

CREST 研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
追跡評価報告書

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域は、戦略目標「最先端レーザー等の新しい光を用いた物質材料科学、生命科学など先端科学のイノベーションへの展開」の下、従来は個別に行われてきた物質・材料、加工・計測、情報・通信、環境・エネルギー、ライフサイエンスなどの分野において光を利用した研究開発を融合するとともに、高性能・最先端レーザー光源技術を徹底的に駆使することにより「物質と光の関わり」に関する光科学・光技術におけるイノベーション創出基盤の形成を目指して推進された。特に、

- (i) 既存の光源等を独自に改良、あるいは新しい利用法を考案することにより、既存の最先端光源を徹底的に使い尽くす
- (ii) 全く新しい発想に基づく研究に挑戦することにより、各重点分野における光の利用研究において世界トップの成果を目指す

の根幹的条件を満たすことで、光エネルギーにより原子の結合状態を変化させ、新規物質の創成、有害副産物の無害化、非破壊で異物や生体内の腫瘍の発見を可能にする非侵襲計測・医療の実現などのイノベーション創出を目指した。

その結果、大きな研究成果として、尾松によるトポロジカル光波（光渦）に基づく新規ナノ構造・物性の創出や、辛によるコヒーレント軟X線光源の開発とその光電子科学への応用に代表される国際的に高く評価される研究成果を得た。また、多くの研究チームは、光源・分光法の研究グループと独創的アイデアをもつグループとの共同研究に基づいて新しい課題に挑戦し、原子・分子、結晶、生物系材料を対象とした研究分野において高い研究成果をあげた。例えば、佐藤が開発した新規短パルスレーザー技術と今村の新しい多光子イメージング装置を融合することにより、生体に対する光イメージングのデメリット克服に貢献するなど、非常に高い水準の研究成果が得られた。このように、各チームからは国際的に非常に著名な学術誌（辛、岩井、高橋、田中）を含む合計 1404 報（主たる共同研究者を含む）の論文が公表され、光科学・光生物学・光医学において数多くのイノベーションを生むための基盤が創出された。

本研究領域終了後に公表された学術論文総数は 458 報（当時の研究代表者）であった。このうち辛の公表論文が最も多く 105 報であり、次いで尾松の 39、鈴木 of 37、田中の 36 報と続く。また、岩井、辛、高橋、今村、田中、大森らによって発表された研究成果などのように、学術的に影響力のある非常に質の高い論文も数十報発表され、研究領域終了後も成果を継続・発展させている。特許出願は国内 22 件（研究期間中は 52 件）、海外 7 件（研究期間中 14 件）、特許登録は国内 5 件（研究期間中 33 件）、海外 2 件（研究期間中 7 件）であったが、基礎研究的色彩の強い研究領域としては十分に多い数である。特に知財活動実績は尾松が最多であり、CREST 研究開始以降から追跡調査時までには、国内と海外でそれぞれ 10 件と 4

件が特許登録されており特筆される。

招待講演は国内学会 120 件、国際学会 286 件であった。特に、国際学会からの招待講演が多い事は本研究領域のメンバーが国際的に高く評価されていることを表している。国際会議では尾松のトポロジカル光波（光渦）関連の講演が 48 件と最多であり、次いで高橋が 39 件であった。また、研究課題終了後に報道機関からのニュースリリース等は 407 件に上った。大森が 78 件で最も多く、次いで辛の 61 件、高橋の 59 件、川田の 36 件、田中と山内の各 34 件、竹内の 29 件と続き、研究成果が社会的にも大いに注目されていることが確認される。

研究の成果の指標の一つである受賞に関して、著名な賞を含む合計 20 件の受賞に輝いている。具体的には高橋の紫綬褒章、田中の仁科記念賞、腰原の島津賞、竹内および田中の応用物理学会光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）、大森の松尾財団宅間宏記念学術賞等があり、いずれも受賞者の長年の研究成果と本研究課題の成果の集積によるものであり、受賞者が長期間にわたって高い水準で研究活動を行っていることを示すものである。さらに佐藤、大森、尾松、山内の文部科学大臣表彰科学技術賞受賞は本研究課題の卓越した研究成果を反映したものである。これらの受賞には、本研究領域の中核課題である最先端レーザー光源の研究成果が大きく貢献している他、尾松の OSA 及び SPIE Fellow 受賞は研究が国際的に高く評価されているものとして特筆に値する。

競争的研究費の獲得状況も研究期間中ならびに終了後の研究成果の高さを端的に表す指標である。岩井、辛、鈴木、高橋、今村、川田、腰原、竹内、田中、細貝、大森、尾松、山内の 13 名が、本研究領域終了後それぞれ 1 億円を超える大型の競争的研究費を獲得している。具体的には JST の新たな戦略的創造研究推進事業 CREST「最先端光科学技術を駆使した革新的基盤技術の創成」に 5 件、ACCEL に 3 件、さらに日本学術振興会の科研費特別推進研究 2 件、科研費新学術領域研究（研究領域提案型）6 件、科研費基盤研究（S）7 件、文部科学省 Q-LEAP 3 件、内閣府 ImPACT 1 件など、合計 49 件に及んでいる。

以上のように、個々の研究課題において国際的にもインパクトのある成果を挙げている。さらに、各研究者はその後、それぞれの研究分野において世界的なリーダーとして活躍しているとともに、本研究領域の研究課題を継承して着実、かつ先端的な研究を推進している。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本研究領域は 16 の研究課題からなるが、以下の 4 つの分野に分類できる。

(1) 光源の限界を駆使した物性探索

（腰原、田中、岩井、辛、鈴木の各チーム）

(2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能

（尾松、佐藤、細貝、山内の各チーム）

(3) 最先端光量子を駆使した原子・分子・集合系の量子制御

(高橋、竹内、大森の各チーム)

(4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用

(今村、本田、川田、小林の各チーム)

科学技術的観点から貢献が大きい代表的な研究成果の発展は以下に要約される。

腰原は時間分解光電子顕微鏡などを用いて分子結晶の光誘起相転移の観測や遷移金属酸化物強誘電相のテラヘルツ (THz) 光誘起分極の制御を世界で初めて確認することにより、光と物質の一体的量子動力学が生み出す新しい光誘起協同物質の開拓を行っている。また、金属錯体や人工光合成系の光励起・反応機構の解明などについて国際的な共同研究を推進し、当該分野を牽引している。

田中は THz 光非線形分光物理学を探索し、世界で初めてグラフェンの 9 次高調波の観測や高強度 THz 光照射に特有な光・固体一体化電子状態・動的対称性の観測などに成功している。THz 光研究は大出力光発生の実現により飛躍的に進歩したが、田中はこの新しい世界の潮流の中心にいる。さらに、企業との共同研究も進め、実用化を目指した研究も行っている。

岩井は特色ある近赤外フェムト秒超短パルスレーザーを開発するとともに、高周波強電場による有機金属化合物の絶縁体化や超伝導体の光誘導放出現象の観測に成功するなど、量子多体系の光強電場科学の研究を推進している。

辛は高分解能角度分解レーザー光電子分光装置や高次高調波レーザーなどの分光システムを用いて、表面トポロジカル超伝導状態や新しい絶縁体-金属相転移の観測を行い、学術的にインパクトのある研究成果を発表している。

鈴木は超高速光化学反応の全過程をイオン化エネルギーという統一した観測量で追跡することを目的とし、真空紫外フェムト秒光を用いた超高速光電子分光を実現した。化学過程の根源的理解に迫る重要な研究で世界をリードしている。また、光電子分光に液体ジェットを導入し、気体を溶液の研究につなぐ先駆的な研究を行っている。

尾松はトポロジカル光波 (光渦) を用いて物質表面・内部における世界初のサブ μm 螺旋構造体形成に成功している。これに基づき、尾松は光硬化樹脂による螺旋ファイバーの実現や蜂蜜状高粘度液膜による極細・超解像スピンドローム状の秩序化の発見など、光渦による螺旋ナノ構造創製に成功した第一人者として世界の研究潮流を牽引している。また、最近ではトポロジカル光波 (光渦) による微小液滴の空間配列などの研究も展開している。

高橋は極狭線幅・超高安定レーザー光を用いて光格子中のレーザー冷却 Yb 原子多体系におけるサウレスポンプ現象を世界で初めて実証し、量子シミュレーター応用に必要な Yb 分子光会合による量子多体状態制御や Yb 原子間のトンネル現象による格子点の空間断熱移送の制御に成功するなど、独自性の高い基礎研究を行っている。

今村は 2 光子励起顕微鏡に基づき、第 2 高調波発生による生体深部観察や近赤外蛍光標識剤の開発と利用など、多様な光技術とイメージングソフトウェアを包括する革新的技術を駆使した研究を行っている。その結果、非アルコール性脂肪肝炎の新たな線維化診断法や変形性関節症の早期診断法、細胞外マトリックス構築に対するコンドロイチン硫酸の重要

性の検証、マウス脳血管の深部イメージングなど、多くの先進医療へ向けた基盤技術を開発した。なお、今村は新学術領域研究「Resonance Bio～共鳴誘導で革新するバイオイメージング～」(2015年度～2019年度)に採択され、分子設計者と超解像顕微システム技術者との協働により、従来の生体光イメージングの限界に挑戦している。これらの研究成果は新規ながん診断・治療への波及効果が期待される。

その他、川田は高分解能・電子線励起超解像イメージングシステム(D-EXA)を開発し、生細胞の核や線維組織を数十nmの解像度で観察可能にしたこと、電子線による直接励起可能なマーカー分子の発見など、新規観察系の構築と超解像法による生細胞観察を可能にした点は興味深い。さらに、川田のD-EXA開発は幅広い細胞・生体分子への応用に向けたCREST研究領域「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「光と電子の融合による超光分解能細胞機能イメージング・制御」(2020年度～2025年度)へと発展している。

上記以外の研究チームも研究領域終了後に積極的に論文発表や大型プロジェクト研究を推進するなど、本研究領域全体としての学術的な貢献は十分である。また、研究成果を発表している学術誌と論文公表数、国際的な共同研究の展開、国際会議における招待講演数などの観点からも、研究成果が国際的に高い水準にあることが十分確認できる。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

本研究領域終了後も、多くの研究者は企業との共同研究を含め、研究成果の社会実装に向けた取り組みを積極的に行っている。その例を以下に示す。

田中はACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017年度～2021年度)を継承し、THz技術の普及の一つとして2021年にボディ・スキャナーなどのセキュリティ検査システムのプロトタイプ開発を計画している。こうしたTHz技術の普及は非破壊・非接触の材料検査、食品・危険物検査や高分解能・無被爆で安全・安心なセキュリティ装置/システムなど、幅広い領域の開拓を促すものである。さらに、交通機関をはじめとする公共の場でのセキュリティ強化、製品の安全性の確保など、安全・安心な社会の確保に基づく経済活動の活性化を促すものとして、その研究成果の社会・経済的波及効果は大きいものと期待される。

今村は愛媛大学附属病院との共同研究による第二高調波発生顕微技術などを基に非アルコール性脂肪肝炎の診断法、変形性関節症の早期診断法、人工知能の導入による自動診断法などの開発を行っている。これまで蓄積してきた蛍光イメージング技術と光操作技術を統合することにより、がん転移の形成過程を広範囲かつ高分解能で時空間ダイナミクスを解析することが可能となる時代が到来すると考えられるとともに、バイオイメージングを中心に捉えた学際的な共同研究の成果は様々な生物学分野への展開が期待される。

尾松はトポロジカル光波(光渦)を用いて世界で初めて物質表面・内部にサブ μm の螺旋構造体を形成可能であることを発見した。以降、光硬化樹脂を用いて螺旋ファイバーを実現するとともに、蜂蜜状高粘度液膜における極細・超解像スピンドレット状の秩序化や、飽和溶

液中の金の 3 量体ナノ構造における鏡像体過剰率の増大や結晶化の円偏光依存性を発見した。このように、尾松は光渦による螺旋ナノ構造創製のパイオニアとして世界を牽引している。これらの研究成果は CREST 研究領域「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「光渦が拓く超解像スピンジェット技術」(2019 年度～2024 年度)に継承されている。なお、尾松は以下の様に研究期間中・終了後を通して、国内・海外の特許出願・登録件数が本研究領域で最多となっている。

- ・研究期間中： 特許出願(国内/国際) = (8/4) 特許登録(国内/国際) = (8/4)
- ・研究終了後： 特許出願(国内/国際) = (5/2) 特許登録(国内/国際) = (2/0)

また、国際共同研究の成果として、螺旋型位相版と円錐レンズを用いて発生させた非回折光渦(1 次ベッセルビーム)を用い、従来の 100 倍(超 1 cm)の長尺螺旋ファイバーを世界で初めて実現した。光渦を利用した次世代光通信が注目される中、この研究成果は複数の光渦にデータを幾重にも重ねることにより毎秒 100 TB を超える大容量高速通信に貢献する可能性を秘めており、今後の展開が大いに期待される。さらに、電子デバイスの融着を目指した光渦レーザー加工や超解像スピンジェット技術に関しては複数の国内企業と共同研究を行っている。

大森は光格子に捕獲された極低温リユードベリ原子集団をアト秒精度で制御する超高速量子シミュレーターを世界に先駆けて開発した。本量子シミュレーターは量子多体系の未知の物理現象や物性の探索に利用できる可能性がある。このため、超高速コヒーレント制御と極低温物理が融合した新しい科学技術の創出のみならず、磁性・超伝導材料などの新機能物質の設計・計算手法の開発につながる可能性を持つ。なお、大森は超高速量子シミュレーターの実用化を目指して民間企業と緊密な共同開発を行っている。

小林は蛍光標識不要な光熱 (PT) 顕微イメージングの開発を行い、2次元高速・超解像イメージングにおける回折限界の向上 (34 %) を実現している。これを用いてマウス皮膚の正常細胞とガン化悪性細胞の効果的な判別法なども確立し、医療現場において有効な PT 顕微鏡技術を展開している。

実用化・企業連携として、山内は X 線自由電子レーザーや次世代リング型放射光施設で有用な形状可変ミラーにおけるピエゾ素子・ミラー基板の接合技術や通常型・長尺型形状可変ミラーの実用化を進めている。

辛は 266 nm・513 nm の CW レーザー、11 eV パルスレーザー、半導体リソグラフィー用 193 nm 光源などの共同開発を推進している。NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016 年度～2020 年度、プロジェクトリーダー：小林洋平東大教授)を支援するとともに、新規高出力レーザーに関して複数の企業と共同開発を行っている。

川田は電子線励起超解像イメージングシステム(D-EXA)の改良・高機能化に関して国内企業や台湾との共同開発を行っている。また、開発した同システムによる試料観察の評価技術およびシステムの販売に関して複数の企業と実用化を目指している。

腰原は新型フェムト秒光電子顕微鏡(fs-PEEM)装置の製品化に向けて企業 3 社と共同開発

を行っている。

細貝は高強度レーザー駆動の電子ビーム利用技術や高速パルス電源およびレーザー駆動電子源について海外研究機関との共同研究とともに、民間企業との共同開発を行っている。

以上のように、各研究代表者は研究成果の応用や社会実装に向けた技術開発にも取り組んでおり、必要に応じて企業との共同開発も行っている。基礎科学として高い成果をあげながら、同時に社会的運用をも推進する視野の広い研究活動を行っている。

(3) その他の特記すべき波及効果

研究代表者の多くは研究領域終了後も大型研究費を獲得していることから、これらの研究プロジェクトを通して新たな研究コミュニティーの形成とともに、関連研究の更なる発展に大きく貢献しているものと推察される。また、研究領域に参画したメンバーのキャリアアップと関連研究人材の育成にも寄与している。例えば、腰原チームの研究者として参画した恩田（当時：東工大准教授）は「さきがけ」研究者（2009年度～2016年度研究領域「光エネルギーと物質変換」）を経て九大教授（2017年）となるとともに、様々な分子・材料系の時間分解物質構造科学の発展に貢献しており、その研究は高く評価されている。本研究領域において、最先端光源を使い尽くすとともに新しい発想の光研究を展開するという指針を強く打ち出したことは、参加したメンバー（特に若い研究者）に対する研究の強い動議づけになったと思われる。研究者に科学・技術研究の「夢」と「指針」を示したことが、本研究領域が与えた最も大きな波及効果であろう。

以上により研究成果の発展や活用が認められ、科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果が十分に生み出されている。

以上