

## ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクト事後評価（予備評価）報告書

【研究総括】美濃島 薫（電気通信大学 情報理工学研究科／教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

伊東 一良（委員長；大阪大学／名誉教授、産学共創本部／招聘教授）

大内 由美子（株式会社ニコン 光学本部第一設計部／部長）

須田 亮（東京理科大学 理工学部物理学科／教授）

三尾 典克（東京大学 大学院理学系研究科／教授）

### 評価の概要

ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクトでは、エレクトロニクスと光技術とを融合することにより、スペクトル強度が楕状に等間隔に並んだ先端的光源「光コム」を、基盤的かつ革新的なツール「知的光シンセサイザ」へと進化させることを標榜している。これによって、光波の時間、空間、周波数、位相、強度、偏光などの全てのパラメータを、高精度、広範囲にリアルタイムで、自在に制御、操作でき、科学技術から社会生活までの広範囲な応用に使える先進的光源技術を実現し、さらに、未踏の応用分野を開拓するように取り組んでいる。これまでの美濃島薫研究総括をはじめ、各グループリーダーが培って来た光コムに対する世界最高レベルの知見と技術の蓄積をベースとして、本プロジェクトを推進することにより、応用分野の先進技術との融合による様々な革新的新技術が創出され、基礎科学はもちろん、先端光計測における新たなキーテクノロジーとなる可能性が強く示唆されている。

当該プロジェクトは、

- ・美濃島研究総括を中心とした「知的時空間統合化グループ」（電気通信大学）、
- ・「周波数極限化グループ」（産業技術総合研究所）、
- ・「テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ」（徳島大学）の

3つの中核グループと、委託研究先グループの

- ・横浜国立大学、慶應義塾大学、国立天文台で

構成されている。それぞれのグループは、光コムの制御性を「周波数制御性」、「モード制御性」、「時間・コヒーレント多モード制御性」の3つの領域に特徴付け、基盤技術の高度化と応用展開を分担し、連携しながらも独自性を示しつつ包括的に技術開発を行っており、高い研究レベルが維持できるよう工夫されている。

応用に適した光源発生・制御と光コムの特性を生かした利用技術の開発、およびそれらによる応用技術の研究に取り組んだ成果としては、前者では、

- ・ファイバレーザの直接出力を使って周波数絶対値の付与された光コム（以下ファイバコム）としては、最も高い繰り返し周波数（750 MHz）を持つ波長 1  $\mu\text{m}$  帯のイットリビウム添加ファイバレーザによる光コム（以下 Yb ファイバコム）、
- ・1台のレーザから2つの光コムを同期出力する「デュアルコム光源」、
- ・エルビウム添加ファイバレーザを用いた光コム（以下 Er ファイバコム）の「モードフィルタリング技術」による信号検出感度の画期的な向上、
- ・多数の光コムを同期制御することで、コヒーレンスを自在に制御・活用する新たな光

源・利用技術、

- ・常にパルス間隔を等間隔に保つという光コム<sup>①</sup>の性質を有効に利用することにより、環境変化を高精度に補正する手法、

があげられる。また後者では、

- ・デュアルコム分光の固体物性研究、
- ・チャープ・コムによる広範囲、高精度、超高速の瞬時 3 次元イメージング法、
- ・天体分光に適した波長基準として利用可能な光コム光源である天体コム<sup>②</sup>の開発と観測所への設置、
- ・エアロゾル混在ガスのデュアル THz コム分光分析技術の開発

など、多くの新規応用分野の開拓があげられる。これらはいずれも極めて挑戦的な課題であり、光コム<sup>③</sup>の普及において先導的な役割を果たす重要な成果である。

以上より、ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクトは、戦略目標「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成」に資する成果が得られていると判断される。なお、イノベーションの源流を拓くという ERATO プロジェクトの真価は、プロジェクトで得られた成果が将来どのような社会・経済的な価値形成に貢献したかという観点からも問われる。残りの研究期間において、個々の研究成果、方法論をプロジェクトとしてどのようにまとめ将来に繋げるか、よく議論し、学术界、産業界等へのより積極的、戦略的な情報発信とともに幾つかの成果については企業との共同研究など実用化に向けたシナリオ展開策定に取り組むことも期待する。

## 1. 研究プロジェクトの設定および運営

### 1-1. プロジェクトの全体構想

本研究プロジェクトは、すでに述べたように、エレクトロニクスと光技術との融合により、「光コム」を光波の時間、空間、周波数、位相、強度、偏光など全てのパラメータを自在に制御・操作するツール「知的光シンセサイザ」へと進化させ、先端科学から社会応用に至る様々な場面において利用可能な知的光源技術群を開発し、併せて未踏な応用分野を開拓することを標榜し、2013 年度に発足したものである。

レーザー光周波数の絶対値（数百 THz）計測のため、超短パルスレーザーを基にして開発された光コムは、極限的に精密な「周波数物差し」として知られており、2005 年のノーベル物理学賞も主としてこの性質が評価されたものである。現在に至るまで、最も精密な物理量である光の周波数の様々な分野での利用を拓くと同時に、マイクロ波から光までの超ブロードバンド電磁波領域のコヒーレントなリンクを実現してきた。研究総括の美濃島薫氏は、光コム<sup>④</sup>の持つポテンシャルにいち早く注目し、光コムを高精度距離計に適用したが、これは「周波数物差し」以外の応用では世界初であり、現在に至るまでこの分野の研究を牽引し続けている。

本プロジェクトは研究総括の上記の先駆的業績を土台に、光コム技術において、「周波数物差し」を大きく超えた新潮流を世界に先駆けて生み出すことを目指している。特に、各々のパラメータにおける精密性ばかりでなく、時間・空間・周波数軸の精密な関係と、パルスレーザーの高い強度に基づく効率的な非線形光学効果<sup>⑤</sup>の発現を利用することにより、従来の計測技術ではトレードオフの関係にあった超高速と超高精度、高密度と広範囲という計測属

性の制限を緩和し、超広ダイナミックレンジ、広帯域な波長域などの従来技術を凌駕した計測法の創出と、これによって生まれる広範な応用の開拓を目標としている。言い換えれば、光コムを従来の「周波数物差し」という捉え方から一歩踏み出し、光を自由自在に操ることのできるツールと捉え、その実現と未踏な応用の開拓を目指すものであり、斬新なコンセプトのもとに研究を遂行する挑戦的なプロジェクトである。また、美濃島研究総括をはじめ、各グループリーダーが培って来た世界最高レベルの光コムに対する知見と技術の蓄積により、基礎科学はもちろん、分野の特長を生かした融合からさまざまな革新的技術が産み出され、これらが先端光計測のキーテクノロジーとなり得る可能性を有している。

このように、本プロジェクトは独自のコンセプトを掲げた挑戦的、創造的な取り組みによる先進的かつ広範囲に応用可能な基盤技術の創出を目標とするため、更なる融合による発展と、様々な分野への波及効果が大きいと期待されるものであり、ERATO にふさわしい構想であると評価できる。

### 1－2．プロジェクトの目標・計画

上記の全体構想に基づき、本プロジェクトでは、光コムのポテンシャルを生かした応用の創出を促す光源技術と、独自領域の光信号制御・処理、および情報取得手法を伴う光源利用技術の開発に取り組んでいる。同時に、光コムの持つ制御性を、「周波数制御性」、「モード制御性」、「時間・コヒーレント多モード制御性」の3つの視点から捉え、この制御性を自在に活用した革新的応用を開拓する。その為、「知的時空間統合化グループ」（電気通信大学）、「周波数極限化グループ」（産業技術総合研究所）、「テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ」（徳島大学）の3つの中核グループを置くとともに、要素技術研究に重点を置いた委託研究を3機関（慶應義塾大学、横浜国立大学、国立天文台）に委託している。中核グループそれぞれは、基盤技術の高度化と応用展開を分担し、3つの視点をカバーする専門家を結集して、バランスのとれた無理のない体制で有機的に連携しながらプロジェクトを推進し、新技術の開発と新規応用の開拓の実施例を提示することで広く社会に普及することが意図されている。以上により研究期間における目標ならびに計画の設定は適切である。波及効果が表れるまである程度の時間を伴うことも思量されるものの、このような取り組みは得難く、本プロジェクトの役割と意義は大きい。

### 1－3．プロジェクトの運営

本プロジェクトは、研究総括、研究総括補佐とグループリーダー3名（1名は研究総括が兼任）という体制で進められている。また、中核をなす3グループに主として要素技術研究を行う委託研究機関、さらには共同研究先の国内外の大学・研究機関が基礎から応用まで様々なレベルで有機的に連携した構成となっており、プロジェクトを遂行する上でたいへん効果的である。また、研究員の専門分野、各グループの人数などのバランスも妥当である。この様な体制にあって、多様な人材の連携を自主的に働かせる仕組みが作られており、グループや実施機関を越えた交流も盛んである。プロジェクト後半では、有機的にまとまって強固な分野を形成するような成果を創出する運営も意識され、研究開発の効率化・加速化が図られている。

また、研究総括のもと、電気通信大学に置かれたヘッドクォーターも適切に運営されており、予算管理および研究計画策定や各種調整等を含む研究支援の役割が十分に遂行されてい

る。特に予算策定では研究総括の指示にもとづきガイドラインが設けられ、グループとの調整を経て最終案がまとめられており、プロジェクト全体が一体となったマネジメントが遂行されていると思われる。

若手研究人材の育成も適切に行われている。実際、領域（全体）会議やサイト会議に若手研究者や学生も含めて参加させて、高度な議論の場を経験させるとともに、ポスターセッションが行なわれ、自らの分野に近い専門家らとの密な議論に耐える力を養成する場が設けられている。また、複数の大学や国立研究機関がプロジェクトに参画しているメリットを生かし、開催場所を巡回させて他機関を見学する機会や、合同で若手研究者や学生同士が今後の研究の方向性について意見交換する場が設定され、次世代 PI としての力を養成する場が設けられている。

今後は、研究の多様化や発展性を考えると、プロジェクト外の、毛色の異なるグループとの交流も重要である。そこで、企業を含め、より広い交流に留意されると良いと考える。また、本プロジェクトで構築されてきた連携体制は、光コム関連の研究拠点として近未来的にも遠未来的にも極めて高い発展性を有していると考えられるので、本プロジェクト終了後も何らかの形で維持・発展させるべきものであり、その方策に関しては美濃島研究総括がイニシアチブを持って、プロジェクトの残りの期間でアクションプランがまとめられることを期待する。

## 2. 研究の達成状況および得られた研究成果

### 2-1. 知的時空間統合化グループ

本グループは、主として光コムの利用技術の高度化に取り組み、さまざまな応用に適した光コム光源の開発と、光コムの特性を十分に生かした利用技術の開発を目標としている。同時に、それらの光源およびその利用技術の成果を、広範な分野における新規応用の開拓につなげるため、光コムの特性を生かした様々な応用基礎技術の開発を目標としている。

光コム光源の開発では、光コムの応用展開において重要な鍵となる高繰り返し化技術の可能性を、汎用的な Si 検出器の使用が可能な波長  $1\ \mu\text{m}$  帯の「Yb ファイバコム」を開発することにより実証している。この光コムでは、周波数絶対値の付与された  $750\ \text{MHz}$  の高繰り返しと広範な応用に適用できる増幅出力  $10\ \text{W}$  が達成されており、レーザー共振器直接出力を用いて制御されたファイバコムとしては、最も高い繰り返し化が実現されている。また、光コムの標準的光源として信頼性の高い「Er ファイバコム」においても、その高制御性を保ったまま、任意の高繰り返し化を実現するためのモードフィルタリング技術に取り組み、広帯域なフィルタリングが可能な空間光学系に基づいた技術、およびコンパクト化が可能なファイバ光学系を利用した技術を確認し、 $10$  倍以上の増倍率で  $\text{GHz}$  レベルの高繰り返し化、 $40\ \text{dB}$  以上のサイドモード抑制が達成された高品位光源を実現している。

実用的な光源開発においては、 $1$  台のモード同期レーザーから  $f_{\text{rep}}$  のわずかに異なる  $2$  つのコム出力を得るための基礎検討を実施し、良好な結果が得られ始めている。この光源が完成すれば高精度の制御が不要となり、「デュアルコム分光法」の応用が画期的に拡大される。

光コムの利用技術の高度化の例としては、「モードフィルタリング技術」により信号検出感度を画期的に向上させる手法の開発事例があげられる。近年光コムの応用として広く用

いられるデュアルコム分光法において、信号検出感度の向上は普遍的な課題であるが、開発された手法では、応用に即した測定条件の設計指針を得ることでリアルタイム測定が実現されており、この分光法の実用性向上に大きく寄与している。分光応用の高度化の観点からの光コムの「モードフィルタリング技術」の研究は世界的にも例を見ない。

また本グループは、制御された多数の光コムを同期制御することで、光コムのコヒーレンスを自在に制御・活用した新たな光源・利用技術が拓かれることを世界に先駆けて示している。実際に、高速な偏光変調光コムの生成や、空間と時間軸の双方で位相制御がなされた高機能光源“光渦コム”を得ている。光コムの安定なコヒーレントパルス列という時間軸上の特性を、多数の光コムの同期制御技術に積極的に活用する初の試みであり、光波の制御技術、および新規な高度コヒーレント光源技術として、最先端光技術の世界に大きなインパクトを与えている。

さらに、常にパルス間隔を等間隔に保つという光コムの性質を有効に利用する技術が開発されている。この技術により、距離測定において一般的に主要な不確かさ要因となる空気屈折率の環境変化を高精度に補正する手法が開発され、広く用いられている経験式による空気屈折率変化補正を凌駕する精度が得られることが実証されている。この独創技術を実用的応用に結び付けることに成功した意義は大きい。これらは、いずれも光コムを従来の「周波数物差し」という捉え方から一歩踏み出し、光を自由自在に操ることのできるツールとしての機能を示す画期的な成果例である。

光コムの時間軸特性を生かした応用技術の開拓は、これまでほとんど行われてこなかったが、本グループでは、従来のデュアルコム分光を、「時間分解デュアルコム分光」へと拡張発展させることにより、デュアルコム分光の固体物性研究への応用が有効であることを示している。この手法では、光学結晶や半導体などの様々な固体試料の複素光学特性を直接取得することが可能であり、広帯域スペクトル特性と、高時間・周波数分解能を両立した測定が高速に可能である物性評価ツールとして期待される。また、デュアルコム分光は、「周波数極限化グループ」および委託研究先である慶應義塾大学の佐々田教授との共同研究により、高感度性と高分解能性を生かしたドップラーフリー光-光二重共鳴（OODR）分光法に適用するなど、光コムによる革新的材料分析技術について重層的な成果を得ている。

美濃島研究総括らが世界に先駆けて実証した長さ・距離計測技術は、最も光コムの特長が生かされると同時に、実用化に近い応用技術として期待されていたが、本グループにおいて、光コム干渉計の実用化に向けた高度化技術が開発されている。この技術は、光コムによる異なる目盛を持つ複数の距離計測技術を“カスケードにコヒーレントリンク”する技術であり、長距離の高精度絶対計測技術の確立に大きな進展を得たといえるものである。

さらに、本グループにおいて、モード同期ファイバレーザによる光コムを光源としたチャープ・コムを利用した「パルス間スペクトル干渉」による、広範囲・高精度・超高速な瞬時3次元イメージング法が開発されている。実際に、3次元段差形状測定、粗面や内部構造のイメージングに適用し、光コムの精密な間隔のパルス列を用いることで、計測における基本的なトレードオフの関係を解消できることを実証している。本方法は、非常に小さな物体から、大きな段差や長辺と短辺の比が大きな物体の高速3次元形状の精密計測、単発現象の瞬時イメージングなど、多様な応用が期待される。

これらはいずれも極めて挑戦的な課題であり、光コムの普及において先導的な役割を果たす重要な成果である。同時に、研究成果の外部への多数の発表もあって国内外を問わず多くの注目を集めていることは言うまでもなく、プロジェクトの目標に対する達成度は十

分と言える。また、プロジェクト設置期間内で完結する課題ばかりではなく、本プロジェクト終了後も引き続き発展させることが望まれる。

## 2-2. 周波数極限化グループ

本グループでは、主として光コム自体の高繰り返し化、新たな制御法の開発、安定度の向上に関する基盤技術の高度化を研究しつつ、具体的に天文、分子科学、温度計測分野への光コム適用を目指している。その為の重点研究項目として、「天文コムの開発」、「デュアルコム分光」、「光コムの新たな安定化技術」、および「極限的周波数安定度の追求」を設定して研究が実施されている。

重点研究項目のうち、「天文コムの開発」については、「高調波モード同期」および「電気光学変調」の2つの手法について基礎研究を経て Er ファイバコムを用いた堅牢性と信頼性の高い装置が試作され、それを岡山天体物理観測所に設置、さらに国内初の試験観測が行われている。研究の規模、目標の厳しさから、プロジェクトの設置期間に完全な完成に至ることは難しいと推量されるものの、当初予定した目標レベルに達しており、引き続き研究を進めことによりさらなる発展が期待できる。天文コムは、既存の天文台の性能を飛躍的に改善する技術であり、研究成果が国内外の多くの天文台に波及する可能性があつて意義は大きく、また、民間企業への技術移転も期待される。この装置は、将来、天文観測の要となり得る装置であるため、実施機関の取組の一角として開発が引き継がれていくことが望まれる。

「デュアルコム分光」は、重要かつ多岐にわたり応用が広がるため、電気通信大学、徳島大学、横浜国立大学、および慶應義塾大学と協力して研究が実施されている。そのうち、本グループが主体となって「超広帯域デュアルコム分光」「アセチレン分子の遷移双極子モーメントの測定」が実施され、波長  $1.0\text{--}1.9\mu\text{m}$  にわたる複数の分子吸収線の同時観測、圧力に対するアセチレン分子( $\text{C}_2\text{H}_2$ )吸収スペクトル線幅広がりのオルト・パラ依存性の世界に先駆けた発見など、顕著な成果をあげている。「デュアルコム分光を利用したガス温度測定」の研究は、研究の途上で派生的に生じた成果であるが、今後の発展が大いに期待できる。

「光コムの新たな安定化技術」では、「音響光学変調器 (AOM) を用いたオフセットフリーコム」、Dual-beat phase-lock 法の開発に基づく「半整数光コム」および「オフセットフリーコム」、また、励起光強度変調により光コムの全ての周波数制御を行う「全光制御型光コム」、そして、光コムの「Fixed Point 制御」について研究されている。「極限的周波数安定度の追求」は、光コムの雑音について正確に理解し、世界最高の周波数安定度を持つ光コムを開発するために行っている。これまでに、光ファイバが発生する位相雑音に関して 1 秒平均において  $10^{-21}$  の周波数安定度まで評価する手法が開発され、1 秒平均で  $10^{-20}$  程度の周波数安定度を持つ光ファイバ干渉計が実現されている。

本グループでは、世界に先駆けて開発を進めてきたファイバコム技術を進化させ、究極の安定度や従来の常識を超えた応用を目指したが、これらはいずれも、先行研究・競合研究を凌駕するインパクトの高い研究成果であり、光コムの基本的技術の高度化・先鋭化については順調に推移していると言える。天文コムは高度化・先鋭化された光コムの端的な応用例であり、現状では、天文観測に必要な帯域幅を十分満たしてはいないが着実な進歩がみられる。デュアルコム分光に関する研究も顕著な成果を挙げられている。分光という手法は、非常に範囲が広く、さまざまな分野で利用されている手法なので、様々な立場で取り組むことは重要である。今後は本グループで培われた独自色ある技術をさらに高度化しつつも、他のグループとの関係性を明確にしてグループ間連携を促進した上で一層の成果獲得を期待する。

### 2-3. テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ

本グループでは、光コム波長の波長域の拡大を目的として、テラヘルツ波領域の発生と利用技術の高度化、テラヘルツ分光を中心とした応用が展開されている。

THz コムに基づいた分光計測（「デュアル THz コム分光法」）を、さらに高精度化するため、THz コムの間隙部分をギャップレス化した「ギャップレス・デュアル THz コム分光法」が開発されている。さらに、THz コム・パルス列の極めて安定な時間周期性を離散フーリエ変換に取り込むことにより、デュアル THz コム分光法と同等以上の高精度性を実現しながら測定データ量を大幅に削減する、「離散フーリエ変換 THz 分光法」も開発されている。また、実用時の装置コストを意識し、非制御レーザーの利用を可能とする「アダプティブサンプリング式デュアル THz コム分光法」が開発され、「デュアル THz コム分光法」に汎用性が付与されている。これら以外にも、光源サイドからの汎用化のアプローチとして、非制御/単一共振器の 2 波長デュアル光コム光源が「デュアル THz コム分光法」に応用され、その有効性が実証されている。

THz 分光の応用展開では、「デュアル THz コム分光法」が煙混在ガスの実時間濃度モニタリングに応用されるとともに、光周波数差が THz オーダーに設定された 2 台の光シンセサイザの差周波信号を抽出することにより連続チューニングが可能な「周波数可変型 THz シンセサイザ」は、アセトニトリルとその同位体の分子種識別に応用され、ガス分析手段としての有用性が実証されている。

一方、広帯域スペクトル利用イメージングに関する研究では、「THz デジタルホログラフイー」の研究により、不透明物体の実時間 THz 電場/位相イメージの取得が可能であることが示されている。

また近赤外領域では、光コムの未だ潜在する究極的光源特性を掘り起こし、これに基づいた新奇計測技術が開発されている。具体的には、光コムが多数の離散スペクトル（コムモード）を持つことから、回折格子などの空間フィルタを利用した波長/空間変換によってイメージ画素とコムモードを 1 対 1 対応させ、イメージ情報をコムモードに重畳させた後に、モード分解した振幅/位相スペクトルから一括して読み出せば、スキャンレスでのイメージ取得が可能になる。実際、この技術は共焦点顕微鏡に適用され、顕微計測に共焦点性/スキャンレス性/位相コントラスト性を同時に付与することが可能であることを世界で初めて実証している。

次に、「デュアル光コム分光法」の持つ、短い測定時間で広波長域を高い波長確度・高い周波数分解能で計測可能かつ光の振幅/位相情報を直接取得可能であるという特徴を活用し、機械的偏光変調が不要な高精度分光エリプソメトリーが実現されている。更に、デュアル光コム分光とシングル・ピクセル・イメージングに基づいた機械的サンプル走査が不要な「高密度ハイパースペクトルイメージング」も実現されている。最後に、ファイバ光共振器の外乱/RF 周波数変換機能が歪み/超音波/屈折率の計測に適用され、RF 周波数計測に基づいたファイバセンシングという新機軸が示されている。

これらの研究成果はいずれも新規性に富み、さらなる発展が期待できる。また、目標に対する達成度は十分であり、一部は当初計画で想定されていた目標を大きく上回る成果が得られている。

以上に基づき研究成果を俯瞰すると、様々な応用に適した光コム光源の開発及び利用技術の高度化とともに、この光源技術を利用した新規応用分野の開拓に取り組み、光コムの普及において先導的な役割を果たす多くの成果をあげている。具体的には、高性能光コム光源、

精密広ダイナミックレンジ短時間測距、精密分光、材料評価、表面分析などの分野において、イメージングや顕微法を含めた独創的な技術開発が行われている。

学術的には、当該分野は、その関連論文発表件数が、いまだに増加を続けている先端的な分野であるが、本プロジェクトの研究成果に関わる論文数、発表件数、招待講演数、知的財産権の数などは十分であり、本研究課題の目標が十分に達成されている。また、一部では期待以上の成果も得られている。

成果は多方面に広く波及効果があり、新たな分野の創出も期待される。国内外の連携体制も十分であり、研究成果のさらなる発展が期待できる。このように学術的な面では、質・量ともに世界をリードする研究成果をあげていることは疑いがない。プロジェクトの残りの研究期間を鑑み、個々の成果がプロジェクト全体を貫く研究構想とどのように結びつき、これらが発展してイノベーションに繋がるのか、より具体的な道筋を示しながら成果を確固たるものにすることで、学术界、産業界に一層アピールできると思料する。

### 3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

#### 3-1. 科学技術への貢献

本プロジェクトの研究成果はいずれも独創的であり、国内外を問わずその評価は非常に高く、申し分がない。このことは論文数や学会発表件数のみならず、多数の招待講演や受賞件数にも表れている。また、さらなる研究の芽を育み、新たな分野を創出する勢いと方向性がある。光コムの研究は、基礎と応用、技術の開発と実践など、さまざまな対立または相補する要素を含んでいる。プロジェクトに参画するメンバーが目標を共有して位相を揃えることが難しい中で、プロジェクトリーダーの明確で見通しの良いガバナンスにより、さまざまなレベルの連携が動的に形成され、研究成果に結びついていると考えられる。今後も引き続き科学技術への貢献は大いに期待できる。

#### 3-2. 社会・経済への貢献

企業への技術紹介や人材の育成などを精力的に行い、この分野と技術の裾野を広げることには貢献しているが、これが具体的な成果として現れるまでは時間を要するであろう。光コムは、一見して興味深い、一方で、先端的光技術や高周波エレクトロニクス技術などを必要とするため、取り扱いが厄介な代物であると捉えられがちであり、このような状況はレーザーの黎明期と似ている。そのような意味では、本プロジェクトのリーダーおよび構成メンバーが、明確なビジョンを持ち、粘り強い努力を重ねていることから、やがて光コムが社会・経済に浸透し、多数の理解者や利用者を得て、その波及効果が現れるものと期待される。

### 4. その他特記すべき事項

#### 4-1. 若手研究者支援

若手研究者や学生に積極的に国内外の学会での登壇の機会が与えられ、延べ 410 件以上の発表が行なわれている。また、若手研究者に招待講演や解説記事執筆などの機会も与えられ、また、若手研究者や学生の奨励賞など受賞機会への積極的な挑戦が奨励され、24 件の受賞を得ている。さらに、国内外の著名な研究者や海外の若手研究者・学生を多く招聘し、国際的な経験を積む機会が積極的に設けられると同時に、国内外の研究機関との複数の共同

研究が実施され、若手の国際的な視点の育成につながっている。

プロジェクトに参画する複数の研究室間で、学生と若手研究者の交流も促進され、ポスター発表などの議論の機会が設けられ、若手の育成につながっている。このように、常に外部の研究者や学生が滞在している環境が作られており、若手研究者同士の国際的な交流やコミュニケーションを図ることにより、人材育成が推進されている。プロジェクトに関わる人材が、将来的には本プロジェクトの成果普及に大きく寄与するものと期待される。

#### 4-2. アウトリーチ活動

40 件以上の科学技術コミュニケーション活動が行なわれている。実際、プロジェクトの積極的な紹介のために、研究室 Web サイトの充実、プレス発表、取材対応と一般誌への記事掲載、雑誌でのプロジェクト特集号の出版、主催・共催の国際会議を含むシンポジウム開催、展示会への出展、新技術説明会などが実施されている。2017 年 8 月には、関連する世界的に著名な研究者の参加のもと、ICO-24（第 24 回国際光学委員会）においては、本プロジェクトが共催した光コムの特設シンポジウムを、またそのサテライト会議として電気通信大学にて主催した一般公開の国際シンポジウムを開催するなど、プロジェクトの成果の普及に繋がる活動が行われている。また、一連の活動の中で、中高生や一般に対するアウトリーチ活動が行われていることは、長期的な視点からの人材育成やの先端技術への理解醸成の観点からも大変好ましい。

### 5. 総合評価

本プロジェクトは、先端的光源「光コム」を、基盤的かつ革新的で柔軟な「光ツール」へと進化させるために、光波の時間、空間、周波数、位相、強度、偏光などの全てのパラメータを、高精度、広範囲にリアルタイムで、自在に制御、操作でき、科学技術から社会生活までの広範囲な応用に使える先進的光源技術群を開発し、さらに、未踏の応用分野を開拓するものである。

各グループ、あるいはプロジェクト全体としても、研究成果の客観的評価の目安である論文数、発表件数、招待講演数、知的財産権の数などは十分にあり、これまでの成果の質の高さを考慮すると、本研究課題の十分な目標達成が見込まれる。また、その成果は多方面に広く波及効果があり、新たな分野の創出も期待される。このように学術的な面では、質・量ともに世界を席卷する研究成果をあげており、このことが持続されることは疑いがない。

一方、光コム自体の企業への技術移転が十分に進んでおらず、またその過程ではコスト面の課題をクリアしていく必要もあること等も考慮すると、本プロジェクトによる成果の社会的・経済的波及効果が目に見える形となって現れるまでに、ある程度の時間を要すると思われる。それは、レーザー装置や高周波エレクトロニクス技術など、先端的な機器や技術が必要であることを背景とし、即座に実用化・企業化することは、今すぐ利用できる光源技術等の一部を除いては、困難と思われるからである。しかしながら、幾つかのブレイクスルーによって、光コム自体の低コスト化や非常に魅力的な応用の提案があれば、様相が一挙に変わり、短期間に成果の社会実装が実現できる可能性もあるので、今後、一部でも企業との連携を進めていく必要があると思量される。実際、研究総括、グループリーダーおよび構成メンバーが明確なビジョンを持ち、粘り強い努力を重ねていることから、光コム技術のみならず、それを用いた多くの実施例を提示することで多くのユーザーを得て、やがて社会・経済に浸

透し、その波及効果が現れるものと期待される。この観点から評価すればプロジェクトの方向性は問題ないと言える。

プロジェクトに参画する若手研究者や学生が、高いモチベーションを維持し、それぞれの研究課題を十分に理解した上で研究を遂行している。プロジェクトリーダーのガバナンスが機能し、若手が研究に勤しむことのできる環境を提供するとともに、その育成に大きく貢献している。それらの若手研究者や学生がもたらす人的波及効果が、将来的に光コム関連技術の発展に大きく寄与することが期待できる。

以上の3項目をもとに本プロジェクトを総括すると、ERATOの目的に適い戦略目標「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成」の達成に資する成果が得られていると判断される。

以上