

センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム

終了報告書

研究開発期間：平成 25 年度～令和 3 年度

拠 点 名： 「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」

中核機関： 東京大学

プロジェクトリーダー	氏名	湯本 潤司
	所属機関	国立大学法人 東京大学
	部署	理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構
	役職	特任研究員

公開版 令和 4年 3月 31日

目次

エグゼクティブサマリー	i
A イノベーションの創出に向けた活動実績	1
1 目指すべき将来の姿の設定	1
2 目指すべき将来の姿からのバックキャスティング	3
3 アンダーワンルーフ	6
3.1 拠点体制（R3 年度）	6
3.2 参画機関一覧	9
3.3 拠点のマネジメント体制と仕組み・実績	10
4 研究開発テーマの成果	14
4.1 難加工性材料の光加工技術開拓	14
4.2 高度光造形・光改質	20
4.3 短波長（EUV）光源・利用技術	25
4.4 個のニーズ探索	36
4.5 非平衡新規光プロセス開拓	41
4.6 研究開発全体の成果について（科学技術・学術上の新たな体系的知見等）	45
5 社会実装に向けた必要な対応	48
5.1 知的財産マネジメントの状況	48
5.2 社会実装に向けた課題の抽出と対応	49
5.3 マーケティング・試験的な取組の状況	51
5.4 研究開発成果の多様な展開の状況	55
B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた成果	57
1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について	57
1.1 自立的なプラットフォームの構築に向けた拠点の強み・資産の形成状況	57
1.2 産学連携を効果的にするルール・運営方法の工夫	60
1.3 自立的なプラットフォームの構想・設計・稼働の状況	61
2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について	64
2.1 次代を担う若手等の多様な人材の育成・活躍促進の状況	64
2.2 人材の育成・人材循環整理表	68
別紙 1 ロードマップ（FY2013～FY2021）	
別紙 2 活動実績一覧	
別紙 3 参画機関一覧	
別紙 4 参加者一覧	
別紙 5 研究開発テーマと個別研究開発課題の関係一覧	
別紙 6 用語集	

1 拠点の概要

レーザー技術に代表されるコヒーレントフォトン技術の革新は、高密度エネルギー源、超低ノイズ光源として、加工、材料創成、計測など、ものづくりや医療等におけるラダイムシフトをもたらし、産業と暮らしの形を大きく変えつつある。本拠点では、本来あるべき未来社会を描き、その実現で想定される技術課題とその解決方法と共に、研究活動を進める上での組織、運用での問題を抽出し、継続的、持続的拠点構築を進めた。

本拠点の活動では、全員参加のラウンドテーブルディスカッション（RTD）を活用し、あるべき姿から二段階バックキャストによる現状の課題と具体的な対応策を議論した。その結果、PJ 運営では、組織間連携強化を目指した光量子科学連携機構（UTripl）の設立、COI を中核とした PJ の多角化、恒久的な活動の場としてのレーザー加工コンソーシアム（TACMI）の設立、安定財源基盤の構築を目指した共同研究利用設備制度の新設、研究成果のニッチ市場への自らの展開を目指したベンチャー企業フォトンテックイノベーションズ株式会社（PTI）の設立を行った。更に、これらの活動を有機的に連携させ、「点から面への展開」を実現した。

また、研究成果の社会実装に向けた取り組みとして、COI 活動に限定せず、新規 PJ（NEDO、SIP、Q-LEAP）を開始し、これらの PJ 連携を活用することにより、多様な被加工材料、レーザー光源を包括に取り込んだレーザー加工データベースを構築し、その運用を開始した。その一環として CFRP やサファイアの難加工材料のみならず汎用的な材料のレーザー加工技術の確立を進めた。また、臓器透明化技術を用いた光シート顕微鏡、病理診断システムへの展開、更には、Beyond 5G、6G への基盤技術の提供を目指したサブ THz 帯での導波管デバイスの事業化を進めた。これらの活動は、「研究支援型ニッチ商品」として、PTI において自らの手で商品化を進め、研究室に埋もれてしまう成果でも研究市場に提供することで、「研究者が元気の出る仕組み」を創出した。以上の PJ 展開は、結果として内閣府、文科省、経産省、厚労省、総務省など多数の省庁が主管する各 PJ の連携体制となっており、「現場からのボトムアップ型府省連携」活動が形成された。

2 研究開発期間終了時の実現目標と達成状況

本節では、拠点構築活動について述べ、次節において研究開発成果について述べる。

これまでの大学では、研究室単位で独立した活動が中心であったが、社会実装を主眼とした場合、研究者間連携の構築が不可欠である。それを構築するために、

- (1) 学術界、産業界からの参加者がそれぞれの持つ言葉の違いをお互いが理解して、社会における真のニーズや解決すべき課題を正しく捉える、
 - (2) 大学での成果を最も効果的に社会に提供できる方策を従来の枠に拘らずに導入する、
- の 2 点を主眼に、本拠点事業に取り組んできた。

(1)に関しては、学と産の意識、言葉、文化のギャップが大きく、それを如何に埋めるか課題であるとの考えから、毎月、全員参加の拠点会議を RTD として開催し、研究成果、課題、対応方針の共有、また、一体感の醸成を進めた。また、この活動を進める上で、学内組織の連携の難しさも抽出され、それを解決する為に、部局間連携組織である UTripl を設立した。議論の中で、レーザー加工分野では、COI 活動に留まらず、関連研究機関、産業界を巻き込む必要がある考え、NEDO、SIP、Q-LEAP の活動を開始し、ICCPT がその司令塔として連携を構築した。また、(2)に関する議論の中から、これらの活動の持続性を確保する為に TACMI を設立した。TACMI は、NEDO プロ活動の一環として UTripl が母体となって 2017 年 10 月に設立され、2021 年 10 月末時点で 87 法人 90 グループが参画している。参画者に対するヒアリング等から、被加工材料や加工用レーザーを特定のものに限定せず、包括的に扱うレーザー加工データベース（DB）の必要性が認識され、その提案と構築を進めた。これは、職人的なレーザー加工分野に DX、AI を導入するもので、現在、その DB は、規模、内容ともに世界のトップとして認知され、先駆的と評価されている。一方、PJ に紐付いた活動では、その PJ 終了と共に活動拠点を失い、それまでの成果の活用、研究の継続性に対して大きな障害がでる。この問題を解決する為に、TACMI コンソを NEDO プロとは独立させ、継続性・持続性のある組織にできた事は、大学での研究活動で新しい施策として注目されている。また、本拠点では、レーザー技術を医療分野や 3 次元造形技術にも展開し、次世代病理診断技術の提案、Beyond 5G/6G の分野で必要となる導波管デバイスへの展開を進めた。

RTD での成果の出口論に関する議論の中から、研究市場を対象としたニッチビジネスを創出することも日本の研究競争力強化に不可欠と考えた。一般に、企業との連携で進める場合、市場規模が重視され、研究現場には大きなインパクトがあるが、ニッチであるテーマは見過ごされる。しかし、この活動は、研究競争力を強化する上で必須であり、欧米中では活発に行われている。この問題を解決するために、PTI を設立し、優れた機能や使いやすさ等で特徴のある「研究用商品」の市場化を重点的に進めている。この活動により、事業化のリスクを若手研究者ではなく組織で対応することで、若手研究者への過度な負担を低減することができる。PTI では、生体透明化試薬、3D プリンタの造形サービスの事業化を開始し、特に 3D プリンタ製導波管デバイスは、NEDO のベンチャー企業支援制度の支援を受け、また、NICT の「Beyond 5G 研究開発促進事業」で採択された。今後、天文用ミリ波帯反射防止膜やレーザー加工痕計測技術の市場化を進める。

一方、研究活動の推進上、資金、人材、設備等の効率的な活用が必須である。この課題に対しては、UTripl が部局横断組織であるという特徴を活用した共同研究利用設備制度を学内で初めて開始した。これは、研究装置の有料貸出によって UTripl の財務基盤を安定化が図られ、PJ 終了後の装置維持が可能となる。自立財源の確保が図られることから、今後、学内外に展開を進める。

3 特筆すべき研究開発成果の概要

(a) 本拠点の柱であるレーザー加工については、COI 活動がきっかけとなり、NEDO、SIP、Q-LEAP 活動へと発展し、さらに、当初計画には無かったレーザー加工データベース、リモートレーザー加工等の新しいテーマを創出した。その活動は、学术界、産業界において新しい技術トレンドとして認知されてきたことは非常に大きな成果である。一方、CFRP のレーザー加工に関しては、UV 光のナノ秒パルスレーザー光を用いることで、熱損傷が発生せずに切断ができる特異条件の存在が確認されたが、そのメカニズム解明、産業技術展開については、現時点では継続中であり、今後、UTripl および TACMI で進める。また、ミリ波帯反射防止膜であるサファイアモスアイ構造の作製に成功し、LiteBIRD プロジェクトでの採用が決定し、また、米国 Green Bank 天文台にすでに設置された。また、シリコンモスアイ構造による THz 帯反射防止膜にも成功し、高効率 THz 波発生デバイスとして、PTI で事業化を進めている。

(b) 透明化試薬 LUCID は、病理診断に使用可能な唯一の試薬であり、大学、研究機関への販売を開始した。また、100 万円以下の 3 次元イメージングを可能とする光シート顕微鏡の商品化も PTI で進めている。まずは、薬効、副反応検証として新薬開発企業への販売を予定している。

(c) 3D プリンタ RECILS による造形品展開として、PTI による無線通信部品試作受注事業を開始。特に、Beyond5G・6G 関連技術に関しては、NEDO のベンチャー企業支援事業、および NICT の PJ として採択された。

(d) EUV 光源技術は、次世代半導体製造技術として重要である。EUV 光学部品検査用光源を東大からギガフォトンに開示し、また、EUV 波長領域での各種材料の光学特性の精密計測を可能とするダブルスリット位相敏感高精度測定技術を、EUV 露光で使用される実サンプル用いて確立した。今後、本技術は、共同研究利用設備制度を活用して、EUV 関連産業界への展開を図る。

4 今後の課題と活動方針

本拠点事業は、今後、2 つの点に注力して進める。第一は、9 年間の拠点活動で蓄積した技術・設備・ノウハウなどの継承と発展である。レーザー加工関係に関しては、SIP、Q-Leap などの事業に引き継がれる共に、TACMI の活動を通じて持続性を維持しつつ産業界への展開を進める。また、学内でも、UTripl のもとに共同研究設備利用制度を設置し、設備の有効かつ長期的な利活用を進めることができるようになった。特に、この制度の下では、学内の設備を一定の条件下ではあるが、営利を目的とした企業活動に利用できることになり、大学の資産の社会的価値を高めることが可能となり、COI 事業で示された、研究成果の社会実装、特に、研究成果の社会実装まで研究者が責任を持つという理念を実現できる体制を整えることができた。

第二は、設立したベンチャー企業 PTI の育成である。PTI が設立されたことで、大学単独では解決が困難と思われた研究成果の商業利用に関して大きな進展があった。大学と企業が同じ目線で連携することで本事業の理念が、一層、広がると確信している。

5 人が変わる、大学が変わる、社会が変わる、の状況

現在の日本において、すべての社会活動において、閉塞感であふれている。このような状況になった原因を考えると、組織、個人の判断が、上部あるいは他人任せになっていることが大きな要因と考える。これは、大学内でも同じであり、本来行うべき、あるいは行いたい活動を、予算不足、環境の不備を理由にし、行動を起こしていない。このような、個人、あるいは組織が、自ら行動を起こすことの重要性を再認識することが、日本が変わるために、今、行うべきことと考えて進めてきた。

その具体的行動は、(1) フォトンテックイノベーションズ(株)(PTI)の設立と(2)東京大学量子科学連携機構(UTripl)での共同研究利用設備制度の設立である。

- (1) PTI は、有志 4 名による自己資金で設立した事業体であり、東京大学での研究成果の社会実装を、自己の責任で、外部資金を得ずに進めている。これは、Small Business Technology Transfer(SBTT)活動であり、ベンチャー投資を受けるまでのリスクを周囲の支援を受けつつも個人でとるものである。米国では、ベンチャー投資を受ける前の技術開発に、4000 億円もの国家予算が投入されているが、残念ながら、日本では、そのような施策はほとんど見られず、国が進めている SBIR (Small Business Innovative Research)制度の活動も、実効性は全くない。PTI での SBTT により、すでに、いくつかの事業が進められ、その収益を、個人の利益ではなく UTripl に還元すること目指している。
- (2) 大学には、多額のプロジェクト(PJ)費用が投入されているが、そのPJが終了すると研究装置の維持すらも容易ではない。PJの有無にかかわらず、研究活動を安定的に継続する体制を構築するために、実験装置等を適正な料金で他のPJや企業の研究活動に貸し出す制度である共同研究資料設備制度を開始した。今後、本制度による収益の安定化を図り、2025 年ごろまでには、2 億円から 3 億円の収入を目指している。この施策により、研究開発体制の自立化、さらには、日本で決定的に不足しているインキュベーション費用の確保が可能となり、PTI との活動と連携させ、日本の研究開発力の強化に貢献できる体制ができた。

当拠点の成果の一例として、PTI 社が手掛ける、(1)臓器透明化試薬 LUCID および検査顕微鏡の販売、(2)3D プリンタ RECILS による造形品(無線通信部品試作受注)が挙げられる。LUCID や RECILS は社会的インパクトの大きい製品である。LUCID では検体を切らずに全体を透明化して観察するため、癌細胞等病巣の見落としが皆無になる稀有な技術で、コロナウイルス用新薬開発にも有効であることがわかり、先ずはこの方面での活用を進めている。RECILS は、B5G/6G 向け導波管製造など、まさに今、世界の競争が激化している分野で日本が戦うためのキー技術。どちらの技術も今後「個を活かす持続可能な社会」を構築するために不可欠な“健康維持のための最先端医療技術の開発”“現代社会に必須の ICT 情報通信技術の発展”に繋がるものである。これらはウイズコロナ時代の医療やデジタル社会に向けての取り組みに大きく関係するため、今後“診断精度を飛躍的に向上させた、人々の健康的な生活を確保する社会”、そして、“多くの情報をいち早く伝送することが可能な高度デジタル化社会”が構築されていくはずである。

A イノベーション創出に向けた活動実績

1 目指すべき将来の姿の設定

本拠点では、「個を活かす持続可能な社会」を 10 年後のあるべき姿と設定した。そのような社会とは、個人に限らず、企業などの組織も含め、社会を構成しているすべてのメンバーが、社会課題を共有し、それぞれの考えやアイデアを発信・推進し、さらに、その活動を通して社会全体が刺激し合い、そして、お互いに尊重しあえる社会である。

具体的には、半導体の進化によりスマート電化が進み、ウェアブルデバイスにより、あらゆる情報が簡単に得られる社会である。ここでは、来るべき大容量情報化社会に向けて、Information and Communication Technology (ICT)、通信技術を活用したコミュニケーションが広く展開されるようになるだろう。ICT を活用したシステムやサービスが普及することで、社会インフラとして新たなイノベーションを生むことが期待される。スマートフォンはますます進化して身近で簡単に世界中の情報が手に入るため、教育の仕方やビックデータの活用の仕方が変わってくるだろう（現在では、コロナ禍の影響で在宅勤務が余儀なくされ、今後情報通信技術の広がりには当初予想を超えて加速することが期待される）。

ものづくり産業は、Internet of Things (IoT)、Industry 4.0、Industrial Network などのコンセプトを基に、「必要な物を、必要なだけ、必要な時に供給できるサプライチェーン」という、製造数、製造時間、コストの点で革新的な「ものづくり」が求められるようになっている。そして、このような大量生産から個別生産（mass-customization）へのシフトにより、従来とは異なる新しい製造技術の登場が求められてくる。個々に適合したものづくりである。また、ものづくりが個人ベースで簡単にできる世の中に変わってくることが予想される。3D プリンタに代表される Additive Manufacturing では、高価な金型製作費を解消でき、さらに保管費の最適化が可能になり、余分な材料の廃棄がなくなることでコスト節約、環境影響の低減を図れる。また、製作への迅速な対応が可能になったことで着想段階から納入まで最短数日で可能になる等サプライチェーンが変化していき、発展する高度情報通信社会と相まってグローバル規模の転換をしていくだろう。さらには、新たな設計手法の適用が可能になることにもなり、その結果、新たな発想の商品が展開してくることもなっている。

加えて、「個を活かす持続可能な社会」を想定する場合、“健康と安全”は避けては通れない課題である。来るべき少子高齢化社会では医療・介護費を中心に社会保障に関する給付と負担の間のアンバランスは一段と強まることとなる。さらには、高齢者が多くなれば、所得や資産はあっても医療・介護が受けられない事態を招きかねない（現在は、コロナ禍で医療崩壊の危機に面している）。また、進行する高齢化に対応するためには、すべての世代の人々が高齢社会での役割を担いながら、積極的に参画できる社会を構築することも必要にあるだろう。これは、社会に貢献できるよう、健康で居られる社会の実現を意味する。そのためには、先進医療・高度医療の開発が必要にある。さらには、低下する体力等を補える、支援装具等の仕組みの開発も必要になるだろう。

また、情報通信技術は、健康や医療に対しても多大な影響を与える。個人のより詳細な健康管理のみならず、離島や過疎地をはじめ医療空洞化が進んでいる場所への医療の提供（遠隔診療）、災害時の医療活動にも活用にも、ICT/IoT 技術は不可欠となる。ウェアラブル端末を用いて、心拍数をはじめとする各種数値のモニタリングやビッグデータ活用による AI（人工知能）と医療の融合も、急速に展開していくだろう。特に、with コロナの世界では、遠隔医療はますます重要性が増し、それに加え、昨今、社会課題となっている地域格差の是正のためにも重要な課題である。

これらを実現する基幹技術として、本拠点では“レーザー技術”を取り上げた。

この 50 年、レーザー技術は大きく進歩し、光通信、レーザー加工など様々な産業が生まれてきた。レーザー光は、コヒーレントな光であるため、微小領域に集中させることができ、 $10^{15} \sim 10^{16}$ W/cm² という超高強度の光の場を実現することができる。このような超高密度の光は、金属でさえも切断することができ、任意の形状を高速に作る事が可能である。また、この特徴は、3D プリンタなどにも応用され、レーザーは、“Customization”を特徴とする個別生産製造技術を実現する上で不可欠な道具となっている。それだけでなく、モノを観察する上でも、光は必須な技術であり、科学技術の世界（見る）でも、医療の世界（診る）でも最も重要な技術のひとつである。

A イノベーション創出に向けた活動実績

1 目指すべき将来の姿の設定

本拠点は、レーザー物理、光物性物理、理論物理の分野で、世界的にもトップクラスの研究者たちで構成する研究チームである。メンバーが各々培ってきた見識や経験を活かし、様々な組織、個人、世代の枠を超えた「知の協創プラットフォーム」を構築し、グローバルな変革を加速する製造技術開発を展開する。また、レーザー技術は、工業的な革新をもたらすだけでなく、医療における診断、治療などの幅広い応用においても、日本のプレゼンスを高め、新たな産業の創出、そして優れた社会を生み出すことが期待できるものである。ここではさらに、日本の丁寧さ・繊細さと学術的な裏付けとを融合し、国際競争力の高い技術をたゆまなく生み出し、産業、医療等幅広い分野で我が国の継続的な発展に貢献することを目指している。

また、本PJを推進する中で、大学自体が変わる必要性が強く認識された。具体的には、研究活動を継続的に発展させるために、学内外連携の構築、自立化の仕組みが必須で、更に、大学が中核となって学术界、産業界のみならず行政とも強いタイアップを仕組みが必須である。自らの「目指すべき将来の姿」は、大学が変化し続けられる仕組みを内在させることである。



図 A1-1 目指すべき将来のイメージ図：それぞれの個の可能性を最大化し、全員が参画できる社会の実現を目指す。そして、その実現のために、健康の維持やハンディーキャップの克服、すべての人、モノがネットワークでつながり、情報格差のない社会を実現し、さらに、産業技術として、新しい技術やコンセプトを提案・実現する。

A イノベーション創出に向けた活動実績

2 目指すべき将来の姿からのバックキャスト

本拠点では、10年後の目指す社会として「個を活かす持続可能な社会」を設定し、バックキャストを行った。このような社会を作るために取り組むべき内容として、様々な課題が挙げられ、さらに、それらが複雑に絡み合っている。ここでは、“個”とそれを取り巻く“環境”の二つの要素にブレイクダウンし、バックキャストを行った。

“個”について考えると、各個人の能力、可能性が最大限に生かされることが理想である。それを実現する為には、個々が健康で、また、新たな試みを積極的に挑戦できる環境が整っていることが求められる。さらに、社会全体がそのような前向きな世の中になるためには、単に、健常者だけでなく、健康や年齢にハンディーキャップを背負った人にも、それぞれに合った挑戦にチャレンジする機会が得られることも求められる。このように健常者、ハンディーキャップを持った人、すべてが分け隔てなく活躍できる“全員参加型社会”という理想的な社会の実現には、非常に長期の時間が必要ではあるが、いま、5～10 数年という時間スケールで我々が行えることを提案し、実施する必要がある。

また、我々を取りまく“環境”を考えると、自然環境、社会環境等、様々な環境があり、それらも独立ではなく、お互いに深く関係しあっている。自然環境をみても、公害の程度こそ改善しているが、地球温暖化の進行による気候変動が極大化し、災害の発生率の上昇、想定外と言われる甚大な災害の発生頻度が急増している。この問題の一つの解決策としてCO₂排出削減があり、その取り組みが世界中の研究機関や業界で行われている。

このような背景のもと、図 A2-1 にバックキャストのプロセスを示す。多種多様な課題が抽出され、そのすべてに対応することは困難である。そのため、抽出された課題を

- (1) 個を「活かす」、個を「生かす」
 - (2) 高度情報通信社会への技術革新、
 - (3) 個別大量生産技術と環境問題、
- に再整理し、再度、バックキャスト（二段階バックキャスト）することとした。

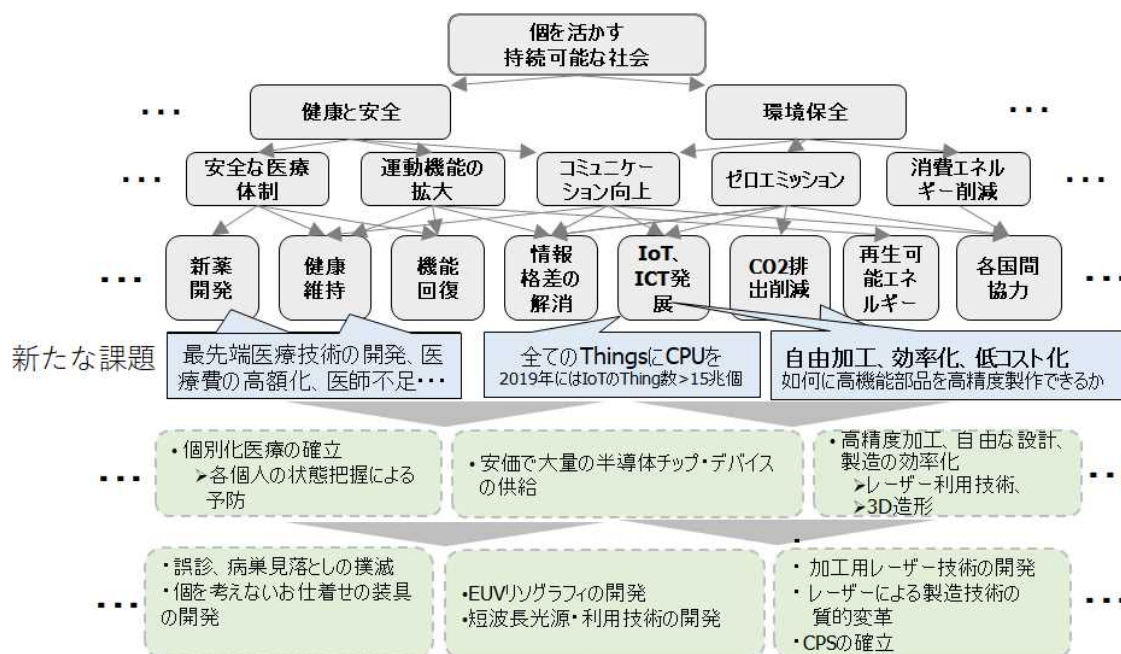


図 A2-1. 2 段階のバックキャスト

A イノベーション創出に向けた活動実績

2 目指すべき将来の姿からのバックキャスト

(1) 個を「活かす」、個を「生かす」

本項目では、すべての人が健康で、また、身体的ハンディーキャップを持った人にも活動の自由を与えられる世界を描いた。そして健常者であっても、健康であり続けられるために、何をすべきかをバックキャストした。さらに、ここでは、医療技術の中でも病理診断にフォーカスした。現状の病理診断では、

(a) 現在の病理診断は、切片切り出し法の為に、“誤診、病巣見落”の可能性がある、

(b) 地方では病理医そのものが減少し、地域格差が顕在化している、

という問題がある。これを解決する方策をバックキャストし、病理標本を丸ごと3次元デジタルイメージ化することを考えた。これにより、病変見落としをなくすることができ、さらに遠隔診断が可能となり地域格差を是正することができる。更に、病理医の負荷低減に関してバックキャストし、AIの導入が課題解決に大きく貢献できると考えた。

このようにバックキャストの繰り返しにより、臓器透明化技術の開発を加速することとした。この技術は、現在では新薬開発サポートに至るまでに来ており、今後さらに病理診断への適用が想定された。更に踏み込んだバックキャストを行うと、3次元イメージングに必須の顕微鏡が非常に高価で、本技術の普及に障害であることが分かった。その解決策とし、安価な3次元顕微鏡の開発が必須と考え、光シート顕微鏡の提案と実現を進めることとした。

(2) 高度情報社会への技術革新

IoTを加速した世界では、すべてのモノが、他のモノと通信し、それぞれが自律的に判断、行動する世界となるだろう。そのような世界を実現するためには、すべてのモノにCPUの搭載が必要となる。そして、今、行うべき課題をバックキャストすると、大容量で、さらに省エネ型の半導体デバイスが大量に必要となり、実現のためにEUVリソグラフィが不可欠となる。EUVリソ技術は、1990年頃から研究開発が行われてきた。しかし、本PJ開始時点では、多くの技術者はその実現を疑っていた。しかし、今後の半導体需要の増加を考えると、EUVリソは確実に必要となると予想し、半導体露光装置用光源メーカーであるギガフォトン社を支援する形で開始した。現在では、EUVリソが半導体製造の中で主流になりつつあり、先駆的な活動となった。

また、情報通信技術のさらなる高度化が求められており、その一つとして無線通信のキャリア周波数をより高い周波数帯に移行することが求められている。そして次世代携帯電話方式であるBeyond 5G/6Gでは、100 GHzを超えるさらにサブミリ波帯の電磁波が利用されることが予想される。この想定から今行うべき研究をバックキャストすると、サブミリ波帯の電磁波デバイスの技術レベルが未達で、その解決を進める必要性を抽出した。その代表が導波管である。サブミリ波帯導波管は、非常に高度な作製技術が必要で、300 GHzを越える周波数帯での導波管作製は、限られた企業しか対応できず、さらにそのほとんど海外企業である。マーケティング活動の中で、この分野での基礎となる技術が日本では立ち遅れていることもわかり、その底上げとして、3Dプリンタを活用したサブミリ波帯導波管作製技術を提案し、その加速を進めることとした。我々の提案が実現すれば、世界のトップ技術としてこの分野の進展に貢献することができる。

(3) 個別大量生産技術と環境問題

気候変動は、我々に直面した最も大きな社会問題の一つである。その解決策として、CO₂排出量の削減が最重要課題となっている。この課題を解決するためには、これまで確立した材料や加工方法で消費されるエネルギーを抜本的に見直す必要がある。この観点から、バックキャストを行い、製品コストを最優先としているために画一的な製品の大量生産から、真に必要なとされる個別製品を必要量生産できる産業技術への転換が必要と考えた。これらの変革を実現する手段として、個別生産を得意とするレーザー加工技術の活用が最も有効な手段と考えた。しかし、現在のレーザー加工は、既存の大出力レーザーを用いられているが、本来ならば、被加工材料に最適なレーザーを用いることで、加工時間の短縮、消費エネルギーの大幅な短縮が

A イノベーション創出に向けた活動実績

2 目指すべき将来の姿からのバックキャストिंग

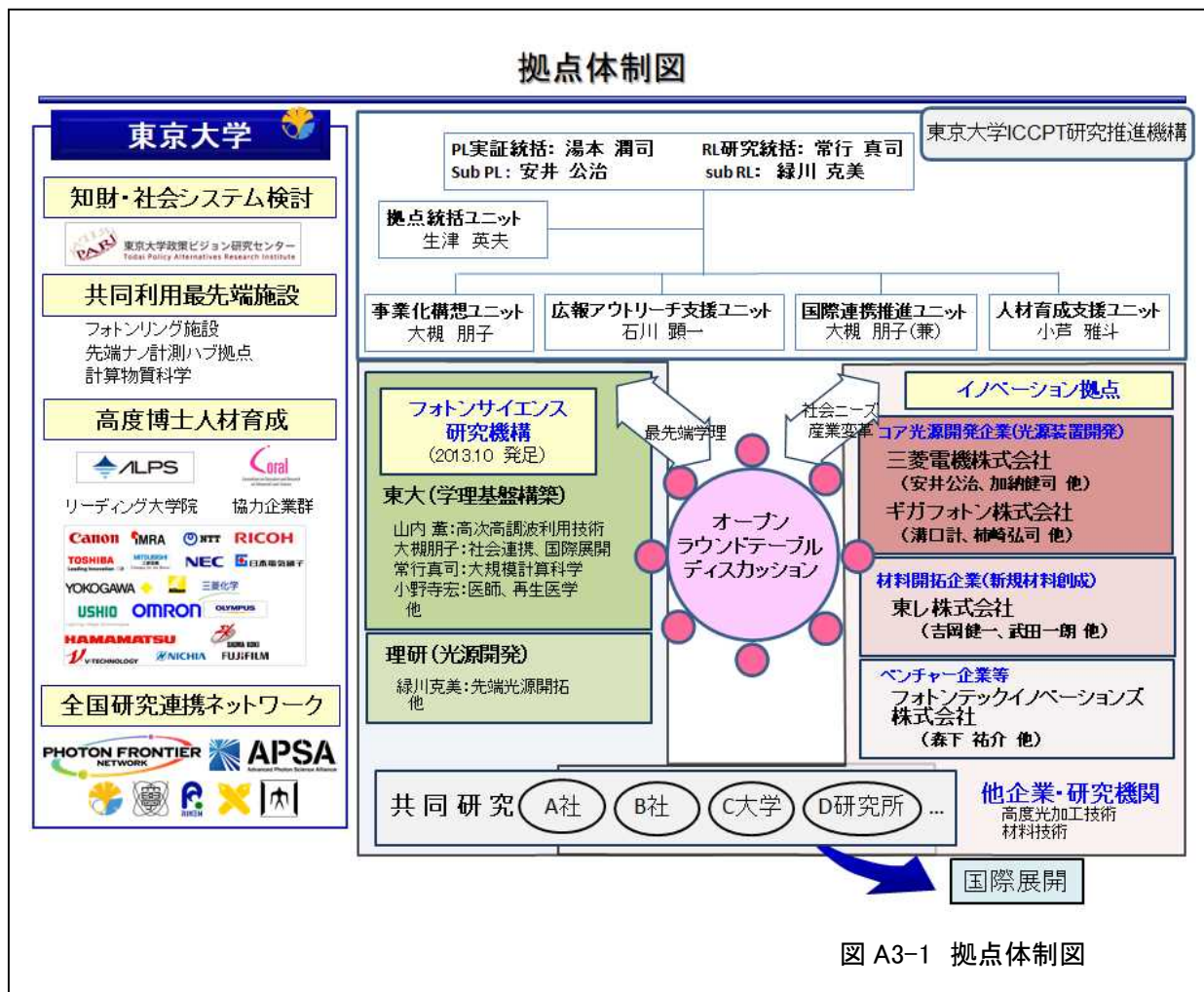
図られるべきである。その課題を解決するために、加工に必要となるエネルギーを低減し、更に、加工品質も向上させるレーザー加工技術が必須とバックキャストした。しかし、レーザー加工では、材料特性、レーザー特性などのパラメータが非常に多く、最適な加工条件を見つけることが非常に難しい。それを解決するために、再度バックキャストを行い、デジタル技術、AI 技術の活用を考え、2030 年ごろまでに AI 型レーザー加工シミュレータの開発を目指すこととし、他 PJ での活動が必須と考え、NEDO、SIP、Q-LEAP での活動に発展させた。

具体的には、高速、高品質加工が可能な UV レーザー加工システムを実装することとし、幅広い産業応用が期待されながら難加工材料とされてきた炭素繊維強化プラスチック(CFRP)およびガラス、サファイアの高速・高精度レーザー加工を目標とした。

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

3.1 拠点体制



東京大学を中核機関とし、参画機関に理化学研究所、三菱電機(株)、ギガフォトン(株)、東レ(株)を開始し、また、2018 年からは ICCPT の活動の中で設立したフォトンテックイノベーションズ(株)を加えた体制とした。研究サポートとなる国研、装置メーカーおよび材料メーカーを配する体制を構え、毎月実施される拠点会議にて、その方向性を確認しながら活動を行ってきた。拠点活動の源泉となる知と人材の循環を支えるオープンラウンドディスカッションテーブルにおいては、参画するすべての機関の参加のもと、産業課題に立脚した課題の抽出とその解決に向けた議論を進める場として活動を行った。

拠点内運営組織として、研究開発推進戦略会議を設置している。トップには全体を統括する組織として、全体のリーダーシップを担う実証統括 (PL)、研究サイドからのリーダーシップを担う研究統括 (RL)、およびそのサポートとして sub-PL を産業界から、sub-RL を研究機関から任命している。

このトップ組織をサポートするためのものとして、拠点統括ユニットがある。拠点統括ユニットは、各ユニットを連携させ、拠点に所属する研究者および来訪滞在する産学の研究者の活動支援、研究者間の連携支援、知財の管理運営、拠点外部との情報管理、シーズとニーズの探索とマッチングの支援、広報活動等を行う。さらには、本拠点の活動全体の進捗を管理し、運営を円滑に行う為に、事業化構想ユニット、広報アウトリーチ支援ユニット、国際連携推進ユニット、人

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

材育成支援ユニットを設置している。

この上位組織である研究開発推進戦略会議の下に、大学、国立研究機関としての理研、産業界からのコア光源開発企業、材料開発企業が参画して拠点を形成している。

また、拠点活動の源泉となる知と人材の循環を支えるため、オープンテーブルラウンドディスカッションを基本として参画機関・企業の参加のもと、産業課題に立脚した課題の抽出とその解決に向けた議論を進めている。

自立的なプラットフォームの具体的な運営は、光量子科学連携機構 (UTokyo Research Institute for Photon Science and Laser Technology, UTripI) と TACMI コンソーシアムを中心として進めている。ここでは、物理、化学、医学、機械等に精通した研究者を揃え、様々な分野で相乗効果を生み出す研究開発の実現を可能としている。

UTripI は、多様な業種の企業からも参画を得ながら「フォトンサイエンス知の協創プラットフォーム」の構築を目指すため、理学系研究科、工学系研究科、物性研究所の関連研究施設の連携を強固にするために設立した (図 A3-2)。



3部局連携での活動

- 光科学関連研究分野の連携による研究の加速と医、薬、農など異分野との**学術連携構築**
- 他大学、国研、産業界を巻き込んだ**大型プロジェクトの中核**としての求心力の構築とその連携を活用した新規プロジェクトの企画・実施
- 海外の研究機関/企業との**国際連携構築**
- 多様な組織で構成されるプロジェクトを活用した**若手研究者の育成**

図 A3-2. 光量子科学連携機構 UTripI

UTripI では、COI 活動をベースとし

- (1) レーザー加工に代表される複数のプロジェクト展開と TACMI コンソーシアムによる学術と産業技術との連携強化
 - (2) 研究室で生まれたアイデアを社会実装につなげる支援する活動「若手研究者のチャレンジを支えるエコシステム」の実現
 - (3) UTripI での研究活動を安定化、持続化させる施策の検討とその施策の実行
- を3つの柱を進めてきた。特に、(3)では、共同研究利用設備制度を発足させた。これにより、多くの研究設備を学内外組織へ有料での貸出が可能となり、UTripI の財政的基盤の安定化が大きく

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

向上することが期待される。また、研究資産を大学にとどまらずに民間企業等の研究開発力の向上にも貢献できる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

3.2 参画機関 ※一覧は別紙3「参画機関一覧」参照

国立大学法人 東京大学 【中核機関】

国立研究開発法人 理化学研究所

三菱電機株式会社

ギガフォトン株式会社

東レ株式会社

フォトンテックイノベーションズ株式会社

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

3.3 拠点のマネジメント体制と仕組み・実績

(1) 拠点マネジメント体制

本拠点の運営は、「拠点体制」の図 A3-1 に従って実施している。

ここでは、拠点内運営組織としての研究開発推進戦略会議がマネジメントの中核となる。実証および社会実装サイドからのリーダーシップを担う実証統括（PL が担当）と研究サイドからのリーダーシップを担う研究統括（RL が担当）が、産学双方の知見を活かし、本拠点で推進する新しい産学連携スキームを実践する。また、sub-PL を産業界から、sub-RL を研究機関から任命し、拠点運営統括ユニットとともに拠点運営の方向性を確認することとしている。さらに、各参画機関からの代表者をメンバーとして運営にあたることとしている。

決定された運営内容については、オープンテーブルラウンドディスカッションを基にした月 1 回開催の拠点会議の中で周知・徹底することとしている。さらに拠点会議では、大学からは開発進捗状況以外にも開発に必要な基礎学問や学会状況を、参画企業である産業界からは最新の産業情報を紹介しあうこととしており、効率良く COI の研究開発が進められるようにしている。

具体的な研究開発の進め方に関しては、特に方向性の確認が必要と判断した場合には、2 週間ごとにミーティング（フォーカスステージ）を実施して内容確認とともに進捗管理を行っている。

さらには、産学協創推進本部と協力して社会実装のあり方について議論を進めている。産学協創推進本部は、産学共同研究の推進、知的財産の取り扱い、大学発ベンチャーの支援を主な活動としている。本組織では、ベンチャービジネス等産学連携に関する実績があり、これまで培われた専門的なノウハウを活用して、本 COI で生まれてくる成果を事業化に結び付けるための有効な助言をしてくれることになる。また、東京大学エッジキャピタル（UTECH; 投資支援を行うベンチャーキャピタル）、東京大学 TLO（知財の権利化、ライセンス業務を行う技術移転機関）とともに三者連携体制を構築しており、積極的に事業化・起業支援を行うことになっている。また、東大関連ベンチャーを支援するベンチャーキャピタル投資会社である東京大学協創プラットフォーム開発株式会社（IPC）と連携し、成果を社会実装するベンチャーの創出およびその育成を検討する。なお、産学協創推進本部からは知財戦略マネジメント・知財管理についても有効且つ積極的な支援を受けることが出来、最終的には知財創造サイクルの活性化に役立つものと期待できる。

COI における活動を知財確保および保護の観点から3つのステージに分けて行うこととしている（図 A3-3）。

A: オープンステージ

COI に正式参加する企業すべてがづくことができるラウンドテーブルを設け、そこでの議論を共有する。未来社会ニーズについてのブレインストーミングなどを行う。また先端科学で議論されている学術および技術的情報を共有する。ここで議論された課題について、概要を一般公開し、シーズ・ニーズの掘り起こしに役立てる。さらに、TACMI コンソーシアムと連携し、次世代レーザー加工技術の共同研究開発を進めていくと共に、市場ニーズを的確に把握した結果を実際の研究開発活動に反映させている。

B: フォーカスステージ

特定の技術課題や開発課題について、限定されたメンバーによる、調査研究および開発を行う。研究項目等については拠点内で公開とする。

C: クローズドステージ

特定の技術課題や開発課題について、非公開を原則として研究開発を行う。本課題に関して、個別の共同研究契約を締結する。研究題目を適宜定め、題目のみを拠点内で公開とする。

プロジェクトリーダー・研究リーダーは守秘義務のもとで、上記のすべてのステージの活動を把握できる体制としている。その情報をもとに、必要に応じて拠点内のプロジェクトの連携調整を図っている。すなわち、オープンステージ段階では産学間ではステージ内活動に係る全体的な共同研究契約、秘密保持

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

契約は締結するが、COI メンバー全員が広く議論するとともに産業界の意見を聞き入れることに重きを置くこととしている。逆に、フォーカスステージやクローズドステージの段階に入ると、参画メンバーを限定して議論内容が他に漏れないことを留意しながら限定した内容についてスピードを重視した活動することになる。これらのステージを運用するために必要な秘密保持契約等を充実させて該当企業の秘密情報の漏洩を防止することにより、相互信頼性を高めた運営を実施することとしている。

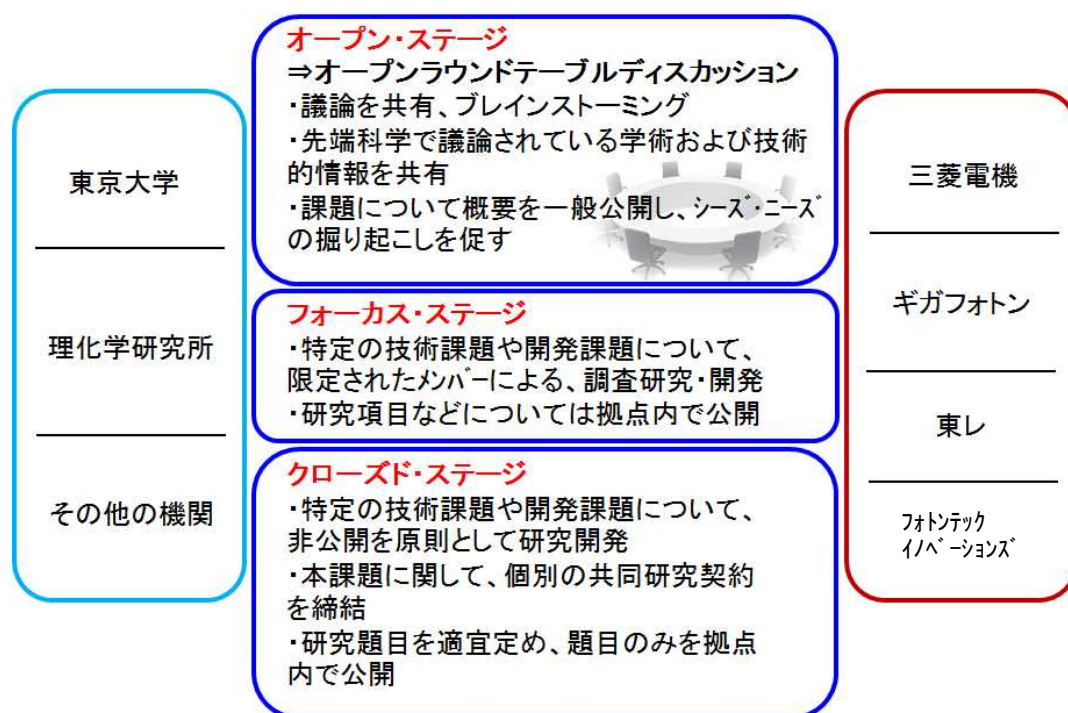


図 A3-3. R&D 戦略の進め方

本 COI 拠点では長期的視野に立ち、幅広い成果を生み出すための光拠点（産学協創プラットフォーム）作りを目指している。これは、連続的な成果創出となる基盤体制を築くことを意味しており、そのために原理探求のための基礎的研究強化にも力を裂いている。加えて、物理、化学、医学、機械等に精通した研究者を取り揃え、産業界での問題点をあらゆる角度から検証、解決することが出来るように整備している。その結果いろいろな産業の受け皿となることが可能となり、加えてオープンステージでの情報共有の仕組みを最大限に利用することにより、業種を超え、分野を超えた連携を進めることが出来る。

教育面では、若手学生を積極的にオープンステージ段階から参画させることにより、社会（企業）からのニーズを実感させるとともに研究・開発の方向性について理解させながら実験させていく。そして、理学と工学の広い分野を俯瞰し、知識、経験を幅広く展開できる人材を育成し、社会に提供することを心掛けている。

また、企業研究員の大学での受け入れを積極的に行い、大学で創出された成果が企業内で実用化として花開き、大きく活用されるように体制作りを行っている。

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

(2) PL、RL による拠点マネジメントの仕組み・手法と実績等

研究計画に関しては、拠点会議での進捗管理を実施するとともに、研究推進機構内での議論の基、予算配分も含めて優先度（選択と集中）を決定している。各研究開発テーマの進捗は、毎月の拠点会議や個別ミーティング（クローズドステージ）にて担当者から報告され、その内容に従って、計画の修正・変更を適宜行った。特に、社会実装に近いテーマに関しては、進捗を細かく管理するようにしている。この観点から、まずは、EUV リソグラフィの実用化に際して不可欠となる多層膜ミラーの平面度測定用テーブルトップ型検査光源の開発に関しては、開発を終了した段階の 2017 年度に、ギガフotonへの技術移管をすべて完了した。

一方、次に社会実装に近い「3D プリンティング技術／RECILS」と臓器透明化技術／LUCID」に関しては現有リソースを集中して取り組ませており、それに伴い、社会実装を担当するベンチャー企業としてフォトンテックイノベーションズ(株)を設立した。現在は、設立したベンチャー企業に技術移転を終了し、商品の販売を開始した段階にある。商品化のターゲットも、臓器透明化試薬 LUCID の販売と、3D プリンタ RECILS を用いた造形品販売（特に、Beyond 5G、6G の無線技術用の導波管分野での導波管を始めとする短波長通信コポーネント）に狙いを定めており、取り組みを強化するように指導している。また、ベンチャー設立後もバックアップは不可欠であるため、量産可能レベルの装置としての再現性、安定性、強靱性、安全性等を向上させた装置作り等、完成度のレベルアップに向けてベンチャー企業に協力していく方針である。

CFRP のレーザー加工の社会実装に関しては、NEDO や TACMI コンソーシアムを有効利用することにより、高精度・高速レーザー加工に不可欠な大出力 UV レーザー加工機を実現させた。それとともに、社会実装への第一目標を、当初「航空機用の CFRP 板のレーザー加工適用」としていたが、航空機用 CFRP 部材組み立て技術の変化により計画を見直し、幅広の未硬化プリプレグを幅 1/8～1/2 インチに裁断して製造する成形材料スリットテープの加工を第一目標に変更した。従来の機械的な裁断では繊維毛羽や堆積樹脂が発生するため、欠点確認のための幾重もの品質保証体制が負荷となっている。高精度な加工が期待できる UV レーザー加工システムを実装することで、求められる高幅精度 0.1mm 未満を実現しつつ、欠点レスの裁断が可能となれば、品質保証に要求されるコストを大幅に低減できる可能性がある。

また、装置の外販よりもサービスを提供することにより早期に学会や世の中に貢献できると判断した研究開発項目に関しては、社会実装先を「産学共同利用」とすることを提案した。対象は、①真空紫外から軟 X 線領域での計測するフォトンリング（研究開発テーマ 3-a）、②非破壊の軟 X 線顕微計測可能な顕微分光測定（研究開発テーマ 3-b）、③各種材料の光学特性を精密計測するダブルスリット位相敏感高精度測定法技術（研究開発テーマ 3-f）等である。特に、ダブルスリット技術は、EUV 領域における光学特性の高感度高精度測定が可能な技術として東京大学内で基礎研究を行っていたが、最先端半導体製造技術である EUV リソグラフィによるナノパターン形成が実用化まで到達し、それに関連した材料の EUV 領域での日常的な計測・評価が不可欠となった。この情報をいち早く察知し、この「EUV 領域における光学特性の位相敏感高精度測定」を COI のテーマとして取り上げた。現在、共同研究先の半導体リソグラフィ材料メーカーが評価を行い、その有効性を確認した段階にある。

TACMI コンソーシアムは、「光ものづくり」に関連する光源、材料、加工等多くの知見を集結し、協調領域を形成することにより、IoT 時代に対応した新たな光ものづくりの仕組みを、産業界とともに創り上げていくことを目的としている。COI での成果を基に設立した本コンソーシアムは、当初は苦労したが、既に 80 を超える法人・組織が活動している。レーザー製造メーカーはもとより、デバイスメーカーも参画しており、今後さらに社会実装への間口が広がることが期待できる。COI から波及した他プログラムの育成は、社会実装への窓口だけでなく、今後の展開への研究資金の確保にも繋がることになるため、重要と捉えている。

それを管理運営する組織として、前述の様に、光量子科学連携研究機構 UTripl を設立している。部局相当組織であり、本連携研究機構は、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構、

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

工学系研究科附属光量子科学研究センター、物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センターの3組織を中心として構成し、各組織間の連携による学術研究、産学連携を加速させると共に、多様な組織から人材が集積している特徴を生かし、将来の中核人材育成を推進する「フォトンサイエンス知の協創プラットフォーム」の実現を目指すものである。今後様々な大型プロジェクトの参画も UTripl が企画・運営していくことになる。

また、地理的に離れたロケーションに設置され、さらに技術仕様の異なるレーザー加工装置をネットワークで接続し、多点での協働によって距離の問題を克服する取り組みなども進めた。これらの活動は、組織、技術ともに新しい「デジタルアンダーワンルーフ」の取り組みを推進したものである。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.1 難加工性材料の光加工技術開拓

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	湯本潤司 東京大学理学系研究科附属フotonサイエンス研究機構・特任研究員
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	杉岡幸次 理化学研究所、先端レーザー加工研究チームリーダー
研究開発実施期間：	2013 年 4 月～2022 年 3 月
参画機関：	三菱電機株式会社、ギガフoton株式会社、東レ株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

本課題では、大量生産、大量消費の時代から脱却し、個に対応した製品を提供することで、個々の満足感、活力を高め、更に資源の有効活用、省エネを通して環境にも優しい社会の実現を目指している。特に、これまで、加工の難しい材料をターゲットとし、レーザー加工による課題の解決を進めてきた。さらに、レーザー加工を単に COI 活動として対応するだけでなく、より多くの研究者、組織からの参画を得るために NEDO、SIP、Q-LEAP のプロジェクトを発足させ、加工対象材料およびレーザー技術の多様化が必要であることを認識し、レーザー加工データベースの構築、さらにそれを活用したレーザー加工シミュレータの実現を進めている。ここでは、レーザー加工の難しい、CFRP、ガラス等の透明材料をターゲットとし、その産業技術への展開を進めて、以降、CFRP、ガラス、サファイアおよびレーザー加工痕評価技術、レーザー加工用深紫外（DUV）波長域のレーザー開発、更には、レーザー加工過程の物理について報告する。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

1-a CFRP の切断

これまで CFRP レーザー加工について研究開発を進めてきたが、非常に高速加工でありながら、1 cm 以上の厚い CFRP 板材の切断を行うレーザー加工は非常に困難であると判断し、2020 年度より CFRP 製造プロセスで用いられている厚さ 0.2 mm 程度のプリプレグのレーザー加工に着手した。現在、NEDO で開発した、波長 266 nm、出力 8 W、パルス幅 10 ps のレーザーを用いて加工特性の評価を進めているが、現時点では、このレーザーの優位性は確認されていない。これまでの成果は（4）で述べるが、2021 年度中に技術課題解決の可否判断を行い、その後、2024 年の社会実装に向けて東レと共に検討を進める。なお、2022 年度以降は、UTripl 並びに TACMI で研究開発を継続する。

1-b ガラスの自由加工技術

ガラスの自由加工技術で開発した手法は、加工の自由度が高く、異なる形状・機能のバイオチップを容易に作製できるといった点で、既存のバイオチップ作製技術にはない優位性を提供する。また用途に応じその都度設計・製造を行うことが容易で、カスタムメイドのバイオチップの作製に最適である。カスタムメイドのバイオチップは生物学分野の基礎研究に有用であり、大学や研究所で基礎研究を行う研究者への提供が想定される。簡単な構造のバイオチップであればすでに供給は可能であり、高機能化したものも 2～3 年後には供給可能である。また開発した手法により作製したマイクロ流体表面増強ラマン散乱（SERS）チップは、従来のチップより数桁感度の高い超高感度分析を実現した。ラマン分光器メーカーや SERS チップ作製メーカーとの共同開発により、2～3 年後の実用化が期待される。一方 3 次元マイクロ流体構造をガラス内部へ構築する技術は、ガラス基板の穴あけや切断用途にも応用可能であり、数年後の実用化を目指し（株）レ

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

ーザーシステムと共同研究を行っている。

また、サファイアのレーザー加工は、非常に加工速度が遅いという問題があり、これまで、全く実用の域に達していなかった。衛星による宇宙背景放射（CMB）（50 GHz～200 GHz）の観測を目指している交際プロジェクト LiteBIRD では、CMB の偏光特性の測定に使用する直径 45 cm のサファイアの表面にモスアイ構造の作製を計画し、ドイツの企業に依頼したが、全く製造の見込みが立たず、2015 年に ICCPT に相談があった。サファイアのレーザー加工は、非常に加工速度が遅いという問題があり、これまで、全く実用の域に達していなかったが、LiteBIRD プロジェクトからの相談が契機となり研究開発を開始し、2019 年の国際技術コンペにおいて第一位で採用された。現時点では、科学衛星の打ち上げ時期は未定であるが、宇宙の誕生の理解に大きく貢献すると期待している。また、成果は、米国 Green Bank 天文台の Mustang2 望遠鏡に採用された。この技術は、シリコンにも提要され、シリコン表面へのモスアイ構造の作製にも成功し、ミリ波帯、THz 帯での無反射構造の作製は、本拠点が世界のトップであり、この成果を PTI からの商品化を進める。

1-c 加工用光源開発

エキシマレーザーをベースとした 100W 級の DUV パルスレーザー光源の実用化をめざした研究開発を開始し、現在、性能実証装置を TACMI コンソーシアムのクリーンルームに導入し、さまざまなユーザーアプリケーションの加工サンプルのデモ中。本技術は、機械加工が非常に難しい材料（硬度が高い）への適用を考えおり、その市場は大きくなりつつあり、その市場性を見極める。

1-d 加工過程のモデル構築

本テーマでは、過渡反射率と誘電率の時間変化をシミュレーションするための解析方法と理論的枠組みを構築し、また、その計測装置である時間分解エリプソメトリ計測装置を、年度内に完成させる。その後、1～2 年を目途に時間分解過渡反射およびエリプソメトリ計測サービスを提供する。

1-e レーザー加工における反応詳細の解明

上記 2 課題に関しては、Q-LEAP と共に、レーザー加工データベースの構築に貢献している。本データベースでは、集積されたデータの量と質が課題であるが、この課題を、NEDO、SIP のプロジェクトで対応し、更に、その膨大なデータを活用した AI シミュレータを 2028 年の実現を目指している。このようなレーザー加工に特化したデータベースの構築、と AI シミュレータは、他にはない。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

1-a CFRP の切断

CFRP のレーザー加工は、当初、厚さ数 mm 以上の熱硬化された CFRP のレーザー加工技術の開発を目指し、これまでに熱損傷がほとんどない加工条件が存在することを見出してきた。しかし、その高速化が難しく、現在は、厚さ 0.2 mm のプリプレグをターゲットとして検討を進めている。2021 年度中に課題抽出を完了させ、その後、UTripl、TACMI での研究開発を継続し、2024 年の社会実装を目指す。

1-b ガラスの自由加工技術

これまでに、一般的にバイオチップに用いられる寸法（チャネル幅 50 μm 、チャネル長さ 1 mm）の 3 次元マイクロ流体構造をガラス内部へ構築する技術を開発し、また、2 バイオチップを高機能化するために、ガラス 3 次元マイクロ流体構造内部への金属配線技術（金属線幅：チャネル幅の 1/10 (5 μm) 以下、）ならびにポリマー 3 次元マイクロ・ナノ構造体集積化技術を開発した（解

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

像度：ガラス加工の 1/50 ($1\ \mu\text{m}$) 以下)。研究期間終了時まで、開発した技術の有用性を実証するために、実用的な機能デバイスを作製する（細胞の動作制御用エレクトロフルイディクス、マイクロミキサーを集積化したバイオチップ（ミキシング効率 80%以上）、生細胞検出・計数バイオチップ（検出率 90%以上）、がん細胞転移観察用バイオチップ等）。

また、サファイアの高モスアイ構造では、50 GHz から 300 GHz の電磁波に対する反射防止膜作製技術は、一応目途が付き、今後、衛星搭載に向け振動試験、衝撃試験等を行う。また、シリコンの高モスアイ構造では、0.5 THz から 2 THz の電磁波領域で、反射防止膜がない場合の透過率は約 50%であるが、本成果により透過率が 98%以上に改善できることが確認できた。今後、サファイア、シリコンの高モスアイ構造の PTI からの販売を実現に向けて加速させる。

1-c 加工用光源開発

DUV 領域で 100W 級のパルスレーザー製品は存在していない。一方、CMC 等のセラミック複合材料のレーザー加工については、市場から大きな期待が寄せられており、本技術の装置化により新たな産業技術として展開が可能となる。

1-d 加工過程のモデル構築

1-e レーザー加工における反応詳細の解明

上記 2 テーマに関しては、Q-LEAP を主体として活動を継続する。

(4) 主な成果と達成状況

1-a CFRP の切断

CFRP のレーザー加工では、波長 258 nm のナノ秒パルスレーザー（出力 1 W）を用い、熱損傷の無いレーザー加工が可能であることを発見した。従来からの報告では、CO₂ レーザー（波長 10.6 μm ）あるいは、ファイバーレーザー（1030 nm）を用いた結果が報告されているが、いずれも、レーザー切断面から 100 μm ～200 μm の熱損傷領域（HAZ）が発生するが、本成果では 3 μm 以下となり、さらに、表面粗さも目標値である 3 μm 以下を達成した（図 A4-1-1）。また、本手法で切断した CFRP を引張り歪みに対するクラック密度を測定し、臨界歪みを評価した。その結果、図 A4-1-2 に示すように、本手法は、ダイヤモンドカッター加工とほぼ同程度で、他のレーザー加

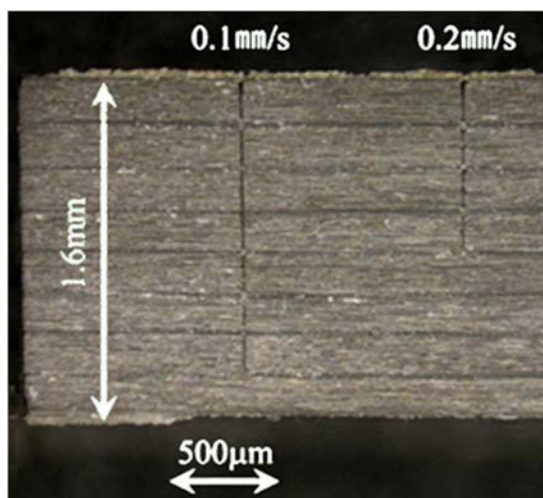


図 A4-1-1 厚さ 1.6 mm の CFRP のレーザー加工結果。熱損傷の無いレーザー加工を確認。

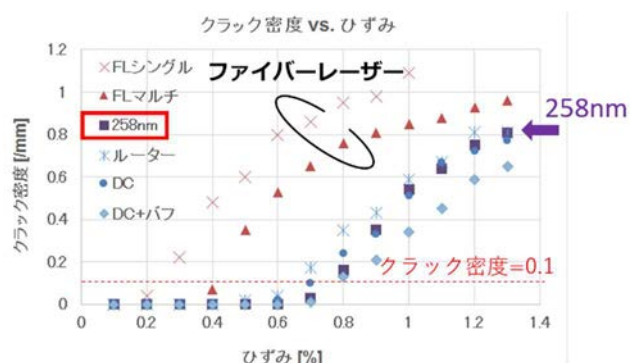


図 A4-1-2 258 nm レーザー、ファイバーレーザー（FL）、および機械加工で切断した CFRP の引っ張り歪みに対するクラック密度の変化。258 nm レーザーを用いた場合、他のレーザーよりも 2 倍程度引張り歪み耐性が高く、ダイヤモンドカッター切断（DC）と同程度であることが確認された。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

工と比較すると 2 倍程度良好であることが確認された。しかし、高速化に関しては、課題が残されており、現在、大出力レーザー（出力 8 W）を用いた研究を進めているが、目標の加工速度達成に至っていない。

1-b ガラスの自由加工技術

① **マイクロ流路** (3)に記述した達成目標は、マイルストーン通り全て達成した。特に生物学研究への応用を実証するため、開発した技術により生体内を模したバイオチップ（微小擬似生体チップ）の作製を行い、がん細胞がナノチャネル内を移動する様子を観察した。本成果は、がん細胞の転移メカニズム解明への展開が期待される。一方、ガラス 3 次元マイクロ流体構造作製技術に、金属配線技術および表面ナノ構造化技術を組み合わせ、極微量物質の超高感度分析を可能にするマイクロ流体 SERS チップの作製に応用した。本チップを用いることにより、SERS 分析において未踏の分析感度（10 アトモラー）を実現した（図 A4-1-3）。本技術は特許を出願済みであり、超高感度分析手法として 2 ～ 3 年後の実用化が期待される。

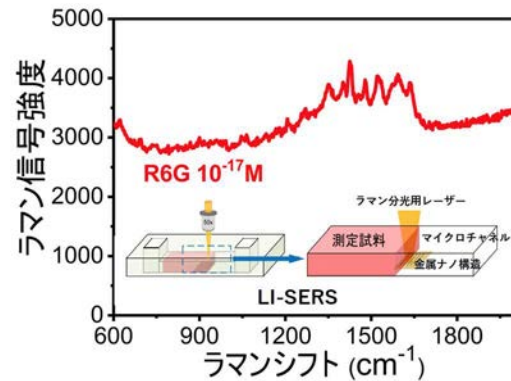


図 A4-1-3 マイクロ流体 SERS チップによりアトモラーセンシングの実現。

② **ビームプロファイラー** レーザー加工に用いる集光でのビームプロファイルを正確に計測することは、レーザー光を用いた精密造形や、レーザー加工の微視的メカニズム解明の研究を進めるための高精度なデータを取得する上で極めて重要である。しかしながら、これまではレーザーの集光点でのビームプロファイルを直接計測する手法が存在しなかったため、多くの仮定のもとに集光ビームプロファイルを推定することしかできず、これがレーザー加工研究を進める上で大きな問題となっていた。この問題を解決するために我々は、レーザーの集光点でのビームプロファイルを直接計測する新手法の開発を行った。

市販のビームプロファイラーのピクセルサイズ（通常は約 20 mm）では分解能が不十分であるため、我々は、小型 PC キット Raspberry Pi 用に安価に市販されている CMOS カメラのピクセルサイズが 1.12 mm 四方と、非常に小さいことに着目した。この CMOS カメラのレンズとカラーフィルターを剥離してビームプロファイラーとして使用したところ（図 A4-1-4）、市販のビームプロファイラーよりもはるかに高い分解能でビーム内の強度分布を取得可能することに成功した（図 A4-1-4 (a), (b)）。これによって、レーザー加工におけるビームプロファイルを極めて精密に計測・制御することが可能になり、レーザー加工技術の進展に大きく貢献することができた。

この成果は、Communications Materials に 2021 年 3 月 29 日に発表した。その後、日刊工業新聞 4 月 2 日版で紹介され、また、レーザー加工学会誌から紹介記事執筆依頼（2022 年 6 月掲載予定）が来ている。今後、PTI での事業化を検討している。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

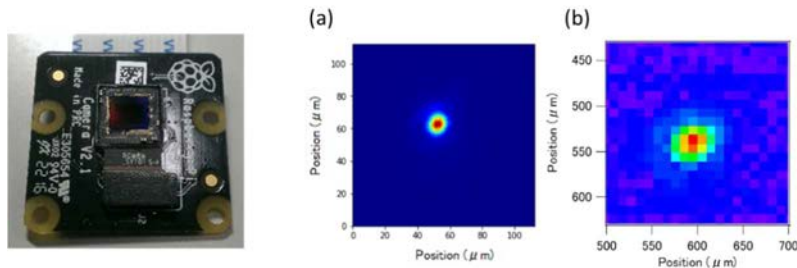


図 A4-1-4 自作したビームプロファイラーの外観写真(左)と 集光点におけるレーザー強度分布の測定結果 (a)開発したビームプロファイラーによる結果 (b)市販のビームプロファイラーによる結果

③ 誘電体モスアイ無反射構造の作製

Beyond 5G や電波天文学で重要な役割を果たす電磁波制御の基盤技術として、サブミリメートルオーダーのピラミッド構造がアレイ状に並んだモスアイ構造が挙げられる。旧来の加工方法ではこのような構造を作製することは困難であったが、我々はレーザー加工を用いることによって、大面積な誘電体モスアイ構造作製の技術確立することに成功した。波長 1030 nm、繰り返し周波数 75 kHz、パルス幅 290 fs、平均パワー 15 W、パルスエネルギー 200 μ J、スポット径 15.5 μ m のフェムト秒レーザーを適切な条件でサファイア表面に走査することにより、図 A4-1-5 (a) に示すようなモスアイ構造を作製することに成功した。作製したモスアイの高さは約 2.0 mm、ピッチは約 0.54 mm である。作製したモスアイ構造の、透過率スペクトルの測定結果とシミュレーション結果の比較を図 A4-1-5 (b) に示す。シミュレーションと実験は良く一致しており、特に 60

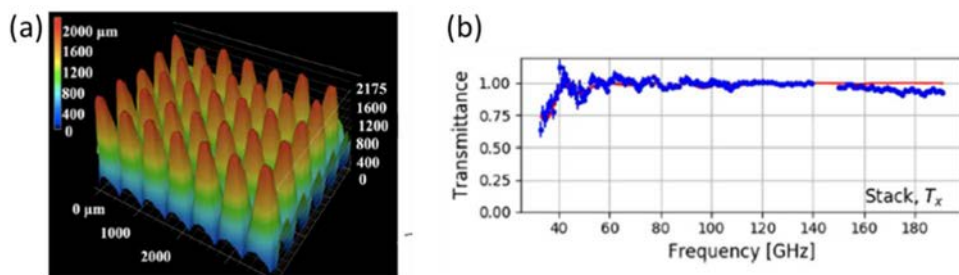


図 A4-1-5: (a) 作製したモスアイ構造のレーザー顕微鏡像 (b) 作製したモスアイ構造の透過率スペクトルの測定結果(青)とシミュレーション結果(赤)

GHz 以上の高周波領域で無反射特性が実現されていることが明らかになった。これらのモスアイ構造は、東京大学 IPMU との共同研究により、将来的に宇宙マイクロ波背景放射偏光観測用の小型人工衛星に搭載することが予定されている。また 2021 年に、アメリカの電波望遠鏡 (MUSTUNG2) へ実際に搭載され、運用が開始されている。

一方、この原理を応用して、さらに高周波の 1 THz 近傍での無反射構造をシリコン基板上に作製することにも成功している。このテラヘルツモスアイ構造と、テラヘルツ発生結晶を組み合わせ、高強度テラヘルツ光発生素子として販売することを計画中である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(5) 今後の課題と対応方針

1-a CFRP の切断

CFRP のレーザー加工に関しては、非常に狭い条件で熱損傷の無い状況が実現されることを初めて発見したが、その高速化については、まだ、研究を継続する必要がある。これに関しては、UTripl と TACMI で継続する。

1-b ガラスの自由加工技術

サファイアのモスアイ加工に関しては、2021 年度、米国の Green Bank 天文台にすでに採用され、2020 年代後半の科学衛星搭載に向け、最終選考で採択された。また、シリコンのモスアイ加工は、ほぼ完全な無反射構造が実現され、研究者から市場化の期待が非常に高く、その実現を PTI で進める。

1-c 加工用光源開発

レーザー加工用ハイブリッド型エキシマレーザーに関しては、まだ、最終形態に至っていないが、TACMI で研究を継続する。

1-d 加工過程のモデル構築

2021 年度末までに、時間分解エリプソメトリ計測のための集積型検出光学系を完成させ、時間分解エリプソメトリ計測装置を完成する。その後、1~2 年を目途に、計測サービスとして提供する。

1-e レーザー加工における反応詳細の解明

Q-LEAP、TACMI を中心として、レーザー加工データベースの構築、その活用として AI 型レーザー加工シミュレータの実現を目指す。

(6) その他特記事項

特になし

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.2 高度光造形・光改質

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	三尾典克 東京大学理学系研究科附属フotonサイエンス研究機構、教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	
研究開発実施期間：	2013 年 4 月～2022 年 3 月
参画機関：	東レ株式会社、フotonテックイノベーションズ株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

本拠点では“個を活かす持続可能な社会”を光技術により実現することをテーマとしているが、前述の研究開発課題①「レーザー加工」と共に、「光造形」、「光による改質」等も進めており、「レーザー加工」（切断）と本研究開発課題（形作り）を融合させ、様々なモノづくり技術の進展に寄与する。具体的には、下記のテーマを設定して開発を進めた。

- ②-a 3D プリンティング技術（東京大学、フotonテックイノベーションズ）
- ②-b 局所加熱利用（東京大学）
- ②-c CFRP の光改質（東京大学、東レ）
- ②-d 加工過程のモデル構築（東京大学）

但し、②-b に関しては平成 27 年度、②-c に関しては、平成 30 年度で保留とした。また、②-d については①-e と同様であるため（フェーズ 2 までは、光／原子の相互作用を第一原理計算するもので同一となる。フェーズ 3 から加工、造形の物理モデルへ分離して、各々でまとめあげる）、本章では割愛する。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

最終目標： 高精細光造形技術開発による新ビジネス分野の創出

3D プリンティング技術に関しては、実験機製作による基本特性把握、優位性のあるアプリケーションサンプルを作製し、マーケティングを行うと共にパートナーを獲得、社会実装出口としてベンチャー企業の設立を通して、産業用造形装置の開発とアプリケーションの市場展開を目的とした。

平成 30 年 10 月に自己資金で設立したベンチャー企業を通して、ベンチャー企業としてマーケティング活動を行い、市場動向を見極めた上で、本格的に事業化の活動を開始している。

この 9 年間の活動の成果として、具体的な市場として、次々世代通信技術といわれる beyond 5G/6G に用いられる超高周波数電磁波デバイスをターゲットとして定め、いくつかの試作品の販売を開始するに至った（2020 年度）。

当面は造形サービス事業を展開、2020 年代後半にはメーカーへの技術供与を事業の柱とし、2030 年に売上 10 億円程度の実現を目指す。

装置の製造・販売については NEDO カタライザー、VC 等の助言を受けながら検討を進めていく予定である。

②-b 局所加熱利用

最終目標： レーザー照射による加熱を利用した局所領域のみ焼結させる新技術を開発

機能性薄膜材料とガラス基板等、加熱処理を必要とする薄膜材料と熱に弱い基板の組み合わせでは全体を加熱する従来焼結法は適用できず、薄膜だけを局所加熱するレーザー処理は高機能薄膜形成

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

で期待されており、その基盤技術の構築と応用展開を進めることを目的とした。

②-c CFRP の光改質

最終目標：理想的な素材強度の達成、付加的機能発現等をもたらす、新たな改質領域の開発

カーボンファイバーの強度を制限している欠陥の修復を光によって実現する技術を東レと共同開発し、その技術を東レへ開示し、生産ライン導入による差別化材料製造プロセスとして確立させることを目的とした。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

②-a 3D プリンティング技術

本技術に関しては、技術的な達成目標と社会実装への取り組みの目標と2つの要素がある。

技術目標は、造形技術としては、現在、市場に出ている3Dプリンタで実現されていない造形精度、および、造形速度の実現を目指した。特に、本造形装置に特徴的な1次元規制液面方式の持つ、高精細な造形精度に注目し、解像度 $L/S = 80 \mu\text{m}$ を目標とした。この解像度が実現できることで、超高周波電磁デバイスの作成が可能となり、社会実装のために必要な基盤技術が確立する。同様に、造形時間の短縮は、生産性の向上には重要な要素であり、新しい造形アルゴリズムを開発することで、大幅な短縮を目指す。実際に、自動露光強度調整プログラムを開発し、従来の1/10の時間短縮を実現した（本件は、特許出願済み）。

社会実装として、本プロジェクトの成果の利活用を進めるために、ベンチャー企業を創設し、市場開拓、投資家やパートナーの獲得、知財関係の整理活用、造形品の販売などの事業を展開してきた。実際に、2018年10月にフォトンテックイノベーションズ株式会社（PTI）を設立し、本装置の基本特許を持つソニー株式会社との知財関係の整理が実現し、PTIを通して造形物の販売を開始できる体制を整えた。現在、NEDOのファンドとNICT（Beyond 5G 研究開発促進事業）の獲得や本プロジェクトの別の研究課題の成果である臓器透明化技術の社会実装などを含めて、活動が広がっている。

②-b 局所加熱利用

当初の研究対象であった蛍光体物質の生成では、蛍光体となる希土類金属粉末と母材となる粉末材料とを混ぜ、高温で焼結する必要がある。本サブテーマでは、高温処理による焼結プロセスを、レーザー光の局所加熱による可能性を検討した。その結果、連続波(CW)のCO₂レーザーでは、焼結に成功し、UVランプによる発光が観測された。しかし、フェムト秒レーザーを用いた焼結の場合では、焼結する前に、材料の破壊が生じた。焼結は、粉末から微結晶を作るプロセスであり、そのためには、ある程度の時間が必要で、必ずしも短パルスレーザーを用いるメリットはないと考えている。このような状況のため、本サブテーマは、平成27年度で保留し、新しい材料系の可能性が見出された時点で、再開の判断を行うこととした。

②-c CFRP の光改質

光によってCFRPの強度を制限している要因の欠陥を減少させて強度の増大を図る試みを行ってきた。実際に、表面の状態をレーザーで制御でき、その結果、強度を制御できることは確認できたが、その機序としてはレーザー光によって欠陥を含んだ表面を除去するが主なものであり、その結果、糸（炭素繊維）の断面積が減るので、糸一本の強度ではむしろ弱くなってしまふとい

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

うことが判明し、有効となるメリットが見出せていないため、平成 30 年度に研究開発を保留することとした。

(4) 主な成果と達成状況

ここでは、最終期まで開発項目として続けた、3D プリンティング技術の開発のかかわる成果と達成状況について述べる。

図 A4-2-1 は、本技術である RECILS の概略図であり、現状の 3D プリンタの市場において、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の造形解像度と手のひらサイズの造形の両立する技術であり、さらには速い造形速度を特徴としている。

RECILS は、平面基板とシリンダー基板とを間隔 $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ のギャップを構成し、その間に樹脂を流入させることで line-by-line での平面造形を行い、さらに、その平面造形を積層する事で 3 次元造形を実現する方法である。この方法では、円筒ガラスが回転した際にガラス面と造形物と必然的に脱離するため、規制液面板との剥離プロセスが不要となる。この動作不要が速い造形速度をもたらす源となっている。

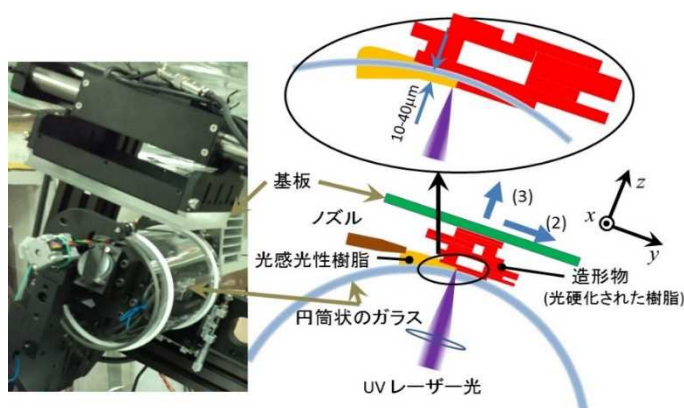


図 A4-2-1 RECILS の構造

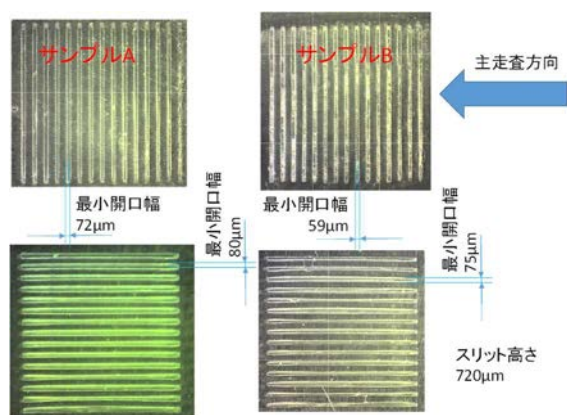


図 A4-2-2 L/S 造形

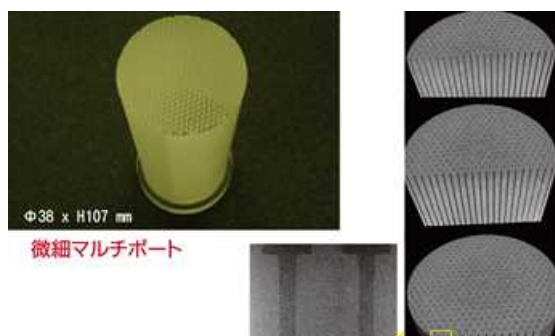


図 A4-2-3 ロケット燃料造形

実際に、図 A4-2-2 に示すように、直線であれば $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の構造が作成できていることを示した。この特徴を生かして、力学的強度を自由に設計可能な構造体の構築や生体計測に威力を発揮するマイクロ流路などの造形に取り組み、同時にその市場での可能性を検討してきた。加えて、学術連携の一環として、北大の永田教授のグループとの共同研究で、推力を制御可能なロケットエンジンのコアとなるハイブリッド固体燃料の作成にも取り組んだ。この件は、科研費にも採択され、燃料特性の改善と共に、本装置の特性評価にも役立っている（図 A4-2-2）。

これらの造形以外にも、試作の依頼を幅広く受け付け、本装置の潜在的なユーザーの掘り起こしを進めた。そして、最終的に、市場価値の高いものとして、beyond 5G/6G と呼ばれるような次世代通信技術のコアとなる超高周波数電磁波デバイスをターゲットとして、本技術の社会実装を進めることとした。さらには、テラヘルツ波制御素子作製への展開を視野に、対応する周波数を $100\text{ GHz}\sim 10\text{ THz}$ と考え、その周波数帯での基盤となる導波管やフィルター等の基本的な光学素子の開発を重点的に進めてきた。この周波数帯での

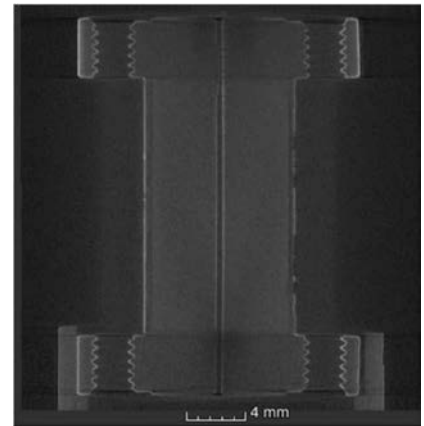
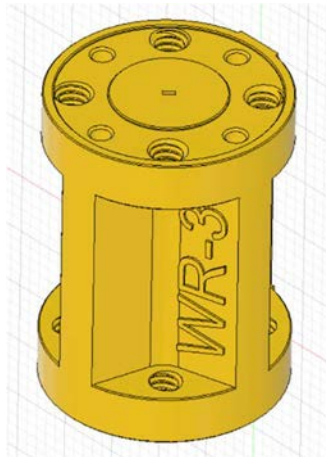
デバイスに対しては、使用する電磁波の長が数百ミクロン程度と非常に小さくなるため、旧来の

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

金属加工ではその作製が難しいという問題があった。そこで、RECILS で作製した微細構造を活用し、その表面を金属被覆することによって所望の性能を実現することとし、安価・軽量な新たなデバイスを提供する。これまで、この方針に沿って研究開発を進め、いくつかの試作と特性評価を行い、これまでの技術では製作できなかったデバイスの作成に成功し、すでに、試作品を販売するまでに至った。そのために、キーとなる金属被覆として、プラスチック上の金属めっきの手法の開拓を進めている。このテーマは、科学研究費補助金や NICT の「Beyond 5G 研究開発促進事業」に採択され、COI の終了後も更なる高度化を進めることが可能になっている。

導波管の作製に関しては、25 mm 長の WR3 の導波管を作成した。導波管としての挿入損失を測定したところ、金属製の導波路とほぼ同等な性能が実現できることがわかった。



めっきに関しては、現在、使用している光硬化樹脂はアクリル系で、難めっき材であることが分かっている。今後、種々の超高周波数電磁デバイスを実用化するためには、安定なめっき技術が不可欠であり、外注に頼らないめっき法の確立を急いでいる。現状、平板には安定なめっきができるようになってきたので、導波管内部のめっきに移行する予定である。



本技術開発の社会実装を推進する目的で、それまでの COI 活動で得たニーズ、潜在顧客、情報を基に、平成 30 年 10 月 1 日に社名を「フォトンテックイノベーションズ(株)」としてベンチャー設立した。それ以降の活動として、RECILS を活用した受託試作・製造サービスを、特にミリ波・テラヘルツ波分野にける通信用コンポーネントをターゲットとして本格的に展開すること、めっき技術の確立を東京大学やめっき企業と共同で行うこと、通信コンポーネント関連部品に関するカタログ品の開発、さらなる営業活動の促進を目標としていた。

実際に、

- ・(無償サンプルを含む)ミリ波・テラヘルツ分野における受託試作サービスの継続的な展開
- ・めっき技術の立ち上げ・自社での研究開発の開始(2021 年 5 月～)
- ・めっき技術に関して、めっき企業との情報交換の開始(秘密保持契約の締結)(2021 年 8 月～)
- ・通信コンポーネント関連部品のカタログ品開発に必要な情報の収集(2021 年 6 月～)
- ・営業活動の促進による新たなターゲット(電波天文用途)の開拓(2021 年 6 月～)

などが実施できた。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)研究開発型スタートアップ支援事業/NEDO Entrepreneurs Program (NEP) (2020 年度第 2 回)への採択(高周波伝送用導波管の製造技術確立がテーマ)に伴う研究開発を 2021 年 4 月～9 月に行い、会社としても、

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

めっき研究開発の自社実施など研究開発に取り組み、実用レベルの高周波伝送用導波管を造形するために必要な技術の一定程度の確立、実用性を高めるためにさらに研究開発が必要な課題の抽出などを行った。

このベンチャーの設立は、もう一つ、極めて重要な意味を持っている。RECILS の基本特許は SONY 株式会社が保有しており、研究開発から RECILS を商用利用する際の権利関係が大学と SONY だけでは十分に整理ができなかった。しかし、本ベンチャー企業が介在することでその整理が可能になり、利益を生むことを目的とした活動と大学での研究開発の間のギャップを埋めることができた。

(5) 今後の課題と対応方針

COI の研究期間を通して、RECILS の開発を行う中で、試行錯誤の結果、現在、ターゲットとしたのは次世代通信を支える基盤技術としての活用であった。課題は、電磁波に対する特性の向上にある。造形精度は、デバイスの特性を実現するために必要なレベルまで、ほぼ達しているので、現在、開発を進めているめっき技術の確立によって、大きな市場への船出が可能となると考えている。前にも述べたように、この点に関しては、科研費や NICT の経費が確保されており、2-3 年の間には、安定な製品供給が可能になると考えている。さらに、本学では、光量子科学連携研究機構を設置し、さらにそのもとで共同研究利用設備制度の運用を開始した。この制度は、大学の資産の円滑な運用と社会実装の一層の推進を目的としたもので、商用を目的とした設備利用を可能とするなど、従来の設備利用制度とは全く異なる制度である。そのため、これまで懸案であったリソースヘビーなものづくりにかかわるベンチャー企業のスターアップに対して、大学の設備を利用できることが可能で、事業展開に大きな助力となると考えている。この制度の運用はまだ始まったばかりで、実績を報告できないが、制度の精神などは、本 COI 事業の基本理念を反映したものであり、本学における COI 事業の成果を継承する活動として、重要な役割を果たすと考えている。

(6) その他特記事項

特になし

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.3 短波長(EUV)光源・利用技術

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	緑川克美、 理化学研究所、光量子工学研究センター、センター長
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	
研究開発実施期間：	2013 年 4 月～2022 年 3 月
参画機関：	ギガフォトン株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

レーザーは、その誕生より半世紀を迎え、その学理の大幅な進展と技術の革新により、高度化・高機能化は近年加速度的に進展している。特に、最近のレーザー技術の革新により、高強度で超短パルスのレーザー光を産業にまで利用することが可能となりつつある。さらに、高強度超短パルスレーザーによる高次高調波の出現により、これまで大型の放射光施設でなければ利用出来なかった真空紫外から軟 X 線領域の短波長光がテーブルトップサイズでも発生することが可能になってきた。その一方で超短パルスを用いたレーザー加工は、複合素材やガラスなどの難加工材料の加工や従来の精度を遙かに上回る精密加工が期待されているものの、その加工のメカニズムについてはほとんど解明されておらず、現場技術者の試行錯誤で加工を行っているのが現状である。そこで本課題では、まず超短パルスレーザーと物質の相互作用を正しく理解するために、真空紫外から軟 X 線領域の超短パルス光を供給するマルチユーザーファシリティとしてのフォトンリングを整備するとともに、EUV 光源の社会実装を含めた利用技術を開発する。EUV 領域の技術は、次世代リソグラフィに不可欠であり、光源のみならずその周辺技術の向上が望まれている。

本テーマは下記に分類される。

- ③-a: 光源技術
- ③-b: EUV 周辺利用技術
- ③-c: 高次高調波発生メカニズム理論
- ③-d: 実社会利用 EUV 光源開発技術
- ③-e: リソグラフィ用 EUV 光源開発
- ③-f: EUV 領域における光学特性の位相敏感高精度測定

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

現在、真空紫外から軟 X 線領域での計測には、主に放射光や X 線自由電子レーザー等の電子加速器をベースとした大型施設が主に用いられているが、ビーム時間の制限や利用申請に長期間を要する等の課題があり、大学等の実験室規模で利用出来る光源の開発が望まれている。そのような要望を踏まえて、「光源技術」では、産学共同利用に資する EUV～THz の超広帯域レーザー施設の開発し、ユーザーに提供する。また、EUV 光の利用の促進には、集光鏡等の周辺技術の開発も重要であり、「EUV 周辺利用技術」では特に広帯域の EUV 光に利用可能な集光鏡を開発し、新たな利用を開拓する。一方、EUV 光源開発技術は次世代半導体リソグラフィの開発において重要な課題であり、その社会実装においては、波長 13.5 nm での強力な光源に加えて材料ならびに光学素子の特性評価等の技術開発も同時に求められている。次世代半導体リソグラフィに資する波長 13.5 nm 光の光源ならびに周辺技術の開発は、我が国の半導体産業の発展に多大な貢献をするものと期待される。

(3-a) 真空紫外から軟 X 線領域の超短パルス光を供給するマルチユーザーファシリティとしてのフォトンリングの性能を実証するとともに、小型高効率化に向けた技術を開発する。

(3-b) 軟 X 線顕微計測による薄膜試料の化学組成・電子状態などの顕微計測サービスを提供する。併せて、EUV・軟 X 線加工サービス（波長 30 nm 帯域、および 13 nm において空間分解能 1 μm 以下）を提供する。

民間企業（日本製鉄）との顕微測定を生かした材料研究に関する共同研究を実施しており、産学共同利用による実用化を進める。EUV リソグラフィは大量生産に向けた技術であるが、本サ

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

ービスでは、加工したい形状データがあれば、1 mm x 1 mm 程度のサイズであれば1時間で加工が実現できる。

(3-c) 高次高調波発生過程および高強度フェムト秒レーザーパルスや高次高調波アト秒パルス光が原子・分子中に引き起こす非平衡過程を、第一原理計算するシミュレータ。

(3-d) EUV リソグラフィ光源に用いられる Mo/Si 多層膜ミラーの反射率測定のための波長 13.5 nm の光源を高次高調波に実現し（2017 年度）、製品化等についてはギガフォトン社に引き継いだ。

(3-e) 次世代 EUV リソグラフィ光源の製品化ならびに 13.5 nm 帯の光源の EUV 光学素子検査装置への検討。

(3-f) EUV 波長領域、特に、13.5 nm での各種材料の光学特性を、精密計測を可能とする技術を構築し、共用施設としての提供を目指す。さらに、市場性が確認できた場合は、パートナーを通して装置販売を進める。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

(3-a) 大型フォトンリングで達成した共振器内高次高調波の発生技術を、理研に設置した小型リングに移転するとともに、ゼロフォノン励起や新しい ThinDisk 材料を導入し高効率化を図る。

(3-b) 軟 X 線顕微計測の整備を進め、波長 13 nm 帯域での顕微計測サービスを開始する。引き続き、軟 X 線光源用高次高調波発生装置の改良を行い、波長 6 nm 以下の顕微計測サービスを可能とする。

(3-c) 多配置展開と結合クラスター展開に基づく第一原理計算手法を開発し、原子・分子に対して数値計算コードを開発する。

(3-d) EUV リソグラフィ光源に用いられる集光ミラーを含む Mo/Si 多層膜ミラーの反射率測定のための波長 13.5 nm の光源を高次高調波に実現するという当初の目的を 2017 年度に達成し、完了した。本課題で達成した成果は、ギガフォトン社に引き継がれた。

(3-e) 13.5 nm 帯の光源の基礎開発による要素技術の確立と次世代 330 W のシステム化を行う。

(3-f) EUV 領域での各種材料の光学特性を精密計測装置として共用施設としての提供を目指す。

4 研究開発テーマの成果

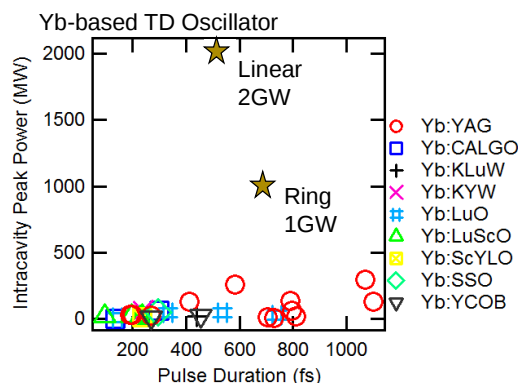
(4) 主な成果と達成状況

4.3-a 光源技術

フェーズ1においては、主に真空紫外からの軟X線領域の高次高調波発生を目的として共振器内に高強度のフェムト秒レーザー光を蓄積できるフォトンリングを整備して共振器内平均パワー約2 kWを達成し、3 MHzの高繰り返しで高次高調波を発生することが可能であることを実証した。フェーズ2ではマルチユーザーファシリティの実現を念頭に、複数ポートでの動作実証ならびに供用を踏まえて長時間の安定性および操作性の改善主要な目標とした。フェーズ3においては、フォトンリングの操作性の向上ならびに小型化に向けた技術開発を行った。

i) モード同期共振器内で mJ 級のエネルギー蓄積

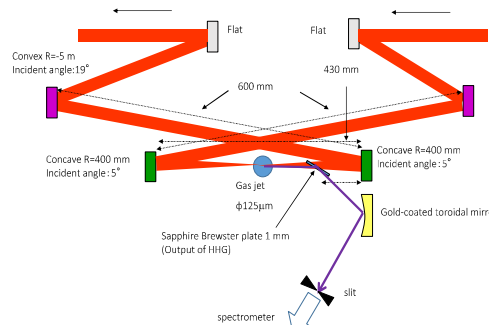
線形共振器で共振器内エネルギー1 mJ、平均パワー3 kWを達成した。さらにリング共振器では安定な片回りモード同期動作を実現し、共振器内エネルギー0.7 mJ、パルス幅約600 fsで、平均パワー2 kWを達成した。これは、図A4-3a-1の星印に示されるように、これまでの報告を1桁近く上回る世界最高パワーが得られている。また、このとき高次高調波発生ポートの集光点近傍に供給されたArガスから高調波発生を示唆する発光が確認された。これによって、本方式において高次高調波を発生必要十分な集光強度が得られることが立証された。さらに安定動作へむけてシミュレーションコードを開発した。



図A4-3a-1 これまで報告されたYbベースThin Diskレーザー発振器におけるパルス幅とピーク出力の関係

ii) フォトンリングの複数ポートでの動作

フォトンリングのモードロック動作で、共振器内平均パワー約1 kWを達成し、3 MHzの高繰り返した。しかし、複数ポートにおける高次高調波発生実験では、光学素子にダメージを避けるために、1パルスあたりのエネルギーを0.7 mJから約1/2の0.36 mJ、平均パワー約1 kWでの実験を行った。パルス幅は、610 fsである。高調波発生ポートの光学配置を図A4-3-2に示す。共振器内を周回する励起レーザー光は、曲率半径400 mmの凹面鏡を介して光路上に設置された希ガスジェットに強度約 $8 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ で集光される。レーザー光と同軸に発生した高次高調波は、励起波長に対してブルースタ角度に配置された厚さ1 mmのサファイア基板で反射され共振器外へ取り出された後、金コーティング鏡を介して真空容器外の分光器に導かれる。



図A4-3a-2 高次高調波発生ポートの光学配置

図A4-3a-3に示すように2つのポートでのNeおよびArガスジェットを配置し2波長同時共振器内高次高調波発生に初めて成功した。これにより、我々が当初提案していた新規コヒーレントXUV光源(フォトンリング)のコンセプトを実証することができた。波長1031 nmのレーザー基本波に対し、最高で43次高調波(波長24 nm)まで観測できた。また、発生点での高次高調波の1次数あたりの平均パワーは最大で10 nWのオーダーと見積られた。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

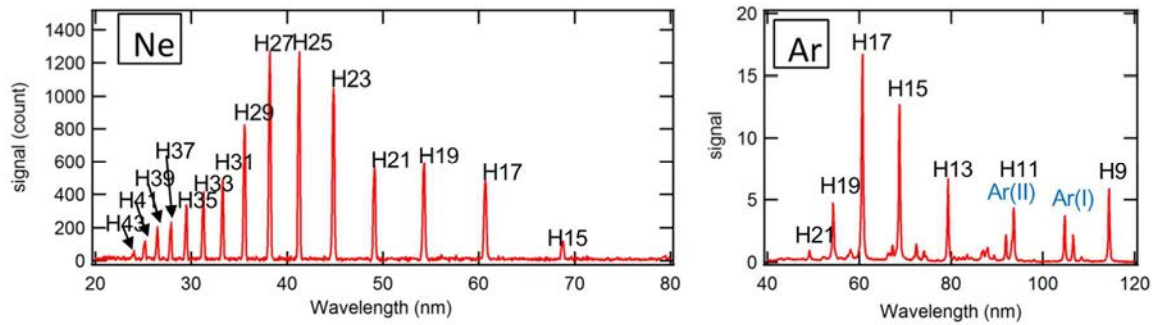


図 A4-3a-3 2ポートでの同時発生

iii) フォトンリングの小型高効率化

これまでフォトンリングの開発で得られた技術的知見をベースに、実験室サイズからテーブルトップサイズへの小型をはかることを目的として、理研に設置の小型リングを用いて要素技術の改善に取り組んだ。まず Thin Disk の熱負荷を如何に軽減するかが鍵であるため、浜松フotonクス社と共同で波長安定化された 969 nm LD を開発するとともに、熱伝導性に優れた Yb:LuAG を新たに Thin Disk 材料として導入し、良好な結果を得た。Yb:LuAG 薄ディスク媒質とゼロフォノン励起を用いたモードロックリング共振器を構築し、その性能評価を行なった結果を図 A4-3-4 および 5 に示す。発振スペクトル幅は 3.3 nm (図 A4-3a-4 左)、出力パルス幅は 298 fs でまで短くなり、より効率的な高次高調波の発生が期待できる(図 A4-3a-4 右)。薄ディスク表面の温度上昇もこれまでより低くなり熱歪みによる影響は改善された。現在までに比較的低出力の励起ながらも、繰返し 13 MHz の共振器の時、共振器内部でピークパワー158 MW を持つパルスを得た。これまでこの媒質を用いたレーザー発振器の報告の中でも既に最も高出力のレベルである。低出力励起時の光変換効率は Yb:YAG よりも優れており、動作の安定性も Yb:YAG と比べて遜色ない。

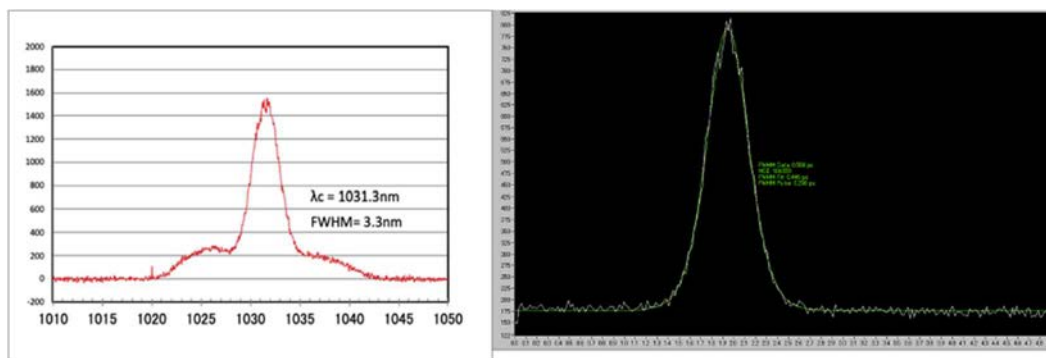


図 A4-3a-4: Yb:LuAG 薄ディスクレーザーの発振スペクトル(右)と自己相関波形(左); パルス波形を sech^2 と仮定した場合のパルス幅: 298 fs (FWHM)

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.3-b EUV 周辺技術

本課題では、高次高調波により発生した EUV 光を集光するための 2 つの光学系を開発してきた。一つは、ナノメートルの集光を行う回転楕円体鏡で、他方はコヒーレント結像のための楕円体鏡と双曲面体鏡を組み合わせる Wolter ミラーである。これまでに、図 A4-3b-1, 2 に示すようにナノメートル領域の集光と結像イメージングを達成している。

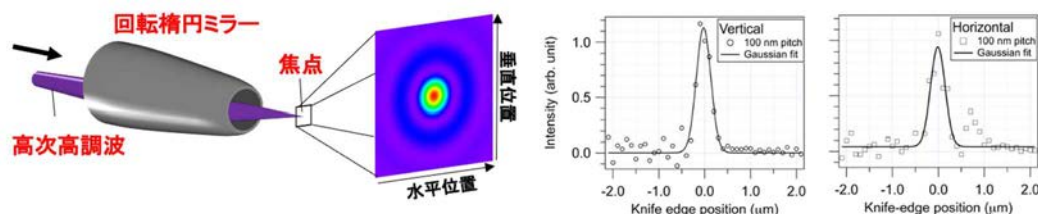


図 A4-3b-1 回転楕円ミラーを用いた EUV 光の集光(右)とその結果 (左)

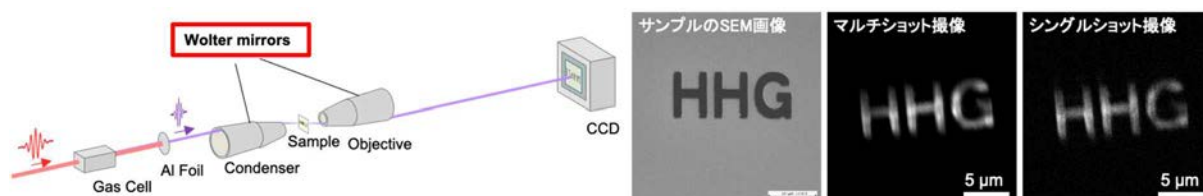


図 A4-3b-2 Wolter ミラーを用いた結像イメージングシステム(左)と得られた画像(右)

Wolter ミラーによる 30 nm 帯域の高次高調波集光の最適化調整を行い、600 x 400 nm (半値全幅) の集光径が得られた。これは、実測した 1 nJ のパルスエネルギーと 40 fs のパルス幅を仮定した場合には、 $1.3 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ の集光強度を達成したことになる。また、毎日の実験において、入射ビームを手順に従って高調波発生装置に入射することによって、集光調整を行うことなく 1 μm 以下の集光径が得られ、シミュレーションによって予測した通り、アライメントの許容誤差が十分に大きいことが示された。13 nm 帯域、および 6 nm 帯域における高次高調波ビームの集光の最適化、および顕微装置のプロトタイプを組み上げ、波長 13 nm 帯域と 6 nm 帯域での顕微計測に着手している。

一方、EUV パルスを用いた加工は、パルスエネルギーが低く、実用には不向きと考えられていたが、我々の開発した微小集光技術によって、小さいパルスエネルギーでも金属のようなアブレーション閾値の高い材料の加工が可能となった。図 A4-3b-3 に高次高調波を集光して加工を行う装置(左)と PMMA の加工の結果(右)を示す。R3 年度にはニッケル他、さまざまな金属や半導

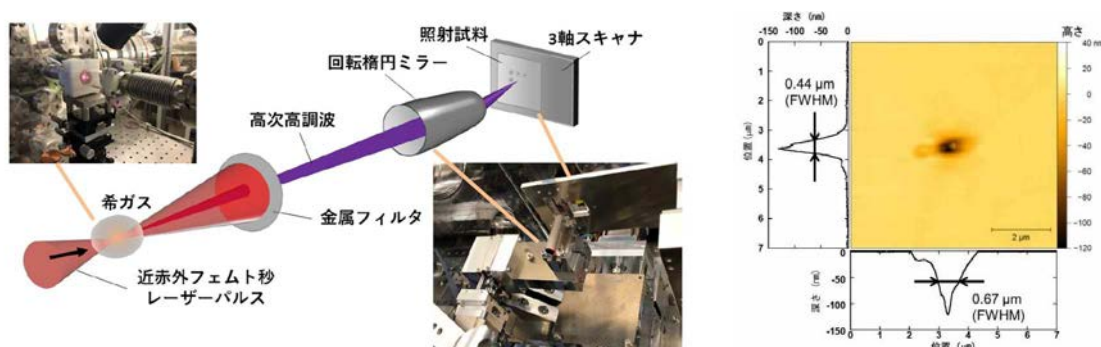


図 A4-3b-3 高次高調波を用いた EUV 光加工装置(左)と PMMA 上の加工痕 (左)

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

体材料の加工が可能であること示した（論文発表2件、招待講演2件）。このような技術は世界をみても我々の研究グループを除いて例はなく、EUVパルスによる金属の加工プロセスの解明など研究を展開しつつある。

4.3-c 高次高調波発生メカニズム理論

高次高調波発生メカニズム理論の研究については、以下にリストするように、現実的な計算時間で電子相関を正確に取り扱える新しい第一原理計算手法を、世界にさきがけて次々と開発してきた。

- ・時間依存完全活性空間自己無撞着場 (TD-CASSCF) 法
- ・時間依存占有制限多重活性空間 (TD-ORMAS) 法
- ・ゲージ不変時間依存配置間相互作用 (GI-TDCI) 法
- ・時間依存最適化結合クラスター (TD-OCC) 法

事業開始当初の想定をはるかに超えて進捗し、研究開発期間終了時の達成目標をすでに達成済みであると言える。

例として、図 A4-3c-1 に、1, 3-シクロヘキサジエンの分子構造と、高次高調波スペクトルの計算結果を示す。このように対称性のない生体関連分子に対して多配置時間依存ハートリー・フォック計算ができるようになったのは、世界初である。他にも、アセチレン、プロパン、アミノ酸の一種であるアラニンなどでの高次高調波発生計算にも成功している。事業開始当初には絵空事としか思えなかったシミュレーションが可能になっており、世界的にも他の追随を許さない。

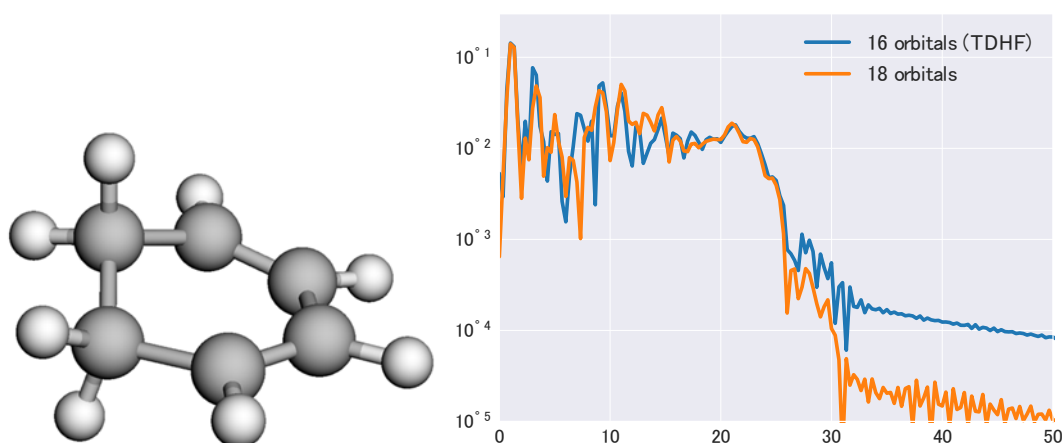


図 A4-3c-1 (左) 1, 3-シクロヘキサジエン分子の分子構造 (右) 高次高調波スペクトル。時間依存ハートリー・フォック法 (TDHF, 青) と 18 軌道での多配置時間依存ハートリー・フォック法 (オレンジ) による結果の比較。

4.3-d 実社会利用 EUV 光源開発技術

EUV リソグラフィ光源に用いられる集光ミラーを含む Mo/Si 多層膜ミラーの反射率測定用光源の整備を行った。評価用光源としてはコヒーレント光が優れているため、波長 800 nm のチタンサファイアレーザーの第 59 次高調波 (波長 13.5 nm) を発生させ、反射率測定の光学系を構築した。サンプル上で 1 nW の目標値に対して 4 nW を照射するシステムが完成し、1 分で 1% の精度で反射率測定ができるようになった。これまで放射光施設に持ち込まないとできなかった EUV 光学系のその場測定ができるようになり、開発目標に到達したので、この技術をギガフoton社に技術移転した。図 A4-3d-1 に 13.5 nm 高次高調波用いた反射率測定装置の概念図を示す。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

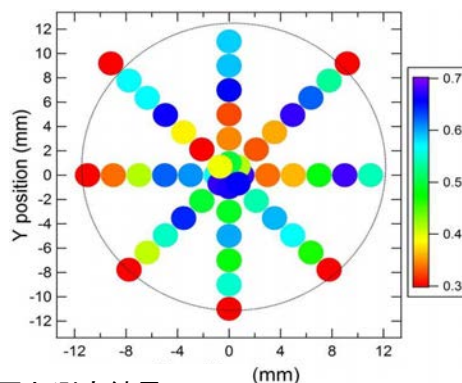
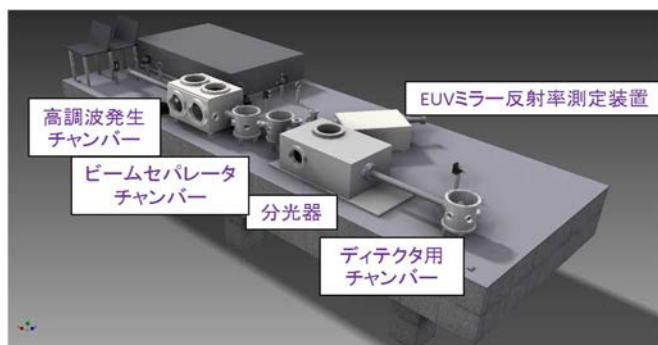


図 A4-3d-1 反射率測定装置の概念図と測定結果

上記の装置を用いて直径 1 インチの EUV 多層膜鏡の反射率の測定を行った。測定は、X 軸方向に 2 mm 間隔で 13 点、45 度ずつ 4 回回転させて行った。各測定点でのビーム直径は 2.4 mm で、測定時間は約 40 秒で全測定には約 1 時間を要した。測定結果を図 A4-3d-1 右に示す。これにより、本技術が 13.5 nm 光学素子の評価に有効である事が実証されたので、ギガフォトン社への技術移転を行い、本課題は 2017 年度をもって完了した。

4.3-e リソグラフィ用 EUV 光源開発

図 A4-3e-1 にギガフォトン EUV 光源の概念図を示す。ターゲットは Sn を融点に加熱して、20 μm 程度の液体 Sn ドロプレットに波長 1 μm のレーザーを照射して液滴を分散させ、これに主加熱用の波長 10 μm のレーザーで加熱して高効率に EUV 光を発生させている。回転楕円面の EUV 集光ミラーの第 1 焦点はプラズマ発生点に設置され、EUV 光を露光装置の照明光学系の入り口にあたる第 2 焦点へ反射集光する。このプラズマから発生する高速イオンによるミラー表面の多層膜のスパッタリング損傷が発生するが、磁場でのイオン制御で、防止緩和を行っている。

YAG レーザーと CO₂ レーザーの時間差を置いて Sn ドロプレットに照射するダブルパルス法により生成プラズマのパラメータを最適化したところ、高い変換効率 (>3%) が得られている。さらにプリパルスレーザーのパルス幅の最適化を行い、画期的な約 50 % の効率改善を実現した。5.5 % の変換効率も実験的に検証された。これは世界最高水準の変換効率であり、製品レベルでこの効率が実現できれば、平均出力 21 kW パルス CO₂ レーザーで 250 W の EUV 出力が、40 kW パルス CO₂ レーザーで EUV 500 W が達成できる。CO₂ レーザーシステムには信頼性が確立した産業用の CW-CO₂ レーザーを増幅器として用いた独自の MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)システムを採用している。すなわち発振段の高繰り返しパルス光 (100 kHz, 15 ns) を、複数の CO₂ 増幅器により増幅している。

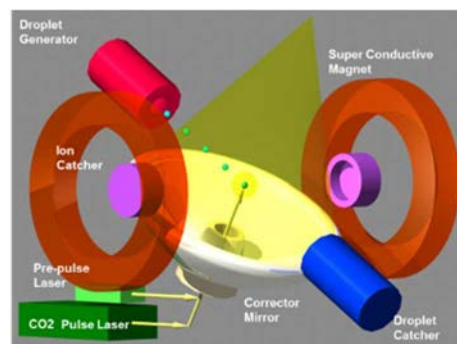


図 A4-3e-1 ギガフォトン社 EUV 光源のコンセプト



図 A4-3e-2 CO₂ 増幅実験装置 (ギガフォトン平塚事業所)

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

250 W の EUV 出力を達成するために三菱電機(株)との共同プロジェクトを実施し、ギガフォトン製のパルスオシレータと三菱電機製の 4 段増幅器を組み合わせ 100 kHz, 15 ns のパルスで 20 kW を超える CO₂ レーザー増幅器の出力が実証された²⁰⁾。現在はこの増幅器を 4 台直列に並べたシステムが稼働中である(図 A4-3e-2)。

一方、EUV 集光鏡の長寿命化も大きく進展している。Sn 液滴にプリパルスレーザ光が照射し CO₂ レーザ光が照射され EUV 発光する。その後、磁場によりガイドされた Sn イオンが磁力線に沿って排出される。エッチングガスの流路の制御で EUV 発生試験の集光ミラー位置でのデブリが桁違いに改善されることがシミュレーションと実験で確認され、すでに平均出力 125 W レベルの運転では、3 週間に渡る EUV 光照射部への EUV 光の伝送の結果ミラーの反射率低下を 0.4 %/Giga pulse 以下に抑えることに成功している(図 A4-3e-3)。

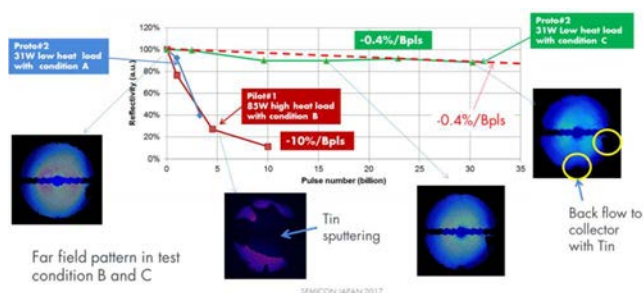


図 A4-3e-3 EUV 発行運転時の集光ミラー反射率の変

4.3-f EUV 領域における光学特性の位相敏感高精度測定光源

赤外のフェムト秒パルスをもとに高次高調波発生によって得られるコヒーレント EUV 光を用いて、EUV 領域における様々な材料の光学特性の位相敏感高精度測定装置を開発した。

図 A4-3f-1 の a,b に二重スリットによる干渉パターンの様子を示す。a は、両スリットにサンプルは配置されておらず、それぞれの光波の強度、位相は同じで、その時の干渉パターンは、中心部に最大強度となりさらに、±の次数方向には対称なパターンとなる。一方、b は、一方のスリットにサンプルを置いた場合で、両スリットを透過する光の位相、強度が異なるため、干渉パターンは、その位相差、強度差に応じた干渉パターンのシフト、ビジビリティの変化を生じる。この変化からサンプルの屈折率、吸収係数を計測する。

また、光源は、近赤外の f 秒パルスをもとに高次高調波発生によって得られる EUV 光で、その次数によって波長は異なり、12 nm(100 eV)から 25 nm(50 eV)の広帯域の光である。図 3f-1c は、サンプルを透過した干渉パターンをトロイダルグレーティングで分光し、各次数(波長)毎に干渉パターンが観察され、そのデータから屈折率と吸収係数の分散を測定することが可能となる。

図 A4-3f-2 は、アルミニウムをサンプルとした時の測定結果である。(a)は、サンプルがない場合で、場所に対してほぼ対称な干渉パターンが確認される。一方(b)は、一方のスリットにアルミニウムを入れた場合で、干渉パターンのシフトとビジビリティの変化が観測され、このシフトをフィッティングによって屈折率と吸収係数を算出する。図 A4-3f-2 (c) は、本手法で得られた 15.9 nm(78 eV)から 19.7 nm(63 eV)でのアルミニウムの伝搬定数(上:実部、下:虚部)である。アルミの他、実際に EUVL で使われている材料の 13.5 nm での評価を、日本の材料メーカーを行っている。これまでは、過去の米国ローレンスバークレー研究所(CXRO)のデータベースの数値を用いて特性を計算していたが、実際の計測結果と一致しないという問題があった。しかし、本測定の結果を用いたところ、非常に整合した結果が確認された。このように整合した結果が、短時間で得られたことが確認され、共同研究先からも高い評価を受けている。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

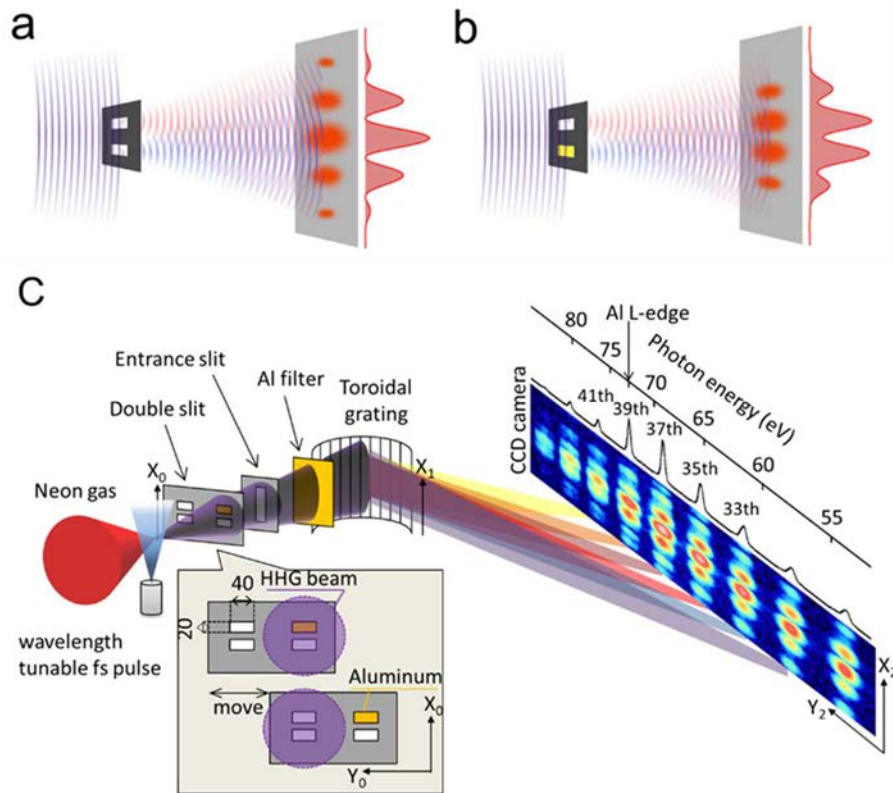


図 A4-3f-1 a, b :二重スリット法による干渉パターンの変化。この変化は、二つのスリットを透過する光の光路長と強度の差で決まる。 c :高次高調波発生による EUV 光を光源とした二重スリットによる干渉パターンの波長（高次高調波の次数）依存性。

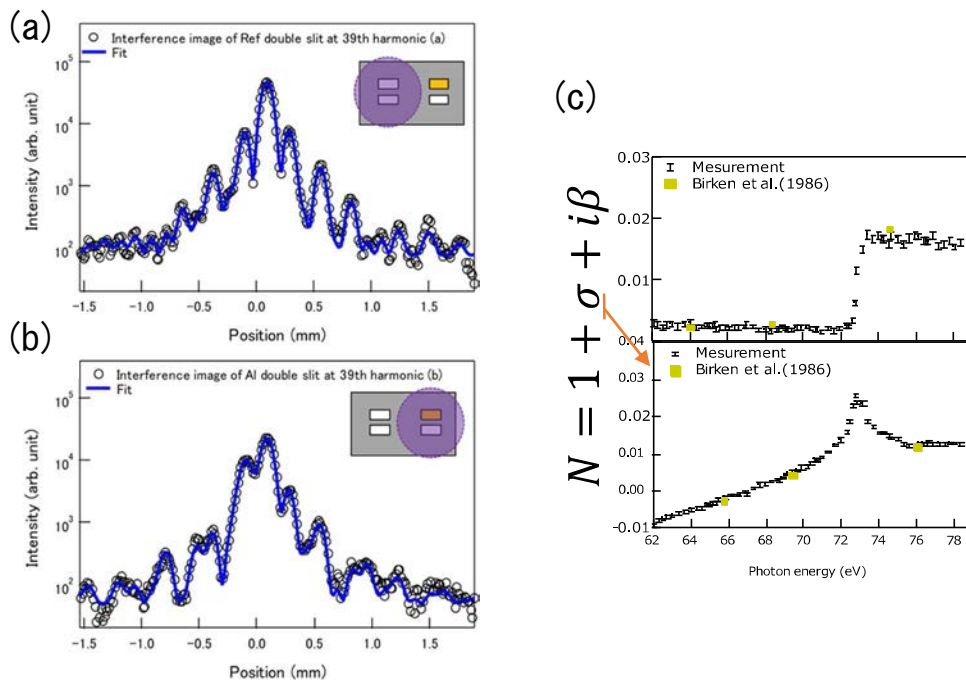


図 A4-3f-2 アルミニウムをサンプルとした時の干渉パターン測定結果。(a) サンプルがない場合 (b) 一方のスリットにアルミニウムを配置した場合 (c) 伝搬定数（上：実部、下：虚部）

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(5) 今後の課題と対応方針

(3-a) フォトンリングについては、操作性の向上や ThinDisk の国産化が課題である。操作性の向上については、理研に設置した小型装置を用いて改善を図る。ThinDisk については、国内の企業と連携して開発を進める。

(3-b) 他の応用として、集光高次高調波をアクリル樹脂 (PMMA) 薄膜および金属ナノ粒子レジスト薄膜に照射し、サブマイクロメートルサイズの微細加工を検討している。実用に向けた課題として、加工速度の向上や加工装置の普及が挙げられる。高繰り返し高パワー光源技術の開発と、高次高調波発生装置および集光装置の小型化によって、EUV 加工の普及が可能となる。そのための様々な技術を、Q-LEAP フラッグシッププログラム、JST SICORP-MIRROR などの外部資金を通じて開発を行ない、実現する。

(3-c) 事業開始当初の想定をはるかに超えて進捗し、研究開発期間終了時の達成目標をすでに達成済みであり、課題はない。今後の方針としては、科研費基盤(A)「分子のための第一原理高強度場物理・アト秒科学シミュレーション」を活用してより大きな分子でのシミュレーションを実現するのに加えて、IBM Sponsored Research を活用して量子コンピューターIBM-Q 実機でのシミュレーションを実施する

(3-d) 実用化への課題として、引き続き光源の高出力化および長期安定性の改良検討が進められている。

(3-e) これまでの基礎開発の結果を踏まえて、①次世代の 330 W のシステム化開発および②EUV 光源の基盤強化のための応用開発を実施する。またビジネス化に向けたユーザーとの交渉を継続実施する。ただし、その進捗によっては今後開発の方向性に変化が生じる可能性がある。さらに市場のニーズの変化に対応して③検査用 EUV 光源の調査研究を追加実施する。

(3-f) 共用設備化にあたって必要とされる長時間安定性の課題を克服するために、励起レーザーのポインティングスタビリティを改善する。

(6) その他特記事項

(3-a) フォトンリングの成果に関して以下の 2 件のプレス発表を行った。

- (1). New extreme ultraviolet facility opens for use -A new machine to probe the ultrafast motion of matter is the first of its -Discover Excellence. The University of Tokyo, September 28, 2020. https://www.utokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508_00134.html
- (2) 2.3 MHzの超高繰り返し高次高調波発生—2波長の極端紫外超短パルスに応用に期待—理化学研究所、2020年10月8日、https://www.riken.jp/press/2020/20201008_2/

(3-c) 高次高調波発生メカニズム理論の研究については、JST-CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの中核技術」領域における研究課題「アト秒反応ダイナミクスコントローラーの創生」、科研費基盤(A)「分子のための第一原理高強度場物理・アト秒科学シミュレーション」を活用して研究開発を推進した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.4 個のニーズ探索

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	小野寺 宏 工学系研究科附属光量子科学研究センター・特任教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	指定無し
研究開発実施期間：	2013 年 4 月～2022 年 3 月
参画機関：	フォトンテックイノベーションズ株式会社

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

計測環境・技術の整備 人間活動解析システムの構築と情報提示システムの開発

運動障害者の日常生活支援や労働者の労災防止対策には、人間の身体機能を簡便かつ正確に測定する技術が不可欠である。そのためには、装着違和感の少ない小型軽量の生体機能評価デバイスの開発が求められる。本プロジェクトでは、手足や靴に装着できる超小型三次元圧センサーシステムを開発する。開発にあたっては、モーションキャプチャーシステム等の高精度測定システムにより正確に評価する。

本システムの開発により、日常生活や労働時の身体負荷量や姿勢安定性をリアルタイムで測定可能となる。健康産業分野（衣服や靴に装着し運動量測定、転倒リスク評価）や労働安全用機器（安全靴への装着）への実装が期待される。

個の QOL 改善のための先進的センサ・アクチュエータシステムおよび生体観察システムの開発

・運動支援アクチュエータシステム

運動機能障害者の日常生活支援、労働者（中腰作業や重量物挙上作業）の腰痛予防と疲労軽減のためにロボット装具の開発が進められている。しかしながら、電動装着型ロボットは、重く装着違和感が大きいという稼働時間が短いため、実用化が進んでいない。そこで、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）による、超軽量で動力源を必要としない活動支援装具を開発する。装着違和感の少ない超軽量の CFRP 装具は歩行支援・中腰作業/重量物挙上支援効果が期待されるので、運動機能障害者ならびに労働者（とくに介護福祉業）向け製品として有望である。

・生体観察技術の開発

臨床病理検体やバイオ標本の 3 次元観察技術が普及すると、診断精度向上（癌見落とし防止）や薬効スクリーニングの迅速化/省力化が実現する。本プロジェクトでは、観察深さ 1 mm 以上で撮影時間 10 分、サンプル自動処理システムの構築を実現し、病理診断精度の均てん化やバイオ研究加速に寄与する。透明化標本の 3 次元観察には、高額専用の装置（2 光子顕微鏡、共焦点顕微鏡、光シート顕微鏡）が必要となるため、標本透明化技術はごく限られた研究者や企業のみがその恩恵にあずかっている。そこで、若手研究者や一般病院/企業が導入可能な低価格 3 次元顕微鏡を開発し、多くのバイオ研究領域と日常臨床において 3 次元解析技術を普及させたいと考える。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

計測環境・技術の整備 人間活動解析システムの構築と情報提示システムの開発

想定製品は手足や靴に装着できる生体活動センサーシステムである。圧センサ搭載方法の工夫により 10 グラムから 80 キログラムまでの外力を測定可能となった（用途によりセンサ搭載方法を変更することで広いダイナミックレンジを確保）。本プロジェクトにおいて開発したドーム構造を持つエラストマーをセンサーチップに搭載することで超小型の 3 次元圧センサとしての用途も想定する。

想定用途とインパクトは次の通り：靴搭載による歩行および転倒リスク解析と警告/腰痛リスク評価と腰痛危険動作の警告（とくに介護業従事者の腰痛予防と離職対策）、手やロボットハンドへの搭載による感覚障害者の物品把持支援やロボットハンド性能向上。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

個の QOL 改善のための先進的センサ・アクチュエータシステムおよび生体観察システムの開発

・運動支援アクチュエータシステム

重量物を扱う労働者や介護者の腰痛発症リスクは、高く離職の原因にもなっている。本プロジェクトでは、医師や理学療法士さらに患者の意見も参考にして、CFRP バネを複数搭載する、無動力で歩行と中腰動作（重量物挙上）を支援できる装具を開発する。従来型の電動装具と異なり、軽量（片側 500 グラム以下を予定）で装着違和感が少なく、重量物挙上時の筋負荷量を軽減する。完全無動力動作を実現することで水中作業や滅菌処理にも耐えられるデバイスとなるため、食品工場や医療介護施設での活用が可能になる。

想定用途とインパクトは次の通り：本装具システムの実用化により、医療福祉従事者や介護者の負担軽減、重量物作業者の労災防止（腰痛症）に貢献する。

・生体観察技術の開発

研究当初の目標値（観察深さ 1 mm）を大幅に超える、観察深さ 2 mm 以上の 3 次元標本観察技術確立する。標本を単に試薬に浸漬するのみで透明化処理を完了でき、煩雑なサンプル処理システムを不要とする。

想定用途とインパクトは次の通り：一般の病院、企業、研究者がバイオ検体を 3 次元で観察できるようになる。これにより、バイオ研究の迅速化、省力化、高精度化が可能になり癌見落とし防止や新薬開発を加速できる。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

計測環境・技術の整備 人間活動解析システムの構築と情報提示システムの開発

手足や靴に装着できる生体活動センサーシステム。100 グラムから 10 キログラムまでの外力を測定でき、センサ 1 個の重量 20 グラム以下。本研究で開発するセンサを足または靴に装着した場合の測定範囲としてマイルストーンを設定。

個の QOL 改善のための先進的センサ・アクチュエータシステムおよび生体観察システムの開発

・運動支援アクチュエータシステム

無動力で歩行と中腰動作（重量物挙上）を支援できる装具の開発。
従来型の電動装具と異なり、軽量（片側 500 グラム以下）で装着違和感が少なく、重量物挙上時の筋負荷量を 7%以上軽減することを目標とする。さらに、完全無動力での動作支援実現を最終マイルストーンとする。米国論文（米軍など）におけるコイルバネ式歩行支援システムの人体負荷軽減効果は 7%であったため、本研究ではマイルストーンとしてこの値を設定した。さらに、完全無動力装具を実現することで、厳密な装置消毒が求められる医療福祉分野ならびに食品製造業務分野での実用化を目指す。これにより従来型支援装具では不可能な水中作業、過酷な滅菌処理が可能な運動支援システム（労働負荷軽減システム）を実現する。

・生体観察技術の開発

観察深さ 2 mm 以上での 3 次元標本観察技術確立する（本研究開始時の目標は 1 mm）。また、煩雑な標本処理操作を不要として省力化と検体取り違いミスの根絶を目指し、標本を単に試薬に浸漬するのみで透明化処理が完了できる透明化技術の開発を目標とする。観察深さ 1 mm は内視鏡生検検体に適合する性能となるマイルストーンだが、観察深さ 2 mm を実現できれば一般の病理検体診断にも本技術は活用可能となる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

計測環境・技術の整備 人間活動解析システムの構築と情報提示システムの開発

人体活動を解析するためのモーションキャプチャー装置設営と運用、人工知能を用いた動画からの人体活動解析法を確立した。想定サービスは手足や靴に装着できる超軽量生体活動センサシステムである。圧センサ搭載方法の工夫により 10 グラムから 80 キログラムまでの外力を測定可能となった（用途により搭載方法は異なる）。マイルストーンのセンサ重量 20 グラムを遥かに下回るセンサユニット 5 グラムを実現した。さらに、エラストマードーム構造による 3 次元圧センシングと静止摩擦係数推定法を確立した。これらの技術を用いて、靴搭載による歩行および転倒リスク解析と警告/腰痛リスク評価と腰痛危険動作の警告について、実用化が視野に入った。硬いエラストマーを用いて靴や足に搭載すれば歩行ならびに滑り転倒リスクの検出と解析に、柔らかいエラストマーを用いるとロボットハンドや感覚障害患者の安定把持動作の支援に活用できると期待している。

個の QOL 改善のための先進的センサ・アクチュエータシステムおよび生体観察システムの開発

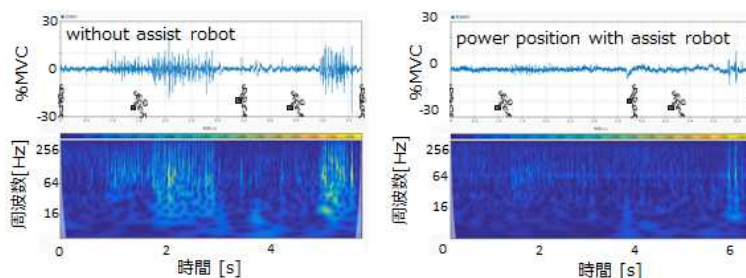
・運動支援アクチュエータシステム

CFRP バネは直進歩行を支援するが方向転換動作を阻害するため、CFRP を複数搭載することで直進のみならず回転動作、さらに中腰動作（重量物挙上）も支援できる無動力運動支援装具を開発した（特許出願済み）。従来型電動装具（数十キログラム）よりはるかに軽量（片側 500 グラム以下）で装着違和感が少なく、下肢への電極装着も不要であるため、装着時間を極めて短くすることができた（一度装着して条件設定しておくで左右下肢で 2 分程度）。下肢筋電図を用いて評価すると重量物（10 kg）挙上時の筋負荷量を 30% 軽減することができた。また、介護労働者用装具と工場労働者用装具の 2 種類に分化させた結果、バネ定数の電子制御が不要となり、電子部品をすべて排除できた。この結果、完全無動力運動支援装具を実現できた。水中作業や滅菌処理にも耐えられるため、食品工場や医療介護施設での活用が可能となった。本装具システムの実用化により、医療福祉従事者や介護者の負担軽減、重量物作業者の労災防止（腰痛症）に貢献したい。



(a) 2020 年型 CFRP バネ装具。CFRP バネ搭載位置を最適化した結果、歩行および重量物運搬時の支援効率が向上した。靴とあわせて 1kg 未満を達成した。下肢接続部は写真の装置の場合はジュラルミンを使用しているが、フレームを CFRP で作成した装具も開発中である。

(b) 上記の CFRP バネ装具での重量物作業負荷試験。下腿の腓腹筋筋電図。CFRP バネ装具装着により筋活動量が軽減されていることがあきらか、約 30% の重量物 (10kg) 上げ下ろし支援効果が確認できた



図A4-4-1 CFRPバネ装具の開発

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

・生体観察技術の開発

当初のベンチマークを大幅に超える、観察深さ 2 mm 以上の 3 次元標本観察技術を確立した。標本を単に試薬に浸漬するのみで透明化処理を完了できるため、当初予定していたサンプル自動処理システムは不要となった。その結果、中規模病院や一般企業、一般研究者への臓器透明化技術普及が可能となった。本プロジェクトで開発した臓器透明化技術は東大発ベンチャー企業が 2021 年度より販売予定であり、すでに臨床病理診断、新薬開発（薬効評価/副作用スクリーニング）、バイオ研究での実用化がはじまっている。

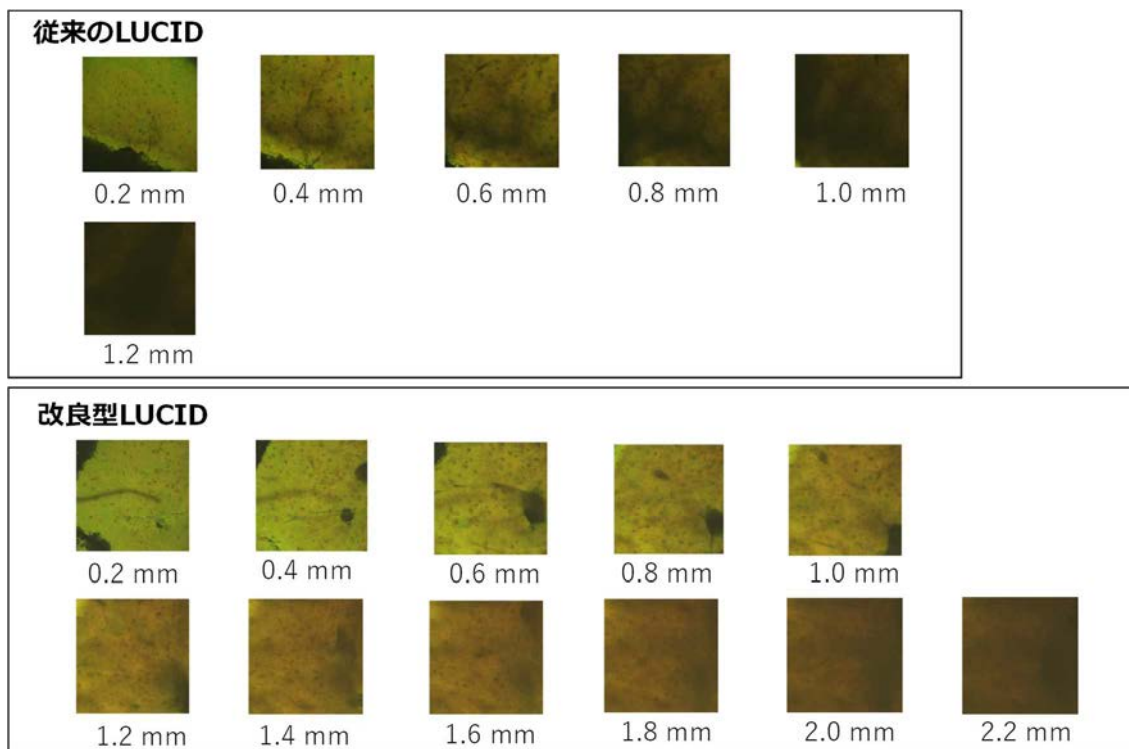


図 A4-4-2 LUCID による肝臓の透明化深部観察（数値は観察深さ）

(5) 今後の課題と対応方針

計測環境・技術の整備 人間活動解析システムの構築と情報提示システムの開発

今回開発した圧センサは非常に小さい圧力から大きな圧力まで用途に応じて測定可能である。大きな力を測定する用途は歩行解析である。現在、研究協力者（東北大学）および装具業者とともに装具への搭載にむけて検討を開始した。小さな力を測定する用途としては、東京医科歯科大学歯学部ならびに東京芸術大学とともに、嚥下機能・構音障害の評価、管楽器の習熟度評価のためのデバイスとして研究を開始した。舌や唇の動きを少ない違和感にて測定できるので、歯科診療や音楽教室等への展開が期待される。課題は、装置の防水、被験者間の感染対策ならびに電子デバイスが直接口腔粘膜に触れることを防ぐためのカバーの開発である。現在の対策は、デバイスを薄いビニール袋で覆うことで対処しているが、共同研究者である歯科医とともに安全で装着負担感の少ない実用デバイスとして開発を進めたい。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

個の QOL 改善のための先進的センサ・アクチュエータシステムおよび生体観察システムの開発

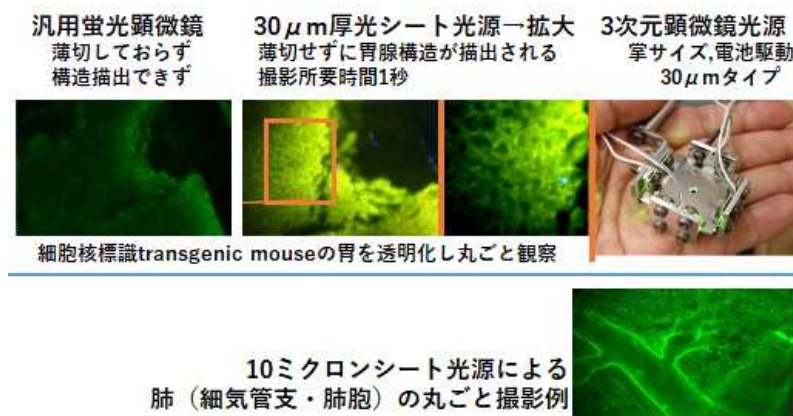
・運動支援アクチュエータシステム

CFRP 製無動力運動支援装具については、重量物挙上動作において筋電図解析では約 30%の筋活動低減効果を観察できた。製品化における最大の課題は CFRP 加工費であり、可能な限り CFRP モジュールの構造を単純化しコスト削減を図ってきた。しかし、左右ペアでの製造原価は約 10 万円であり、医療介護施設や一般工場への導入は容易ではないと考える。低コスト化のためのひとつの方法は、CFRP 部品の小型化（一部金属部品への置き換え）であるが重量増という別の問題が生じるため、研究協力者（東北大学）とともにコストパフォーマンスの向上を目指したい。

・生体観察技術の開発

分担者が CREST のなかで発明した臓器透明化技術 LUCID（JST 国際特許）は、本 COI のなかで超高速の全動植物透明化技術へと進化を遂げ、東京大学発ベンチャー企業である PhotonTec Innovations 社が JST からライセンスを受け、2021 年度より販売を開始した。新型コロナウイルスのため、原材料の輸入が停滞していることが現在最大の課題であるが、まもなく大量生産に進めるものと期待している。すでに、JST から製薬企業への LUCID ライセンスが実現しているとともに、自己免疫疾患治療薬の開発（厚労省認可待ち）にも貢献している。この新薬は、新型コロナウイルスのサイトカinstーム治療薬としても治験が予定されている。

透明標本の 3 次元観察には、2 光子顕微鏡や共焦点顕微鏡などの非常に高価な装置が必要になる。このことが透明化試薬の販路拡大における最大の課題である。安価な 3 次元観察用光源が開発されれば、透明化試薬 LUCID の需要は飛躍的に増大すると考え、ディスプレイ用ガラスのトップメーカーの協力を得て光シート顕微鏡用光源を開発中である。すでに、市販の光シート顕微鏡（海外某社製 3000 万円）を上回る解像度が得られている。若手研究者でも手の届く価格での販売を目指して開発を進めている（目標 100 万円未満）。



図A4-4-3. 3次元光シート顕微鏡光源像

(6) その他特記事項

特になし

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.5 非平衡新規光プロセス開拓

テーマリーダー（氏名、所属、役職）:	常行 真司 理学系研究科物理学専攻・教授
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）:	石川 顕一、 東京大学大学院工学系研究科、教授
研究開発実施期間:	2013 年 4 月～2022 年 3 月
参画機関:	-

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

コヒーレントフォトン技術を用いたプロセス革命の実現に向けて、光と物質の相互作用がもたらす非平衡現象の学理を解明し、その学理に基づき非熱的加工などの新規光プロセスを開拓するのが、本研究開発テーマである。そのために第一原理に基づく精緻な計算機シミュレーションやマルチスケールの数値モデリング、光電子分光実験等の手法を整備し、物質に入射した短波長パルス光の伝播、電子励起、さらにはそれがもたらす物質の構造変化という、空間的にも時間的にもスケールの異なる現象の包括的記述と理解を目指す。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

（5-a）強い光励起を用いた非熱的加工プロセスの開拓

学理に基づき原子レベルのレーザー加工のシミュレーションを行い、対象物質に応じたレーザー加工条件の探索指針を与える、学理 CPS 型レーザー加工シミュレータ。

（5-b）高強度光と電子系の相互作用

レーザー加工の学理に基づいた計算により加工結果の予測を行うミュレータにおいて、極限的光と物質電子の相互作用の計算を担う量子ダイナミクスシミュレータ、および、高次高調波発生の過程および高強度フェムト秒レーザーパルスや高次高調波アト秒パルス光が原子・分子中に引き起こす非平衡過程を、第一原理計算するシミュレータ。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

（5-a）強い光励起を用いた非熱的加工プロセスの開拓

原子レベルのレーザー加工シミュレーションのための学理構築と、対象物質およびレーザー条件に応じた加工進展の様子を予測するための学理 CPS 型レーザー加工シミュレータのプロトタイプ開発

（5-b）高強度光と電子系の相互作用

レーザーパラメーターの特性（例：強度、波長、偏光、二波長混合）に応じて、電子ダイナミクスや高次高調波発生、光電子角度分布、エネルギー吸収がどのように変化するかを計算でき、実験結果と比較できる量子ダイナミクスシミュレータの開発

（5-c）光電子分光の高度化と界面現象解明

非熱的レーザーアブレーションの実験的検証と、角度分解光電子分光法の高度化による非熱的レーザー加工直前の電子状態観察（2018 年度末で終了）

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

(5-a) 強い光励起を用いた非熱的加工プロセスの開拓

先行研究におけるレーザー加工の機構は、レーザーのエネルギーにより温度上昇した材料の溶解によるものと、電子的機構に大別される。前者の機構は単純でシミュレーションが比較的容易であり、実際に海外で加工シミュレータが作成されているが、このような熱的加工条件では材料の熱損傷が伴うため、近年の実験的研究で注目されている熱損傷のない非熱的加工を記述できない。一方、近年注目されている短波長短パルスレーザーを用いた非熱的加工では、電子励起によるクーロン爆発機構や、電子温度がパルス照射直後に極めて高温になる効果が議論され、現象論的なシミュレーション手法が開発されてきたが、対象物質の違いによる加工条件を議論できるシミュレーション手法が確立されてきたとは言い難い。そこで本研究では、目標達成にむけてレーザー加工の学理に立ち返って研究を行なった。その結果、2つの大きな進展があった。

第1に、学理的な進展として、加工が起きる閾値に近い低フルエンス領域で、高温に励起された電子のエントロピー効果により物質が凝集できなくなって原子の脱離・放出が起きるという、レーザー加工の電子エントロピー機構を見出した。材料の原子を結合させている電子は極めて量子性が強いので、室温付近では絶対零度とほぼ同じ状態とみなして良く、エントロピーを考慮する必要はない。ところが短波長短パルスレーザーのパルス照射直後、電子系が短波長短パルスレーザー10,000Kを超えるような高温になると、自由エネルギーに対する電子エントロピーの効果が物質の凝集エネルギーと同程度になり、原子（電子）密度の低いほど安定になるため、物質が凝集できなくなって原子脱離・放出が起きて加工にいたる。これは原子の温度が低い条件でも起きるため、レーザーフルエンスが低い場合には熱損傷を伴わないに非熱的加工が起きる。この物理機構自体は非常に一般的なものであるが、物質の電子状態と凝集エネルギーの違い、光の反射率、吸収係数によって、加工が始まる電子温度の違いが生じることとなる。

第2に、上記の学理に基づき学理 CPS 型レーザー加工シミュレータの2つのプロトタイプを開発した。一つは加工の深さ方向だけを連続体モデルで記述した、2温度モデルに基づく非常に簡単な1次元連続体シミュレータであり、低フルエンス領域での非熱的加工を簡便に取り扱うことができる。もう一つは原子間相互作用に電子エントロピー効果を取り入れて分子動力学シミュレーションを行い、さらに深さ方向への電子温度と講師温度の熱伝導を取り扱うために連続体モデルと組み合わせた、マルチスケールシミュレーション手法である。この手法では、非熱的加工と熱的加工の両方を取り扱うことで、原理的には、従来から言われていたレーザーアブレーションの全体像をシミュレーションすることができる。過去の研究と大きく異なる点は、これらのシミュレータを動かすために必要な、物質の差異を記述する入力パラメータの物理的意味が明確であり、原理的には第一原理計算（非経験的な電子論に基づく計算）可能で、そのため新しい材料に対して予測能力が高いと考えられることにある。実際、銅の光加工シミュレーションを行って、

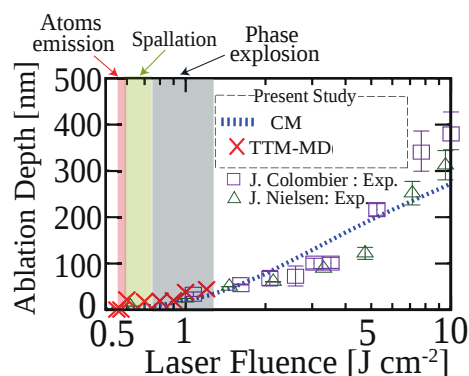


図 A4-5-1 銅のレーザー加工における加工深さのレーザーフルエンス依存性。CM は 1 次元連続体モデル、TTM-MD は 2 温度モデル分子動力学法に基づくマルチスケールシミュレーションの結果であり、いずれもこれまで記述できなかった閾値付近での実験データ再現に成功している。

4 研究開発テーマの成果

レーザー閾値付近での加工深さのレーザーフルエンス依存性の予測を行なったところ、実験データと非常に良い一致を得た。

(5-b) 高強度光と電子系の相互作用

以下に挙げるように、様々な第一原理計算手法を、世界にさがけて次々と開発してきた。

- ・ 時間依存完全活性空間自己無撞着場 (TD-CASSCF) 法
- ・ 時間依存占有制限多重活性空間 (TD-ORMAS) 法
- ・ ゲージ不変時間依存配置間相互作用 (GI-TDCI) 法
- ・ 時間依存最適化結合クラスター (TD-OCC) 法
- ・ 時間依存密度行列 (TD-DM) 法
- ・ Vlasov-UU 法

開発した上記の各種シミュレータおよび SALMON コードを活用し、国内外の実験・理論グループとも協調しながら、光電子分光、高次高調波分光等の計算を進めている。実験結果とも整合し、実験結果解釈における有用性を示している。

例えば、ハロゲン化金属ペロブスカイト半導体の高次高調波発生の偏光依存性（結晶角度依存性）について京都大学（金光教授）のグループによる測定と、我々による時間依存密度行列法を用いた計算の結果を比較した。図 A4-5-2 から分かるように、測定と計算はよく合っている。また、非線形エネルギー吸収の偏光依存性が偏光に大きく依存し、高調波強度の角度依存性と強く相関していることを見出した。この結果は、レーザー加工において偏光が重要なパラメータであること、高調波分光がエネルギー吸収のプロブになりえることを示唆している。また、キャリアの仮想励起の非線形性がこれらの結果において重要な役割を果たすことをはじめて明らかにした。従来使われている半導体ブロッホ方程式（長さゲージ）では、異なる運動量に対するブロッホ波動関数間に現れる位相の不定性が問題となるが、我々の時間依存密度行列法（速さゲージ）ではそのような問題は発生しない点で優れている。また、時間依存密度行列法は、時間依存密度汎関数法 (TDDFT) と同じく非経験的に電子状態を記述する長所をそのままに、計算コストを大きく削減し、また TDDFT では困難な、緩和やデコヒーレンスの効果を考慮できる利点を有する。

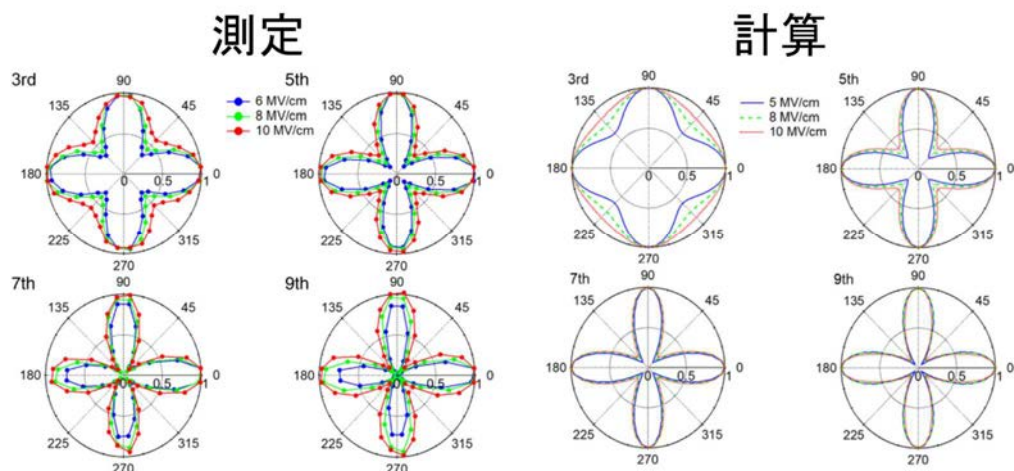


図 A4-5-2 ペロブスカイト半導体からの 3, 5, 7, 9 次高調波強度の偏光依存性（基本波光子エネルギー 0.35 eV）。京都大学（金光教授）のグループによる測定（左）と我々による計算（右）の比較

(5-c) 光電子分光の高度化と界面現象解明

電子状態の精密観測手法である角度分解光電子分光法において、時間分解可能な実験系を構築し、

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

非熱的レーザー加工の原因と考えられている、レーザーパルス照射直後の電子系のみが高温となった非平衡状態を、実験的に観測することを目指した。そのために 10 ピコ秒モード同期パルスレーザーの第二高調波と音響光学素子および遅延光学系を用いて物質の励起光を用意し、時間分解が可能な実験系を完成させた。さらに光子エネルギーの大きな深紫外光発生システムの導入、試料表面を清浄にするスパタリング装置の導入、紫外波長域の連続光照射による帯電対策等を行うことにより、金属表面のみならず半導体やトポロジカル絶縁体など、さまざまな物質で平衡状態の高分解能な評価を実現した。また角度分解光電子スペクトルと時間分解発光スペクトルの両方を実際に取得することに成功し、光電子計測で得られている多彩なデータの同定を行うことが可能となった。光電子分光測定と発光測定を組み合わせた電子状態の同定法は世界でも初めての試みであり、今後より複雑な物質系の光励起状態に適用し、その電子状態を明解に理解するための重要な進歩となったものと考えられる。

その後、非熱的レーザー加工条件近傍での観測を目指し、同じ装置内で試料に短パルス高強度レーザーを照射して、条件によって単結晶金の非熱的アブレーションが起きることを確認した。ところがアブレーション閾値より 3 桁以上低い励起強度においても、励起光照射のみの効果による多光子光電子放出過程が効率よく生じてしまうため、電子系のバンド構造測定の障害になることが明らかになった。この問題を解決するために、弱励起での表面状態の評価に立ち返って研究を行うこととし、本 COI での活動は 2018 年度末で中止することとした。

(5) 今後の課題と対応方針

(5-a) 強い光励起を用いた非熱的加工プロセスの開拓

開発した学理 CPS 型レーザー加工シミュレータの 2 つのプロトタイプには、物質の差異を記述するための入力パラメータ（物理パラメータ）が必要である。これらは原理的に第一原理計算が可能ではあるが、実際に新しい材料のパラメータを計算するには多くの労力がかかる。また現時点では、複合材料のシミュレーションは困難である。今後、アブレーションとは異なる比較的容易な実験を使って、必要な物理パラメータを決定する半経験的な方法を開発することで、より実用的なシミュレーション手法にすることができると考えられる。

(5-b) 高強度光と電子系の相互作用

今後の方針としては、成果を科研費基盤(S)「極限単一アト秒パルス分光法で拓くペタヘルツスケール光物性」に移管し継続して開発を続けるとともに、IBM Sponsored Research を活用して量子コンピューターIBM-Q 実機でのシミュレーションを実施する。

(6) その他特記事項

(5-b) 高強度光と電子系の相互作用利用については、Q-LEAP「先端レーザーイノベーション拠点」、「JST-CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス」の基盤技術」領域における研究課題「アト秒反応ダイナミクスコントローラーの創生」、科研費基盤(A)「分子のための第一原理高強度場物理・アト秒科学シミュレーション」、科研費基盤(S)「極限単一アト秒パルス分光法で拓くペタヘルツスケール光物性」を活用して研究開発を推進した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.6 研究開発全体の成果について（科学技術・学術上の新たな体系的知見等）

(1) 加工の学理（レーザー加工を物理として再構築）

レーザー加工が生産技術として導入され始め 30 年近くが経過する。これまでは、大出力レーザーを準備し、そのエネルギーを被加工物質内で熱に変えることにより切断、接合を行っていた。すでに、レーザー加工のシミュレータも開発されているが、実際の加工の状況とシミュレーションの結果が合わないという課題が残されたままである。これまで、ドイツの Fraunhofer レーザー技術研究所(ILT)とも議論を行ってきたが、彼らのシミュレーションは、熱力学と流体力学を取り込んだもので、それでは説明しきれない“何か”がありそうだというのが実情である。更に、CFRP や GFRP のような複合材料は、それぞれの材料が持つ特性を補完する組み合わせとなっており、そのことは、逆に、レーザー切断に限らず、機械切断をも難しくしている。このような特性が大きく異なる材料が組み合わさった系でのシミュレーションは、さらに難しくなり、実加工の状況との乖離が大きくなってしまっている。

本拠点では、レーザー加工技術をもう一度学理に立ち返った見直しを進めた。これまでに、CFRP の UV レーザー加工の提案とその検証(POC)がほぼ、完了した。また、第一原理からの加工現象の追求を開始したが、この取り組みは、この分野の先駆けである。第一原理計算からの取り組みにおいても、物質中の電子温度上昇によって、原子間の結合が切断されることが分かり、過去に報告されている実験結果を、その観点から見直してみると、その理論を裏付ける結果であることが確認され、論文としても高い評価を受けている。

これまで、レーザー加工は、勘と経験に基づいて発展してきたが、その“職人技術”に学理としての取り組みを加えることは、レーザー加工の更なる発展に大きく貢献できると考えている。その一方で、シミュレーションを進める上で、物質パラメータが必ずしも十分ではないことが分かってきた。実際、銅の物性値はかなり報告されており、それを使ったシミュレーションも可能ではあるが、他の材料の物性値はほとんど報告されておらず、シミュレーションが困難であることもわかってきた。これを解決するために、多様な材料を対象にし、また、各種レーザーのパラメータも包括したレーザー加工データベースを構築することとした。これに関しては、次節で述べる。

(2) 加工 CPS の提唱と AI の融合

CPS という概念は、実世界(Physical System)にある膨大なデータをサイバー空間(Cyber)に取り込み、そこで解析された結果や知識を、再度、実空間での問題解決に展開するというものである。このコンセプト自身、情報科学、ネットワークの研究分野で生まれたものであが、レーザー加工にも導入しようと提案したのは、本拠点の活動がきっかけである。

レーザー加工は、物理として見たとき、それは、「非線形」、「非平衡」、「開放系」が複雑に絡まった領域で、物理の専門家からは難しすぎるために、避けられてきた領域である。その課題に取り組みだしたとき、批判的な意見も聞こえてきたが、この数年という短い期間にもかかわらず、我々の提案が認知され、拡大してきていることは評価できる。そして、この取り組みは、NEDO プロ、Q-LEAP に拡大し、さらに、内閣府 SIP において、「光・量子を活用した Society 5.0」として研究開発を開始するに至っている。また、加工に限らず、CPS は、産業界において多種多様な分野で必要とされており、現在我々が進めている加工 CPS の構築が、その先駆けとなり、他分野に発展することが期待される。

レーザー加工のメカニズム解明する上で、非常に困難な問題として、その場観察の難しさが挙げられる。レーザー光が物質に照射される部分では、1000℃以上の高温になり、さらに、レーザー加工は、被加工物質の内部で実際に起こっている加工の姿を観察することが不可能である。しかし、膨大なデータを処理し、AI 技術を活用することで、実際に掘れている深さや加工部の温度を推定できることが分かってきた。本拠点での活動から、非常に複雑な現象を学理としてとらえ、さらに、CPS のコンセプトの導入、AI の活用と、活動のスタイルを広く展開してきた点は、先駆的な取り組みとして評価できる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

本活動では、先に述べたようにレーザー加工データベースの構築を進めているが、データベースは、継続性が非常に大きな課題である。これを確保するために、この活動を TACMI コンソで、継続することで、産業価値のみならず、学術的価値を高めることとした。

(3) EUV リソグラフィ(EUVL)と EUV 領域での物性研究

TSMC は、今年 5 月、2019 年から EUVL による半導体チップの量産を開始すると発表し、また、サムソンでも、今年 9 月に、2020 年に EUVL による半導体チップ量産を発表した。大手ファブの 2 社が、EUVL の導入を発表したことで、半導体業界でも、EUVL 周辺技術の関連会があわたしくなっている。

EUVL は、20 年以上前から X 線リソグラフィとして提案、検討されているが、技術的困難のために、先送りされてきた技術である。しかし、現状のリソグラフィ技術では、これ以上の集積化は困難で、その結果として半導体コストの上昇が見えてきた。その課題を解決するために、波長 13.5nm の EUV 光によって、更なる高密度化を達成しようというものである。

しかしながら、波長 100nm 以下の領域では、物質の性質がほとんど分かっていないという状況である。これまで、その必要性がなく、また、測定を行うにしても、光源も含め実験装置がなかったということも理由の一つである。

EUV 領域では、学理よりも先に、産業として必要性が高まったという状況ではあるが、本拠点では、すでに、EUV 領域での高次高調波発生(HHG)の研究を行っている。また、干渉による金属の吸収係数と屈折率を測定する技術「位相敏感高精度測定法」を完成させた。EUVL に用いる材料の屈折率等光学定数を正確に知ることが可能で、既に材料メーカーとの共同研究を開始して、有効なデータが採れることが確認済である。今後不可欠なテーブルトップ型の EUV 領域における光学定数測定システムを開発するとともに、測定技術の産学共同利用を推し進めていく予定である。

(4) 次世代高度化社会を支える技術革新への貢献と、若手ベンチャー企業の育成

a) 個を「活かす」、個を「生かす」

健康で安全な社会を実現するためには、正確で迅速な医療体制の構築が挙げられる。日本の社会は未達の領域であることが、昨今のコロナ禍で痛感させられた。我々は、臓器透明化技術という特異な技術を有しており、これを基に長寿命社会に貢献することとしている。開発した透明化技術 LUCID は、臨床病理診断、創薬における薬効・副作用の迅速精密スクリーニングを中心に、バイオ・医療研究の様々な領域で利用が期待されている。特に、我々が開発した LUCID だけが臨床診断に活用できる。これは、LUCID は 5 年間の病理標本保存義務を唯一満たす透明化技術だからである。加えて、透明化試薬の外販は勿論のこと、病理検体（細胞診、内視鏡生検検体、研究用検体）を短時間で透明化・染色を完了できるシステムを実用化する。そのためには、一般活用には 3 次元観察が可能な顕微鏡の普及が不可欠であり、そのための技術開発を行っている。

b) 高度情報社会への技術革新

次世代情報通信技術は、さらなる高度化が求められており、すでに始まった 5G からさらに高速な情報通信網の整備が期待されている。一方、その実現のためには、無線通信に用いるキャリア周波数をより高い周波数帯に移行する必要がある。5G では日本国内では、3.7 GHz 帯と 4.5 GHz 帯およびミリ波帯の 28GHz 帯が使われている。Beyond 5G/6G では、100GHz を超えるさらに高い周波数の電磁波が利用されることが予想され、それを支える回路技術、デバイス技術などはこれからまだ開発を進めていかなければならない。その中でも特に回路やアンテナを接続するための導波管技術は、従来の金属機械加工ではかなり困難なスケールの微細な形状加工が必要になる。これを実現するためのものとして開発してきたレーザーを使った光造形技術を適用し、100 GHz を越え周波数帯の電磁波デバイス市場への参入の基礎を築く。なお、このデバイスのほとんどは現在輸入品で占められている。この状況から脱却し、日本の Beyond 5G/6G の研究開発を底辺から支えるよう推進する。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

c) ベンチャー企業の役割

特に、臓器透明化のような革新的なアイデアや技術をもとにして、新しいサービスやビジネスを展開するには、ベンチャー企業が最適である。研究所相手の小規模でスタートし、数年単位の短期間で規模を拡大していく計画となる。ここでは、東京大学発のベンチャー企業の「フォトンテックイノベーションズ(株)」を設立、30代の若手を代表者とした。研究成果を「スタートアップスタジオ」型で事業化する自立的な社会実装機能を構築できるように育成していく。そして、マーケティングはもとより、市場向け製品としての開発および製造方法の確立を行い、市販商品として販売を開始する。

将来は、フォトンテックイノベーションズを持ち株会社として、商品ごとの事業会社を設立することを検討している。その場合、持ち株会社では、各事業内容のマーケティング等も行い、グループ企業としての戦略構築も進める。特に研究室発の技術は、完成度の向上、市場性の確認に時間がかかる。しかし、そのような基礎技術の社会提供が、今後の研究開発力を大きく左右する。実際、日本の多くの大学・企業の研究室では、日本製の研究開発装置がほとんど見かけることがない。これは、日本の研究開発の基礎が、外国に依存していることをしており、この状況からの脱却の糸口を示す。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.1 知的財産マネジメントの状況

(1) 研究開発成果の知財化

基本的には一塊の研究成果が得られた段階で、東京大学 TLO（知財の権利化、ライセンス業務を行う技術移転機関）に相談して、どの程度の範囲まで知財の出願が可能かを検討することを義務化させている。これまでも、運動支援アクチュエータシステム、生体観察システム、高解像度のビームプロファイル測定方法などに関して協議を実施し、幾つかの特許出願に繋げている。

また、社会実装に近いテーマに関しては、知財の出願だけでなく、ノウハウを固めることも重要となる。3D プリンタでは、種々の依頼造形をこなすことで、造形ノウハウの蓄積を図っている。

(2) 他組織知財の活用

a) RECILS の基本特許はソニーが所有しており、その使用許諾が必要である。以前は、東京大学がソニーから、マーケティング活動に限定し、使用許諾を受けていたが、フォトンテックイノベーションズが RECILS を用いて事業を行うにあたり、2019 年 2 月には新会社とソニー株式会社との間で知財利用に関するライセンス契約を締結した。

b) 同様に、臓器透明化試薬 LUCID の基本特許は JST が所有している。LUCID の試薬販売ビジネスを行うに当たり、フォトンテックイノベーションズは JST に対して、使用許諾を受けた。また、試薬のボトリングを外部企業に委託するが、この際、成分表を渡すのではなく、調合済の試薬を渡すなど、情報管理には最大の注意を払うこととしている。

c) ICCPT 発ベンチャー企業群の知財管理

前述のように、RECILS、LUCID が、すでにベンチャー企業の形態による社会実装を目指している。いずれの活動でも、東大と知財（特許、ノウハウ）だけでなく、外部の特許が必要となる。これらの管理を包括的に行うために、持ち株会社の設立を検討している。詳細は、B1.2(5) 「知財管理も含めた持株会社設立」を参照。

(3) UTripl での知財権の所有

現在、大学から知財を出願する場合、大学 TLO に申請し、大学承継知財の判断を行い、そこで承認された内容が特許出願される。残念ながら、大学承継での判断では、その時点で特許の使用を希望する法人の存在の有無だけで判断され、将来性、あるいは戦略性という観点が全くない。この問題を大学に提起しているが、現状では、見直しが非常に困難である。

大学における知財管理の理想を考えると、知財の専門家、技術の専門家が有機的に特許戦略を考え、その方針に沿って出願の可否を判断すべきである。しかし、大学の場合、技術分野が広すぎ、本部あるいは TLO で知財ポートフォリオの作成や戦略を考えることは必ずしも適切ではない。

この課題について、理想像、現状の問題からバックキャストすると、UTripl で知財を出願することが有効ではないかと考えている。現時点では、UTripl の内部検討の段階であるが、出願費用、特許維持費用は、共同研究利用設備制度での収益あるいは各種 PJ の間接費で賄える見込みを持っている。今後、UTripl として独自に知財を維持、管理する方法を積極的に検討する。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.2 社会実装に向けた課題（規格標準化、規制対応、社会規範・倫理等）の抽出と対応

本拠点の主要な社会実装テーマとして、(1) 炭素繊維強化プラスチック（CFRP）のレーザー加工、(2) 3D プリンティングと、(3) 臓器透明化の3つが上げられる。

(1) CFRP に関しては日本を代表する素材として注目されており、航空機のみならず、自動車の車体や燃料電池車用高圧水素タンク等、さらなる適用拡大に向けて産業界の大きな期待を担っている。材料が使われるためには、その特性だけでなく、加工技術などの周辺技術も確立されなければならない。CFRP のレーザー加工技術は、20 年以上も研究開発が行われてきているが、未だに、安定した技術に到達していない。本拠点では、CFRP の光学的、熱的特性を学理として再検討し、UV レーザー光によるレーザー切断を提案した。その結果、「驚異的」とまで言われるほどの技術として、その検証ができています。しかしながら、実験に用いたレーザーパワーが 1W と、通常の加工用レーザーの出力と比較すると、1/100 から 1/1000 である。今後、これまでに確認された良好な結果が、レーザーパワーが高出力化された場合でも同じ結果が得られるか現在確認中である。また、このような高出力レーザーの開発は多額の予算が必要となるが、幸いにも、本拠点活動から派生した NEDO プロで 20W あるいは 100W の UV レーザーの開発が、この活動との連携で進められている。

CFRP に限らず、ガラス、サファイア等の透明材料や各種金属のレーザー加工の高度化に関しては、NEDO プロの他、TACMI コンソーシアムとの連携を構築して進める。TACMI コンソは、すでに、87 法人 90 グループが参画しており、特定の企業に限らず、より多くの企業との連携をすすめる、本技術のデファクト スタンダード化を目指した。

炭素繊維はリスト規制対象であり、要輸出許可品目になっている。キャッチオール規制も含めた技術輸出管理に関しては、海外へ加工品を持ち出す場合には東京大学安全保障輸出管理規則に基づき該非判定を行い、適切に対応することとしている。

(2) 3D プリンティングは、個別生産技術の一つとして急激な市場成長を遂げている。これは、工業用のみならず、医療用を始めとした個のニーズに対応した製造技術でもあるからである。本プロジェクトで開発を進めている 3D プリンタ RECILS は、100 μ m 以下の解像度をもちながら、数 cm のサイズの造形物を 1 時間程度で作製可能な、解像性と高速造形を両立した特異な技術である。微細孔や中空構造を始め、任意の構造が設計に対してほぼ忠実に形成できるため、これまで製造が不可能であった部品を実現することも可能で、製造技術の究極的な形態として期待されている。社会実装に繋げるため、ベンチャー企業(フォトンテックイノベーションズ株式会社)を 2018 年 10 月 9 日に立ち上げた。光造形品（通信用電磁波コンポーネント）は、2020 年 9 月 1 日から販売開始している。

RECILS に限らず、現在の 3D 造形装置は、造形物の構造に合わせた設計・製造ノウハウの塊である。そのノウハウの蓄積する為に、事業形態を装置売りではなく、造形サービスとする。そして多種多様な造形を行うことにより、装置自身の性能向上につながり、他製品に対する競争力の強化を図る。また、製品の品質保証も課題として挙げられる。最終的には、品質マネジメントシステム（ISO9001）への準拠することが求められるが、まずは、出荷基準を定める（どのように出荷検査を行い、製品として売り出していくか）ことが先決と考える。これはコストと密接に関連するため顧客ごとに対応することになるが、2018 年度導入した X 線 CT を有効に用いることによる透視的検査基準を定めて高付加価値製品とすることを考えている。また、当面の造形サービスの目標は、次世代通信用電磁波コンポーネントとしているが、これには導波管内面に銅めっきすることが必要である。しかしながら、海外製品でもめっきのトラブルが多いと言われている。そのため、めっき膜の信頼性評価基準を定める。特に、めっき膜の密着度に関しては、JIS Z 1522 に準拠したピーリング試験、通信部品規格である Telecordia に準拠したヒートサイクル試験等を実施し、各種規格の適合性を確保する。

(3) 臓器透明化技術 LUCID は、検体（標本）を透明化試薬に浸すことにより臓器を透明化するもので、切片標本を作ることなく標本内部を観察することが出来る。これにより、癌や病原体を早

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

期且つ確実に見つけ出すことが可能になる。透明化試薬は、フォトンテックイノベーションズ(株)を介して2021年5月に販売を開始した。体外診断用医薬品とすると、医薬品医療機器等法の規制の範疇も入ってしまうため、規制当局(厚生労働省及び各都道府県)への認可が必要となる。そこで、当面は、医薬品開発の性能評価等に関連した研究開発機関への提供に止めることとし、市場動向を照らし合わせながら、認可の時期を検討していく計画である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.3 マーケティング・試験的な取組の状況（必要に応じて記載）

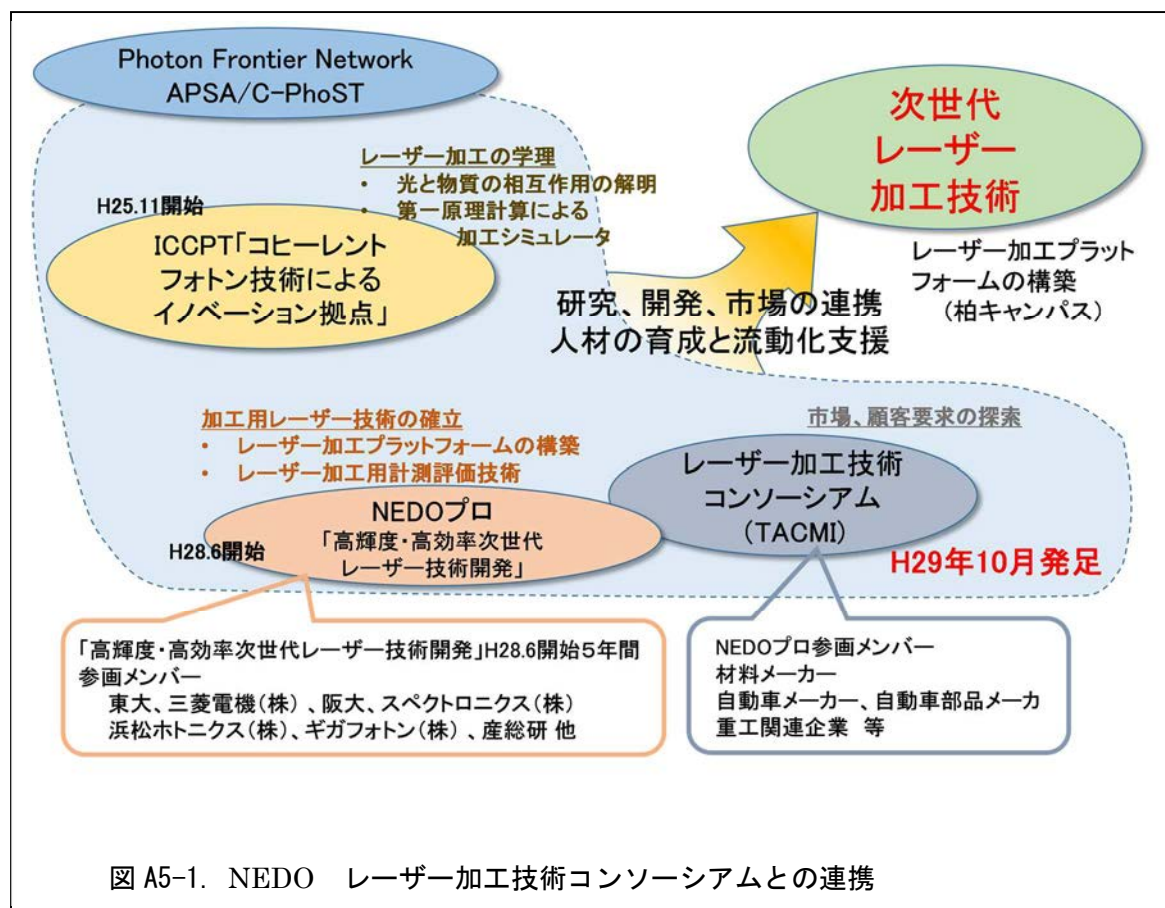
(1) マーケティングへの取り組み

市場動向を的確に把握することは社会実装の基本と考え、以下の様々な手法により行っている。

(i) オープンステージ、フォーカスステージを通じて各企業から最新情報提供がなされ、社会実装に向けた研究開発の方向性について定期的に議論している。

(ii) 国内、海外の大学、国研、企業訪問の中で研究開発の方向性を議論して、参考となれば取り入れる手法をとっている。さらに、ニーズに適合していると判断した場合には、その企業等に積極的に訪問して内容を詰めるための議論を行っている。

レーザー加工技術については、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」と連携して進めたが、現在では、図 A5-1 に示すように、NEDO プロジェクトで立ち上げる TACMI コンソーシアムを活用し、レーザー加工に対する市場要求を的確に把握し、それを研究開発に反映させている。本拠点と NEDO プロとが共同で、30 を超える企業へのヒアリングをおこない、現在、レーザー加工ロードマップを作成中である。また、TACMI コンソには、2022 年 5 月現在、100 法人、103 グループが加入している。



(3) 各種展示会への参加を通じて、製品市場動向について種々の観点からウォッチしている。また、本プロジェクトの成果を展示会に出展し、成果の PR と共に、マーケティング活動を行うこととしている。

2019 年度までは、3D プリンタに関しては、開発展開が日本よりも進んでいる欧米のマイクロ流路市場に積極的に向き、先行する海外市場の動向についても調査を実施した。2020 年度以降、国内外の展示会の多くが COVID-19 の影響により中止またはオンライン開催となり、マーケティングの機会が大幅に減少したが、web 版の経済・ビジネスニュース等を活用して、可能な限り情報収集に努めた。

(4) 市場調査会社のマーケットレポート等を積極的に利用して、特定ビジネス分野の市場規模、

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

企業シェア、将来予測、メジャープレイヤーの動向等の把握に努めている。また、各産業のテクノロジー・ロードマップを入手することにより市場ニーズを予測して、動向把握に生かすことも考えている。

(2) 試験的な取り組み

○ベンチャー企業による事業化への取り組み

設立したフォトンテックイノベーションズでは、臓器透明化試薬に関して 2020 年度に本格稼働すべく、①実際の製造・販売を開始し、既に関係のある企業・研究機関を中心に納入すること、②国内外の病理関係の学会に出展し、試薬に関する認知度を向上させること、③LUCID 試薬を使った研究を複数の研究者に行ってもらうことで、論文発表や学会発表等で LUCID の認知度も向上させることを目標としたが、COVID-19 の影響によって大幅な修正を余儀なくされた。

具体的には、2019 年度より関係構築をしてきた製造委託先候補の国内大手化学薬品メーカー、原料調達先候補のイタリア化学薬品メーカーとの取引が、調達・製造寸前になって COVID-19 の影響により無期延期となったことで、2020 年度の初製造・出荷分について原料調達および製造を大幅に見直した。その結果、代替原料を国内商社から調達し、製品の製造は内製とした。既に初回製造分の原料調達及び製造は終了しており、具体的な購入意向・見積依頼を受けている国内の複数の研究機関へ無料サンプルを提供して顧客の確保を進めている。

3D プリンティングによる受託試作・製造サービスも同様、2020 年度本格稼働のため、①提供開始できる体制を整え、通信コンポーネント試作・製作の受注を開始し、受託試作・製造および販売を開始すること、②本格的な事業の展開に備え日英両言語による技術資料(カタログ等)の充実、③国内関連研究機関への営業活動、著名学会・展示会への参加(国内外)を実施し、本造形品の精度・性能をアピールすることを目標としていた。

これらの目標に対し、以下を達成した。

- ・通信コンポーネント試作受注事業を開始(2020 年 9 月)
- ・受託試作サービスについて初受注・初納品を実現(2020 年 9 月)
- ・ミリ波・テラヘルツ派分野のユーザーに対するマーケティング活動の実施(関連する国内の研究機関、電機メーカー、公的機関へのヒアリングを通じた市場ニーズや要求仕様の確認)(2020 年度を通じて実施)

一方、当初計画に挙げていた国内外の関連見本市・学会への出展については、COVID-19 により世界的に見本市や学会が延期・中止となったことから出展ができず、新規顧客開拓のチャンネルは限定的となった。

○共同研究利用設備制度の創設

本報告書の各所で示す通り、本事業を起点として、成果や戦略を拡大する多数のプロジェクトが生まれ、ラウンドテーブルディスカッションの場を要にそれら相互の有機的な連携も図られることで、それぞれの戦略的テーマの活動規模がクリティカルマスへと拡大してきたところであるが、一方で、それら多数のプロジェクト間の調整については運用上の多体問題も発生した。ラウンドテーブルディスカッションにおいて、この問題が活動規模の拡大と共に個別の活動のスピード感を落とさないような学内制度改変について議論が行われた。その結果、個々のプロジェクト(PJ)を下支えする研究開発基盤として、スペースや設備の確保、整備、運用、ユーザー展開、継続活用、運用人材確保などサステナビリティをパッケージで実現する必要があることが課題抽出された。具体的には、以下の課題が提起された。

- ・各プロジェクトで開発中・開発した、まだ市販・市場投入されていない最先端の設備をいち早く試用提供できること
- ・開発プロジェクトの事業実施中にユーザーからのフィードバックを得るための支援ができること
- ・評価や比較に必要な周辺の(市販されている)設備も一体的(ワンストップで)に提供できること

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

- ・提供設備に追加・接続する開発用スペース・基盤を一体的に提供できること
- ・プロジェクト終了後の設備を継承可能とし、それらを一体で整備・維持・管理し、戦略的・サステナブルに運用できること

この解決策として

各PJにおける「整備した設備の他の活動（他のPJ活動等）での活用」に関する契約条件等を遵守しつつ、可能な限り一体的に活用できる体制を構築し、かつ、それを活用する「ほかの活動」（特に成果展開のための民間との共同研究など）が当初よりその設備の価値に相当する費用を負担する制度を整備する

というコンセプトで新しい制度の創設を検討した。制度設計上のポイントとしては

- ✓ 少額の共同研究などにおいても、適正な設備利用負担を可能とし、有償で成果を活用するという事実によって国プロの成果を「正しく」発信する
- ✓ プラットフォーム維持経費の適切な負担分担を進め、（運営費などの）裁量財源は過去の開発成果の維持や運用ではなく、先行的研究など投資へ活用する体制へ転換する

といった観点が挙げられ、それによって、

- ・ プロジェクト実施中より、終了後の需要および収支が予測できるようにする、
- ・ プロジェクト終了後も活用されるものは拡充する、
- ・ それ以外については、適切なソフトランディングを設計できるようにする、

といった戦略判断をも可能とすることが重要であると整理した。

上記戦略的判断のもとで構築した本制度は、制度概要として以下のような特徴が挙げられる。

- (a) 制度の運用は、東京大学の正式な組織である UTripl が主体となり、継続性を確保する。
- (b) 光学実験などの特徴として、レーザーや計測システムなどの（据付型の）複数の装置を、目的に応じて組み合わせることで一体として利用する必要があるため、過去の PJ を含む複数の PJ の装置を 1 つの実験室の中で組み合わせ方を変えながら利用できる。
- (c) このため、実験室等のスペースを UTripl が本制度用に一括で借用し、空調・クリーンフィルターや光熱水の供給など共通基盤環境を整備・提供し、利用者は 1m² や 1 日などの小さな単位でも利用できる。
- (d) 各 PJ で購入した装置は PJ 終了後、UTripl が本制度のもとで継承する。
- (e) 各 PJ は、既存（過去 PJ）の装置を有償で利用しつつ、(c)により、それら装置と組み合わせたり接続したりして活用する自身の購入装置を、近接するスペースに設置することが可能である。この際、各 PJ は自身が購入した装置を設置する面積に応じたスペース利用料を本制度に支払う。
- (f) 各 PJ が設置した装置は、PJ の方針によって本制度に登録することが可能であり、登録された装置は既存装置と同様に、別の活動に貸し出し可能である。この際、借用を受ける PJ は借用した期間（時間）に対応する (c) の費用を、元の PJ に代わって支払う。本事業のように、当該 PJ が契約上、自身が整備開発した装置システムを市場化テスト等の目的で有償貸し出すことを許容する場合は、借用 PJ は (c) に装置自身の使用料も加えて支払い、支払われた額は元の PJ の活動拡大に充填される。

上記 (f) に例示的に説明した通り、現在実施中の PJ が整備した装置については、各 PJ での契約条件の遵守が優先され、個々の装置の貸し出し条件に関しては個別に設定する必要があるが、利用者側から見た時に同じ枠組みの中でワンストップ利用できるようになり、調整に要する人的・時間的コストを大幅に削減することが可能となった。また、基盤実験環境から、個別の装置や完成したアプリケーションシステムまで、異なる階層のリソースをアラカルトで組み合わせることで必要なだけ利用できる制度となった。これは、結果として、現代的なクラウドサービスのように、インパクトのあるリソースを小口で提供する制度になっており、特にエントリー段階の産学共同研究において、事業成果を明示的に投入することで成果のアピール力が高まることが確認できている。このように、組織内部の運用効率化を当初目的として設計した本制度は、結果として UTripl という産学連携拠点の主要な求心力となることが期待できる制度として運用が開始された。現在、

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

この新たな役割を伸ばしていくための制度拡張の議論も開始している。

研究設備の有料貸出は、東京大学として、各種プラットフォーム事業（分析サービス等）で多数行われているが、本制度のように民間共同研究を含むプロジェクト間の相互運用を効率化することを直接的な目的とした設備利用制度は前例がなかった。本制度は、商用利用についても許容可能としたため、特に慎重な制度設計が求められた。このため、これまで本部や理学系研究科の担当事務組織を交えて丁寧な調整を行い、さらに、UTripl を構成する理学系研究科、工学系研究科、物性研究所の部局長あるいは部局長の指名する副研究科長とも議論を重ね、その後、UTripl 運営委員会の承認により 2021 年 9 月末に開始された(2021 年 4 月からの遡り適用)。一部の実験設備に関しては、他組織が管理する設備との組み合わせで使用されているものがあり、その場合は、該当組織との事前調整が必要であり、UTripl 関係では、その調整も行った上で実施している。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.4 研究開発成果の多様な展開の状況

○社会実装に向けて方向性を拡大したテーマ

(1) スリットテープ加工

これまでは、航空機や自動車業界等でも適用可能な、板厚 3mm 以上の CFRP を加工速度 1m/min、HAZ<5 μ m、Ra<3 μ m の高速、高品質加工が可能な UV レーザー加工を目標としてきた。そして、これまでの検討の結果、波長 258nm のナノ秒レーザーによる CFRP の高アスペクト比加工が可能であることがわかった。しかしながら、近年では、航空機部材への CFRP 適用は、厚板を使うよりもシート状の CFRP 未硬化前駆体(プリプレグ)を Automated Fiber Placement (AFP)マシンを使って自動積層し、IR ヒーターで加熱硬化貼り付けする流れに変わってきている。これは、一定の線幅に切断されたテープを使うことにより 3 次元形状に積層可能なためである。そこで、レーザーによる被加工材を厚膜 CFRP から未硬化プリプレグに変更し、高精度レーザー加工により幅 1/8~1/2 インチに裁断することとした。0.3mm 厚程度の薄厚プリプレグの高速な加工速度 50m/min、幅精度 0.1mm の高品質な加工を両立する UV レーザー加工システムを実装する。従来の機械的な裁断時に発生する繊維毛羽や堆積樹脂による欠点が原理的に起こりえないのであれば、品質保証に要求されるコストを大幅に低減できる。



- (2) EUV 光源を使った超微細化露光技術(EUV リソグラフィ、EUVL)を完成させるための技術の一つとして、小型の集光ミラーの検査用のコヒーレント UV 光源の研究開発を行い、EUVL 用光源の開発・販売会社であるギガフォトン社に“高次高調波発生によるコヒーレント EUV 光源技術”として技術移転した。ギガフォトン社は、EUV リソグラフィ用光源とセット販売を見込んでいたが、2020 年末時点では EUV 光源自体の大規模な売上げの目途が立っていないため、本製品の売上げ見込みを出すことができないのが現状である。さらにその後のマーケット調査等から、EUV 露光用フォトマスクの検査光源への適用も有望であることがわかり、現在その可能性を精査中である。EUV 露光用フォトマスクの検査光源においてもその光学部品評価用に本コヒーレント EUV 光源が利用可能と考えられ、この方面からの販売拡大を狙っていく。
- (3) 2 重スリットを用いた EUV 領域における複素屈折率の測定技術である位相敏感高精度測定技術は、研究としては 2017 年ごろにほぼ完了していたが、実査に産業界からの要望で、それに適用すると得られた実験値が想定していた値と異なり、更に、一桁高い精度が要求された。その対応策の検討から、測定法、データフィッティング法を見直し、2021 年になってやっと、依頼元である企業も納得できる結果が得られた。このように、論文としての技術レベルと実際に産業界で必要とされる技術の間にはギャップがあり、本活動がなければ、本技術は論文レベルで進展が停止していたと考えており、COI 活動の良い例である。
- (4) 宇宙背景放射観測用衛星の計画が日米欧の研究プロジェクトで進められているが、その技術課題として直径 45 cm のサファイア表面にモスアイ加工を施し、反射防止膜を作製する依頼があったのは、2015 年である。それ以前は、ドイツの企業研究所に作製を依頼していたが、加

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

工精度、加工時間の問題が解決できずにいた。そのような状況で、ICCPT に相談があり、当時の所有していたレーザーで試し加工を行ったところ、仕様を満足するためには、加工時間が7年以上かかるとの試算となった。そのため、このプロジェクトの中止を考えたが、レーザーの仕様、加工法の再検討を行い、7年を数か月程度に短縮できる可能性があるとの判断が得られ、研究を継続した。その後、最新型レーザーをSIPの予算で準備することができ、また、担当している博士課程の学生の努力の結果、7年を5~6週間に短縮できることが分かった。更に、50~200GHzのミリ波に対して、反射率を2%以下に低くできることを実証し、すでに、本技術の採用が決まった。また、30cm径の同サファイア板は、すでに、米国Green Bank天文台に装着され、試験運転が開始された。

このような技術は、一般企業では対応できず、ICCPTだからこそ達成できたものである。最終目標達成までに、まだ、7~8年の期間を要するが、COI活動が宇宙の誕生の謎の解明を目指したBig Projectに貢献できるという大きな期待が持てる。

○新たな研究開発課題への取り組み状況

レーザー破壊閾値を高速に決定する手法及びアルゴリズムの開発に成功した。これは、博士課程の学生のアイデアがきっかけで始まったもので、当初、計画に含まれていなかったが、アイデア、波及効果が大きいと考え、本プロジェクトのテーマとしてサポートを行っている。既に、特許出願(日、米)は終了した。

本技術の説明は省略するが、本システムは、簡単な構成で、高分解能、かつ、安価であることを特徴としており、新たなレーザー破壊閾値計測の標準として発展する可能性がある。さらに、簡便で安価であるため、すべてのレーザー加工機に搭載できる可能性もあり、ビジネスチャンスも大きいと考えている。

本成果は、フォトンテックイノベーションズ(株)での事業化を考えている。大学研究室では、若手研究者のアイデアで、様々な研究に便利なツールが生まれる。しかし、このような成果は、市場規模は小さく、単独でのビジネス化は不可能であるが、その技術の使用を希望する研究者が、かなり居ることも事実である。通常であれば埋もれてしまうような成果を、若手自身で事業化をトライする場が得られれば、大きなインセンティブとなり、また、新しいキャリアパスになると考えている。今後、フォトンテックイノベーションズを、単に、COI事業の事業化の場としてだけでなく、COIメンバー以外の若手研究者の成果も社会に提供するサポートを行い、「若手が元氣の出る」体制の推進を進める。

○社会実装に向けたアウトリーチ活動

社会実装を目指したアウトリーチ活動のために、2016年度に3Dプリンタのプロトタイプ機を試作して各種展示会に動体展示してきた。これは、単なるパネル展示では訴えきれないためであり、実機展示等で一般評価を受け、その意見を参考として研究開発を進めてきた。プロトタイプ機は、顧客要求の一つとなりうる“コンパクト性”を意識して設計を工夫した。初めて出展した「3Dプリンティング展2016(2016年1月27日~29日、東京ビックサイト)」では、設置ブースへは70名程度の来場者があり、その中の雑誌記者により日経ものづくり3月号に記事(「日本発の量産型3Dプリンタ/高い生産性と微細さを両立する新方式」日経ものづくり3月号p.112-115.)が掲載されるに繋がった。その後、次年度からは、広くアピールするためにSPIE Photonic West/BIOS(サンフランシスコ)に海外展示することになったが、さすがに実機を持っていくことは困難だったため、代わりに研究紹介ビデオを作成してアピール効果を維持・向上させた。これらの展示を何年間か継続して行うことにより、いろいろな会社からデモ依頼が来るようになってきた。依頼造形サンプル数を年度ごとに比較すると、

2016年度:92件

2017年度:272件

A イノベーション創出に向けた活動実績

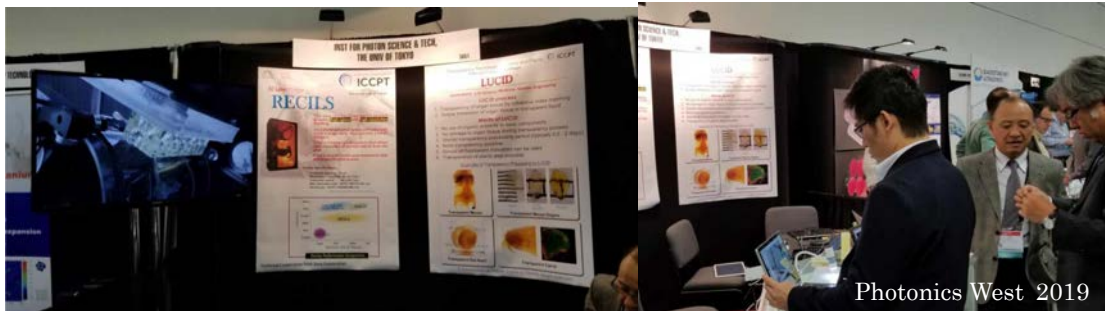
5 社会実装に向けた必要な対応

2018 年度:425 件

2019 年度:392 件

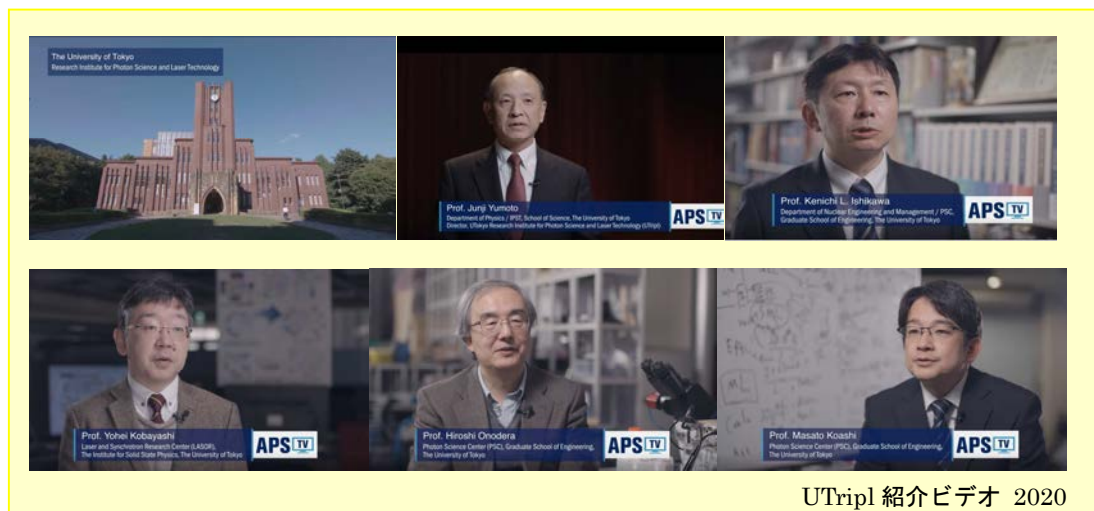
2020 年度:127 件

となっており、展示会での宣伝効果が依頼サンプル数に反映していると考えている。これらは、具体的な市場動向がわかるようになってきたと共に、造形のスキルアップにも繋がっている。



また、研究紹介ビデオは、3D プリンタ RECILS 以外にも、臓器透明化 LUCID、高精度レーザー加工についても制作しており（英語版、日本語版ともに制作済である）、アウトリーチ活動の有効性を高めることに役立っている。

拠点自体の紹介については、ICCPT および UTrip1 についてビデオ制作している。特に、後者は、米国物理学会 (APS) から動画放映の打診を受けたもので (APS-TV を介して公開)、主要学会である APS から組織活動の評価を受けた証でもある。制作した動画は COI を始めとする UTrip1 が主体となるプロジェクトのアウトリーチ活動としても有効活用することが可能となる。今後のアウトリーチ活動を始め、マーケティング活動等にも広く用いる予定である。



Nature インタビュー記事もアウトリーチ活動に有効と考え、本年度に「臓器透明化 LUCID」と「3D プリンタ RECILS」について 2021 年度に制作した。Nature 誌のブランドに沿った、研究や技術にフォーカスした英文記事として配信するものであり、ブランド力を利用したアピール効果を狙っている。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.1 自立的なプラットフォームの構築に向けた拠点の強み・資産の形成状況

(1) 多様性に富んだ人材

本拠点では、物理、化学等の基礎分野での研究者を中心として活動を進めており、個々の研究レベルは非常に高い。しかし、一般的に、大学内でも基礎分野と応用分野の乖離が問題とされているが、本拠点の活動に参加した基礎分野の研究者は、基礎に限ることなく応用にも興味を持ち、さらに、社会実装の中で懸念される問題の解決に積極的に取り組んでおり、その結果として、学術に裏付けされた技術として完成度の高い、そして、信頼できる成果を提供できる点は、大きな強みである。また、医師免許を持っている研究者が2名、工学系と理学系(*)に在籍しており、多様性の持ったチームが構成できている点も強みで、特に医学系との連携の場合、医学系の人材とそれ以外の人材の距離が、なかなか埋まらないう問題もあるが、本拠点では、両者が同一組織内で活動しているため、密接度の高い多様性を確保できている点も強みである。また、博士号と弁理士資格を持った女性研究者も雇用しており、知財戦略などで活躍している。

なお、若手人材の育成については、2.2で述べる。

* 内1名は、2018年4月1日に東大病院に転出し、さらに、2021年7月に浜松医科大学教授として異動した。

(2) フォトンサイエンス研究機構での特定事業費の恒常化

フォトンサイエンス研究機構（IPST）は、2013年10月に発足し、2013年度から2017年度までの5年間、特定事業費をして配布されていた。通常、5年終了時に一般経費化の申請を行うが、本機構では1年前倒し、2017年度からの恒常化を申請した。審査では、本COI活動とその関連活動が評価され、恒常化が認められた。その結果、2017年度、2018年度は、フォトンサイエンス研

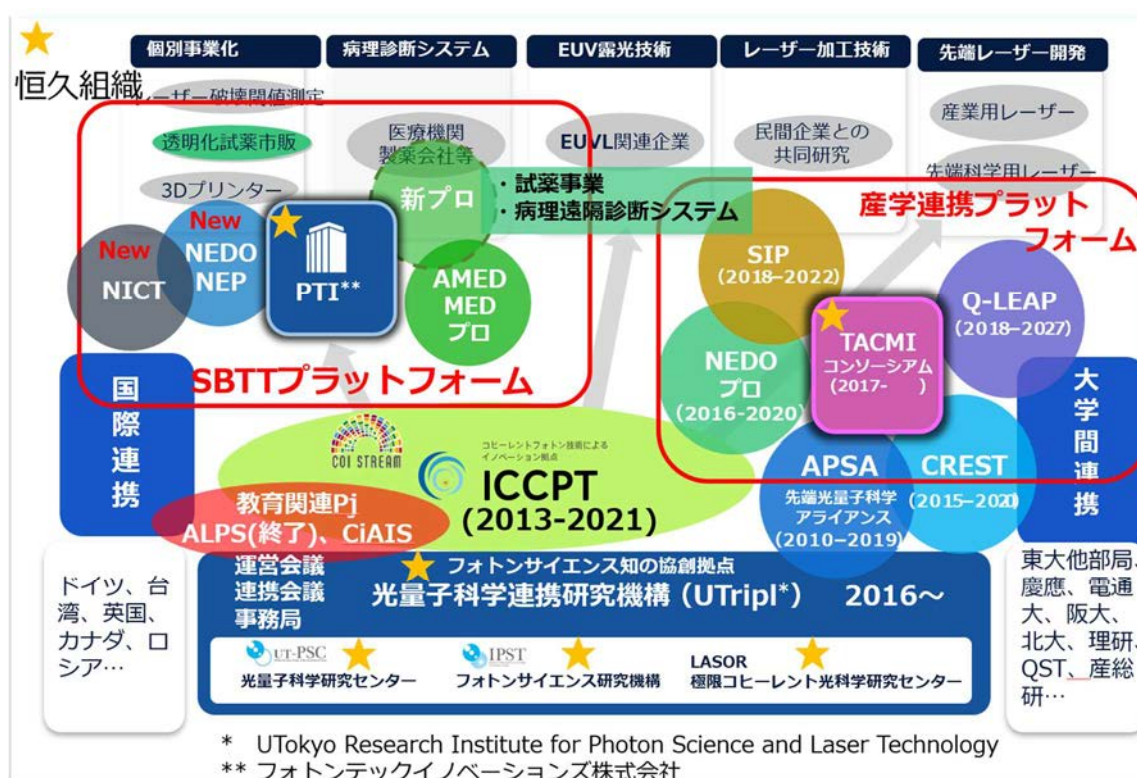


図 B1-1. フォトンサイエンス知の協創プラットフォーム

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

究機構では一般経費として約 46.8 百万円の配布を受け、以降、継続される。この恒常化は、組織の安定的、かつ継続的な維持発展のために有効で、さらに、COI プロジェクトが終了しても継続される安定基盤が構築された。

(3) 光量子科学連携機構の設立

前述した様に、2016 年 12 月 1 日に UTripl を設立した。これは、長期的視野に立ち、幅広い成果を生み出し、また、人材育成、産学連携も含めた総合的な活動を行う「フォトンサイエンス知の協創プラットフォーム」の構築を目指している。UTripl は、

- ・ 理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構
- ・ 工学系研究科附属光量子科学研究センター
- ・ 物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センター

の部局の異なる 3 組織で構成し、部局間の壁を取り除きし、効率的運用を進めるものである。尚、UTripl のメンバーは、各部局に本務を置き、UTripl に兼務発令が行われている。

図 B1-1 に、UTripl での組織構成とそこで行われているプロジェクトをまとめたものを示したが、NEDO プロ、TACMI コンソーシアム、AMED の他、2018 年 9 月に採択された Q-LEAP 等のプロジェクト、さらには、ベンチャー企業の設立、人材育成を推進する体制が構築され、継続的な発展の基盤が構築できた。また、人材育成 2.2 で述べるが、博士学生対象を対象とした卓越 RA 制度を、2019 年度より UTripl として進めた。

(4) プロジェクト資産の活用

COI、NEDO 等の活動で、多種多様な研究設備の活用が可能となった。これらの設備を、学内、学外に有料での貸出し、その収入を研究活動に還元できるよう、学内での調整を進めている。そのために、本郷キャンパスに 242 m²、柏キャンパスに 490 m²の実験スペースをすでに確保し、さらに、柏 II にもスペースを確保する予定である。

尚、RECILS を事業化するフォトンテックイノベーションズ (PTI) では、発足当初、設備を所有する資金的余裕がないため、本制度を活用し、大学所有の RECILS を借用し、製造、販売を行う。

このように、UTripl として研究資産を共用化し、更に、有料での貸し出しを可能とすることで、各 PJ の壁を越えた資産の活用が可能となった。さらに、本 PJ での成果の社会実装を担っている PTI は自己設備を持たずに事業展開をするため、本研究資産活用を利用することにより、今後の活動の加速が図られる。

(5) 知財管理も含めた持株会社設立

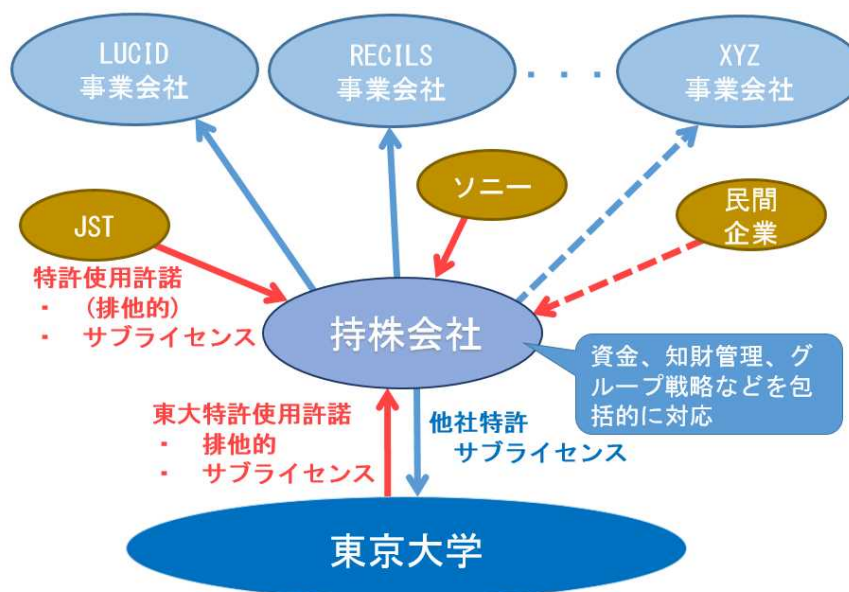


図 B1-2 持ち株会社方式によるグループ経営

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

3D プリンタ RECILS、臓器透明化試薬 LUCID の事業化については、すでに述べたが、いずれの事業化において、ソニー、JST が所有している特許が必要となる。そのため、複数の企業と知財使用許諾交渉が必要となり、また、東大との知財交渉も必要となる。現時点では、フォトンテックイノベーション(株)では、RECILS の事業化を最優先課題として事業化を進めるが、LUCID、さらには、それに続く、複数のベンチャー企業を立ち上げる際に、フォトンテックイノベーション(株)を、ICCPT 発ベンチャー企業群の持ち株会社として再整理し、資金調達や知財等も含めた全体戦略の立案と推進する組織にすることを計画している。

また、現在、PJ の成果は、大学から特許出願しているが、UTripl から出願し、その費用の維持を行う体制の構築を検討している。特許出願費用、維持費用は、総額 1000 万円近く必要となるが、自ら行うことで、「本気の特許戦略」を考える体質が醸成され、また、その顧客探しも自ら行う為、UTripl の責任とリスクは大きくなる。しかし、その対応ができることこそが、真の自立化と考え、その実現に向け前進させたい。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.2 産学連携を効果的にするルール・運営方法の工夫

前述の様（図 A3-2）に、COIにおける活動を知財確保および保護の観点から3つのステージに分けて行うこととしている。ステージごとに、情報共有の範囲を定めており、オープンステージ、フォーカスステージ、クローズドステージとしている。これにより、企業にとって不可欠な“守秘性と効率”を兼ね備えることが出来る。オープンステージでは、オープンラウンドディスカッションとして市場動向や産業ニーズを企業サイドから、先端科学（学術的）動向を大学から紹介しあう場を提供する。さらに、産業インパクトのある高度な課題を学術課題として“翻訳”して大学内の各研究室に参加を呼びかけることとしている。

この場合、各研究室は特定の領域に限定してしまつては、産学連携が有効に働かないことに繋がる恐れがある。このためには、理学、工学、化学はもとより、医、薬、農などの異分野とも容易に連携できる体制づくりが必要である。本拠点では、光科学の分野での効率連携が可能な仕組みを有する光量子科学連携研究機構（UTripl）を構築している。理学部のフォトンサイエンス研究機構、工学部の光量子科学研究センター、物性研の極限コヒーレント科学研究センターから成り、部局相当の高い組織的な権限を有することにより大型プロジェクトを伴う産学連携が可能となる様にしている。また、部局横断的な連携体制を構築できるため、これを求心力として、いろいろな分野での幅広い連携を行うことを可能となる。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.3 自立的なプラットフォームの構想・設計・稼働の状況

(1) (光量子科学連携研究機構；UTripl)

体制・組織の名称	光量子科学連携研究機構
体制・組織の位置付け・種別	部局相当組織、
体制・組織の長となる者の職位	教授 三尾典克、
体制（マネジメント体制を含む）	現在、教授 8 名、准教授 6 名で、活動を進めている。COI 終了時点では、基本的に現在の体制が維持され、その後、2022 年に自己評価を行った後、5 年間の更新手続きをおこなう。
概要	本連携研究機構は、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構、工学系研究科附属光量子科学研究センター、物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センターの 3 組織を中心として構成し、各組織間の連携による学術研究、産学連携を加速させると共に、多様な組織から人材が集積している特徴を生かし、将来の中核人材育成を推進する「フォトンサイエンス知の協創プラットフォーム」の実現を目指すものである。COI プログラム等のプロジェクトを推進するにあたり、その活動の中核としての役割を担い、卓越した知の創出、その社会実装への展開にもつなげ、新たな社会的価値創造に貢献する。また、下記の TACMI コンソーシアムの事務局は、本連携機構で行っている。そのため、会費の処理は理学系事務が担当し、その後、本連携機構が管理する。

(2) TACMI コンソーシアム

体制・組織の名称	TACMI コンソーシアム
体制・組織の位置付け・種別	コンソーシアム
体制・組織の長となる者の職位	物性研教授 小林洋平
体制（マネジメント体制を含む）	本コンソーシアムは、NEDO プロの活動に合わせて発足したが、基本的に、NEDO プロとは独立である。NEDO プロは、2020 度末で終了するが、その後も、本コンソーシアムを UTripl の管理組織として、運営を継続する。なお、事務局は、UTripl が担当し、総会、幹事会、連携会議とワーキンググループで構成される。
概要	本コンソーシアムは、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の参画組織をいれた、総計 100 法人、103 グループ（2022 年 5 月現在）の企業・大学で構成される。産学連携で光ものづくり協創を推進することを目的とし、COI で創出された成果の他、NEDO、Q-LEAP の成果をプラットフォーム化し、参画メンバーへの有料使用を提供する。その有料借用制度の開始のために、COI 拠点での進めてきた規則を展開する。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

・アウトリーチ活動の実績

2015 年度：

【成果発信のイベント開催】

- ・ 2015/8/21 第二回コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点シンポジウム
- ・ 2015/12/18 光量子科学研究センター・レーザーアライアンス・フォトンサイエンス研究機構合同シンポジウム

【展示会への出展】

- ・ 2015/8/27-28 JST フェア 2015
- ・ 2016/1/27-29 3D Printing 2016

2016 年度：

【展示会への出展】

- ・ 2016/8/25～8/26 JST フェア 2016
- ・ 2016/11/28～11/30 MHS (Micromechatronics and Human Science) 2016
- ・ 2016/10/20 化学工業会関西支部セミナー（講演および展示）
- ・ 2017/1/28～2/2 SPIE Photonic West/BIOS 2017

2017 年度：

【プレス発表】

- ・ 2017/6/5 「3D プリンタで素早く 0.1 ミリの微細構造も形成」日本経済新聞
- ・ 2017/10/1 「紫外線レーザーによる超高精細・高速 3D プリンティング装置」月刊オプトロニクス
- ・ 2017/12/19 「Start up innovation 限りなく透明に近い観察」日経産業新聞

【展示会への出展】

- ・ 2017/8/31-9/1 JST フェア 2017
- ・ 2017/11/2 第 18 回西武信金ビジネスフェア
- ・ 2018/1/30-2/1 SPIE Photonic West 2018
- ・ 2018/2/14-2/16 3D Printing 2018
- ・ 2018/3/17-3/20 応用物理学会展示会 2018 春

【成果発信のイベント開催】

- ・ 2017/12/13 ICCPT/TACMI コンソーシアム 合同シンポジウム
(主催：コヒーレントフォトンによるイノベーション拠点、TACMI コンソーシアム)

2018 年度：

【展示会への出展】

- ・ 2018/8/30～8/31 JST フェア 2018
- ・ 2019/2/5～2/7 SPIE Photonic West 2019

2019 年度：

【プレス発表】

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

・2019/6/18 実験室で軟 X 線名のビームを形成することに成功 — 名のビームで新しい物理を拓く —

【展示会への出展】

- ・ 2019/6/11-6/13 MD&M East 2019
- ・ 2019/9/2-9/5 IRMMW-THz 2019

2020 年度 :

【プレス発表】

- ・ 2020/8/1 アトモラーセンシングを実現
- ・ 2020/9/28 New extreme ultraviolet facility opens for use -A new machine to probe the ultrafast motion of matter is the first of its kind
- ・ 2020/10/8 3MHz の超高繰返し高次高調波発生—2 波長の極端紫外超短パルスに応用に期待
- ・ 2020/5/15 フェムト秒レーザー光の高次高調波によって薄膜の微細加工に成功！ — 極端紫外光の回折限界集光が拓く微細加工の最前線 —
- ・ 2021/3/29 たった 1 つのレーザー加工穴から、数十万点の加工深さビッグデータを取得

【展示会への出展】

- ・ 2020/9/28-11/30 イノベーションジャパン 2020

【成果発信のイベント開催】

- ・ 2021/2/17 フレキシブル医療 IT 研究会

2021 年度 :

【展示会への出展】

- ・ 2021/8/23-9/17 イノベーションジャパン 2021

【成果発信のイベント開催】

- ・ 2021/6/30 理研/ICCPT 合同シンポジウム「超短パルス高出力薄ディスクレーザーの新展開」
- ・ 2021/12/23(予定) TACMI/ICCPT 合同シンポジウム

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.1 次代を担う若手等の多様な人材の育成・活躍促進の状況

(1) ベンチャー企業を通じた若手マネジメント活動

光科学の分野での効率連携が可能な仕組みを有する光量子科学連携研究機構では多様な組織で構成されるプロジェクトを構築できるため、そこでの若手研究者の育成にも有効である。すなわち、産学連携、さらに海外との交流を基に多様な研究開発テーマに対して様々なアプローチを行う必要があるが、この経験が今後の研究者生活に役立つことになる。

さらに、研究以外でもベンチャー企業の立ち上げに際して、若手を登用している。ここでは、3D プリンタや臓器透明化試薬の市場展開にベンチャーを活用するが、シード段階を中心にスタートアップまでを若手を積極的に登用している。経験は乏しくてもバイタリティと市場展開の（新鮮な）読みを与えてくれることを期待している。さらに、若手起業家を起業計画の立案打合せに参画させて事業形態案を作成させる等により、積極的な若手によるベンチャー起業を試みている。現在は、以下の取り組みを軸として活動し、ベンチャー企業の技術的骨組みの強化を図っている。

1) 事業計画策定には東大 IPC 協力の下で実施し、産学連携協創本部、東大 TLO とも連携して、事業計画を具体化。

2) キラーアプリケーションとなる造形品を探索すべく、国内外の展示会等の調査を筆頭に、幅広いマーケティング活動を実施中。

3) 解像性向上や適用樹脂拡大のための評価など、3D プリンタとしての性能向上を図るための検討を開始。併せて、その実現のために関連企業との共同研究を開始。

4) 透明化試薬の原料調達ネットワークの構築を図った。COVID-19 の影響で見直さざるを得なくなり、原料調達および製造を海外メーカーから国内商社へと大幅に見直した。2021 年 6 月の初回製造分の原料調達及び製造は終了し、無事出荷した。

また、弁理士資格を有している女性研究者を拠点の中核に取り入れ、知財戦略の立案を中心に、コンソーシアムの運営等拠点マネジメントを担えるように育成している。

(2) 優秀人材の確保と若手人材の育成

2018 年 9 月に、文科省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）が開始され、本連携研究機構から提案した「先端レーザーイノベーション拠点」が採択された。これは、2018 年度から 10 年間（5 年後にステージゲートがある。）のプロジェクトで、Q-LEAP の特徴の一つとして、若手人材育成を柱の一つにしている点である。今後、UTripl では、(a) 准教授クラスの PI を 3 名程度雇用、(b) UTripl における卓越 RA 制度の立ち上げの 2 点を中心に活動を進める。

(a) 准教授クラスの PI の雇用

COI あるいは、Q-LEAP では、間接経費が付与されている。東京大学では、この間接経費を利用し、人件費相当額を大学本部に支払うことで、承継ポストが配分される制度「部局経費を財源とした承継教員の採用承認」が、2015 年 11 月に実施された。この制度を活用することで、プロジェクト雇用ではなく、正規の教員として大学の承継ポストに就くことが可能となる。時限付きポストの場合、特任教員となるために雇用が安定せず、研究に対するインセンティブが低下するという問題があるが、それを解決できる。また、研究費の支援も、プロジェクトの直接経費で行うことが可能であり、人事、研究費の両面で、若手研究者に魅力的な環境を与えることが可能となる。この活動により、10 年後の中核要員を育成することを最大の目的として進める。

(b) 卓越 RA 制度の実施

東京大学では、2018 年度、従来の RA 制度を柔軟的に運用する施策として、卓越 RA 制度を開始した。これは、独創性及び高度な専門性を要する研究プロジェクト等の業務遂行に、選抜された特に優秀な大学院学生を参画させ、研究活動の効果的推進、研究体制の充実及び学術領域を俯瞰する能力の育成を目指している。UTripl では、COI、NEDO プロ、AMED、Q-LEAP などのプロジェクトに参画している学生を対象に、選考方法、選考基準、フォローアップ等のルール作りを行い、2019 年度 4 月から実施した。

これら、准教授クラスから、助教、ポスドク、さらには、大学院学生に対して、インセンティブを与える共に、責任感を醸成する仕組みを構築する場として発展させる。

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

(3) 若手研究者、博士課程学生を対象としたインターンシップ（派遣、受入）の実施

若い時期に、海外の研究者との交流は、その後の人生にとって非常に有益である。そこで、UTripl では、参画している教員と在籍している博士学生全員を対象に、3 か月程度の海外研修を実施している。この経費は、COI プロジェクトでの支出は困難であるが、他の人材育成プロジェクトの経費や ICCPT の恒久化された予算を使って実施している。

また、海外からの博士課程の学生の受け入れも積極的に行っており、UTripl として、2017 年度に 10 名の教員、学生を受け入れている。2017～2020 年度の実績を記載する。（海外からの受け入れの場合は、母国からの経済的支援を受ける場合が多い。）

一方、TACMI コンソーシアムでは、2021 年 10 月 8 日現在、87 法人 90 グループの大学、国研、民間企業が参画している。これらの企業へのインターンも進め、学生に産業の現場を知る機会を提供する。また、海外企業に対してもインターンの受け入れを打診している。欧米のいくつかの企業からは、日本からの学生受け入れの高い興味が示されており、2019 年度夏の実施を目指す。なお、フランホッファーレーザー技術研究所には、2016 年度、東大博士課程 1 年生（当時）を 3 か月間のインターンシップを実施した。また、ITRI（台湾）からの受け入れも提案も受けていたが、コロナ禍の為に実現が見送られている。

(4) 若手部会活動への参画

平成 29 年 3 月に開催された COI2021 会議（北海道）の場で、弊拠点特任研究員の森下裕介が発表した事業化へ向けた取り組みに関する発表が、参加者および講師から高い評価を受け、拠点横断型の若手プロジェクトである COI アクセラレーターチームが結成された。チームを構成するのは東京大学、名古屋大学、信州大学、立命館大学、政策研究大学院大学の若手研究者および URA であり、構造化チームの梶川東工大教授や江渡産総研主任研究員がアドバイザーとして加わった。チームでは約 1 年間にわたり、文科省および JST の協力のもと、若手部会や若手研究者による合宿を通じて各拠点に対するヒアリングやワークショップを行い、研究者や拠点が抱える事業化に関する悩みや課題を抽出するとともに、大学や公的機関、投資家、民間企業などがそれぞれ大学発の事業化に対してどのような支援を行ってきたのかを調査した。しかし、平成 29 年度の活動はあくまで有志によるボランティア活動であったことから、文科省のアドバイザーのもと、チームとして平成 30 年度の COI 若手連携研究ファンドに応募し、採択された。平成 30 年度は若手連携研究ファンドの研究課題「拠点発事業化の加速を目指した COI アクセラレータの手法開発およびその実証研究」として、上記の大学に弘前大学を加えて公式に活動している。本拠点は特任研究員の森下が課題 3「研究室から事業化への課題解決型 COI アクセラレータプログラムの実証」の課題代表者として活動しており、COI の若手研究者による研究成果の社会実装を支援するプログラムおよびシステムを、プロトタイピングして実証する活動を行っている。こうした若手活動の中で得た情報・経験・ネットワークは、弊拠点が行うベンチャー企業の設立に活用されているだけでなく、研究成果を持続的に社会実装できるようなエコシステムを弊拠点が構築する上でも活用されている。

また、この活動は、ICCPT から生まれた PTI とも連携して進めている。

・若手ファンドの成果

本拠点においては、平成 30 年度～平成 31 年度の 2 年間、「拠点発事業化の加速を目指した COI アクセラレータの手法開発及びその実証研究」（平成 30 年度）および、その後継テーマである「新たな大学発イノベーション創出プラットフォーム構築及び組織デザインの検証」（平成 31 年度）を実施した。

両テーマを実施した連携研究チームは、構造化チーム若手部会による第 2 回 COI2021 会議（2017 年 3 月、於・北海道大学）において、本拠点の特任研究員である森下裕介の発表に賛同した複数拠点の URA や事業創出担当者によって結成され、業務外の自主的な活動として、大学の科学技術の成果の社会実装（とりわけベンチャーによる事業化）を促進する取り組みの検討を進めた。具体的には、文部科学省や JST と継続的に協議を行いつつ、各 COI 拠点で事業化を希望する

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

若手研究者やベンチャー支援機関などに対しアンケートやヒアリングを実施し、「研究と本格的な事業化との間にあるギャップ」の存在を具体的な仮説として得た。

平成30年度には、このギャップを対象として、ギャップの検証・明確化に基づく手法開発及びギャップ解消の実証を行うことを目指し、「拠点発事業化の加速を目指したCOI アクセラレータの手法開発およびその実証研究」として若手ファンドに採択され、拠点における正式な若手活動となった。平成31年度には引き続き、連携拠点を拡大し、「新たな大学発イノベーション創出プラットフォーム構築及び組織デザインの検証」として採択され、2年間にわたり活動を行った。

その結果、研究と本格的な事業化との間にあるギャップを明確化し、そのギャップを埋めるために必要な諸活動をデザインするに至ったことから、文部科学省、JSTの承認のもと、令和2年度～最終年度にかけて若手部会におけるチームとして引き続き予算を得て活動を続けた。結果として、研究と本格的な事業化との間にあるギャップ(大学の現場が抱える課題およびその解決のための具体的なアイデア)を整理した上で、ポストCOIにおいても各拠点の研究者、COIに参画した大学・拠点以外の研究者が、自らの研究成果を本格的に事業化しようとする際に活用できるツールやコミュニティを一定程度整備することができた。

本拠点の特任研究員である森下裕介は、前述の通り一連の活動のきっかけを作ったとともに、2年間の若手ファンドにおいて課題代表者を務めるなど、一連の活動において常に主導的な役割を担ってきた。また、一連の活動で得た成果を、本拠点がポストCOIに向けたイノベーション創出プラットフォームの中核組織の1つと位置付ける、拠点発企業フォトンテックイノベーションズ株式会社の活動のデザインおよび経営に活かしてきた。

以下、2年間の若手ファンド活動についてそれぞれ概略を示す。

平成30年度「拠点発事業化の加速を目指したCOI アクセラレータの手法開発及びその実証研究」では、大学の科学技術の成果の社会実装（とりわけベンチャーによる事業化）を促進する取組「COI アクセラレータ」の構築・実施に向け、「研究と本格的な事業化との間にあるギャップ」を対象として、ギャップの検証・明確化に基づく手法開発（課題1）およびギャップ解消の実証（課題2及び3）を行った。

大学発イノベーションを成功させるための新たなアクセラレーション手法の調査・提案を目的とした課題「COI アクセラレーションの手法開発のための調査研究」については、米国での大学発ベンチャーの事例調査から、大学発ベンチャー特有の課題について3つの課題に注目し、各COI拠点に所属する研究者を対象として、大学発ベンチャーに対する研究者の意識に関するアンケート調査を実施し、内容を分析した。また、本拠点の森下が課題代表者を務めた課題「研究室から事業化への課題解決型COI アクセラレータプログラムの実証」においては、COI 2021会議等の発表者から事業化が有望と思われる研究シーズをもつ研究者を約10名選定し、アクセラレータプログラムの実証を行った。プログラムの実施にあたっては、実際にプログラムを実施しておりノウハウを有しているトーマツベンチャーサポート株式会社と連携し、基礎的な起業教育やビジネスモデルの立案、ピッチ講座・発表など約3か月間のアクセラレーションプログラムを実施した。

平成31年度「新たな大学発イノベーション創出プラットフォームの構築及び組織デザインの検証」では、前年度の活動を踏まえ、大学や研究開発機関の持つ研究シーズの本格的な事業化（産業への技術移転およびベンチャー起業による事業化）を促進する取組を拡大・発展し、科学研究成果の社会実装を通じたイノベーション創出を行う「新たな大学発イノベーション創出プラットフォーム」の実現を目指し、活動した。

具体的には、課題「イノベーション創出を最大化する研究共創システムの設計」では、2019年9月19日（木）・20日（金）に、東京の日本科学未来館で「第2回COI学会」を開催し、開催後のアンケートで参加者から高い満足度を得ることができた。課題「研究-事業化ギャップの解消のための知識・組織・人材を絆ぐCOI アクセラレータ」では、COI DRIVE（マッチングサ

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

イト)の受容性検証を中心に、研究―事業化ギャップの解消のための知識・組織・人材を紡ぐCOIアクセラレータの構築に取り組んだ。

また、本拠点の森下が課題代表者を務めた課題3では、ベンチャーキャピタル、金融機関、スタートアップ支援機関など様々なステークホルダーとの協議を行い、上記の一連の取り組みを組織的・継続的に行ってゆくための基盤となる、「組織・コミュニティとしてのプラットフォーム」そのものの構想を行った。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.2 人材の育成・人材循環整理表

○人材の育成、人材循環整理表

※大学等：大学・研究機関 単位：人

(人材の育成等の状況)		合計 (H25-R3)
昇格	同一機関	7
	他機関	6
定年制の取得	同一機関	1
	他機関	2

(出向・クロスアポイントメント等の人事交流状況)		合計 (H25-R3)
大学等→大学等		1
大学等→企業		0
企業→大学等		11

※転籍出向や兼業は含みません。

(転籍等の人材流動の状況)		合計 (H25-R3)
大学等→大学等		10
大学等→企業		3
企業→大学等		6

(外国機関との滞在型研究交流の状況)		合計 (H25-R3)
短期	派遣	0
	受入	13
2ヶ月以上	派遣	14(12)
	受入	39(16)