

# 研究領域「革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出」 事後評価（課題評価）結果

## 1. 研究領域の概要

科学の発展に光科学技術が大きな寄与をしてきました。原子の分光学の知見が量子力学を生み出し、半導体物理学に発展し、その後の光物性や量子光学の基盤を支えています。レーザーの発明は光科学における大きな一里塚でしたが、現在では多くの科学分野を支える基盤技術となり、また光通信や光記録に代表される数え切れないほどの応用展開をもたらしました。このように光科学技術は学術や社会への貢献を果たしつつ、光科学技術自身も大きく進化するという好循環を起こしてきました。ここで着目するのは、様々な科学分野において新しい展開を追い求める研究者の夢や理想が、新しい光科学技術を生み出す強い動機や原動力となっていることです。細胞内をできるだけ高い空間分解能で見たいという生命科学者の飽くなき探求心が高解像度光学顕微鏡の技術開発を突き動かしてきました。最近では、非線形光学の取り込みと共に新しい蛍光色素が開拓され、回折限界をはるかに超える分解能に至っています。アインシュタインの一般相対論が予言する重力波の検出は長年の物理学者の夢でしたが、最近になってようやく長尺のレーザー干渉計によって達成されました。これに必要なレーザー安定化技術や干渉計技術の開拓は光科学の進展をもたらしています。そのような例は枚挙にいとまがありません。

本研究領域では、これまでには無かったような革新的な光科学技術を開拓し、様々な科学分野の新局面を切り開くような挑戦的な研究を推進します。この過程から、将来様々な分野で応用されるような基盤的な光科学技術の創出を図ります。

## 2. 事後評価の概要

### 2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

「戦略的創造研究推進事業(先端的低炭素化開発を除く。)の実施に関する規則」における「第4章 事業の評価」の規定内容に沿って実施した。

### 2-2. 評価対象個人研究者及び研究課題

#### 2019年度採択研究課題

- (1) 赤松 大輔(横浜国立大学大学院工学研究院 准教授)  
極低温原子・微小球ハイブリッドシステムで探る散乱の物理
- (2) 石島 歩(北海道大学電子科学研究所 助教)  
光駆動非線形音響波による生体深部メカノイメージング
- (3) 井上(今野) 雅恵(東京大学物性研究所 特任研究員)  
” All-optical” な電気生理学による植物個体の膜電位操作技術の創出
- (4) 長田 有登(東京大学大学院総合文化研究科 助教)  
原子イオン集積量子光回路による究極の量子技術基盤の創出
- (5) 久世 直也(徳島大学ポストLEDフォトリソグラフィ研究所 准教授)  
マイクロ光周波数コムの新規制御技術の開発
- (6) 坂本 雅行(京都大学大学院生命科学研究科 特定准教授)  
コンピュータホログラフィーを応用した活動電位発生機構の解明
- (7) 杉本 敏樹(自然科学研究機構分子科学研究所 准教授)  
原子スケール極微分光計測法の開発と界面水分子の局所配向イメージングへの応用展開
- (8) 高橋 幸奈(九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 准教授)  
新型プラズモン誘起電荷分離を用いたCO<sub>2</sub>資源化光触媒の開発

- (9) 蓑輪 陽介 (大阪大学大学院基礎工学研究科 助教)  
光トラップ技術による量子流体力学の開拓
- (10) 横田 泰之 (理化学研究所開拓研究本部 専任研究員)  
電気化学デバイスの分子スケール制御に向けた近接場基盤技術の創成
- (11) 吉岡 孝高 (東京大学大学院工学系研究科 准教授)  
炭素原子気体の精密分光と冷却の実現

### 2-3. 事後評価の実施時期

2023年1月28日(土曜日) 事後評価会開催

### 2-4. 評価者

#### 研究総括

田中 耕一郎 京都大学大学院理学研究科 教授

#### 領域アドバイザー

石原 一 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

岩井 伸一郎 東北大学大学院理学研究科 教授

枝松 圭一 東北大学電気通信研究所 教授

小川 哲生 大阪大学大学院理学研究科 教授

小川 美香子 北海道大学大学院薬学研究院 教授

腰原 伸也 東京工業大学理学院 教授

島野 亮 東京大学低温科学研究センター 教授

鈴木 俊法 京都大学大学院理学研究科 教授

武田 光夫 電気通信大学 名誉教授

中野 貴志 大阪大学核物理研究センター センター長

三沢 和彦 東京農工大学 副学長(教学統括)

湯本 潤司 東京大学 特任教授

#### 外部評価者

該当なし

### 3. 総括総評

本研究領域は、これまでには無かったような革新的な光科学技術を開拓し、様々な科学分野の新局面を切り開くような挑戦的な研究を推進することを目指している。今回評価対象となった1期生（2019年度採択）11名は、光周波数コム技術、量子光学、原子系の光科学、量子液体の光操作、ナノ空間の分光学、光音響イメージング、光化学、バイオイメージングなど、幅広い分野において、独創的かつ挑戦的な研究を進めた。光駆動非線形音響波による高速イメージング、レーザーアブレーションを用いた高効率イオントラップ技術、マイクロコムの低位相雑音化と掃引技術開拓、高感度・高速応答カルシウム発光センサーの開発、量子渦のイメージング、液中の新規近接場基盤技術の開拓、炭素原子のレーザー分光の基礎技術開拓、などで大きな研究成果が得られており、総じて革新的な光科学技術の開拓が進んだと評価できる。特筆すべき点は、当初計画になかった研究展開や成果が数多く見られたことである。本領域では、各研究者に対して大きな目標に向かってチャレンジすることを勧めており、研究の展開によっては新たな方向性を模索することも奨励してきた。本領域の研究者はこの趣旨をよく理解し、機動的な研究を進めた結果が現れたものだと考えている。

本領域では、11名の1期生に対して、その専門分野に詳しい領域アドバイザー1名がメンターとなり、さまざまな局面で親身になってアドバイスを与えてきた。2019年採択時の会議では対面での意見交換ができたが、2020年度からの2年間は新型コロナウイルスにより、対面での会議を行うことができず、オンラインでの領域会議や技術交流会を行った。これによって、さきがけ研究者が本来享受できたはずの研究交流が妨げられたのは間違いない。非常に残念な状況であった。最終年度は対面での領域会議を開催できたが、そこでは非常に活発な意見交換がおこなわれ、対面での議論の機会の提供がいかに重要であるかを再認識した。今後の領域会議にも1期生を招き（自由参加）、研究交流の機会の提供を続けたい。

本領域の1期生11名のうち4名が研究期間中に異動または昇進しており、また様々な賞の受賞やプレスリリースでの成果発表も相次ぐなど、さきがけを契機にそれぞれの研究分野において評価され、研究者として着実に成長している。また、このさきがけ研究の終了時点で、全ての研究者に新しい研究展開の萌芽が見えてきている。是非、その芽を伸ばし、大きな研究展開につなげてほしい。今後も1期生だけでなく、2期生や3期生の研究者との交流を継続し、さきがけで得られた経験や得られた人脈を生かして、研究者として大きく羽ばたいていくことを期待している。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 極低温原子・微小球ハイブリッドシステムで探る散乱の物理

2. 個人研究者名

赤松 大輔（横浜国立大学大学院工学研究院 准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、レーザー冷却された極低温原子気体と光トラップされた微小球からなるハイブリッド系を用いて、“古典的”微小球と“量子的”原子の散乱現象を明らかにすることを目指した。

高真空中でのナノ粒子の振る舞いは全く未知であり、新しい困難が次々と起きるのを幅広い知識の交換を行いながら一步一步解明し、低真空中でのトラップに成功したことは評価できる。光トラップしたナノ粒子のロスのため、最終的に狙いとするナノ粒子の高真空中でのトラップには至らなかったが、目標のハイブリッド系実現にはもう一步のところまで来ている。ナノ粒子と極低温原子の同時トラップとそれらの間の散乱現象が観測されれば、マクロ（古典）とミクロ（量子）の世界をつなぐ基礎物理としての重要な成果となる可能性がある。また、当初予想されなかったナノ粒子の電場による制御技術の開拓は大きな成果である。ナノ粒子と電荷の関係を明らかにして、電場によるナノ粒子の運動制御に結びつけたことは意義深い。

途中で大学への転出があり、実験の中断を余儀なくされたが、新しい環境での立ち上げを順調に進め、学生を含めた研究チームを構築し研究を継続できたことも併せて評価したい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 光駆動非線形音響波による生体深部メカノイメージング

2. 個人研究者名

石島 歩（北海道大学電子科学研究所 助教）

3. 事後評価結果

本課題は、生体深部の機械特性を音波の伝搬とチャープパルスの後方散乱をうまく利用して可視化を行うことを目指した。

既存のブリルアン散乱顕微法を用いた生体のリアルタイムイメージングを志向した研究を進展させ、秒オーダーでの溶液中に存在する固定化細胞のイメージングに成功し、各種音波波形成型技術、イメージング法の開発もライトシート手法での高速スキャンを実現している。手堅い手法で確実な研究計画に沿った開発進展は高く評価される。今後、周波数分解能を液液相転移などのレベルまで改善し、完全に生体環境中での深部の非破壊力学特性測定に成功すれば、生体中での器官形成にかかわる過程の可視化など、画期的な応用が期待される。さらに、ライトシートブリルアン散乱顕微法の開発などのように、当初の想定とは異なる新しい展開があったことは高く評価できる。更なる高速化の推進や生体以外の応用の可能性も視野に入れることを期待したい。

また、他大学への転身のため、研究中断期間があったが、新しい組織で、学生も含めた研究実施体制を構築し研究を着実に進めている点も併せて評価したい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ” All-optical” な電気生理学による植物個体の膜電位操作技術の創出

2. 個人研究者名

井上(今野) 雅恵 (東京大学物性研究所 特任研究員)

3. 事後評価結果

本課題は、微生物型ロドプシンを植物へ組み、植物の膜電位の操作と観察を可能とする全く新しいオプトジェネティクスの開拓を目指した。

植物個体の膜電位イメージングには至らなかったが、培養細胞に対するチャンネルロドプシンと膜電位センサーの共発現、個体に対する共発現、培養細胞の光刺激による脱分極の検出、と段階を踏んで着実に研究を行った。細胞レベルでの膜電位操作・観察用の光学的測定システムをほぼ構築し、組織・個体レベルのイメージング実現への基礎を完成させたことは評価できる。このシステムは、植物の膜電位と関連した、各種生理現象や細胞間・個体間連携問題にとって必要不可欠な研究ツールとなる可能性を秘めており、新しい膜電位解析分野への展開が期待される。

この課題においては、技術的な面での問題点の洗い出しを、試料のハンドリングと光学機器の両面で行う必要があり、光学機器の改善に手が回らなかった面があったことは致し方ないが、今後は、光学測定系の構築や条件最適化の点で専門家との共同研究を積極的に考え、研究のスピードアップを図っていくことも重要である。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 原子イオン集積量子光回路による究極の量子技術基盤の創出

2. 個人研究者名

長田 有登（東京大学大学院総合文化研究科 助教）

3. 事後評価結果

本課題は、イオン・光集積回路の高度な技術融合により、新たな量子光学プラットフォームの構築を目指した。

半導体ミラーを利用したイオン・光インターフェースの基本技術の開発に成功し、そこでの実証を基盤に光回路一体型イオントラップの試作にも着手しており、当初目的のかなりの部分を達成していることは評価できる。また、イオントラップ等をノードとした分散型量子ネットワーク技術の開発は、量子情報処理技術分野において重要性を増しており、光ネットワーク接続という意味で波及効果は非常に大きいと考えられる。一方で、共振器ミラー作製の部分で多くの困難が発生しそうなことは当初より予想できたことであり、この対策にどうリソースを割くかについては、もう少し早期より戦略や代替策の検討があってもよかったのではないかと思われる。

レーザーアブレーションによって発生したイオンのトラップにより、高い確率で単一イオンの捕獲が可能となるなど、当初予想していなかった成果が得られたことは高く評価でき、今後のイオン冷却型量子科学分野にとって大きな進展が期待される。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： マイクロ光周波数コムの新規制御技術の開発

2. 個人研究者名

久世 直也（徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所 准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、マイクロ光周波数コムを将来の基盤光源として確立するために必要な制御技術の開拓を目指した。

マイクロコムの低位相雑音化とコムモード掃引技術の開発を目指した研究によって、熱雑音等の大幅低減、100 GHz 領域での高速掃引を達成した。応用展開はこれからであるものの、着実に成果を上げており高く評価される。今後、マイクロコムのコンパクトさを活かしたコンパクト加速器技術への応用、低雑音化の達成によるレーダーとしての応用、コム掃引の確立による高周波数分解の分光応用などが期待される。さらに、熱揺らぎを減らしたマイクロコムの実現など、当初には想定していなかった新しい熱雑音通減の技術を進展させており、今後の実装に向けた重要な技術展開となることが期待される。

マイクロコムは、将来の光技術分野において、基幹産業を構築できる可能性を秘めている。ぜひ究極の低雑音化とそれによる新しい分光学の創始という初志を貫徹するとともに、さまざまな社会実装に研究をつなげてほしい。



## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： コンピュータホログラフィーを応用した活動電位発生機構の解明

2. 個人研究者名

坂本 雅行（京都大学大学院生命科学研究所 特定准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、シナプスの複数のスパインに対してデザイナブルな光刺激を可能とする神経生理学における新しい光技術の開拓を目指した。

ホログラムパターンを使った空間変調器で、生体脳において神経活動操作を多点で光によって行い、同時に多点で計測を行うための顕微鏡を実現し、さらにそこで用いるための高感度・高速応答カルシウム蛍光センサーの開発に成功した。これと並行し、細胞内で重要な役割を果たすと推定されている cAMP の動態をとらえるための蛍光プローブ開発にも成功している。これらの成果は高く評価される。一方でスパイン刺激はまだ出来ておらず、神経系に対する照射効果はこれからの課題である。今後の研究展開に期待したい。

また、脳内活動のパターンと刺激部位との相関研究は、今年度の日本国際賞にもその創始研究が選ばれているように、脳機能解明研究技術として極めて重要なものである。本研究は大きなインパクトをもたらす新手法開発の可能性を持っており、今後の展開が期待される。さらに、cAMP の超高感度センサー開発など、記憶などの機能に関する研究への貢献が期待される開発にも成功する想定外の成果をあげている。この成果と、顕微分光装置の組み合わせも是非柔軟に考えてほしい。神経科学分野にとって大きな進展が期待される。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 原子スケール極微分光計測法の開発と界面水分子の局所配向イメージングへの応用展開

2. 個人研究者名

杉本 敏樹（自然科学研究機構分子科学研究所 准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、非線形光学と走査型トンネル顕微鏡（STM）の組み合わせによる分光手法を発展させ、水分子の表面局所構造の解明を行うことを目指した。

水分子の観測は研究途上であるが、STM 探針の作成や観測系の性能向上確認など、主要部分は達成されている。今後のさまざまな表面化学種への展開が可能であることを確認している点は高く評価される。なお、当初目標である界面水分子の配光イメージングには至らなかったものの、水分子凝集系の非線形分光イメージが取れ始めればインパクトのある成果が期待できる。特に先端増強型の非線形分光は未開拓な部分が多く、この関連で重要な分野を拓く可能性がある。

水分子非線形分光の本格的な測定への準備は整ったが、プローブ先端付近での電場偏光は形状の依存性もある複雑なもので、信号の方向依存性も単純ではないと推察される。単に電場プロファイルだけでなく、ターゲットの微視的情報も含めたシミュレーションなども取り入れてうまく観測データを解析できる態勢が整えば、今後大きな発展や波及効果が見込まれる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 新型プラズモン誘起電荷分離を用いた CO2 資源化光触媒の開発

2. 個人研究者名

高橋 幸奈 (九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 准教授)

3. 事後評価結果

本課題は、金属ナノ粒子と p 型半導体とを接合した新奇なプラズモン誘起電荷分離素子の開発によって独創的な光エネルギー変換システムを実現することを目指した。

金属表面プラズモン共鳴を用いた効率的な光エネルギー捕集系と p 型半導体の組み合わせで達成可能な電荷分離系を精力的に探索した。その結果、効率が 0.1%を超えるに至る材料系を発見しており、ホール側を使ったプラズモン電荷分離系の原理的可能性を実証したと評価される。一方で、当初目標の二酸化炭素資源化のための光触媒の実現には至っておらず、まだ萌芽的な成果の段階である。もう少し時間をかけて目標に近づけば、エネルギー変換技術として新しい道を拓くインパクトある成果が見込まれる。

金属ナノ粒子と p 型半導体を用いた電荷分離反応の観測、面配向したナノ金属粒子アレイの開発に成功したことは大きな成果であり、今後、光触媒としての性能評価を進め、実用的な光触媒の開発に繋げることを期待したい。研究室立ち上げの中、雇用の問題などで多少もたつきもあったが、最終的には研究スタッフ、学生からなる研究チームを立ち上げ、良い実施体制を構築し研究を効率系に進めたことも併せて評価したい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 光トラップ技術による量子流体力学の開拓

2. 個人研究者名

    袁輪 陽介（大阪大学大学院基礎工学研究科 助教）

3. 事後評価結果

本課題は、量子渦の光マニピュレーションを通じた量子渦やその励起状態であるケルビン波の物理的理解を目指した。

極低温の超流動ヘリウム中で微粒子の光トラップの実現、その電場操作など、光操作でのケルビン波励起を除いて本研究の目的はほぼ達成されており、その手腕は高く評価される。また、量子流体中の運動や乱流の制御は基礎科学的視点で重要であるが、今後プラズマ科学、特に核融合との関係で重要となると期待される。なお、光トラップによる励振の代わりに外部電場でケルビン波を励振できたことは想定外の成果であり、光技術だけでなく、低温技術の面でもスキルの幅が広がり、さらなる飛躍が期待される。また、理論分野の研究者のサポートを積極的に取り入れていったことが、今回の研究の方向性や結果の解釈を得る上で重要なポイントであったと考えられ、この点も併せて評価したい。

今後は、ケルビン波の光操作など、光照射を熱源として排除してきた極低温物理の世界に新たな視点を投げかけることを期待する。量子渦は、量子流体を理解する上で重要であるが、その一方で非常に地味な研究対象である。今までの成果をベースに、更なる進展を図り、他分野への知見の展開も進めてほしい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 電気化学デバイスの分子スケール制御に向けた近接場基盤技術の創成

2. 個人研究者名

横田 泰之（理化学研究所開拓研究本部 専任研究員）

3. 事後評価結果

本課題は、溶液下での電気化学反応に関わっている分子のミクロな情報を走査型トンネル顕微鏡 (STM) の技術を用いて分光学的に取得することを目指した。

電気化学環境下での表面増強ラマンについては、界面分析手法の開拓として、独創的多機能 STM 探針の開発を軸に発光スペクトルや時間分解測定も合わせ、多彩な展開を図った点は高く評価できる。また、蛍光色素を利用した手法や、狭帯域波長可変パルス光源など、当初予定していなかった手法、機器を柔軟に取り入れており、そのことが良い成果に結びついている。今後、多機能探針技術で、単分子界面での電荷移動など電気化学的評価が可能となれば、電気科学的探針顕微鏡、さらには電気化学反応そのものの基礎過程解明の手法として大きなブレイクスルーとなることが期待される。

さらに、多くの研究者との議論や相談により研究の進捗が図られただけでなく、新しい方向性を見いだせたことも併せて評価したい。他分野の研究者との積極的な交流により学際的に研究を進められたことが大変良い効果を生んだと思われ、今後もそのネットワーク・学際的研究体制を一層発展させることを期待している。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 炭素原子気体の精密分光と冷却の実現

2. 個人研究者名

吉岡 孝高（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、世界的に誰も達成していない炭素原子のレーザー冷却を目指した。

多くの困難を乗り越え、新しい技術開発を行いながら炭素原子気体の発生と2光子励起を確認し、レーザー冷却までもう一步というところまでたどり着いたことは大変素晴らしい成果である。光源、原子ガス発生など実に様々な未踏領域に踏み込んだ試行錯誤の中で、これだけの一貫した方向性を出せたことは極めて高く評価される。また、炭素という生命の源となる元素の精密分光，レーザー冷却が可能となれば、地球、宇宙、生命科学を含む広い分野の科学技術において大きなインパクトと波及効果を生む可能性があり、本研究でその目処をつけたことは大変大きな意義がある。

炭素原子のエネルギー準位は、真空紫外域にあるために、未解明な点も多く、それ自体が研究となるものである。吉岡氏の緻密さと粘り強さは、特筆に値するものがあり、さらに研究を深めるとともに、その成果を他の分野へ展開してほしい。

未踏の目標に向かって試行錯誤を重ねながら探索、技術開発を続け、研究期間中に目標目前まで到達したことは大変優れた成果であるとともに、さきがけ研究としての本来あるべき姿を体現するものである。