

## さががけ「光の極限制御・積極利用と新分野開拓」

### 研究領域事後評価報告書

#### 総合所見

本研究領域は、戦略目標「新たな光機能や光物性の発現・利活用による次世代フォトニクスの開拓」の下、新規な光機能や光物性を解明し、利用することで新たなフォトニクス分野を進展させることを目指した。社会産業ニーズに応えることを最終目標として視野に入れつつ、シーズの創出を支える原理の解明や基礎研究にも力点をおいている点が特徴である。

具体的には以下の項目を本研究領域の達成目標とした。

- (1) 様々な光応答物性の精密制御による新たな光機能物質やナノ構造体の創製および高機能光デバイスの開発
- (2) 非線形・有機フォトニクスの応用による生体やソフトマテリアル内部の非侵襲 *in vivo* 観察・イメージング手法の高度化
- (3) 物質中の多彩な素励起と光の相互作用に関する基盤的研究の推進および超高密度・高電磁場科学など極限フォトニクスの開拓。

光の利用技術は、物質や現象の観察手段としてだけでなく、材料加工、情報通信、医療等の幅広い分野における横断的技術としてすでに活用されており、現代の社会経済活動の基盤を形成している。同時に、物理学、化学、宇宙の探求など、知のフロンティア開拓を先導する先端科学技術としても欠かせないものであることは、最近のノーベル物理、化学賞の多くが、レーザー・光技術やその利用に基づいている（17年間で11件）ことから広く認識されているところである。その一方で、光の本質や物質との相互作用には未知の部分も多く、それらの解明や、新しい極限的な光源、その利用法の開拓などは、大きな発展の可能性を秘めている。そのため、本戦略目標では、新たな光機能や光物性の解明・利活用・制御等を通じて光科学技術を横断的かつ重層的に集積・発展させることにより、将来の社会・産業ニーズに応える新たなフォトニクス分野の進展を加速させるとともに、新技術シーズの創出を支える基礎的な原理の解明にも併せて取り組むことで、複合光基盤技術・システムの創出等を目指した。情報通信やイメージング、微弱フォトニクス技術など高度な光の利用が欧米を中心に世界的に推進される中、この戦略目標設定はイノベーション分野における日本の国際競争力を高めるためにも、まさに望まれていたものであり、時宜を得たものと高く評価される。

次世代フォトニクスの開拓を目標に掲げて公募を行った結果、3年度にわたり総計548件の応募があり、15倍の厳しい競争を経て厳選され、36件が採択された。光科学技術を軸に据えることに加え、特に新たな視点の創出、限界の追及に注目し、提案者自身の構想実現に向けた「強いこだわり」を重視し、課題が自分自身の言葉で明確に意識されていることを評価基準として選考した結果、非常に独創性の高い挑戦的な課題が集まった。研究課題は基礎物理、極限フォトニクスから、ものづくり、デバイス、情報処理、バイオ医療関係までバラ

ンス良く分布しており、研究総括の想定した専門領域に相応しいものとなった。領域会議においては、個々の研究者にその分野の全体俯瞰に基づいた進捗報告を要請するなど、特徴的な指導がなされたほか、セミナーや自主勉強会など、十分な情報発信と異分野交流の機会が設けられ、共同研究（領域内共著論文5報）も促進された。中でも領域会議の際に設定されたナイトセッションにおける異分野を横断するブレインストーミングや、研究哲学や情熱を研究総括から直接若手研究者に語り掛ける講演などの取り組みは、マネジメントの一つの特徴として評価される。

長期的視点で重要な研究につながる挑戦的な研究を推進するという研究総括の確固たる方針の下で、特に基礎分野で国際的に非常に高く評価される研究成果が創出された。研究領域全体では論文241報（国際誌236報）、そのうち国際的に非常に著名な自然科学系雑誌に29報も発表されるなどインパクトの高い国際学術誌に多数発表されている事が、この研究領域の独創的かつ先導的な研究成果の多さを特徴づけている。招待講演も国内外で373件（国内244件、国際129件）あり、特許出願は26件（国際特許出願8件）という形で結実している。特に基礎分野で国際的に非常に高く評価される研究成果が多く創出され、短期間に高い被引用数を獲得した秀逸な論文が多数あった点も注目される。一方で、現実のがん治療に直結する薬事承認まで到達した分子薬学・医療系の研究、イメージング計測技術でブレークスルーを開いた研究など、社会への貢献が期待される研究成果を上げた研究者もあり、研究領域全体としては、基礎から科学技術イノベーションまで含めて、期待以上の成果が上がったと評価される。

研究の期間内および直後に文部科学大臣若手科学者賞8名を含む多数の顕彰、受賞（57件）があったことから、研究の水準は非常に高く、学界での高い評価を受けたことがわかる。准教授への昇進（14名）をはじめとして、採用された36名中21名が昇任を果たしたことから見ても、人材育成には成功したと言える。

以上を総括し、本研究領域は総合的に特に優れていると評価できる。

## 1. 研究領域としての成果について

### (1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

#### ① 研究課題の構成、採択方針

研究課題の公募には、「限界に挑戦し、限界追究を通じて、科学や技術の本質を理解し発展させる」という研究総括の確固たる基軸の下、下記の4つの分野を例示すると共に、これ以外でも研究総括の想像を超えた優れた提案があれば積極的に採用した。

- (i) 光が介在するバイオ、生物、医学応用全般を対象とし、イメージングを超えるアクティブ機能発現などを含む研究
- (ii) ナノフォトンクス技術を応用して新機能発現させたデバイスとその具体的応用研究
- (iii) 超高精度光を用いた冷却原子による極限物性研究や光格子時計による時空間計測、制御の科学と技術

(iv) 高エネルギー密度、高強度電場が生み出す新しい物質との相互作用、高エネルギー物理とそれを可能とする新しい光科学技術

その結果、3年度にわたり総計 548 件の応募があり、36 件が採択された(採択率約 6.6%)。光科学技術を軸に据えることに加え、特に新たな視点の創出、限界の追及に注目し、提案者自身の構想実現に向けた「強いこだわり」を重視した結果、非常に独創性の高い挑戦的な課題が多く集まった。研究課題は基礎物理、極限フォトニクス、ものづくり、デバイス、情報処理、バイオ医療関係までバランス良く分布しており、研究総括が描いた専門領域の拡がりに相応しいものとなった。

一方研究者の多様性という観点では、私立大学、海外研究機関、女性研究者の比率が少なめであったが、領域の問題というよりは当該光分野の研究者母集団の問題であったかもしれない。

## ②領域アドバイザーの構成

領域アドバイザーには、国立大学、私立大学、企業から選定した高い見識を持つ 10 名の研究者を、光科学、理工学一般、生物医学等の広い分野を網羅する形で配しており、幅広い研究課題への対応が適切に行われた。また、応用展開も見据えた企業からの 2 名の参画は適切であった。選考委員会には、このほかに 3 名の外部評価委員が加わり、個別分野での先端的な研究テーマの提案にも的確な判断ができるように配慮した。

## ③研究領域のマネジメント

研究総括のマネジメントでは、個々の研究者が自らの視点で設定した高い目標へ向かう意欲と自律性、研究者間の切磋琢磨を重んじ、研究総括からの過剰な干渉は極力避けるという研究総括の強いポリシーに基づく方針が一貫してとられた。年に 2 回開催された領域会議では、発表する研究者に対して、その分野を代表するという自覚の下に当該分野を全体俯瞰させ、学術的な背景や世界の状況などを盛り込んだ形で各自の研究進捗を報告する形式を採用した。この進め方は若い研究者に各自の研究の意義に対する自覚を高めるとともに、論文作成能力の向上にも大きな基礎力を付加したと考えられる。またオープンセミナー、公開セミナー、自主勉強会、シンポジウムの共催など、十分な情報発信と分野交流の機会が設けられ、「高速ホログラフィック蛍光顕微鏡の開発」など数件の領域内共同研究が開始され研究成果を上げた。さらに領域会議の際にナイトセッションを設定して、異分野を横断するブレインストーミングを行うと共に、研究総括自身の講演を通じて研究哲学や情熱を若手研究者に直接伝えるという取り組みは、特徴あるマネジメントとして評価される。

予算の配分では、異動に伴う再スタート資金の支援、共同研究(領域内共著論文 5 報)、フィービリティスタディ(領域内 12 件、領域外 2 件)の援助などに工夫が見られる。研究総括や領域アドバイザーは各課題の長所短所をよく理解し、常に進捗状況を十分把握して研究領域の進展を図った。領域会議などにおいて、研究者相互の交流や自律的な討議を促進した点は評価される一方で、進捗状況が期待通りでないプロジェクトに対して、領域アドバイザーや研究総括の果す役割が必ずしも明確でなかった点が惜まれる。

#### ④受賞、キャリアアップなど

文部科学大臣若手科学者賞 8 名を始め、IUPAC（国際純正・応用化学連合）、英国王立化学会、ゴットフリード・ワグネル賞などの有力な国際的な賞を含む多数の顕彰、受賞（国内国外総計 57 件）があったことから、研究領域全体の研究の水準は高く、国際的にも高い評価を受けたことがわかる。人材育成の観点からは、准教授への昇進（14 名）をはじめとして、採用された 36 名中半数以上の 21 名が昇任を果たしたことは特筆に値する。

以上により、本研究領域の研究マネジメントは優れていたと評価できる。

#### (2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

「新たな光機能や光物性の発現・利活用による次世代フォトニクスの開拓」という戦略目標の下に、各研究者が立案した独創性の高い研究が推進され、顕著な研究成果を上げると共に、新たに発生した共同研究による研究成果にも、いくつか顕著なものが認められた。目先の成果に捕らわれて小さくまとまるのではなく、長期的視点で見て重要な研究につながる挑戦的な研究を推進するという研究総括の確固たる方針の下で、特に基礎分野で国際的に非常に高く評価される研究成果が創出された。また、医療や産業など、社会への貢献が期待される顕著な成果を上げた研究者があった点も高く評価される。研究領域全体での研究成果は、国際論文 236 報で、そのうち非常に著名な自然科学系雑誌に 29 報も発表されている。インパクトの高い国際学術誌に多数の論文が発表され、多くの注目を集めていることが、この研究領域の独創的かつ先導的な成果の多さを特徴づけている。招待講演も国内外で 373 件（国内 244 件、国際 129 件）あり、特許出願は 26 件（国際特許出願 8 件）である。

具体的には、基礎物理分野では、松本伸之が大質量機械振動子を用いた巨視的量子分野の開拓で注目すべき成果を上げた。この課題は、「大質量振動子の基底状態実現」、「振動子の光学トラップフィードバック制御系」、さらに「超精密ハイパワー光共振器」などの複数の極限技術をすべて実現する必要があることから、当初から極めて挑戦的なテーマと考えられていたが、研究総括の予想を良い意味で裏切り、個々の極限的な技術を順次全て実現し、mg スケールの機械振動子の基底状態を実現して研究を大きく進展させたことは、重力・量子論に新たな知見をもたらす実験分野の扉を切り拓いたことを意味し、発表された著名な物理系専門誌で Featured Physics に選定されるなど、特筆すべき独創的・挑戦的・先駆的な研究成果を挙げた。また小林淳は、光共振器増幅により大きくて深い光格子トラップを造る技術を開発し、これまでよりも桁違いに大きなトラップ原子密度を実現した。この技術により、すでに電子・陽子質量の恒常性検証の精密化に成功しているが、独創性、先駆性、発展性において秀でており、特筆に値する。

バイオフィotonics関係の基礎研究では、光を利用した遺伝子発現や生理学的反応を制御するオプトジェネティクスという観点で、井上圭一による、第3の新たなロドプシン分子（ヘリオロドプシン）の発見とその特性解明が注目される。既存ロドプシンとその誘導体を光受容分子とするオプトジェネティクスに新たな特性の光受容分子を提供可能にしたこと

で、世界への波及効果が大きく、すでに井上のグループと名古屋工業大学の神取秀樹教授を中心とした国際共同研究が開始されている。この研究成果は国際的に著名な自然科学誌に掲載され、多くの注目を集めている。最先端の極限的な光源（X線自由電子レーザーと可視レーザーの組み合わせ）を駆使した研究事例として、秋田総理による「光化学系 II の酸素発生過程の解析」も非常に注目される研究成果である。世界中が追究してきた光による水分子酸化と酸素形成メカニズムの解明に迫る研究成果であり、人工光合成によるクリーンなエネルギー生産に向けた基盤研究として国際的にも高く評価されており、実際国際的に著名な自然科学誌に掲載され、すでに非常に多くの研究者に引用されている。

一方で、同じバイオ系分野で社会的な貢献に極めて近いところまで到達した研究事例もある。例えば小川美香子の「光と生体の新たな相互作用を利用したがん治療法の開発」は、社会的に強く望まれているがん治療薬の実現に向け、基礎から実用に至るまでの一連の研究を戦略的に推進し、企業とも連携して「薬事承認」を得るまでに到達した。小川の光免疫療法に関するメカニズム解明（光による細胞障害）、開発（新規光反応性薬剤）、臨床利用へ向けた展開・異分野融合による光の新たな活用法の開拓へとつなげる一連の展開は、基礎研究から始めて臨床段階にまでシームレスに繋がる先駆的な研究として特筆に値する。今後医療現場で実用化できれば、難治性のがんに対し、新たな治療方法を提供できる可能性が非常に高い。なお小川は、上記研究成果と連動する形で、CREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の令和元年度の採択課題「光を用いたヒト生体深部での分子制御」の研究代表者に繋がっており、今後、社会的・経済的価値の創造に繋がる研究成果が大いに期待される。

バイオ系分野では、最も「さきがけ」らしい個人研究として着実な成果を挙げた小笠原慎治の成果事例も高く評価する。メッセンジャーRNAのキャップ構造に光感受性分子による化学的修飾を加えて翻訳過程自体を光制御する仕組みを考え、従来長時間を要した光照射から発現までのタイムラグを大幅に短縮し、精密な光制御の可能性を開拓した。小笠原は有機合成からゼブラフィッシュの胚発生操作という化学と動物生理学の境界領域における研究を殆ど個人で行い、単著の原著論文としてまとめているが、これは正に個人研究を支援する「さきがけ研究」の精神を体現したものと言える。

量子フォトンクス分野では、岩崎孝之が、ダイヤモンドにスズを導入する画期的な量子光源の開発に成功したことが挙げられ、特筆に値する。光を利用する量子情報の分野で必須の要素である量子光源に新しい選択肢を加えるものとして当該分野でのインパクトが大きい。将来的には、長い記憶時間を有する量子メモリーなど量子ネットワークへの応用が期待される。この成果論文は、著名な物理学系学術専門誌に掲載され、高い注目と評価を得ている。

ナノフォトンクス分野では、石井あゆみが、当初実現が難しいのではないかとされていた無機有機ハイブリッド界面における光信号増幅を実現させた。それに加えて、有機キラル分子を用いた円偏光センサーの開発にも成功するなど、応用的な価値も高い優れた研究成果を挙げた。ライフイベントのある中でこのような優れた研究成果を挙げられた事例は、本

人の努力に加えて、さきがけにおけるライフイベント支援制度がうまく機能した好例であると言える。この研究課題は、新型コロナウイルスの影響も含め6か月の延長となったが、その間に、有機色素をシェル層に組み込んだ新しいアップコンバージョンナノ粒子を開発し、近赤外光の受光感度をさらに向上させることに成功した。また、これまでの成果を含めた総論を招待論文として出版するとともに、特許を新たに3件出願するなど、短期間に大きな成果を上げた。また田中嘉人は、局在プラズモン共鳴による光運動量変化を用い、ブラウン運動に打ち勝つレベルの光駆動可能なナノモーターを実現させており、光をナノのステージで運動機能と融合させた興味深い結果を発表した。

オプティクス分野では、堀崎遼一が、散乱光計測・制御に機械学習を取り入れる画期的手法（ゴーストサイトメトリー）を創出し、その応用として多視点光制御への可能性を見出した。細胞の超高速自動分取システムの構築への応用などが考えられる。この産官学連携による細胞分析・分離に関するイメージング技術を基に大学発のベンチャーが設立されるなど、今後他の企業からも大きな注目を集めると思われる。その成果は著名な自然科学誌に出版され、多くの注目を浴び、また国際的に高く評価されている。また田原樹は、高い光利用効率で高速記録・可視化する自然光マルチカラーホログラフィック撮像システムを開発した。これは古典光学的アイデアを、検知器やデータ処理系を含めた現代技術を駆使することで、現実のものに仕立て上げた研究成果であり、高く評価される。この研究成果は、石井あゆみとの共同研究の形で論文発表されている。

有機化学とオプティクスの融合分野では、齊藤尚平が独自に開発した羽ばたく分子 [FLAP] を基軸に、単一分子への応力に対応して発光スペクトルが変化するメカノフォア分野で蛍光分子ライブラリーを構築すると共に、共有結合の切断を伴わずにV字から平面型へのコンフォメーション変化だけで発光特性を変えることができるため、ナノレベルの応力情報をリアルタイムに定量する革新的な光解析技術を創出した。

その他、小澤祐市による新しい3次元イメージング技術の構築、浅沼大祐が構築した退色分子の高速置換による長時間超解像観察システム、大山廣太郎による光で生体内温度分布を観測・制御する蛍光温度ナノシートの開発、磯村彰宏による細胞の振動リズムのイメージング技術、松永隆祐によるディラック半金属における巨大非線形応答の発見など、独創性と将来性の高い研究成果が実に多く、大目標への重要なステップを乗り越えた研究など、「さきがけ」の精神からは、高く評価すべき研究成果が実に多数報告された。

このように達成が極めて困難な課題も積極的に採用し、研究者の自主性と相互交流による切磋琢磨を尊重し、過度な干渉は控えることに徹した運営方針が、一面では功を奏し、非常に高水準の研究成果に結びついたと思われる。

全体を通してみると、(a)周到に計画されていて順調に成果を出したものの、(b)一見不可能かも知れないと当初は判断されながら、大きな成果を上げたものの、(c)目標が高くて、志し半ばに終わってしまったものの、の3つのタイプに分類される。ここで(c)に分類される研究に対しては、積極的なアドバイスがプラスに働く可能性はあったかもしれないが、(b)のタ

イブ（例えば前述の小笠原の光照射遺伝子操作技術、小澤の3次元高速イメージング、岩崎の量子光源材料開発、田原のホログラフィックセンシング、石井の高感度検出器など）は、正に「さきがけ」の精神に沿うものであり、これらの提案を拾い上げ、開花に導いた研究総括の見識は非常に高く評価される。

以上により、本研究領域の戦略目標の達成状況は特に高い水準にあると評価できる。