

さがけ研究領域「光の創成・操作と展開」

追跡評価報告書

総合所見

本研究領域は、光の本質の理解、光に関わる新しい現象・物性の解明、光の制御や光による物質の制御に関する新しい概念・手法の探求を目的としたものであり、「光の究極的及び局所的制御とその応用」という戦略目標の下で、我が国が比較的優位に立っている光・光量子科学技術を核にした次世代基盤技術の早期開拓を目指すために設定された領域である。

本研究領域では 24 件の研究課題が採択され、テラヘルツから軟 X 線領域にわたる光の発生・制御・操作・物質との相互作用に関して、基礎物理学から量子光学、物性物理学、化学、材料科学、光・フォトンクス、光遺伝学にわたる広い学問分野において優れた研究成果が得られた。

研究領域終了後、それらの研究成果はインパクトある研究へと発展し、学術および応用の両分野において重要な進歩をもたらしている。アト・フェムト秒高強度レーザー光源やテラヘルツ・赤外・紫外・軟 X 線領域の高強度光源とその計測技術の開発により、原子・分子の操作・制御、化学反応制御や光子の量子操作など先進的研究領域において重要な成果を生み出している。その代表的な例として、角運動量が制御された光源や新奇の三次元加工技術により、物質のトポロジカルな構造を創製したほか、テラヘルツ領域において特殊な光学特性を有するメタマテリアルを創り出すことに成功し、光と物質の相互作用に関する新たな理解とともに産業上の応用に繋がる技術の創出に貢献していることなどがあげられる。研究終了後に発表された論文と招待講演の件数は研究期間中のおよそ 2 倍にのぼり、光源、計測装置、加工法などについては特許の出願・登録も引き続き行われている。基礎的研究の成果から企業との共同研究やベンチャー企業での実用化研究に発展した例もいくつかあげることができる。

本研究領域の殆どの研究者は学会の奨励賞や論文賞を受賞し、8 名が文部科学大臣表彰若手科学者賞、1 名が文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞している点は、高い水準の研究が推進され、大きな学術上の貢献があったことを示している。多くの研究者が継続的に大型研究費を獲得して、本研究領域の研究成果を発展させている。また、キャリアアップについては、全ての研究者が昇任し、そのうちの 2/3 は採択時の所属とは異なる研究機関に移って自らの研究グループを築いている。

以上より、学術の新たな潮流の創成、先進技術への展開、社会への高い波及効果および優れた研究人材の育成などの状況から、本研究領域は研究終了後も非常に高い成果をあげていると評価できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域では、「光の究極的及び局所的制御とその応用」を戦略目標として、2005 年

度～2010年度において24件の課題に対する研究が精力的に行なわれた。それらの研究課題は、「高強度超短光パルス」、「テラヘルツ電磁波」、「光の新しい自由度」、「プラズモニクス・メタマテリアル」、「光による分子操作・物性制御」という用語で括られる密接に関連したテーマ群、および「原子分光」、「冷却原子気体」、「量子光学」といった原理検証を主とする基礎研究テーマ群に大別される。

研究領域終了後、各研究者はそれらの研究を継続・発展させ、国際的に影響力のある学術誌を含めて413報の学術論文、280件に及ぶ国際会議招待講演など多数の優れた研究成果をあげている。終了後に発表した学術論文のうち、この数年間における被引用回数が50を超えるものが10編余りあり、それぞれの分野でインパクトのある研究に発展していると言える。特許出願件数は研究期間中の36件（うち海外出願7件）に加えて、終了後においても38件（同12件）にのぼり、本研究領域の研究を通して得られた新しい原理や方法論の革新的技術展開にも十分貢献している。

研究成果の発展状況を競争的研究資金の獲得状況で見ると、ほとんどの研究者は科研費基盤研究(B)、若手研究(A)を獲得し、基盤研究(S)(1件)、基盤研究(A)(3件)により研究を進展させている研究者もある。また、JSTのCRESTにおけるグループ型研究に進展させたものが3件、科研費新学術領域研究として新しい学術領域創成に主要な役割を果たしているものが4件あり、本研究領域で推進された研究の先見性、先導性がうかがえる。さらに、応用展開への研究助成金として、JSTの産学共創基礎基盤研究プログラムへの発展が2件、総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)の1件などがあり、これらは新しい原理の発見や方法論の創出から革新的な技術展開の契機をつくることを目指した本研究領域が、今日において結実してきた重要な成果と言える。

受賞については、8割を超える研究者が国内学会の奨励賞や論文賞を受賞していることから高い水準の研究が行われたことが認められる。研究期間中および研究終了後を合わせて、8名の研究者が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。これは優れた研究業績が高く評価されたとともに、研究者としての将来性も評価されたと言える。また、尾松はさきがけ研究を大きく発展させて、トポロジカル光波によるナノ物質や結晶の構造制御とその物性を制御する研究領域を拓いた功績が高く評価され、2016年度文部科学大臣表彰科学技術賞(キラルな光渦によるナノ物質の構造と物性制御に関する研究)を受賞した。

2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

(1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

本研究領域は、光に関わる広い学問分野にわたって基礎から応用に関する格段に優れた研究成果を生み出し、科学技術の進歩と将来の研究リーダー育成に大きく貢献していると言える。特筆すべき成果について以下に述べる。

尾松は「トポロジカル光波シンセシス」において、波面や偏光のトポロジカルな構造を制御したトポロジカル光源を開発し、ナノ粒子の運動を制御・操作する研究を行った。これら

の成果を大きく発展させて、トポロジカル光波の照射による金属のキラル構造制御や単結晶シリコンニードルの創製に成功した。これは、物質がトポロジカル光波の全角運動量を受け取り、公転運動しながら螺旋状のナノ構造体に成形・変形するという新奇な現象に基づいており、トポロジカル光波の波面構造が物質に転写されることを発見した研究として特筆に値する。さらに、科研費新学術領域研究において、尾松はトポロジカル光波の光圧に着目して、微粒子相互作用の選択制御と結晶成長・化学反応の物理的制御に関する研究を進めており、光技術の新しい学術領域の創出が期待される。

大村、菱川、石川は、高強度短パルス光による分子操作やその反応追跡・解析において新しい物質操作に繋がる優れた成果をあげた。大村は、位相を精密に制御したフェムト秒パルス光による分子の選択的切断や配向制御を世界に先駆けて実現し、さらに任意の光電場波形をもつレーザー光源を開発して適用可能な分子の種類と制御可能な操作を拡張した。菱川は超短パルス分光法と光電子ホログラフィーを融合させた独創的な手法を構築し、研究領域終了後には多原子分子の多体クーロン爆発の可視化およびレーザー強電場による分子構造変化に伴って発生する電子波動関数の変化の可視化に成功した。石川は、数値計算法により波動関数の時間変化を追跡する手法を確立して、高強度超短パルス光の高速変動電場中における分子・原子の電子の振る舞いを定量的に理解することを可能にした。石川の研究成果は国際学会で多数の招待講演を行うなど高い評価を受けている。このような高強度短パルス光による分子操作の研究は、近未来の分子操作の本命技術として研究開発現場に導入され、産業応用に展開していく可能性が高く、今後の発展が期待される。

板谷はスペクトル強度と相対位相を精密に制御した高次高調波によって軟 X 線ビームを発生させるための赤外域高強度極短パルスレーザー光源および高次高調波発生シミュレーション手法を開発した。研究領域終了後、赤外域極短パルスレーザー光源の更なる高強度化を図るために、光パラメトリックチャープパルス増幅法による赤外光源を開発し、軟 X 線領域の高次高調波により孤立アト秒パルスを世界に先駆けて発生させることに成功した。さらに、物性研究者や光電子分光研究者との共同研究を推進しており、物質との相互作用の強い軟 X 線を利用して特定元素の電子状態の直接観察やアト秒・フェムト秒領域における光化学反応、高強度電場に対する電子状態変化の実時間観測など学術上の先駆的な展開が期待される。

芦田は高強度超短パルス光照射により特殊なアンテナに励起される電流によってテラヘルツ周波数帯の電磁波を発生させる技術に関する研究を行った。継続した研究により、1 個の光源と検出器で 0.5THz から 200THz という極めて広い周波数範囲においてテラヘルツ波を発生させることに成功した。従来法に比べて、この方式は振幅と位相の双方を検出できるため通信や計測応用に適しており、多方面への応用展開が期待できる。

青木は微小トロイド共振器とテーパーファイバーから成るキャビティ QED 系を構築して単一原子との光強結合を実現し、量子情報処理に繋がる現象の観測に初めて成功した。継続した研究により超低損失テーパーファイバー作製に成功して、全てファイバーで構成され

るキャビティ QED を実現した。さらにそれらのネットワーク化に向けた研究が進められている。

越野は量子化された光同士の相互作用を現実的な計算時間で数値計算する手法を独自に考案し、量子情報処理や量子デバイスにおいて解析可能な問題の対象を拡大することに成功した。この手法はマイクロ波にも適用できるため、超伝導量子ビットに関する大型プロジェクトの実験に大きな貢献をしている。

三代木は「重力波検出技術が拓く超巨視的量子性の物理」において、超巨視的物体の量子力学的振舞いの検証を究極的目標とした研究を行った。20K 以下に冷却したレーザー干渉計における鏡と振り子の熱雑音の直接観測および揺動散逸理論に基づいた熱雑音の理論予測の実証に成功した。さらに、低温重力波レーザー干渉計に対する研究を進めて、新規アイデアにより熱の流入低減を実現し、その技術を導入した大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (神岡) の稼働に向けた取り組みを推進している。

その他に、独自の発想と堅実な計画に基づいて着実に研究成果を出し続けている宮丸と前田の成果を取り上げたい。宮丸はテラヘルツ域におけるプラズモニック結晶の一種である金属開口アレイの異常透過現象の解明、分割リング共振器アレイシートの三次元構造においてテラヘルツ磁場が誘起する磁気共鳴現象の世界初の観測と共鳴周波数シフトの検証、およびメタマテリアルにフラクタル構造を導入することによる光伝導アンテナの広帯域化など創造的な成果を上げている。前田は研究領域期間中に米国の大学においてリュードベリ原子の電子波束ダイナミクスの研究を行い、「本来は核の遠くを周回して量子電磁気学的に不安定」であるはずのリュードベリ電子状態を長時間にわたり安定に保持することに成功した。この成果は電磁波の周波数の精密制御と高励起状態の準位間隔の緻密な設計に基づいており、光原子物理学において重要な意味をもつ成果である。帰国後は、2つの非発散波束の量子力学的重ね合わせ状態の生成やヨーク型超放射の観測など独創性に富んだ研究を展開している。

(2) 研究成果の応用に向けての発展状況

田中はテラヘルツ波の伝搬を制御するためのメタマテリアルを実現するために、微小な分割リング共振器の三次元周期構造を宿主物質中に直接作り出す新しいレーザー加工技術を開発した。さらに、電子ビーム描画法で加工された金属リボン構造の自己組織化現象を利用した新しい手法により、従来法に比べて低コスト・高速の加工が可能な新規技術を構築して、30THz を超えるテラヘルツ波に対するメタマテリアルの創製に成功した。田中の成果は国際学会で多数の招待講演を行うなど学術上の高い評価を受けるだけでなく、応用展開に対する期待も高い。可視光領域の色を作り出す二次元のメタマテリアル光学シートは、全く新しい発想による「塗装技術」として様々な応用が期待されるとともに、高解像度ディスプレイや光学フィルターとしての応用も期待できる。11 件の特許出願がなされ、既に 6 件が登録されており、今後の産業化への期待度が伝わる。

尾松は光渦レーザー発振装置やレーザー加工装置などの特許を出願・登録するとともに、ベンチャー企業と共同して、光渦レーザー加工装置によって製作した中空マイクロニードルをインスリン注入用無痛注射針に実用化する研究に取り組んでいる。これは光渦レーザーの特性を活用した加工法の応用として注目される。

永井は産業用ファイバーレーザーを用いてテラヘルツパルスを高効率で発生させる技術やテラヘルツ周波数帯の電磁波の偏光を金属板で制御する技術を開発し、企業と協同してそれらの実用化に向けた研究を継続して進めている。金属製位相板はアイソレーターや高感度赤外光センシングなどへの応用が期待される。永井の研究は「テラヘルツ電磁波による高速電子スピン操作」をテーマとする基礎研究であったが、非線形分光に必要な高強度テラヘルツ光源の開発から得られた成果を、研究期間中において企業との共同研究で応用へ展開した点は評価できる。

石川は時間依存シュレーディンガー方程式の直接数値解により超短パルス光中の原子や電子のダイナミクスを解明する研究で培った成果を、がん治療などの医療分野に適用する研究に取り組んでいる。重粒子線の線量を三次元で評価する線量計とシミュレーターの研究を理化学研究所や企業と共同して進めている。3件の特許申請も行い、社会への波及効果の大きい開発研究に貢献していることは十分に評価できる。

(3) その他の特記すべき波及効果

人材のキャリアアップについては、16名の研究員が採択時の所属と異なる研究機関に移って昇任し、8名が同一研究機関で昇任をしている。さきがけ採択時において海外の研究機関に所属していた5名の研究者全員が帰国して国内の研究機関で研究を続けている。本研究領域における研究実績が評価されたと言える。

国内外の研究者とのネットワーク形成状況については、実験と理論の協調を目指した研究総括の方針によって採択された3名の理論研究者と実験グループの共同研究が研究領域終了後も活発に継続し、優れた成果を生み出している。特に、森下は研究期間中に海外研究機関に長期出張する機会を与えられた結果、本研究領域内の研究者ばかりではなく海外の研究者とも密接に連携した共同研究を数多く実施した。また、他のさきがけ領域や領域アドバイザーの研究室との研究協力も活発に行われ、研究領域終了後においても光に関わる広範な分野間の交流とネットワーク形成が図られたことは特筆に値する。

事後評価報告書に、「科学および社会に真に影響力のある成果まで完成させるには更なる努力が必要であることを考えると、光コミュニティ以外の専門家集団との緊密な交流を進めることによって困難な課題の洗い出しやシステム化の方策を探求することが求められる」という指摘がなされている。越野が超伝導量子ビットに関する先進的な実験プロジェクトに対して理論面から重要な貢献をしている例や、板谷が物性研究者や光電子分光研究者と協力して、高次高調波レーザー光源開発研究を材料科学に応用する研究に取り組んでいる例はこのコメントに正に込めようとしているものと言える。また石川が、がん治療への応用

を目指して行っている重粒子線の三次元線量計とシミュレーターの研究は、上記コメントに応える大きなスケールでの取り組みと理解できる。

3. その他

採択時に海外研究機関の所属であった 5 名の研究者はいずれも、先導的な研究グループで行っていた研究が高く評価されたと思われる。また、本研究領域の支援を受けて海外研究機関に長期出張して研究を進展させたケースもあり、これらの研究者はそれぞれの海外グループと継続して共同研究を行うことによって優れた成果をあげている。今後は、本研究領域で採択された研究者が独自アイデアの研究によって新しい潮流を創り出し、自ら率いている現在の研究チームを世界の先導的なグループに発展させることを期待したい。

本研究領域では、大きな組織・グループに所属する研究者ばかりでなく、独自性・独創性に富んだ研究を進めている若手研究者や「さきがけ」に馴染みが薄い基礎物理学の研究者が採択されており、顧みると当時の本研究領域の運営は評価できる。一方、さきがけの戦略目標に設定された領域に関わらない分野において、独自の発想による優れた個別研究や重要かつ地道な基礎研究が数多く行われていることを考慮するならば、それらの研究を受け容れることのできる研究領域を設定する叡智も今後期待したいところである。今日的なトレンドで「主流」と思われている研究に取り組んでいる研究者だけでなく、主流から距離をおいて独自に活躍している研究者にも注目することは、科学技術研究を多様・多面的に推進する上で将来的に重要と考える。