題を視野に入れたアプリケーション開発となる（図 2-5-11 参照）。開発環境と実行環境がセットで提供されるため、すぐに次世代アクセラレータの活用が開始可能であり、本 SIP 光・量子課題の出口戦略を活性化している。

⑥ 成果の対外的発信

本研究開発では、上述のような三位一体の出口戦略に基づき、研究開発の成果として得られた API、ソフトウェア、ライブラリを広く普及させるために、さまざまな対外的な成果発信を行っている。

量子科学技術研究開発機構の Web ページを通じて、本課題の情報発信を行っているほか（<https://www.qst.go.jp/site/sip/35680.html>）、社会実装コンソーシアム QPARC に向けてシンポジウムを開催し（2022. 8. 30 開催）、2019 年度～2022 年度にかけて、複数回のシンポジウムや国際シンポジウムを実施している（SIP「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、<https://www.qst.go.jp/site/sip/43880.html> 等を参照）。さらに各実施項目に関連して以下のような対外的な成果発信を行っている。

(A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術

次世代アクセラレータ・コデザイン技術の成果展開の例として、物流倉庫による作業者最適配置の実証実験の成果活用事例を動画紹介している。

・動画リンク：<https://youtu.be/UyvomUej2Xw>

(B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

次世代アクセラレータインタフェース技術の成果展開の例として、(株)QunaSys が ENEOS と連携し NISQ デバイス実機で分子の振動数解析を実施（誤差指標が 29%⇒2%）した研究が 2022. 9. 21 に Microsoft の顧客事例として公開された。量子コンピュータの化学産業への応用に道筋をつけた事例として紹介されている*（図 2-5-39）。

*…<https://customers.microsoft.com/ja-jp/story/1536149625843093498-eneos-energy-azure-quantum-japanese>



図 2-5-39. Microsoft における事例紹介

(C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進

研究期間を通じてさまざまなイベントで社会実装を促進している。特に最終年度となる 2022 年度には、Innovation Japan 2022 や KEIO TECHNO-MALL 2022 等の各種イベントにおいて、わかりやすい情報発信に努め、次世代アクセラレータの社会実装に取り組むパートナー探索を実施した。アウトリーチ活動がきっかけで連携を介した企業も出てきている（電気機器メーカー等）。

⑦ 国際的な取組・情報発信

これまでの研究期間を通してさまざまな国際的な取り組みや情報発信を行っている。例えば、⑥成果の対外的発信でも記述したが、2022. 10. 12 には、本 SIP 光・量子課題の国際シンポジウムで本研究開発の成果や拠点から提供できるサービス内容を広く世界に向けて発信したほか、以下のような活動や取り組みを通じて、国際的な情報発信を行っている。

1) 国際カンファレンスの共催（2022. 7. 13-14@ウェスティンホテル東京）

(株)QunaSys は量子コンピュータのビジネス応用に関する国際会議「Q2B22 Tokyo」を共催した。量子コンピュータの国際会議 Q2B としては初の米国以外での開催となり、(株)QunaSys はイベント全体の企画と運営を実施するとともに、社会実装に向けた活動を国内外の参加者に幅広く発信した。（参考：<https://q2b.qcware.com/>）

2) 米国量子経済開発コンソーシアム QED-C との連携

上述の社会実装コンソーシアム QPARC の活動として、米国の量子経済開発コンソーシアム QED-C の Executive Director である Celia Merzbacher を招き、社会実装活動の紹介を行った。

- ・ (2022. 7. 13) QPARC 会員のユースケース探索活動を QED-C へ紹介
 - ・ (2022. 8. 30) QPARC にて QED-C ディレクターから QED-C のコンソーシアム活動紹介を受け、連携に向けた意見交換
- 3) IEEE でのチュートリアル実施 (2022. 9. 20)
- 量子コンピューティング教育を強化し、産業界や学界からより多くの人が量子コンピューティングの分野で活躍することを目指した、チュートリアルやパネルディスカッションを実施した。
- ・ エネルギー分野における量子コンピューティング化学アプリケーションの紹介 (ハンズオンコーディング)
 - ・ QPARC 量子化学ハッカソンチャレンジの取組紹介
- 4) Pistoia Alliance とのグローバルイベント実施 (2022. 7. 7)
- 製薬系非営利アライアンスである Pistoia Alliance とともに、Pistoia Alliance グローバル ナレッジ シェアリング バーチャル イベントを開催した。
- ・ ヘルスケア及びライフサイエンスの領域において期待されるユースケースと、量子計算が医薬品研究開発の未来に及ぼす影響について、ユーザー企業との対話形式で講演を行い、社会実装の活動をアウトリーチした。

(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）

担当サブ PD：安井 公治（レーザー加工担当）

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

1) 研究内容

パイロットプロジェクトの全体像：

モノづくりの CPS 化は Society 5.0 実現化において重要な役割を果たす。連携研究課題の「CPS 型レーザー加工機システム研究開発（東京大学）」においては、スマート製造の中でも最も困難な工程の代表例であるレーザー加工において CPS 化を実現することで、モノづくり全体に CPS 化技術を波及させ、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している。本実施課題では、2019 年度に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の提供を受けて、「CPS 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 CPS 化に取り組んだ。2020 年度以降は CPS 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プロジェクトを開始した。半導体材料のレーザー改質プロセスは、物質の除去や材料の劇的な形体変化を伴う切削や穴あけといった学術的な理論の整備がいまだ実現していないプロセスと比べて、いまだ不足するものの一部において学術的な理論の整備も進んでおり、CPS の実用化を検証する対象として望ましい。加えて喫緊の課題として産業界からの投資が始まっている工程からの要請・ニーズも強いことから、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とともに、開発側としては成功体験を積むよい機会である。従って、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。

具体的には連携研究課題から提供される 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」等の提供を受け、これ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整備を進める。「プロセスを CPS 化するための基盤技術群」としては、東京大学において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構築と運用における知見から CPS 化に重要とされた要素技術群、例えば、その場計測、データ取得手法、シミュレータ開発などを、当該分野に適合させて開発するとともに、それらを有機的に繋げるインテグレーションを実践し、レーザー改質プロセスの CPS 化を実施する。また、「CPS 化推進拠点を構築する枠組」等のノウハウ提供を受け、これら基盤技術群を中核として、CPS を搭載するレーザ

一改質プロセスのシステム化を促進し、GPS 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拠点を形成する。

連携研究課題が最も難しいとされる技術分野における GPS 構築を行い産業界における中長期的なボトルネックの解消に取り組むのに対し、本パイロット拠点は、喫緊の課題としてすでに産業界における取組が始まっている分野に対してその方法論を展開することで、迅速な波及加速を担う。これらの相補的な取り組みにより、連携研究課題が推進する GPS 化戦略を効率的に社会に展開することを目指す。

具体的な実施計画（内容）：

半導体材料のレーザー改質プロセスの GPS 化として、「プロセスを GPS 化するための基盤技術群」のノウハウ提供を受けて GPS 化に向けた加工-データ取得ループ（プロセス-その場観察-詳細観察-データ蓄積-データ解析）を構築する。レーザー光源としては、高品位な改質が期待でき、我が国に強みのあるエキシマレーザーを用いる。パルス波形やビームプロファイル、強度、スキャン速度、スキャンパターンなど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。GPS 化に向けた加工-データ取得ループを構成する光源、レーザーによるプロセスのその場観察ユニット、改質後の電気的特性や表面の形状・組成分析など詳細観察装置はできる限りモジュラーな設計とし、運用・評価に基づき適切な組み合わせで構成できるようにする。詳細観察・評価ユニットから得られる詳細情報とその場観察ユニットから得られる簡便な情報の相関をデータ解析により見出すことが GPS 化に向けて重要である。また、本レーザー改質は、大規模な物質の離脱を伴わないプロセスであることから、固相液相相転移現象の数値モデルシミュレーションによって比較的正確に予想できる、もしくは、観察結果との比較によって現象の理解を深めることが期待できるため、シミュレータ開発を実施し、GPS 化に向けた加工-データ取得ループによって取得した結果との比較・検討を行う。

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、(2) ディスプレイ用多結晶 Si 薄膜半導体のレーザーアニール、(3) 次世代半導体デバイスのレーザードーピング等を選定し、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。また、電子デバイスメーカー等との連携によりニーズを集約し、パートナー企業のニーズを反映して適宜優先度を更新し、他のプロセスへの展開も評価・検討を行う。パートナー企業からのニーズを総括し、適切なプロセスに対して GPS 化された機能実証機 (α 機^{*1}) を構築することで、パートナー企業が GPS 化技術を評価し、自己資金で量産へ進展するための量産実証機 (β 機^{*2}) の構築判断を可能とする体制を整備する。

上記体制の整備として、九州大学拠点では光・量子プロセス研究開発センターを核とし、センター内の社会実装推進部門である綺羅コンソーシアムを中心に技術育成・補完、必要な企業への速やかな技術供給を実施する。半導体メーカーが集まる九州地区の利点を生かし、

様々なコミュニティ等との連携を推し進め、CPS 化技術の波及とネットワーク型製造システムの実現を加速していく。CPS 化に向けた加工データ取得ループ及び CPS 化に向けて開発した基盤技術群及び CPS 化プロセスの機能実証機（ α 機）を綺羅コンソーシアムのプラットフォームに提供するとともに、関係企業からの提供設備等も集約し、CPS 化ニーズを持つ企業等が試行・評価でき、投資判断を可能とする環境を整備する。また、これに関わる人・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る。これらの活動を通し、電子デバイス分野において CPS 化戦略の波及を加速する拠点として CPS 化のニーズを持つパートナー企業の課題に取り組み、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ことを目指す。図 2-6-1 にパイロット拠点実施体制図を示す。

*1… α 機： β 機の製品仕様を見極めるための試作機。実際の生産ラインで必要とされる仕様に関する実証検証を行うことが可能な装置。

*2… β 機：量産機に先行して民間企業の生産ラインに導入する製品。販売を前提とする装置。

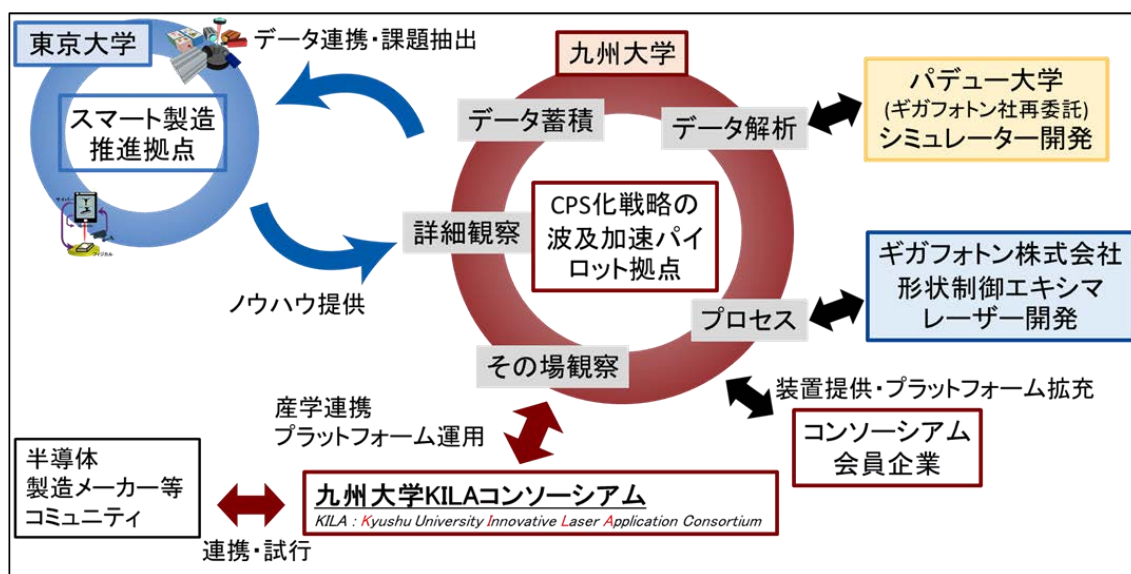


図 2-6-1. パイロット拠点実施体制図

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）

- ・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。
- ・CPS 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、CPS 化戦略の持続的な波及に貢献する。

以下に 2020 年度以降の 3 年間の工程表を示した。本研究課題では「パイロット拠点の形成と運用」及び「出口戦略テーマの社会実装」に分けて各年度の計画を策定している。「パイロット拠点の形成と運用」では、SIP 最終年度に「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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」を達成することを目標にしている。

研究開発項目	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
④CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成	CPSループ構築 リアルタイム観察 装置の開発 研究開発ロード タイム削減の実証 パイロット拠点の 形成と運用 ・ 莫大からのPoCにより構築したCPSループを用い、AI解析用データベースを構築 ・ AI解析による半導体デバイス電気特性の推定 ・ 材料改質過程を高度に測定可能なリアルタイム観察装置の開発とモジュール化 ・ モジュール化されたリアルタイム観察装置の市場投入体制の構築 ・ CPS化戦略パイロット拠点の形成と、企業からの投資を持続的に誘起する組織体制の構築（光電子プロセス研究開発センターの設立）	・ 材料改質観察用リアルタイム観察装置の製品化とCPSループによるAI解析の試験運用 TRL6 ・ CPSループ適用による研究開発ロードタイム削減の実証検証 ・ CPS化ニーズを持つ複数企業の具体的なテーマに対するCPSループデモンストラシヨンの実施（有料） ・ CPS化ニーズを持つ複数企業との共同研究の実施（マッチングファンド率90%を達成）	・ 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の市場投入 TRL7 ・ 複数企業とのCPSループを適用した共同研究の実施 ・ 半導体製造プロセス全般へのCPS化波及加速を実現する連携体制の構築 ・ 企業がTRL7の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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達成	・ スマート製造装置販売を行う企業を主体とした材料改質観察用リアルタイム観察装置の開発 ・ リアルタイム観察装置のモジュール化 ・ AI解析システムを搭載したリアルタイム観察装置の試作と評価 ・ CPS化ニーズを持つ企業との共同研究の実施と社会実装までに必要な要件の定義	モジュール化されたリアルタイム観察装置 (2021) AI解析システムを搭載したリアルタイム観察装置 (2022)
	出口戦略 社会実装 ・ 複数企業との具体的な共同研究テーマの構築 ・ 共同研究テーマの社会実装までに必要な要件の定義 ・ 製造ライン投入を実現する改質プロセスの選定 ・ TRL6 実証実施に向けた企業からの投資判断の獲得 民間からの出資（人材、物資、資金等） (>70%)	TRL6 評価用CPSシステムの製作 TRL6 ・ 企業からの試作サンプルの提供とTRL6を用いた企業試作ラインによる評価の開始 ・ 社会実装を目指す新規テーマの選定と当該新規テーマに対する社会実装までに必要な要件の定義 (>70%)	TRL7 実証実施に必要な要件の定義と解決策の提示 TRL7 ・ TRL7 量産実証機の仕様決定 ・ TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得 ・ 2021年度に選定した新規テーマのTRL6 実証実施に向けた企業からの投資判断の獲得 TRL6 (>70%)	・ CPSループを活用した研究開発期間の短縮 ・ TRL6 実証実施に向けた企業からの投資判断の獲得と企業試作ラインによる評価 ・ TRL7 実証実施に向けた企業投資判断の獲得 ・ TRL7 量産実証機の仕様決定と製作 ・ 企業量産ラインによるTRL7量産実証機の評価 ・ 新規追加テーマの社会実装に向けた課題抽出と解決策の提示	社会実装テーマ1 材料改質レーザー加工装置Ⅰ (2024) 社会実装テーマ2 材料改質レーザー加工装置Ⅱ (2025~2026)

3) 課題目標の達成度（成果）

① 国際競争力

国際競争力の評価は、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ことを目的に実施している材料改質レーザー加工装置 I（パワーデバイス向けレーザードーピング加工）に対して実施した。当該テーマは、ギガフォトン(株)及びデバイスメーカーM 社が協業して取組んでいる出口戦略テーマであり、2022 年度には量産実証機（β機：TRL7）の実証実施に向けた企業の投資判断の獲得を目標としている。市場性の評価に関しては、富士経済、矢野経済研究所に加え、Yole、Global Information Inc. などの海外のマーケットレポートの今後 10 年間の市場予測を調査するとともに、複数のパワーデバイスメーカーに対して設備投資の時期と規模の聞き取り調査を行った。競合メーカーのプロセスコストに関しては、装置メーカーからおよその装置価格の聞き取り調査を行うとともに、本研究課題の「パワーデバイス抵抗損失低減用レーザードーピング装置」のプロセスコストに関しては協業メーカーとともに装置仕様と価格目標を設定し比較を行った。デバイスの

高性能化、信頼性、拡張性などの装置及びプロセス能力の評価に関する事項は、過去 10 年間の文献調査（約 500 件）により現状の技術的到達度と改善見込みを評価し、また特許（約 300 件）やプレスリリース、野村証券などのアナリストレポート及び各デバイスメーカーの技術報告書（デバイスメーカー5 社、IR 情報として公開）の調査により当該分野の開発動向を把握し評価に反映した。

【2021 年度】

2021 年度に行ったグローバルベンチマークの結果を表 2-6-1 に、これをレーダーチャートにしたものを図 2-6-2 に示す。

文献調査結果から、住友重機械工業(株)や LASSE などのレーザーアニール加工装置は、SiC、GaN のワイドギャップ半導体に対する吸収が低い波長のレーザーを選択しているという問題、及び抵抗損失低減に必要な高濃度ドーピング加工が不可能であるという本質的な問題を抱えており、2020 年度から進展はなかった。また、高温注入＋ファーンেসアニール工程も、学術文献調査や特許調査においても従来を超える高濃度ドーピングが実現できたという報告は無く、技術的進展は確認できなかった。一方、本研究課題でギガフォトン(株)及び M 社などとともに取り組んでいるパワーデバイスレーザードーピング加工装置においては、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を実施し良好なコンタクト抵抗が再現できることを確認した。

表 2-6-1. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」のグローバルベンチマーク（2021 年度）

評価軸		研究開発				備考
		SIP-九大 波長248 nm (日本)	住友重機 波長355 nm (日本)	LASSE 波長308 nm (仏)	高温イオン注入 ファーンেসアニール (全世界)	
SiC	高性能化	◎ 0.2～0.3 %	△ 5～9%	△ 5～9%	△ 5～9%	裏面コンタクト抵抗損失割合
	信頼性	○※7	○※1	—	◎※2	※7：チップレベル評価実施 ※1：剥がれ要因(界面偏析物)あり ※2：剥がれ要因なし
	拡張性	○※3	×	×	△※4	裏面p型コンタクト形成プロセス ※3：低抵抗を実現 ※4：高抵抗で適用範囲に制限あり
	プロセスコスト	○	◎	◎	×	◎：1,000円/waf.以下 ○：1,000～2,000円/waf. △：2,000～3,000円/waf. ×：3,000円/waf.以上
	市場性	○※8	○※8	○※8	○※8	※8：コロナ禍により上方修正 適用可能市場規模×占有率 ◎：～1兆円 ○：～1000億円 △：～100億円
GaN	性能・信頼性	○※5	×※6	×※6	△	※5：FSレベルでp型低抵抗化 ※6：適用不可
	プロセスコスト	○	×	×	×	◎：1,000円/waf.以下 ○：1,000～2,000円/waf. △：2,000～3,000円/waf. ×：3,000円/waf.以上
	市場性	△	△	△	△	※8：コロナ禍により上方修正 適用可能市場規模×占有率 ◎：～1兆円 ○：～1000億円 △：～100億円
総合評価		○	△	×	△	

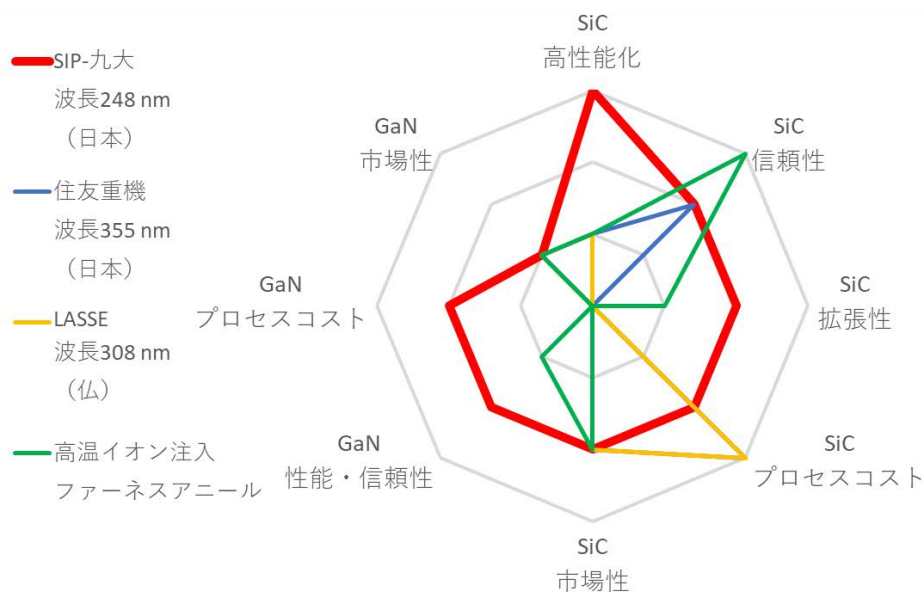


図 2-6-2. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」と競合技術との比較（2021 年度）

世界は EV の加速度的な普及や脱酸素社会実現に向けて大きく歩みだしており、これら電気インフラにて重要な役割を担っているパワーエレクトロニクスの市場予測は、2021 年度のマーケットレポートから大きく上方修正されている。2021.9 に発表された Global Information Inc. の市場調査レポートによれば、現在の SiC パワーデバイスの CAGR は 18.7% であり、2026 年には 2,400 億円の市場規模となると予想されている。また、同レポートによれば、GaN デバイス（光デバイス、RF 通信デバイス、パワーデバイス）の市場規模は、CAGR 5.4% で 2026 年には 2 兆 6 千億円に達すると予想されている。GaN パワーデバイスの現在の市場規模は約 100 億円と小さいが、CAGR は 64.4% と驚異的に高く、2026 年には 1,200 億円に達すると予想される。以上の様に、SiC 及び GaN デバイスの市場性が上方修正されたことで、これらワイドギャップ半導体の製造装置として強みを持つ、パワーデバイスレーザードーピング加工装置の市場性が向上した。

【2022 年度（終了時）】

研究開発計画に基づいた開発を進めた結果、SIP 終了時の比較結果は、表 2-6-2、図 2-6-3 のように進展した。

住友重機械工業(株)や LASSE などのレーザーアニール加工装置は、SIP 終了時の 2023.3 には、量産ラインでの生産を続けることで現状より信頼性が向上すると見込まれる一方で、文献及び特許調査から、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に関しては現状より改善される見込みはなく、次世代パワーデバイス市場拡大のボトルネックとなっている抵抗損失の改善に寄与する見込みは無い。また、高温イオン注入＋ファーン

表 2-6-2. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」のグローバルベンチマーク (2022 年度 (SIP 終了時))

評価軸		研究開発				備考
		SIP-九大 波長248 nm (日本)	住友重機 波長355 nm (日本)	LASSE 波長308 nm (仏)	高温イオン注入 ファーネスアニール	
SiC	高性能化	◎ 0.2~0.3 %	○ ~1%	△ 5~9%	△ 5~9%	裏面コンタクト抵抗損失割合
	信頼性	◎	◎	—	◎	
	拡張性	◎	×	×	△※1	裏面p型コンタクト形成プロセス ※1: 高抵抗で適用範囲に制限あり
	プロセスコスト	◎	◎	◎	×	◎: 1,000円/waf.以下 ○: 1,000~2,000円/waf. △: 2,000~3,000円/waf. ×: 3,000円/waf.以上
	市場性	○	○	○	○	適用可能市場規模×占有率 ◎: ~1兆円 ○: ~1000億円 △: ~100億円
GaN	性能・信頼性	◎	×※2	○	△	※2: 適用不可
	プロセスコスト	○	×	○	×	◎: 1,000円/waf.以下 ○: 1,000~2,000円/waf. △: 2,000~3,000円/waf. ×: 3,000円/waf.以上
	市場性	○	○	○	○	適用可能市場規模×占有率 ◎: ~1兆円 ○: ~1000億円 △: ~100億円
総合評価		◎	○	○	△	

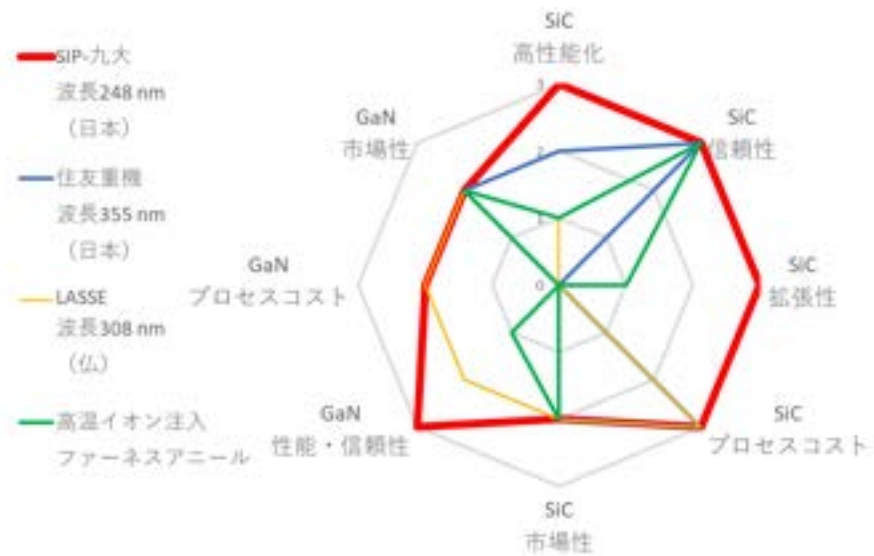


図 2-6-3. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」と競合技術との比較 (2022 年度 (SIP 終了時))

ネ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、現段階においても多種多様な研究開発に取り組んでおり、それら数多くの学術的知見から、GaN デバイスにおいては高性能化や信頼性向上に関し若干の進歩が期待できるものの、それ以外の項目に対する進歩は

ほとんど見込まれず、特にプロセスコスト改善が困難であることから SiC や GaN 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分析される。本研究課題の社会実装テーマであるレーザードーピング加工装置は、2022 年度にはギガフォトン㈱と M 社において量産ライン抜き取りウエハを用いた評価を実施し、「量産実証機（ β 機：TRL7）の実証実施に向けた企業の投資判断の獲得」という目標を達成した。また、GaN パワーデバイスプロセスへの適用及び SiC パワーデバイスの他工程への拡張適用に関しては、複数のデバイスメーカーとフィージビリティースタディフェーズの検討を実施中であり、今後 CPS システムにより開発を加速することで、SIP 終了後にデバイスメーカー試作ライン評価を行う企業からの投資判断を獲得する。

以上の様に本研究課題の開発技術は、時空間制御に優れた短波長高出力レーザーを利用し、他の競合技術と比較して優位にたつ基本的な性質を有しており、CPS 化システムにより開発を加速することで企業設備投資の時期を逃さず量産装置の市場投入が実現できると分析される。

上記に示した本研究課題の成果を、CPS 化ニーズを持つ他の企業に示すことで CPS 化の社会波及を加速し、九州パイロット拠点に参画している様々な企業のニーズに対応した課題解決に取り組み、企業からの投資を獲得することで、SIP 終了後も持続的に社会実装を実現するパイロット拠点を継続運営する。

② 研究成果で期待される波及効果

九州大学では、最終年度の目標である「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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を持つ持続可能な拠点を構築（CPS 化推進半導体拠点）」として、4 センター連携体制（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、量子コンピューティングシステム研究センター）を構築した。その結果、当該拠点の主な社会実装活動基盤である綺羅コンソーシアムの参画企業は目標である 40 社に達成しており、民間企業より 2.5 億円/年の投資を誘起しつつ複数の社会実装テーマに取り組み、最終年度目標である持続可能な拠点の構築を達成している。

図 2-6-4 に、本課題目標にて構築した九州大学の CPS 化推進半導体拠点活動の概要と 30 年後までに見込まれる社会波及効果を示す。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スマートレーザ加工機市場投入に取り組んでいる。これらテーマの最終年度目標は既に達成しており、5 年後のパートナー企業の事業規模は 100 億円に到達する見込みである。

現在、より市場規模の大きな先端半導体及び高速通信デバイス分野でのボトルネックを解消する製造装置の開発を民間資金により推進しており、これら新規テーマの社会実装

を実現することで10年後のパートナー企業の事業規模は850億円を達成することを目標としている。

本SIP課題にて形成したCPS化推進半導体拠点をベースに活動規模を拡大し、10～30年後には、ドイツのフラウンホーファー研究機構(FhG)、オランダ応用科学研究機構(TNO)、台湾の工業技術研究院(ITRI)など海外の産学官共創の社会実装拠点到に匹敵する世界屈指の半導体製造装置の社会実装拠点(活動規模:数千億円/年)を構築する。現在、世界屈指の半導体製造装置の社会実装拠点実現にむけた活動をより確かなものにするため、TNOより九州大学CPS化推進半導体拠点活動に対するレビューを受け、テーマ選定、目標設定、市場分析、サプライチェーン分析などTNO運営のノウハウの適用を目指した活動を行っている。2023.1.31～2.2には副学長の白谷主幹教授および藪田教授が三菱UFJリサーチ&コンサルティング(株)と共にTNOを訪問し、本SIP「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」の成果と課題を紹介したうえで、訪問先機関それぞれにおける産学連携形態など(特にエコシステム構築・運営方法)の説明を受け、今後の産学連携形態の方向性に関して議論し、以後も継続して議論および情報交換を行うこととした。これにより、世界屈指の半導体製造装置の社会実装拠点実現をより確かなものとし、半導体市場全体へ波及効果の拡大(約16兆円)を目指した活動を実施する。

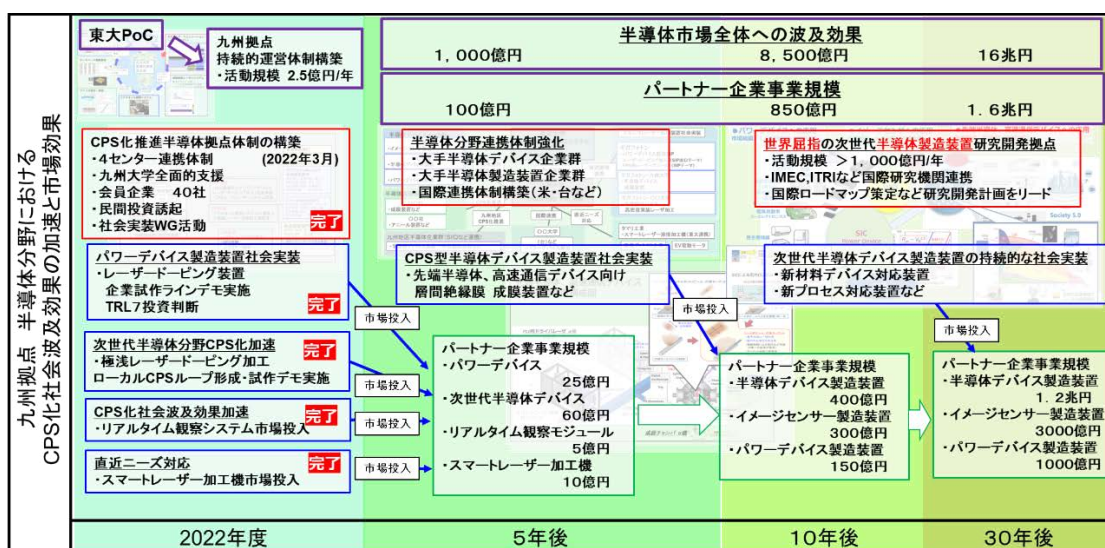


図 2-6-4. CPS 化推進半導体拠点活動の概要と 30 年後までに見込まれる社会波及効果

③ 達成度 (1) ※4 年間の設定目標に対する達成度

九州大学拠点における SIP 第 2 期の最終年度の目標は下記の通りである。

1. 企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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を持つ持続可能な拠点を構築 (CPS 化推進半導体拠点) (九州大学)

2. 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の市場投入（九州大学）
3. 2021 年度選定テーマの TRL6 実証検証に向けた企業投資判断の獲得
（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）（九州大学）
4. TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得（パワーデバイスレーザードーピング加工装置）（ギガフォトン㈱・パデュー大学（再委託））

以下、各目標に対する達成状況を説明する。

1. 企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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を持つ持続可能な拠点を構築（CPS 化推進半導体拠点）（九州大学）

九州大学では、CPS 化推進半導体拠点として、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 センター連携体制を構築した。その活動概要を図 2-6-5 に示す。本 CPS 化推進半導体拠点の目的は、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である。現在、半導体関連企業、量子計算・AI 解析、デバイス製作&評価、外部評価関連企業及び研究機関、熊本県や福岡県の地方自治体との連携や事業展開を目指した情報交換を行っており、国内外の半導体関連企業に対してワンストップでソリューションを提供できる体制を整えた。結果、綺羅コンソーシアムに入会した企業は、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 70%以上を達成していることから、最終年度目標の

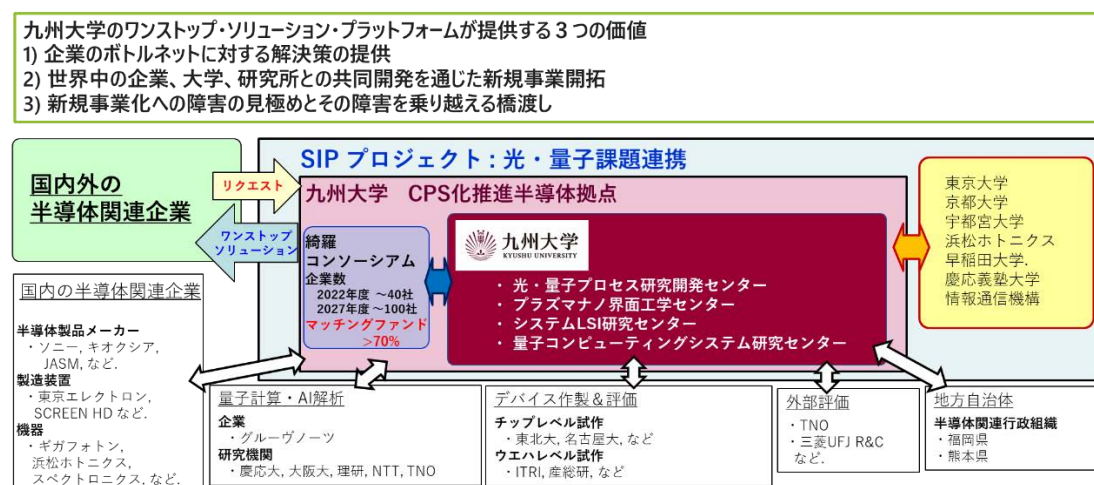


図 2-6-5. 九州大学 CPS 化推進半導体拠点の活動概要

「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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を持つ持続可能な拠点を構築」を達成した。

2. 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の市場投入（九州大学）

「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」用に開発した AI アルゴリズムを図 2-6-6 に示す。学習に用いるリアルタイム観察データは、レーザー加工後の品質と相関が高く、また画像中の各ピクセルのデータに定量性を持たせた温度分布動画とした。開発した CNN 構造は、(1) 温度分布動画を 3 次元マトリックスとして扱い、3 次元マトリックスから畳み込みを行う「3D-CNN」、(2) 温度分布動画を 2 次元画像の集合とみなし 2 次元画像の畳み込みを行った後にニューラルネットワーク内で統合し畳み込みを行う「2D-CNN 統合型」、(3) 2 次元画像の畳み込みを行い、各 2 次元画像それぞれに対して分類判定を行う「2D-CNN 不良検出型」の 3 種類であった。レーザー材料改質の制御パラメータ（パワー、スポット径、フォーカス、スキャン速度など）を変化させ、それぞれの照射条件に対する加工品質の OK、NG の分類判定の学習を行った結果、3D-CNN、2D-CNN 統合型の AI において OK/NG 判定の推定確率は 98%以上であり、判定する人物の違いによる推定精度と同等の結果が得られた。また、2D-CNN 不良検出型の CNN で分析を行った結果、不良画像と認定された 2 次元画像が多いサンプルにおいて、加工品質が良品と判定されたレーザー材料改質状態であっても、スパッタや改質形状が不安定で NG となる兆候が見られることが明らかとなった。以上の結果より 3D-CNN もしくは 2D-CNN 統合型の AI 解析に加えて 2D-CNN 不良検出型の AI 解析を組み合わせることで、OK/NG などの分類判断だけでなく、不良発生の兆候や不良発生個所を瞬時に推定可能な AI システムの構築に成功した。

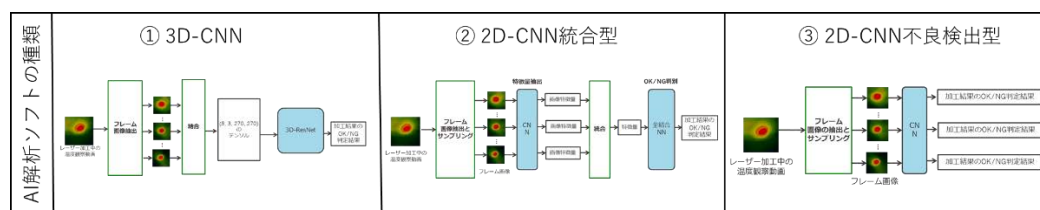


図 2-6-6. 材料改質リアルタイム観察装置搭載の AI 解析システム

現在、上記に示した「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」のモジュール部単体の市場投入を行うとともに、(株)タマリ工業より投資を受けて本 AI システムを搭載した EV モーター用の平角銅線レーザー溶接加工機を製作し、2022.12 より材料メーカーより提供を受けた量産試験銅線を用いた検証に着手した。

また、ナノ秒オーダーで進展するレーザー材料改質過程のデータを取得するため、ナノ

秒オーダーで温度分布の進展の観察が可能な、高速温度分布観察カメラの開発を行った。

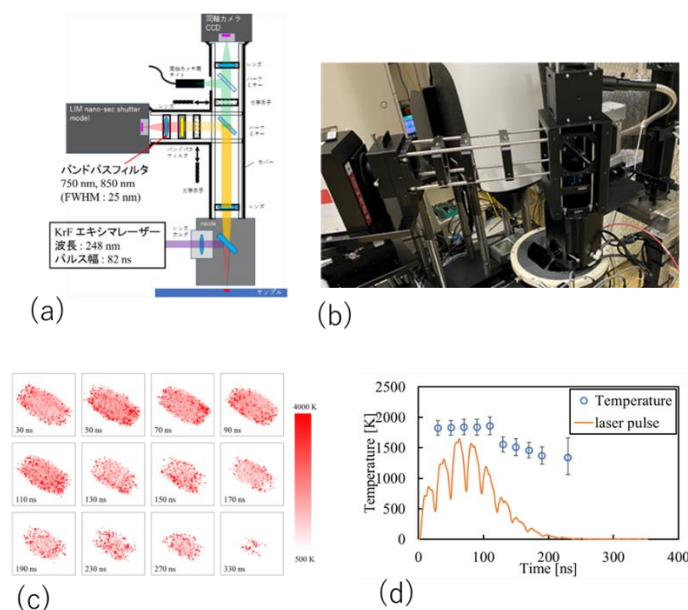


図 2-6-7. 高速温度分布観察カメラの概要。(a) 構成図、(b) レーザー材料改質装置への搭載写真、(c) 温度分布進展画像、(d) レーザーパルス波形及び画像中心温度の時間変化のグラフ

図 2-6-7 に、高速温度分布観察カメラの (a) 構成図、(b) レーザー材料改質装置への搭載写真、(c) 温度分布進展画像、(d) レーザーパルス波形及び画像中心温度の時間変化のグラフを示す。図 2-6-7(a) に示すように、本カメラには波長 750 nm 付近、及び 850 nm 付近の放射光の画像を各々測定する CCD カメラが搭載されており、2 つの画像の各ピクセルの強度比より温度分布画像を求める。各画像の観察時間は 10 ns であり図 2-6-7(c) に示す様にナノ秒オーダーでの温度分布動画の観察が可能となる。Si のレーザー材料改質を行った際の温度変化を図 2-6-7(d) に示す。図 2-6-7(d) より、Si の融点近傍で潜熱を蓄えている様子が観察されたことから、本観察装置で正確な温度の測定が可能と判断した。先に示した AI 解析システムの本装置への搭載は容易であり、AI 解析システム搭載した高速温度分布観察装置の市場投入を実現した。

以上の結果より、最終年度の目標である「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の市場投入」を達成したと判断する。

3. 2021 年度選定テーマの TRL6 実証検証に向けた企業投資判断の獲得

(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) (九州大学)

2021 年度に新たな社会実装テーマとして次世代半導体デバイス製造用の極浅レーザードーピング加工装置の社会実装を選定し、2022 年度にはデバイスメーカー S 社との協業体制を構築し TRL6 実証実施に向けた投資判断獲得に向けた検討を行ってきた。次世代半導

体デバイスの性能向上には極浅領域での高濃度ドーピングが必要であり、従来のドーピング法では達成困難な深さ数 nm 以下の高濃度ドーピングが要求されている。

実験は p 型 Si 基板、及び n 型 Si 基板への p 型不純物 (Al) のレーザードーピング加工により行い、レーザードーピング加工領域と Si 基板の裏面に電極を形成し、IV 特性の測定を行うことで p 型活性の確認を行った。

結果、p 型 Si 基板上へのレーザードーピング加工では、照射フルエンス 0.8 J/cm^2 の条件にて表面に損傷を与えることなく p 型活性を示唆するオーミックコンタクトが得られることを確認した。n 型 Si 基板へのレーザードーピング加工を施した後に pn ダイオードを形成し、IV 特性を測定した結果を図 2-6-8 に示す。図 2-6-8 は、IV 特性から求めたダイオードの理想因子 n と表面粗さの照射フルエンス依存性を示す。図 2-6-8 より p 型基板上へのレーザードーピング加工とほぼ同等の照射フルエンス 0.9 J/cm^2 において、表面粗さの増加を抑制しつつ、理想因子は p 型活性を示す 2 近傍となることが分かった。この時のドーピング深さと濃度を測定した結果、ドーピング深さは 3 nm 以下であり、表面近傍で Si に対する Al の固溶限界を超える $10^{20}/\text{cm}^3$ 台後半のドーピングが達成されていることが明らかとなった。

PNダイオード電気特性評価

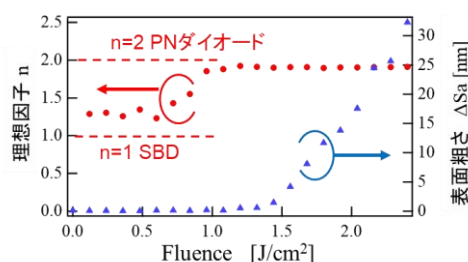


図 2-6-8. レーザードーピング加工後のダイオード理想因子 n とレーザー照射領域の表面粗さの照射フルエンス依存性

上記のレーザードーピング加工特性は、従来法では達成困難な極浅・高濃度ドーピング特性であり、次世代半導体デバイス電気特性向上のためのボトルネック解消を達成し得るプロセスであると結論した。

現在、デバイスメーカーS社より、資金の提供と試験パターン付き 300mm ウエハの提供を受けデバイス構造を用いた検討を実施している。本検討は、TRL6 実証実施に向けた投資判断獲得に相当することから、最終年度目標を達成した。

4. TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得（パワーデバイスレーザードーピング加工装置）（ギガフォトン㈱・パデュー大学）

2021 年度にギガフォトン㈱と M 社との協業により TRL7 実証実施判断獲得に向けた要件定義と解決策の提示を行い、2022 年度は解決策の目標達成に向けた検討を行ってきた。2021

年度の時点において、レーザードーピング加工後の電気特性目標（コンタクト抵抗： $10^{-6}\Omega$ cm^2 台前半）は達成しており、2022 年度には面内均一性向上に向けた検討を行った。

面内均一性の評価にあたっては、ウエハ全面において多点測定が可能な、微小 4 探針プローブを用いて行った。測定結果を図 2-6-9 に示す。結果、良好なレーザードーピング加工条件においては面内均一性の目標値を超える $\sigma=1.3\%$ を達成できた。システムのステージ精度やビーム均一性を改善した新しいシステムが完成し、M 社より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した。以上の結果は、TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得に相当する。

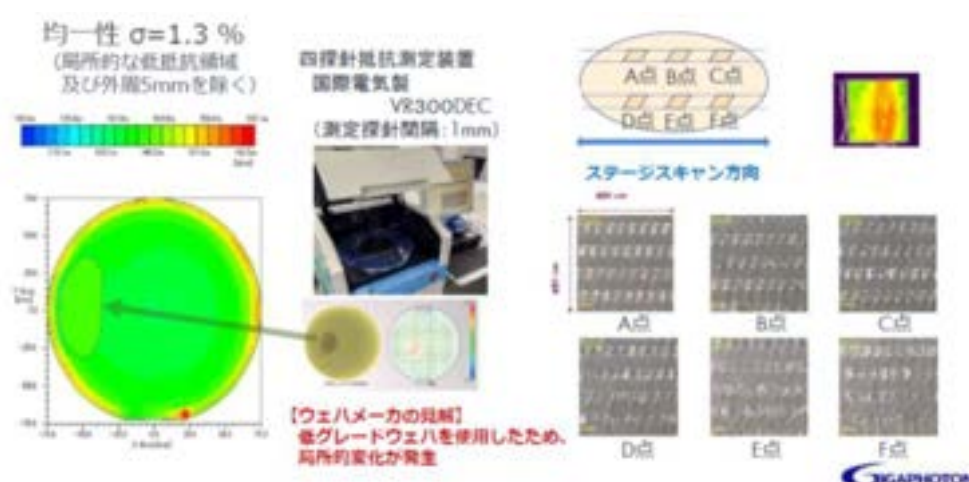


図 2-6-9. ウエハ全面ドーピング加工均一性評価結果

④ 達成度（２）※社会実装の実現可能性

「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、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を持つ持続可能な拠点を構築」の目標に対して構築した、九州大学 CPS 化推進半導体拠点の活動（図 2-6-5 再参照）を SIP 第 2 期終了後も持続し、さらに発展・拡充させた。具体的には、半導体関連大手企業、地方自治体、及び海外研究機関のトップに対し、九州大学の現副学長である白谷主幹教授、西田 PD、安井サブ PD など、本拠点のマネジメントや評価に携わる役職者等の協力を得て本拠点に対する意見交換を実施した。半導体拠点に関する大手半導体企業、及び在外公館・海外研究機関・メディアに対して実施した結果の概要を、それぞれ、表 2-6-3(a) 及び (b) に示す。表 2-6-3 に示すように、半導体分野における量子コンピュータ活用に対する強いニーズ、フラウンホーファー型研究拠点構築に向けた本拠点活動に対する期待、及び人材育成・供給に対する強い要望を確認した。

表 2-6-3. CPS 化推進半導体拠点構築活動に対する意見交換実施状況

(a) 大手半導体関連企業トップとの実施状況

企業名	懇談者	SIP参加者	日時	懇談形式	成果
S社	社長 他	西田PD、安井SPD 九大：白谷P、池上P、QST	4/1	オンライン	・量子コンピュータに関心
K社	執行役員CTO他	西田PD、安井SPD 九大：白谷P、池上P、QST	6/22	オンライン	・量子計算のニーズを把握
SC社	執行役員 他	九大 池上P	7/7	対面	・従来型AIに対する量子計算導入の効果に関心
T社	執行役員 他	西田PD、安井SPD、 九大 白谷P、池上P	7/28	対面	・フラウンフォーファー型拠点構築に対する要望を把握
J社	社長 他	西田PD、安井SPD 東大：小林P、田丸P、坂上 九大 白谷P、池上P 内閣府・QST	8/3	オンライン	・国際連携、人材育成に対する課題を把握

(b) 在外公館・海外研究機関・メディアなどとの意見交換実施状況

企業名	懇談者	SIP参加者	日時	懇談形式	成果
熊本県	局長他	西田PD、安井SPD、QST 九大 白谷P、池上P	8/4	対面 (熊本県庁)	九州地区内連携協力を確認
TNO	研究戦略 担当者	九大 白谷P	9/9	オンライン	量子コンピューティングに関するEU-Japan協力構想へのSIP成果などのインプットと情報交換
米国福岡領事館	科学技術 担当者	九大 白谷P、池上P、藪田P	9/27	対面(九大)	半導体に関する日米の状況の情報交換とのSIP成果などのインプット
NHK	ディレクター	九大 白谷P	10/16	オンライン	半導体人材育成など1月放送予定番組へのSIP成果などのインプット
半導体産業新聞	会長	・九大 白谷P	11/18	オンライン	半導体に関する意見交換とSIP成果などのインプット
CDRI(台湾)	局長他	九大 執行部、白谷P、池上P、藪田P	11/15	対面(九大)	人材供給体制、育成に関わるニーズを把握
ITRI(台湾)	幹部	安井SPD、九大 白谷P、池上P、藪田P	11/18	対面(九大)	研究交流、台湾企業との連携協力を確認

九州大学では、量子コンピュータ活用に対する大手半導体関連企業からのリクエストに応えるため、量子計算商用サービスの提供に世界で初めて成功した(株)グルーヴノーツと2022.6にMOUを締結し、量子計算環境の構築に着手した。2022.9には、(株)グルーヴノーツが提供する量子コンピュータのクラウドプラットフォーム（製品名：MAGELLAN BLOCKS）の試用版を九州大学に導入し、半導体製造における量子コンピュータ活用事例の提示に向けた活動に着手した。結果、半導体プロセスにおいて、処理手順の組み合わせが最も複雑で量子計算による最適化効果が最も示せるダイシング工程を題材として、計算処理時間に対する量子コンピュータの効果の提示を行った。結果の例を図 2-6-10 に示す。

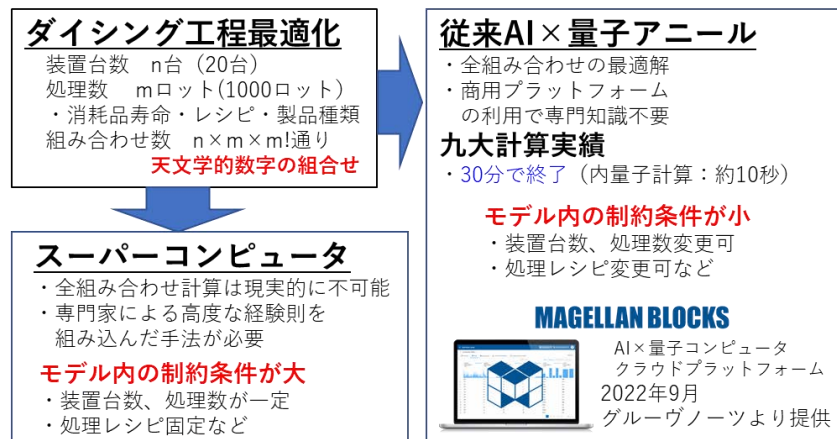


図 2-6-10. ダイシング工程を題材とした量子コンピュータ計算結果の例

結果、天文学的な組み合わせ数となる最適化問題においても、量子コンピュータを用いると僅か 30 分（内、量子計算約 10 秒）で妥当な結果が得られることを示した。現在、大手半導体企業から量子計算の要望を受け、半導体分野における量子計算活用に対する具体的な活動に着手した。

以上に示したように、必要に応じて企業とのトップ会談を実施することで半導体関連企業からのリクエストを常に把握し、ワンストップソリューションを提供する体制を随時構築することでさらに大型な企業投資を誘起し、マッチングファンド 70%以上を維持しつつ活動規模の拡大を行い、フラウンホーファー型拠点実現に向けた活動を行う。

出口戦略テーマとして選定した「パワーデバイス・レーザードーピング加工装置」及び「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」は、最終年度の目標を達成しており、SIP 終了後も企業投資を誘起し、それぞれ、2024 年度及び 2025～2026 年度の市場投入に向けた活動を持続する。

現在、GPS 型半導体拠点では、企業投資により 23 のテーマを推進している。パワーデバイスや次世代半導体デバイスに加えて、先端ロジックや 3 次元実装などの製品開発に対するボトルネック解消の技術に取り組み、持続的に社会実装を実現する組織運営を行なう。

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

九州大学 GPS 化推進半導体拠点の GPS 関係の知的財産戦略の運用方針を図 2-6-11 に示す。図 2-6-11 に示すように、オープン領域特許として綺羅コンソーシアム参画企業に対して実施権を認める GPS 関係の特許を保有し、知財実施権の対価としての企業からの投資を受けつつ GPS を活用した企業との共同開発を加速し、社会実装を目指した活動を行う。社会実装活動の中で生じた個別テーマの知的財産はクローズド領域の特許として扱い、企業投資の対価としての知的財産を確保する。以上の運用方針により、社会実装を目指すテーマに対して企業投資を誘起しつつ九州大学拠点での社会実装活動を行い、知的財産的観点から

も国際競争力の高い個別テーマの社会実装を実現する。

現在、レーザー材料改質加工に対する AI 解析の基本特許を T 社と九州大学で出願し、綺羅コンソーシアムに参画する企業に対して実施権を認めることでの合意を得た。

CPS関係の知的財産の戦略方針：

九州大学が関わるAI解析基本特許については、綺羅コンソーシアム参画企業に対して実施権を設定する

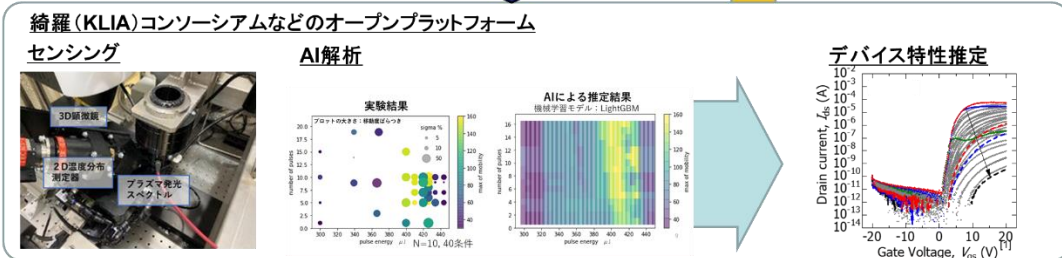
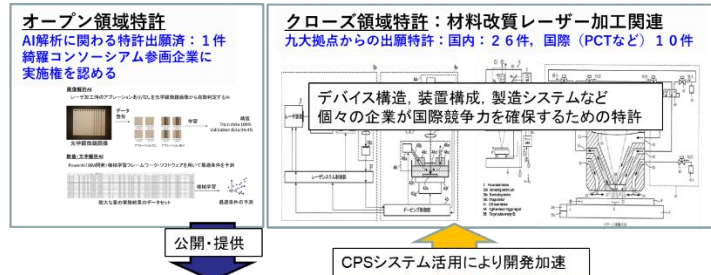


図 2-6-11. 九州大学 CPS 化関連の知的財産戦略の方針

⑥ 成果の対外的発信

九州大学 CPS 化推進半導体拠点の社会実装活動として企業向けに行った対外的発信の概要を図 2-6-12 に示す。企業向けの対外的発信は、主に下記の 3 つを行った。

- 1) 九州地区の半導体関連中小企業向けに行った SIIQ（九州半導体・エレクトロニクスイノベーション協議会）交流会
- 2) 国内企業向けへに発信した月刊オプトロニクス特集号への企業との連名による記事掲載
- 3) 台湾の半導体関連企業、及び研究機関向けに行った SEMICON Taiwan での展示発表
以下、項目に分けて詳細を説明する。



図 2-6-12. 社会実装活動として企業向けに行った対外的発信の概要

1) SIIQ 交流会での対外発信

本 SIIQ 交流会は、コロナ禍以降途絶えていた現地での SIIQ 交流会再開の第一回目として 2022. 4. 22 に九州大学にて行われた。交流会には、九州地区の半導体関連の中小企業を中心に約 80 名が参加し、九州大学 CPS 化推進半導体拠点の紹介を行うとともに、九州大学総長の挨拶、安井サブ PD による「SIP プログラムの紹介と九州大学 CPS 化推進半導体拠点に対する期待」の講演も行った。結果、拠点運営に対する中小企業からの意見を得て、特に「大手企業のニーズにもとづく中小企業との共同開発の実施」に対する強い要望を得た。これら要望に応えるため、大手半導体関連企業を対象としたニーズ調査と中小企業の保有の技術、大学シーズとのマッチング活動を実施し、(株)デンケン、岩崎電気(株)、(株)東海理化など複数の中小企業との新たな共同開発を実現した。

2) 企業との連名による月刊オプトロニクス特集号への記事掲載

国内企業に向けた対外発信として、月刊オプトロニクス誌 2021. 5 号に、「高繰り返し KrF エキシマレーザー光源のアニールへの応用 (ギガフォトン(株)ー九州大学共著)」、2023. 1 月号では「半導体産業と光・レーザー技術 (キオクシア(株)ー九州大学共著)」を掲載した。

「高繰り返し KrF エキシマレーザー光源のアニールへの応用」では、九州大学 光・量子プロセス研究開発センター内に設置したギガフォトン Next GLP 共同研究部門にて開発した量産対応レーザーアニール技術の紹介であり、企業の大型資金投資による産学連携活動の成果事例として紹介した。現在、光・量子プロセス研究開発センター内には新たな共同研究部門としてタマリ工業共同研究部門が設置されており、今後もこれら共同研究部門の成果事例の発信を行うことで、企業大型投資の持続的受け入れを実現する。

「半導体産業と光・レーザー技術応用」の記事の執筆は、デバイスメーカーであるキオクシア(株)と九州大学の連携を示す目的で行った。今後も、デバイスメーカーや大手半導体製造装置メーカーとの連携を推進し、その連携活動の対外発信を行っていく。

3) SEMICON Taiwan での展示発表

tsmc 新工場設立にともない九州地区への進出を計画している台湾の半導体関連企業に対して、本拠点の活動の紹介と運営に対する要望を把握することを目的とし、SEMICON Taiwan での展示発表を行った。その結果、地元メディアである CTIMES、アジア経済圏ニュースを発信する NNA アジアに記事が掲載されるなどの大きな反響があり、ITRI 及び CDRI 幹部の九州大学訪問などの国際連携に向けた活動に結実した。

⑦ 国際的な取組・情報発信

九州大学 CPS 化推進半導体拠点では拠点活動を国際標準とするため、日米の半導体関連の国際連携として最重要なオランダ応用科学研究機構 (TNO) からの外部評価を受けている。TNO から得た中間報告の概要を図 2-6-13 に示す。図 2-6-13 に示すように、アカデミック及びビジネスパートナーとの連携体制、量子コンピュータ活用などの取組状況、九州の地の利、ビジネスコラボレーション強化に向けた量子アニーリング活用事例提示の取組など、拠点の強みに対する評価を受けるとともに、さらに改善するための提案として、本拠点の焦点の明確化、エコシステム状態の分析、パートナー活動を 1 つの物理的な場所に統合など、図 2-6-13 に示す様な具体的な提案を受けた。

これら改善に向けた提案をより具体的なものとし、拠点運営活動に反映させるため、九州大学では CPS 型プラットフォーム構想立案に携わった三菱リサーチ&コンサルティング(株)とともに、2023. 1. 31~2. 2 にかけて欧州に訪問団を派遣し、ドイツ人工知能研究センターやオランダ TNO を訪問した。訪問では、拠点運営評価の具体化に加えて、欧州のエコシステム運営方法、量子コンピュータの半導体関連分野活用等に向けて議論した。

半導体製造装置の市場規模は、アプライドマテリアルズ(米国)、ASML(和蘭)、東京エレクトロン(株)(日本)、ラムリサーチ(米国)、KLA(米国)、(株)SCREEN ホールディングス(日本)で全体の 80%を超える。九州大学 CPS 化推進半導体拠点と TNO との連携推進は、半導体製造装置のサプライチェーンの強靱化に向けた日米蘭連携推進に資すると考える。

TNO中間報告の概要	
九州大学半導体拠点の強み ・九州大学の内部、アカデミックパートナーおよびビジネスパートナーとの連携体制 ・長期的なゲート型量子コンピューティングの開発と、現在の量子アニーリングの活用による巧妙な2段階アプローチ。 ⇒現在および将来にわたりテクノロジーの活用が可能。 ・九州の地の利(多くのセミコン関連企業が九州に所在)。 ⇒近接性により、パートナー間の情報交換が可能。共同イノベーションに必要な相互および個人的な信頼関係を形成。 ・最適化プロセスに最もよく使用される量子アニーリング活用法を半導体業界への提示。 ⇒ビジネスコラボレーションを強化するための賢明な活動。	
さらに改善するための提案 ・九州大学の半導体拠点の焦点の明確化 ・エコシステムの状態の分析 ・製品ポートフォリオの確立 ・パートナーの活動を1つの物理的な場所に統合 ・ロードマップの作成 ・バリューチェーン分析	TNOからのアドバイス(TNOの経験から) イノベーションの形は常に進化。伝統的には欧州でもR&Dはサイロ型(クローズド)イノベーションだったが一般的ではない。 欧州でオープンイノベーション手法へと移行した理由は下記。 オープンイノベーション移行の理由 ・必要な投資コストの削減 ・学際的なノウハウ、他のパートナーや潜在的な顧客のネットワークへのアクセスを提供 ・イノベーション達成に対する不確実性を低減。

図 2-6-13. TNO による九州大学 CPS 化推進半導体拠点運営に対する中間評価の概要

第3章 課題マネジメント

① Society 5.0の実現を目指すもの

【本 SIP 光・量子課題の成果はスマート製造実現に貢献するだけでなく、スマートモビリティ、スマートエネルギー等に波及し、Society 5.0を支える様々な分野に恩恵をもたらすことを目指した。】

光・量子技術は、第5期科学技術基本計画において、「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」として位置づけられており、我が国が強みを有する分野である。この強みを活かし、Society 5.0 実現に向けた投資を阻むボトルネックを解消することで、民間企業の投資を促し、関連分野における国際的な競争力を高める。

SIP 光・量子課題の基本コンセプトは、Society 5.0の実現というゴールイメージからバックキャストして、それに取り組む企業が市場で調達が見込めない「ボトルネック解消技術」を提供し、安心して投資活動に取り組めるようにすることである。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。5つの研究課題が個別の高い目標を達成するとともに、「CPS 型レーザー加工機システム構築」へ貢献するという一つの目標を共有しており、連携による成果はスマート製造からスマートモビリティ、スマートエネルギー等に波及し、Society 5.0を支える様々な分野に恩恵をもたらす（図3-1 参照）。

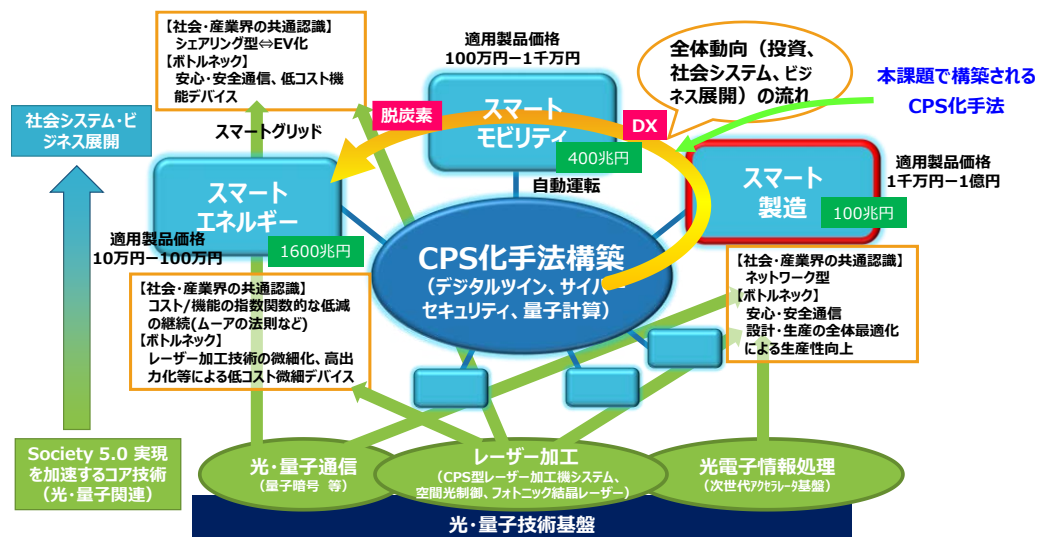


図 3-1. SIP 光・量子課題の成果が Society 5.0 を支える分野へ貢献（図 1-2 の再掲）

経済発展と社会的課題の解決を両立し、一人一人の人間が中心となる社会である Society 5.0 実現のためには、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステム、すなわちサイバーフィジカルシステム（CPS）の構築が鍵となる。国内外の市場において、IoT/AI 関連及び IoT/AI の具体的な応用先としてのスマート製

造分野に対する積極的な投資が開始されるなど、GPS 構築を推進する動きが進んでいる。

一方で、この流れを期待通りに進める上での懸念材料も顕在化してきている。例えば、IoT/AI 関連では、市場が将来的に要求する制御、通信、AI デバイス等を搭載した電子機器の進化（コスト／性能の指数の低減）が予想通り進展するか、また、スマート製造分野では、ネットワーク型の製造システムへの移行が実現するかが見通せていない。さらに、サイバー空間におけるセキュリティの脅威は増加の一途を辿り、いったん障害が発生するとその影響はフィジカル空間において甚大な被害をもたらす懸念が高まっている。

この懸念材料がボトルネックとなって、民間企業の将来への投資マインドを低下させることが想定されるため、これらを取り除くための研究開発を国主導で加速し、関連業界が安心して投資を継続、拡大するように導いていく必要がある。

そのため、本 SIP 光・量子課題では広範囲な光・量子技術から、重要かつ優先度の高い技術として、①レーザー加工、②光・量子通信、③光電子情報処理の 3 項目を選定して研究開発を実施した。

レーザー加工を取り上げているのは、日本が強みを持ち、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く困難であるが、インパクトのある分野だからである。レーザー加工を先導例として取り組み、GPS 化が達成可能なことを示すことで、GPS 化により広い分野でスマート製造が実現可能であることを示すことができる。具体的な目標の例としては、スマート製造分野での投資のボトルネックとなっている GPS 型レーザー加工機システムの実装（レーザー加工のパラメータの初期選定のリードタイムの 9 割減）や、将来にわたりサイバーセキュリティへの脅威に晒されることのない安全なデータの流通・保管・利活用を実現する量子暗号技術、イジング型コンピュータや NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータなど個別の計算資源を適材適所で自動的に利活用する次世代アクセラレータ基盤によって Society 5.0 に資するアプリケーション全体を最適実装する技術の実用化（10～100 倍の高速化）等を行った。これにより、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。本 SIP 光・量子課題では、このような施策によりボトルネックを取り除くことで、民間企業による、IoT/AI の具体的な応用先としてのスマート製造、スマートモビリティ、スマートエネルギー等への潮流（投資、社会システム、ビジネス展開）を引き起こし、Society 5.0 の実現を加速する。

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。

【社会実装を実現するためのマネジメント体制の最終形を 2021 年度に整え、社会実装の確実な実現に向け、PD、サブ PD が連携して各拠点の社会実装活動を支援・強化した。また、技術評価委員会や出口戦略分科会等へ活動状況を報告し、確実な社会実装等への助言を得、マネジメントに反映させた。】

本 SIP 光・量子課題は図 3-2 に示す研究開発体制で研究開発及びマネジメントを実施した。PD がリーダーシップをとるため、研究推進法人に PD を議長とする最高意思決定機関

であるマネジメント会議を設置し、重要事項を決定し、本 SIP 光・量子課題の着実な実施に向けて議論を行った。その構成員としてサブ PD、各研究責任者、研究推進法人の代表者が参画することに加え、関係府省がオブザーバーとして参加し、情報共有と意思統一を図った。また、より細やかなマネジメントを実施するため、府省も参加する定例会を原則週 1 回開催し、研究開発の推進、広報戦略の推進、光・量子分野に関する社会動向の情報共有及びそれらを踏まえた社会実装のマネジメントを実施した。また、サブ PD もリーダーシップを強化し、研究課題間や個別に参画機関との会合を不定期で多数実施し、情報・目標・方向性等の共有を綿密に行なった。さらに PD をサポートする研究推進法人も、専任 10 名、併任 1 名相当の体制で運営し、研究機関との契約や資金の利用に関する監査などを適正に行ったほか、社会実装にも関わる研究開発計画の策定、進捗管理、広報活動、知財権調整などの面で十分な体制を確保した。

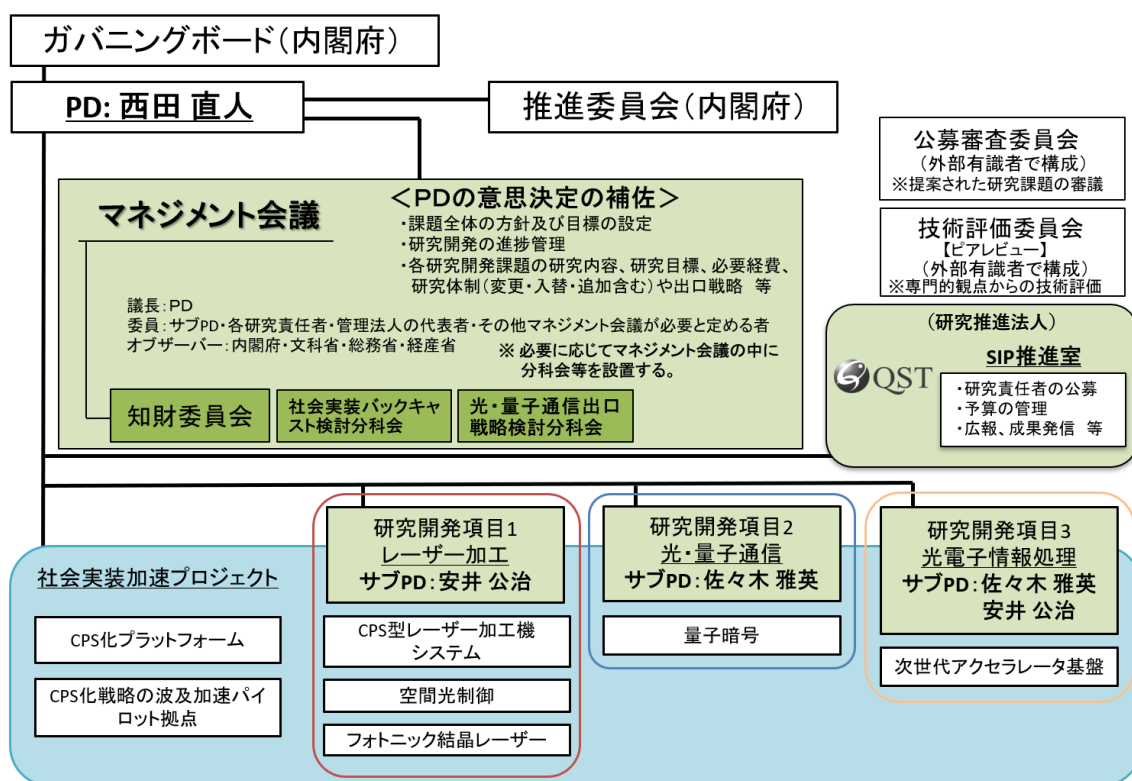


図 3-2. 研究開発体制図

本 SIP 光・量子課題の研究開発及び社会実装活動への外部有識者のレビューに関しては、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理の分野に通じた技術評価委員(表 3-1 参照)にユーザー視点の委員にも参画して頂き、半期に 1 度、進捗報告を実施した。そこで得た確実な社会実装に向けた助言をマネジメントに反映させた。加えて、社会実装責任者を継続配置し、研究責任者と共に社会実装を推進した。

表 3-1. 技術評価委員会構成

氏 名	所属・職名	氏 名	所属・職名	氏 名	所属・職名
帯川 利之	東京大学 名誉教授	本庄 利守	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所 量子光物性研究部 主幹研究員	山下 茂	立命館大学 情報理工学部 教授
加納 誠介	産業技術総合研究所 つくば東事業所 所長	今井 浩	東京大学 大学院情報理工学系研究科・コンピュータ科学専攻 教授	小野寺 民也	日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所 副所長
菅原 充	株式会社QDレーザ 代表取締役社長	宇根 正志	日本銀行金融研究所 企画役	木原 誠司	NTTテクノクロス株式会社 デジタルツイン事業部 理事 シニアディレクター
藤崎 晃	古河電気工業株式会社 執行役員 研究開発本部長	田中 秀磨	防衛大学校 情報工学科 教授	嶋田 義皓	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
森 勇介	大阪大学 大学院工学研究科 教授	松尾 正克	デロイト・トーマツサイバー合同会社 サイバーアドバイザー ディレクター	津田 宏治	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
レーザー加工		松本 泰	セコム株式会社 IS研究所 主席研究員	光電子情報処理	
		光・量子通信			

注) 帯川氏が技術評価委員長。帯川氏、本庄氏、山下氏が各分科会座長。

2022 年度の特長として、GPS 化に貢献する研究成果を各拠点から波及効果が大きな市場領域（半導体製造、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）へ加速的に社会実装するため、サブ PD が積極的に社会実装戦略を立案・先導し、企業の事業部への橋渡しを行った。また、これまで社会実装をボトムアップ型で推進してきたが、トップダウン型として、PD、サブ PD が企業幹部を訪問し、各拠点の社会実装活動を後押しした。こうした活動により、各拠点は SIP 後も自律的に社会実装を継続できる組織的・財源的な基盤確立に目途が立ったことから、本 SIP 光・量子課題が構築した社会実装を実現するマネジメント体制は機能したと判断している。

レーザー加工全般は、社会実装を本 SIP 光・量子課題終了後の視点からバックキャストして推進していたが、随時サブ PD が世界レベルでの産業社会の潮流や、スマート製造や光・量子技術の活用を期待する企業の動向など、社会実装に深く関係する情報を提供した。また、サブ PD は、より影響力の大きな市場（半導体、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）に向けた社会実装を推進するため、個別の参画機関と議論を重ねたほか、本 SIP 光・量子課題の各拠点とオランダ、台湾、ドイツ等の海外研究機関や国内企業の事業部門との連携を積極的に支援すべく、関係者間の会合を実施するなど、その指導力を発揮した。

光・量子通信では、参画 7 機関の研究進捗や社会情勢などの情報共有のために、サブ PD が 2022 年度には 3 回の定期会合を持ち、ベクトルを合わせて目標達成に向けた研究開発に取り組んだ。また、2022 年度も出口戦略検討分科会を 1 度開催し、専門家による社会実装戦略のブラッシュアップを実施した。光・量子通信の社会実装は、新しい社会インフラを構築する側面を持つことから、本 SIP 光・量子課題に参画している機関だけでなく、部品メーカー、光回線プロバイダー、テレコムオペレーター、セキュリティサービスプロバイダー、そしてエンドユーザーも含んだビジネスエコシステム構築に向け、本 SIP 光・量子課題参画機関が中心となって設立した（一社）量子 ICT フォーラム等を活用した業界横断の連携で社会実装を推進している。また、研究成果の事業化を担う企業には、法律、知財、営業の専門家がおり、社会実装を実現するのに必要なサポートを得られる体制で運営された。

光電子情報処理では、社会実装推進には知財戦略、事業戦略、技術戦略が三位一体とな

ったマネジメントを遂行することが重要と考え、知財部会の下で本 SIP 光・量子課題に参画している 4 機関が緊密な連携を持ちながら社会実装の検討を行った。また、さらなる社会実装の推進に向け、早稲田大学に量子計算アプリケーション拠点を構築し、法律面では、各参画機関の法務担当者や産学官研究推進センターの担当者が適切な支援を行うほか、POC の実施や事業推進面では、本 SIP 光・量子課題に参画している 4 機関のほか、社会実装に詳しいコンサルタントや研究成果の出口を広めるために重要と考えている商社も参画し、社会実装を進める体制を整えた。また、レーザー加工同様、サブ PD が随時世界レベルの社会の潮流や、スマート製造や光・量子技術の活用を期待する企業の動向、海外の量子計算サービス提供会社の状況など、社会実装に深く関係する情報を提供したほか、半導体設計の最適化（フォトリソグラフィ結晶レーザーの性能向上）に向けた課題内連携も継続し、拠点間連携も進んだ。

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。

【ガバナリングボードなどの指摘事項に積極的に取り組み、SIP 後も睨んだ予算配分を実施したほか、社会情勢への変化対応策、海外連携の強化策等を踏まえた上で、各テーマの取組状況を適切に把握・評価し、確実な社会実装に向けて支援するなど、機動的なマネジメントを行った。】

本 SIP 光・量子課題は、光・量子技術から重要かつ優先度の高いレーザー加工（GPS 型レーザー加工によるスマート製造の実現）、光・量子通信（サイバー空間における絶対安全なデータの流通・保管・利活用）、光電子情報処理（ものづくり設計・生産の全体最適化）を活用して、複雑な物理現象を伴うため GPS 化が最も困難とされているレーザー加工を代表例に GPS 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なことを証明すること、また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、GPS 型レーザー加工によるネットワーク型製造システム実現に貢献し、ひいては Society 5.0 実現に貢献することを目標に、少数精鋭でスタートした。社会実装の実現に向けて本 SIP 光・量子課題では、Society 5.0 の実現というゴールイメージからバックキャストして、それに取り組む企業が市場で調達が見込めない「ボトルネック解消技術」を提供し、安心して投資活動に取り組めるように活動した。この目標達成には、それぞれの研究課題が研究開発計画書に基づいて着実に研究開発成果を挙げて社会実装を推進したことはもちろん、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理の成果を糾合して、Society 5.0 の実現に貢献する GPS 型レーザー加工機システムを構築することも目指した。

本 SIP 光・量子課題では、出口指向で研究開発を進め、開発した技術を早期に社会実装（事業化・実用化を含む）するマネジメントを実行し、各研究課題もそれぞれ TRL7 の実現を目指した開発項目を研究計画に含み、各工程表でも出口戦略、製品化ターゲットを明記した。研究成果が未完成の段階でも、潜在ユーザーとの POC を行い、社会実装に向けた課題抽出を早期に行うマネジメントを実行した。この 5 年間の活動で、当初計画で目標とした TRL7

数 11 件に対し、当初計画になかった成果の展開も含めて、活動後の実績として TRL7 以上の数が 23 件になるなど、多くの研究成果を社会実装に適した技術レベルまで引き上げ、またその一部は既に実用化・事業化されるなど、社会実装を強く意識した活動成果が得られた。

この 5 年間で社会情勢は大きく変化し、特にコロナ禍への対抗手段として DX 化が高く評価され、また米中対立やロシアのウクライナ侵攻などで基幹部品のサプライチェーン確保を狙う経済安全保障問題は激化し、半導体の確保等はわが国として優先度が高い事項となっている。中でも自動車に波及した半導体については、米国が先端半導体で先頭を走る台湾を囲い込み、欧州も米国に追随するなど、日本が取り残されるリスクがある。また、量子技術も半導体と並び、わが国として経済安保に関わる優先度の高い事項となりつつあると判断している。こうした変化の中、本 SIP 光・量子課題の社会実装も加速することが必要になったと判断し、整備した各拠点を核に波及効果が大きな市場領域（半導体製造、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）で、企業の事業部門等へ CPS 化に貢献する研究成果を加速度的に社会実装するマネジメントを機動的に行った。

研究テーマの推進に関わる 2022 年度のマネジメントは、2021 年度のカバニングボード評価を踏まえた研究開発計画書の改訂や内閣府や技術評価委員会からのフィードバック等を織り込み、ゴールイメージを共有しながら社会実装を先行検証するため、機動的なマネジメントを推進した。特に原則毎週行われる定例会で、PD、サブ PD が海外を含む社会情勢の変化、研究活動や社会実装の状況、諸戦略の見直し、課題内連携等の情報共有や議論を実施した。また、研究責任者からも定期的に進捗報告を受け、研究テーマに対する評価、マネジメントを適切に実施した。

2022 年度の機動的なマネジメントの主要な例として、以下の 9 点を挙げるができる。(1) 予算面では、最終年度は内閣府指針に基づき 12 課題が一律減額となる中でも、SIP 第 2 期終了後も自立的に社会実装を継続するため、大学への予算配分を重視した。東京大学、宇都宮大学、京都大学、九州大学、早稲田大学の各拠点が経営、法律、営業、コンサルタントなどの人材を活用できるように配慮した。(2) 原則毎週行われる定例会で、PD、サブ PD が海外を含む社会情勢の変化、研究活動や社会実装の状況、諸戦略の見直し、課題内連携等の情報共有や議論を実施した。また、研究責任者からも定期的に進捗報告を受けた。こうした活動を踏まえて社会実装の方向性や取り組み方を支援或いは修正するなど、研究テーマに対する評価、マネジメントを適切に実施した。(3) 社会情勢がさらに大きく変化したことに対応し、SIP 光・量子課題の社会実装をさらに加速するため、拠点を核にパートナー企業等から波及効果が大きな市場領域（半導体製造、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）で、CPS 化に貢献する研究成果を加速度的に社会実装するマネジメントを行った。特に、研究成果が早期に実用化されるためには、企業の事業部門へ成果を早く移行することが重要であることから、各研究チームの拠点から企業の事業部門へのアウトリーチを積極的に働きかけた。(4) さらにこうしたボトムアップ活動に加え、PD、サブ PD が直接企業幹部を訪問するトップダウン活動を実施した。(5) 研究成果の実用化に対して市場要求が高い京都

大学、九州大学を社会実装の先行拠点として整備した。(6) 研究成果を活用したい企業と各拠点が連携し、win-winの関係となるためのプラットフォームデザインを検討した。(7) 研究成果の海外展開を推進するため、2022.6 にサブ PD がレーザー加工チームを率いて訪欧し、ドイツ(FhG)、オランダ(High Tech Campus)の幹部と懇談し、より一層の連携強化を進めることに賛同を得た。こうした活動が進展し、京都大学(PCSEL)とオランダ PhotonDelta が駐日オランダ大使及びオランダ王子同席の元での MOU を締結(2022.10.11)し、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)へと繋がった。さらに浜松・宇都宮拠点及び九州大学拠点が、オランダ TNO によるコンサルテーションを受け、オランダのエコシステム形成や拠点運営ノウハウを学んだ。(8) 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、本 SIP 光・量子課題独自の国際シンポジウムを、海外連携機関幹部 7 名を招待し、海外 78 機関以上(79 名)を含む 1,058 名の参加登録、1,014 名の参加を得て開催した(2022.10.12)。また、企業の経営層に向けた雑誌の発刊(日経ビジネス(2022.9.12))、世界中の科学者、技術者向けに、本 SIP 光・量子課題の取組を紹介するため Nature Focal Point を発刊(2022.8.11)、一般ビジネスパーソン向けに本 SIP 光・量子課題の成果や CPS プラットフォーム構想を知って頂くための書籍発刊(東洋経済新報社、2023.1.26)など、様々な手段を用いた情報発信を行い、社会実装を強化した。(9) 個々の研究課題の取組みに閉じず、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理の 3 課題が連携し、半導体デバイス設計の最適化において、量子セキュアクラウドにより高度設計情報データの高秘匿伝送、保管を担保しつつ、半導体デバイス設計最適化に活用する量子計算アルゴリズムを深化させ、PCSEL の実デバイス試作でその効果を検証することにつながった、などである。

一連の活動成果に対し、第三者機関である技術評価委員から、2021 年度に引続き全課題の研究成果、社会実装への取り組みやマネジメントに対して高い評価を頂いた。こうしたことから、研究テーマに対する評価やマネジメントは適切に実施されたと評価している。

④ 民間から適切な負担を求めているか。官民の役割分担が適切になされていたか。

【民間からの貢献を重視しており、適切な負担を求めた。また、レバレッジ視点からの波及効果も考え、SIP 光・量子課題の成果を波及効果が大きな市場領域へ早期に適用し、日本の生産性向上に貢献することを目指した。】

研究課題への応募の際に、産業界からの貢献(人的、物的貢献を含む)は、研究開発費の総額(国と産業界からの貢献との合計)の 15%~30%程度を期待していることを明示し、適切な負担を求めた。研究開発計画書に沿った適切な負担となっており、当初は 4 年目(2021 年度)から 50%のマッチング率を予定していたが、研究成果が計画以上のペースで上がっていることや、その成果の活用に関心を寄せる企業が増えていることなどもあり、2020 年度に各研究課題は 50%以上を達成し、2021 年度は 61%になり、研究開発計画を上回る負担を

得た。2022 年度も SIP 光・量子課題の優れた成果に関心のある企業数が着実に増加しており、また各拠点での社会実装活動も活発化していることから、2021 年度を上回る 66%を見込んでいる。

本 SIP 光・量子課題で取り組んだ拠点形成は、SIP（国）の支援により開発した技術を広く活用してもらうための基盤となる。レーザー加工に関する拠点形成では、GPS 型レーザー加工機システム、空間光制御技術、フォトリソ結晶レーザーの研究において、それぞれ東京大学拠点、浜松・宇都宮拠点、京都大学拠点が研究開発成果の活用や技術移転の拠点として順調に活動し、関心のある企業が、開発の早い段階から研究成果を試用することができるようになった。光・量子通信では、量子暗号技術の社会実装の拠点等を通じ、アーリーアダプターへの研究成果の受け渡しを行なった。また標準化・エコシステム構築等を継続して行った。光電子情報処理ではオープンソースソフトウェアを開発し、早稲田大学拠点において早期に潜在ユーザー企業との産学連携を通じ、世界のデファクトスタンダードを目指して活動した。完成したアルゴリズムエンジンを企業に提供し、今後のさらなる機能拡充に向けて、当該エンジンを組み込んだクラウドサービス「QunaSys Qamuy™」の試験的な提供を継続した。さらに「GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成」を行う九州大学では、総長指示の下、GPS 化推進半導体拠点として、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 センター連携体制を構築した。これにより、九州半導体アイランドの強化に向け、ワンストップで企業のボトルネックに対する解決策の提供を目指すことができるようになった。

こうした拠点の整備が進んだことで、東京大学では TACMI コンソーシアムに参画するグループ数が 2021 年度より 21 グループ増えて 110 グループに、京都大学では拠点への国内外からの引合いが 2021 年度より 27 機関増加した 83 機関以上に、九州大学では半導体製造技術の確認を目指す綺羅コンソーシアムへの参画企業数が 2021 年度より 16 企業増えて 41 企業になった。

本来民間だけで行うべきものに国費が投じられていない点については、内閣府とも緊密に協議・調査し、利益相反が疑われることのないように適切に運営した。SIP（国）が実施する部分として、本 SIP 光・量子課題の主旨であるボトルネックの解消や我が国産業界の生産性向上に資する内容であるかに基づき、官民の分担を整理している。

参画機関の浜松ホトニクス㈱の事例では、当初個社では、「高出力レーザー加工用デジタルフィードバック光制御モジュール」のテーラーメイドな多品種少量販売のビジネスを検討していたが、本 SIP 光・量子課題での活動を通じて東京大学、宇都宮大学と連携し、かつフラウンホーファー研究機構（FhG）とも連携したシナジー効果の結果、半導体や車載部品の量産ラインや海外市場への展開のほか、大学を活用した市場展開策の立案が可能になるなどが顕在化した。コストダウンと量産による市場展開の展望が開けたことで、これを活用する企業の生産性向上が期待できる。今回の本 SIP 光・量子課題での投資は、浜松ホトニ

クス(株)個社の Win、それを安価に活用できる国産生産ラインの Win、それにより、わが国の半導体産業等の競争力が強化され経済安保に貢献する政府の Win の Win-Win 構築につながる。

⑤ マッチング額が十分に計上されていたか。

【社会実装活動が拡大中で、マッチング率 66%の計上を見込む。】

課題全体としては、2022 年度は当初の研究開発計画書の最終年度 15-30%(研究課題別)の目標値を大幅に超える 66%を課題全体で達成する見込みである(図 3-3 参照)。また、個別の研究課題別でもそれぞれで 50%を超える見込みで、本 SIP 光・量子課題における優れた研究成果に対し、企業等の関心・期待が益々高まっている。

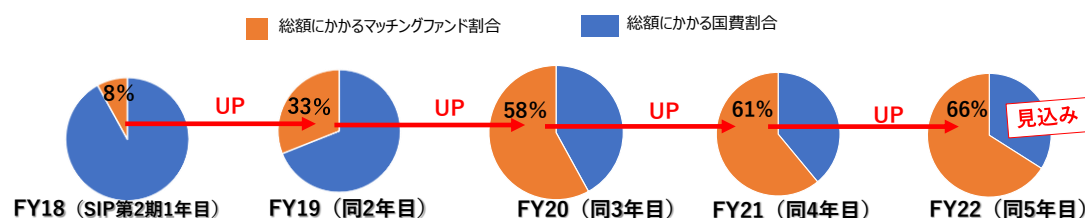


図 3-3. マッチング率の推移

GPS 型レーザー加工機システムにおいては、MDG の本格稼働に伴い、TACMI コンソーシアムに関心を寄せ、コンソーシアムに参画するグループが 2021 年度より 21 グループ増えて 110 グループになると共に、既に企業による MDG の有償利用が始まっている。空間光制御技術においては、耐光性が一桁向上したデバイスの完成を受けて、半導体製造企業等との実用化を見据えた POC が本格化しており、多層半導体の切断加工で、従来法では実現が困難であった「半導体表面にダメージを与えない」、「規定以上の機械的強度を持つこと」をクリアし、高スループットを実現する目途も立った。フォトリソ結晶レーザーにおいては、参画企業である三菱電機(株)やローム(株)が、本 SIP 光・量子課題からの資金提供を受けることなく、適切な費用(労務費、機械償却費、研究費等)を負担している。またフォトリソ結晶レーザーに関心を寄せる国内外企業はさらに増え、2021 年度から 27 機関増加した 83 機関から引き合い(2022. 12 時点)があり、ユーザー企業・機関への MTA によるデバイスの供給やユーザー企業と連携した LiDAR 等のシステムの試作が発展し、さらに製造企業との共同研究も拡大していることが、マッチング率向上に貢献している。2021 年度、世界初の PCSEL を搭載した試作 LiDAR の体積を 1/3 に大幅に小型化したことで、連携企業による実用化検討が本格化した。量子暗号技術では、電子カルテ、ゲノム医療、生体認証技術との融合のほか、早期実需が見込める金融分野での POC を継続した。光電子情報処理では、参画機関である(株)フィクスターズやベンチャー企業である(株)QunaSys が自己負担により研究開発費用を拠出しているほか、(株)QunaSys が運営する量子コンピュータの応用検討コミュニティで 50

社が参画する「QPARC」のプログラムの中でメンバー企業が研究成果をさらに活用したことや、(株)フィックスターズは住友商事(株)などとの POC が事業化されたほか、多くの他企業と POC を実施することに発展したことから、マッチング率が拡大した。また、九州大学では拠点形成、拠点機能の拡大により、共同研究や共同開発を進める企業数も増加し、2019 年度 7 社であった綺羅コンソーシアム参画企業数は、2021 年度には 25 社、2022 年度には目標とする 40 社を超える 41 社に達し、マッチング率向上に貢献した。特に、半導体分野に関連する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、半導体分野における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活動している。

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。

【SIP 光・量子課題は、経産省 NEDO プロ、文科省 CREST、QLEAP、総務省「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」などの研究成果を活かし研究開発に取り組んでいる。】

本 SIP 光・量子課題では、府省が実施している関連事業で開発される研究成果を本 SIP 光・量子課題に糾合し、研究開発を加速した。レーザー加工では、広範囲な事業体に成果を提供できる体制構築からバックキャストして、必要な府省・産学のプログラム(NEDO、Q-LEAP 等)の成果の糾合を推進し、光・量子通信では、本 SIP 光・量子通信のメンバーが中心となり設立された、(一社)量子 ICT フォーラムを通じて府省庁連携、産学連携を強力に推進した。光電子情報処理においては、関連する NEDO 事業、Q-LEAP 事業等と緊密に連携することにより、研究開発を効率良く、かつ最大限の効果を上げるよう進めた。個別の研究課題での取り組みは以下のとおりである。

GPS 型レーザー加工機システム研究開発においては、本 SIP 光・量子課題は NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発、Q-LEAP 次世代レーザー領域で開発された成果を活用・糾合し、府省連携で社会実装を推進する体制を構築し研究開発を実行した。

フォトリソグラフィ結晶レーザーに係る研究開発においては、NEDO、JST CREST の成果を糾合して研究開発を実行した。

量子暗号技術においては、本 SIP 光・量子課題の光・量子通信のメンバーが中心となり、(一社)量子 ICT フォーラムを設立し、府省庁連携や産学連携を強力に推進する体制を構築した。同フォーラムでは、研究開発の国家戦略やロードマップの策定、運用ガイドライン案の提言、標準化支援などについて、府省庁をオブザーバーに大学、国研、企業で検討を行う場として、本 SIP 光・量子課題の光・量子通信のメンバーが主導している。また、本 SIP 光・量子課題の参画メンバーである NICT は総務省とも緊密に連携し、総務省プロジェクト「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」に本 SIP 光・量子課題での成果も活用し、量子暗号技術のさらなる展開に結実させた。

次世代アクセラレータ基盤技術に係る研究開発においては、早稲田大学、(株)フィックス

ターズ、(株)QunaSys、慶應義塾大学の4者によって研究開発を実施したが、本 SIP 光・量子課題に関連がある NEDO 事業*1、Q-LEAP 事業*2 等と緊密に連携することにより、研究開発を効率良く、かつ最大限の効果を上げるよう進めた。

*1…(1) イジングマシン共通ソフトウェア基盤の研究開発（代表機関：早稲田大学）

(2) 組合せ最適化処理に向けた革新的アニーリングマシンの研究開発（代表機関：日立製作所）

(3) 超電導パラメトロン素子を用いた量子アニーリング技術の研究開発（代表機関：日本電気）

*2…NISQ コンピュータあるいは誤り耐性ゲート型量子コンピュータに関連した3つのプロジェクト（(1) 超伝導量子コンピュータの研究開発、(2) 量子コンピュータのための高速シミュレーション環境構築と量子ソフトウェア研究の展開、(3) 量子ソフトウェア）と連携する。

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。

【SIP スタート時から、SIP 国家レジリエンス（防災・減災）、SIP マテリアル革命等のプログラムとの連携を進めた。更に医療 AI プラットフォーム技術研究組合（HAIP*1）、SIP ビッグデータ・AI、新たな SIP 国家レジリエンス（防災・減災）との連携が進み、新しいシステム構築、POC 実施、技術移転等で貢献した。】

光・量子通信は本 SIP 光・量子課題チームが開発している電子カルテ保管・交換システムを災害医療支援に適用するため、2019.2 より「国家レジリエンスチーム」と打合せを開始し、高知県・高知市病院企業団立高知医療センター及び連携協力機関から成るチームと、電子カルテデータのセキュアなバックアップと医療機関間での相互参照、災害時の迅速なデータ復元を可能とするシステム開発してきた。2021 年度は被災地での救護活動を効率化するため、個人情報保護しながらの患者情報の統計データを使うシミュレータシステムの開発に成功している。2022 年度は電子カルテ情報を匿名加工したうえで、外部機関に提供できるようにするためのシステムを開発し、それを適用して H-LINCOS*2 に保管されている秘密分散ファイルシステム上の医療情報から、地域別、年代別、病気ごとの患者数を集計し統計情報を抽出するなどの機能を追加開発した。この機能で得られる統計情報を国家レジリエンスチームが開発している D24H*3（災害時保健医療福祉活動支援システム）に提供することで、被災地に必要な医療支援物資の推定が可能となる。またここで開発された高速秘密分散処理及びデータ伝送技術を、SIP AI ホスピタルの HAIP にも提供し、HAIP 独自システムのアクセス管理に活用された。

光電子情報処理では、既に SIP 課題「IoT 社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ研究開発」の「プロシージャ適格性保証による信頼の証明技術の研究開発」に本 SIP 光・量子課題の参画機関が関与しているほか、マテリアル革命に向けてイジングマシンを用いて自動車産業・電子情報産業等広範なスマート製造業においてニーズのある複合材料組織の構造最適化に関する phase-field model の発展モデルによる新しい定式化方法の研究と本格的な計算を実施した。その結果、従来の手法では計算結果を得るのに 100 分かかっていたのが、本 SIP 光・量子課題の参画機関が開発した Fixstars Amplify を使って 1 秒で完

了するなど、計算の高速化に貢献した。また、SIP ビッグデータ・AI の分野横断的なデータ検索・連携を可能とするシステムへの接続に貢献すると共に、これをきっかけに、データ連携基盤を使い、自治体データの一部（例：ハザードデータ）を共有し、それを用いて次世代アクセラレータが避難計画を最適化することに繋がった。具体的には、SIP 防災との連携で、SIP4D（府省庁連携防災情報共有システム）の災害対応や危険度に関する検証用ダミーデータを取得し、地図データとあわせて、SIP 光・量子課題のイジングマシンにて最適避難計画を計算するもので、長野県松本市の人口、避難所情報、浸水想定区域情報などを元に、複数のケースにおいて量子アニーリング・イジングマシンによる組合せ最適化計算用エンジンを設計し、災害時に住民が避難する最適地を推薦する計画を立てた。2022. 12 まで POC を実施し、イジングマシンによる最適化計算結果が実用的な情報を導けることがわかり、災害支援データ活用への可能性を示すことに貢献した。

*1…SIP「AI ホスピタルによる高度診断・治療システム」において、他の SIP 参画機関との共同研究により、将来的な社会実現を見据えた研究開発をする組合。

*2…電子カルテ保管・交換システム。電子カルテデータのセキュアなバックアップ、医療機関間での電子カルテデータの相互参照及び災害時等に必要な医療データ項目の迅速な復元を実現するシステム。さらに、個人情報情報を扱うため、セキュアなアクセス管理も実施。大規模災害において被災地で医療情報を提供可能なシステムとして開発、検証してきた。

*3…災害時保健医療福祉活動支援システム。SIP 国家レジリエンス（防災・減災）が研究開発したもので、府省庁連携防災情報共有システム（SIP4D）及び被災地で支援活動を行う保健・医療・福祉チーム（DMAT、DPAT、DHEAT、日赤等）のそれぞれの独自システムと連携し、災害時の保健医療福祉支援活動に必要な情報を収集、整理統合、加工分析し、支援活動の意思決定判断に必要な情報を提供するシステム。

⑧ 上記以外にマネジメントの観点から評価すべきこと

【社会実装のゴールイメージを共有しながら機動的な研究開発・社会実装を推進する過程で、様々なマネジメント上の工夫を随時行った。】

具体的には、第 3 章③でも述べたように、2022 年度のマネジメントでは、(1) 予算面で SIP 後も自立的に社会実装を継続するため、大学への予算配分を重視した、(2) 原則毎週行われる定例会で PD、サブ PD が海外を含む社会情勢の変化、研究活動や社会実装の状況、諸戦略の見直し、課題内連携等の情報共有や議論を実施し、社会実装の方向性や取り組み方を支援或いは修正するなど、研究テーマに対する評価、マネジメントを適切に実施した、(3) SIP 光・量子課題の社会実装をさらに加速するため、各拠点から事業部門へのアウトリーチを積極的に働きかけた、(4) PD、サブ PD が直接企業幹部を訪問するトップダウン活動を実施した、(5) 研究成果の実用化に対して市場要求が高い京都大学、九州大学を社会実装の先行拠点として整備した、(6) 企業と拠点が連携し、win-win の関係となるためのプラットフォームデザインを検討した、(7) 成果の海外展開を推進した、(8) 各拠点から企業へ提供できるサービスの紹介や海外連携強化等を意図した情報発信を強化した、(9) レーザー加

工、光・量子通信、光電子情報処理の3課題が連携した、などのマネジメントの工夫を行ったほか、第1章(2)–⑥、⑦でも述べた、課題全体としての成果の対外的発信、論文投稿などの推奨、国際的な取組・情報発信を進めた。

上記以外では、(a)課題評価WG委員に本SIP光・量子課題の活動への理解を深めて頂くための視察に対応(2022.10.25@東京大学)し、頂いたご意見・アドバイスをマネジメントや方針決定に活かしたほか、(b)課題内連携を推進する上で重要な、課題内の良好なコミュニケーション環境作りに取り組み、PD、サブPD、関係府省、研究推進法人による緊密な情報提供・共有及び活動指針の確認の場として、原則1回/週の定例会(2022年度は2023.3.01までに34回)を開催したのに加え、研究責任者からの定期報告(レーザー加工(4回)、光・量子通信(4回)、光電子情報処理(5回))により、研究進捗のみならず困りごとなどを共有し、課題解決に協力した。本SIP光・量子課題では、全参画機関間で秘密保持契約を締結し、研究課題内の情報共有や闊達な議論がしやすい環境を構築していることから(2023.1現在:全20参画機関)、課題チーム内、課題間の打合せも個別に多数回開催された。

参考情報

1. 知財出願/外部公表等活動状況

【2022 年度活動状況】

2022. 4. 1– 2023. 2. 28 までの知財出願/外部公表等活動状況を以下にまとめた。

【2022年度(状況)】

※2023.2.28現在状況

知的財産（特許（外国出願を含む）、プログラム等著作物など）

特許		他の産業財産権合計			
出願件数		登録件数		プログラム等著作物	その他 (商標など)
国内	海外	国内	海外		
5	23	1		1	

論文など（原著論文、学位論文、プロシーディングス、総説、解説、速報など）

論文数（総数）	（内外国誌文）	（内国内誌文）
32	18	14

学会発表など（（国内・国際）学会口頭発表・ポスター発表、招待講演で成果を公表したもの）

会議発表（総数）			（内国内会議発表分）			（内国際会議発表分）		
発表数	発表数の内、 査読有	発表数の内、 招待	発表数	発表数の内、 査読有	発表数の内、 招待	発表数	発表数の内、 査読有	発表数の内、 招待
107	21	41	57		20	50	21	21

その他

書籍出版件数	プレスリリース	メディア取材	展示会参加数	表彰・受賞数	アウトリーチ数
2	16	83	8	5	89

標準化活動		
標準化委員会参加	寄与	標準化アクセプト
14	22	

- ✓CPS型レーザー加工機システム
- ✓空間光制御技術
- ✓フォトリソグラフィ技術
- ✓量子暗号技術
- ✓次世代アクセラレータ基盤
- ✓PD・サブPD・管理法・共通

その他アウトリーチ活動	
シンポジウム開催	SIPシンボルマーク使用数
2	34

【5 年間の活動結果】

本 SIP 光・量子課題の 5 年間の活動期間中の知財出願/外部公表等活動状況を以下にまとめた。なお、数値は 2023. 2. 28 までの実績。

【SIP期間累積実績】

※2022年度は2023.2.28時点での集計値

知的財産（特許（外国出願を含む）、プログラム等著作物など）

特許		他の産業財産権合計			
出願件数		登録件数		プログラム等著作物	その他 (商標など)
国内	海外	国内	海外		
30	48	2		11	

論文など（原著論文、学位論文、プロシーディングス、総説、解説、速報など）

論文数（総数）	（内外国誌文）	（内国内誌文）
115	69	46

学会発表など（（国内・国際）学会口頭発表・ポスター発表、招待講演で成果を公表したもの）

会議発表（総数）			（内国内会議発表分）			（内国際会議発表分）		
発表数	発表数の内、 査読有	発表数の内、 招待	発表数	発表数の内、 査読有	発表数の内、 招待	発表数	発表数の内、 査読有	発表数の内、 招待
560	66	213	366	2	121	194	64	92

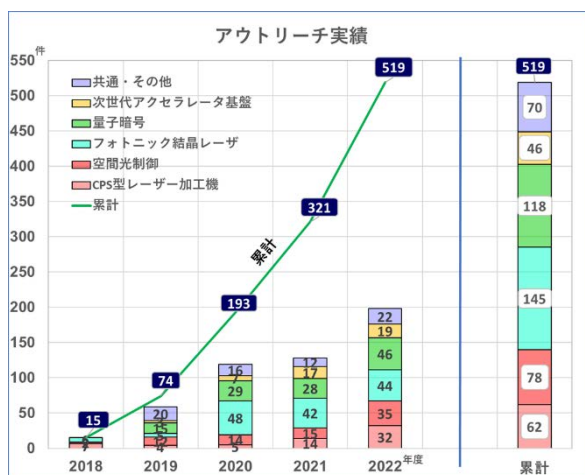
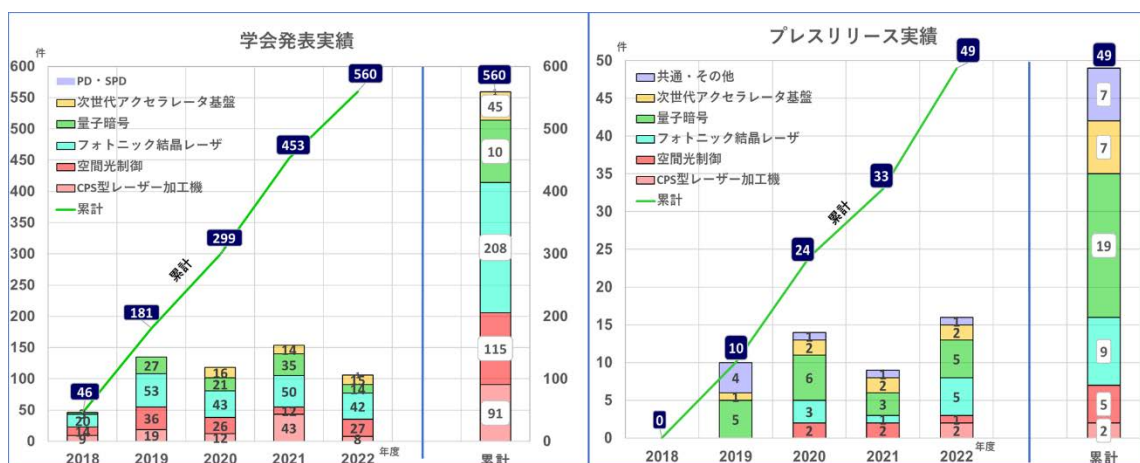
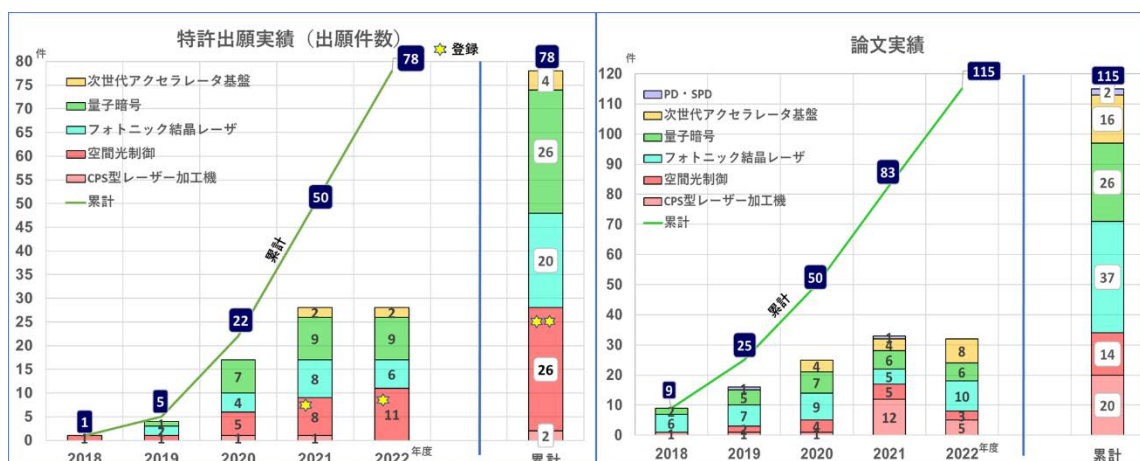
その他

書籍出版件数	プレスリリース	メディア取材	展示会参加数	表彰・受賞数	アウトリーチ数
5	49	175	32	37	258

標準化活動		
標準化委員会参加	寄与	標準化アクセプト
113	179	11

- ✓CPS型レーザー加工機システム
- ✓空間光制御技術
- ✓フォトリソグラフィ技術
- ✓量子暗号技術
- ✓次世代アクセラレータ基盤
- ✓PD・サブPD・管理法・共通

その他アウトリーチ活動	
シンポジウム開催	SIPシンボルマーク使用数
8	149



※アウトリーチには、プレスリリース・取材対応・展示会参加・書籍出版を含む

2. SIP 光・量子課題主催のシンポジウム開催実績

	2018	2019	2020	2021	2022
シンポジウム名	公開シンポジウム2018	公開シンポジウム2019	公開シンポジウム2020	公開シンポジウム2021	国際シンポジウム2022
主な内容	キックオフ。 SIP光・量子課題の活動内容紹介。	研究成果報告。 有識者と光・量子技術で加速するCPSの可能性を議論。交流会では各研究グループとの幅広い交流の場を創出。	研究成果報告。 CPSプラットフォームへの理解と参加を呼び掛け。	研究成果の社会実装に向けた現状の取組みを発表。社会実装トークセッションで企業による光・量子技術のビジネス化への取組を紹介。	社会実装先となるお客様に向けて、SIP後も成果を提供する拠点からのサービス内容を紹介。海外連携機関からの提案等を通じ、新規連携の構築を訴求。
開催日時	2018/12/4 13:00~17:30	2019/11/1 13:30~16:40 16:40~ NW*	2020/11/9 13:30~18:00	2021/10/25 14:15~17:00	2022/10/12 13:30~17:20 17:30~ NW*
開催方法	リアル	リアル	オンライン	オンライン	ハイブリッド
開催場所	浜離宮朝日ホール	東京大学 伊藤謝恩ホール	－	－	イノホール
参加者数	225	324	448	582	1,014 (会場143/オンライン871)

*...Networking (交流会)