

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（先端的低炭素化技術開発及び先端的カーボンニュートラル技術開発（ALCA-Next）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

2020年度採択研究課題

- (1) 青木 貴稔（東京大学大学院総合文化研究科 助教）
冷却原子を用いた量子センシングによるダークマター探索
- (2) 石井 順久（量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門 上席研究員）
アト秒軟X線光源による水の光励起ダイナミクスの解明
- (3) 稲田 優貴（埼玉大学大学院理工学研究科 准教授）
感度と速度を極めた中赤外画像診断による革新的プラズマの創出
- (4) 上杉 祐貴（東北大学多元物質科学研究所 助教）
光子-電子誘導非線形散乱による新規光学技術の創出
- (5) 加藤 峰士（電気通信大学大学院情報理工学研究科 准教授）
光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発
- (6) 神田 夏輝（理化学研究所光量子工学研究センター 研究員）
ベクトル波形制御された高強度高周波テラヘルツパルスによる物質制御
- (7) 歸家 令果（東京都立大学理学部 教授）
光ドレスト高速電子線散乱によるzeptosecond遅延時間測定
- (8) 白神 慧一郎（京都大学大学院農学研究科 助教）
全反射減衰テラヘルツ分光で切り拓く細胞内の水の世界

- (9) 千賀 亮典(産業技術総合研究所ナノ材料研究部門 主任研究員)
電子線赤外分光を利用した超高空間分解能同位体検出
- (10) 久富 隆佑(京都大学化学研究所 助教)
表面弾性波を用いたオプトスピンメカニクス
- (11) 道村 唯太(カリフォルニア工科大学物理・数学・天文学専攻 リサーチサイエンティスト)
超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索

2-3. 事後評価の実施時期

2023 年 12 月 16 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 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

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2期生（2020年度採択）11名は、アト秒軟X光源技術、電子線の光学制御、冷却原子や共振器を用いたダークマター探索、テラヘルツ光源の高度化、赤外領域とテラヘルツ領域の同時全反射分光技術開拓、光周波数コム技術、表面弾性波の光検出、プラズマ診断など、幅広い分野において、独創的かつ挑戦的な研究を進めた。電子線赤外分光を利用した超高空間分解能物質科学、光子-電子誘導非線形散乱による新規光学技術、アト秒軟X光源の高度化、ダークマター探索に向けての新規な光学測定技術、時空間分解中赤外イメージングによる革新的プラズマ画像診断技術、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2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。しかし、2020年採択時からの2年間は新型コロナウイルスの影響により、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く、非常に残念な状況であった。最後の2年間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2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2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： 冷却原子を用いた量子センシングによるダークマター探索

2. 個人研究者名

青木 貴稔（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、光技術と弱い力を組み合わせた量子センシングによるダークマター探索を目指した。

原子のレーザー冷却、ラムゼー共鳴、スクイーミングを組み合わせてダークマターの探索を進めるため、技術の総合力が求められる挑戦性の高いテーマであった。このため、最終目標から考えると不十分ではあるものの、Cs 原子の冷却、マイクロ波ラムゼー共鳴の実験までは成功しており、一定の成果はあったと評価できる。しかしながら、冷却原子の禁制遷移の分光には想定していなかった問題もあり、成功には至っていない。ダークマター探索という目標達成へ重要なテーマが残った形となり、今後の課題である。

また、理論、実験両面で、種々のサブテーマで国際的な共同研究を組んで研究を進めたことは評価できるが、一方で、共振器を導入できず保留になった研究項目がある。今後は、必要な研究費の確保や計画の進め方等について、自身の考えや科学的目標を効果的に説明し、計画的にサポートを得ることが望まれる。さきがけ終了後は、早期に冷却下での禁制遷移の観測を実施し、目標であるダークマター探索を進めて欲しい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： アト秒軟 X 線光源による水の光励起ダイナミクスの解明

2. 個人研究者名

石井 順久（量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門 上席研究員）

3. 事後評価結果

本課題は、高強度・高繰り返し赤外レーザーを用いた高次高調波発生によるアト秒軟 X 線光源を開発し、本光源による水の光励起後極初期のダイナミクスの解明を目指した。

励起レーザー光源の開発から始め、目標となる光子エネルギーの X 線発生まで研究を着実に進め、光パラメトリック増幅を用いた波長 2,000 nm 高強度極短赤外光源の開発まで到達したことは高く評価できる。なお、酸素 K 吸収端を超える軟 X 線発生とそれによる目標の分光が未達であるが、今後達成されるものと期待される。一方、応用展開としての水の光励起状態反応過程の解明はいまだ未着手で、アト秒のターゲットとして何を分光するのか、という目標の設定が課題である。

水や生体の励起反応ダイナミクスを追える X 線パルス光源の開発は、多くの分野に大きな波及効果をもたらす成果である。光源開発に成功したことでバイオや医療のみならず、産業への波及効果は大きく、多くの共同研究や成果につながることを期待される。今後は水の計測に限らず、固体系も含めた時間分解計測プラットフォームの確立に向けた研究展開を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 感度と速度を極めた中赤外面像診断による革新的プラズマの創出

2. 個人研究者名

稲田 優貴（埼玉大学大学院理工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、プラズマの時空間進展をシングルショットで連続可視化することで超希少なプラズマパルスを発掘するとともに、本プラズマパルスを再現性良く生成できる革新的なプラズマ発生法の創出を目指した。

プラズマの超高速イメージングという非常に独自性の高いテーマを立ち上げ、電子密度センサーの高速化、高感度化、電界センサーの高分解能化など多くの目標を達成しており、活性種生成メカニズムの解明に肉薄している。設定した目標へは電界センサーの高感度化やシミュレーターの構築など課題もあるが、さきがけ研究としての十分な達成度があった。また、これらの成果を用い、活性種生成メカニズムの解明に着手し、その成果が出始めている。

ここで得られた、電子密度センサー、電界センサーは再現性のない現象を捉える上で大きな成果であり、雷等の現象解明が大きく期待される。また、プラズマは産業技術として重要であり、本研究での成果は、プラズマ制御技術、活用技術に大きく貢献することが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 光子－電子誘導非線形散乱による新規光学技術の創出

2. 個人研究者名

上杉 祐貴（東北大学多元物質科学研究所 助教）

3. 事後評価結果

本課題は、レーザー光による電子顕微鏡用素子の開発や自由電子を媒質とする非線形光学効果を実証することで、光と自由電子の誘導散乱過程を利用した全く新しい光科学技術の創出を目指した。

円環状光ビームを使って発生する電子レンズ作用を幾何光学にもとづき解析し、諸レンズ特性を簡素な表現に整理し明らかとしたことは高く評価される。また、この新動作原理のポンデロモティーブレンズを透過電子顕微鏡の結像系に適用することで、3次球面収差を補正できることを示し、関連企業などの関心を集めたことも評価される。一方、レーザー光源の開発の遅れによる達成不足や欧州の研究者に先行されたことは残念ではあるが、当初からの意欲的な研究目標の設定と理論解析ならびに実験装置の実装の両面における学術的レベルの高さは十分であり、さきがけ研究として高く評価できる。

光電場を用いた電子ビームの波面・光線制御技術は、電子顕微鏡のみならず広い分野で応用可能な革新的技術となり得るもので、産業的にも大きな波及効果が見込まれることから、今後、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： 光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発

2. 個人研究者名

加藤 峰士（電気通信大学大学院情報理工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

本課題は、光周波数コムによる高速かつ広帯域な光フェーズドアレイ（OPA: Optical phased array）の開発を目指した。

光コムの作成と OPA の原理実証、光点形成、操作と広帯域化のデモまで進み、当初予定していた応用までの道筋は付いたといえる。関連する特許も取得しており、この点は高く評価できる。また、光コムのパルス間位相差を利用する新しい応用のアイデアも出てきており、適用される技術分野の広がりが期待される。一方、現時点では 5 点の光アンテナでの光点形成とその走査を確認したのみで、実際のフェーズドアレイには数 10 点の光点が必要となるが、そのレベルには到達できていない。今後は光コム光源の特徴を生かした計測のデモの具体化が必要と考える。

光コムを用いた OPA は高いポテンシャルを有しており、今後、高性能化、高機能化の共同研究を通して実現していけば、種々の応用で波及効果が見込まれる。出口やその実現に向けた課題の検討、実際に興味を持ちそうな研究者とのコミュニケーションを深めることで、応用について本成果のポテンシャルを十分活かしたターゲットを見極めてもらいたい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ベクトル波形制御された高強度高周波テラヘルツパルスによる物質制御

2. 個人研究者名

神田 夏輝（理化学研究所光量子工学研究センター 研究員）

3. 事後評価結果

本課題は、ベクトル波形制御高強度高周波テラヘルツパルス発生と、物質制御への応用を目指した。

中赤外光の偏光（位相）制御した単一サイクルの高強度光の開発は独自性が高く、かつ物性応用への展開が期待できる。数々の問題を着実に克服して光源開発を成功させた技術力の高さは極めて高く評価できる。この光源の特性を活かした物性探索やほかの光源の開発への展開が期待され波及効果は大きい。一方、ベクトル制御波はまだ高強度化の課題もあるが、完成した際に物質科学にどう活用するか、ターゲットをしっかりと見極め、開発した光源でしか得られない新奇な知見を蓄積して新しい学理に繋げることを期待する。

また、逆回り2波長円偏光パルスの生成は、想定していなかった成果として高く評価できる。本研究の今後の展開の中でさらに大きな成果に結実されることを期待する。光源としては大変高度な自由度を持つものが開発できており、今後物質科学に大いに活用されと考えられる。科学技術上のインパクトだけでなく、将来的には材料科学を通して産業へと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： 光ドレスト高速電子線散乱によるzepto秒遅延時間測定

2. 個人研究者名

歸家 令果（東京都立大学理学部 教授）

3. 事後評価結果

本課題は、電子 - 原子散乱過程で生じる散乱電子のzepto秒オーダーの遅延時間計測の実現を目指した。

電子散乱は、時間領域がzepto秒オーダーでは未だその計測手法が確立しておらず、非常に野心的なテーマであった。レーザーアシスト電子散乱検出装置が出来上がり、データ積算の段階に入っており、数値シミュレーションと予備実験が完了し、実際の観測結果を待つ段階にまで来ていることは評価される。また、現時点では、Wigner 遅延時間測定には至っていないが、様々な厳しい環境の中でも最大の努力を払っており、その姿勢は評価できる。

螺旋運動電子線のキラル分子による散乱過程における不斉効果の研究、円偏光場中の赤外円偏光場電子衝突による模擬星間氷でのアミノ酸不斉合成、超高感度捕捉イオン電子回折装置の開発は、想定外の成果であり、本研究者の視点の幅広さを示すものとなっている。これらの研究も、生命のホモキラリティーの謎を解明できる可能性、質量選別されたイオン分子種の精密構造測定という、これまでに不可能であった新たな研究展開に繋がるものであり、今後の展開が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 全反射減衰テラヘルツ分光で切り拓く細胞内の水の世界

2. 個人研究者名

白神 慧一郎（京都大学大学院農学研究科 助教）

3. 事後評価結果

本課題は、テラヘルツ～赤外領域に至る分光情報を同時に取得できる高精度・高安定な広帯域分光測定系を構築し、水の物性変化と細胞活動の関係性を明らかにすることを目指した。

中赤外からマイクロ波に至る広帯域のスペクトル測定から生体中の水の性質を分光学的に解明する計画であり、超広帯域のスペクトル測定装置の製作が研究の核といえる。その意味で、水分子の 5THz 吸収の起源など広帯域スペクトル測定により新たな知見を得ていること、当初計画よりもさらに広帯域な誘電分光計測系を開発、水分子のダイナミクスの計測に成功したことは、想定を上回る成果であり評価できる。一方で、何を測定すると、何が分かるのかという学術的な目標設定が曖昧であったことは否めない。今後、細胞内の水にどのようにアプローチするのか、開発した手法が活きる新たなターゲットがあるのか、狙いを付けて研究を進めて欲しい。

また、生物関係や異分野の研究者との交流を進めることは、多角的な視野をもつ研究者として飛躍する機会につながるので、積極的な取組を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 電子線赤外分光を利用した超高空間分解能同位体検出

2. 個人研究者名

千賀 亮典（産業技術総合研究所ナノ材料研究部門 主任研究員）

3. 事後評価結果

本課題は、電子線の赤外分光を利用することで、原子レベルの空間分解能を持つ同位体検出技術の実現を目指した。

電子顕微鏡による赤外 EELS を用いた可視化は、新規性が高く、独自性において卓越した技術である。この研究で見出した、グラフェン同位体の熱拡散、ポリマー材料の水素同位体分析は、波及効果の非常に高いものと評価できる。また、当初の目的である同位体分析の枠を超え、そのポラリトンの分散など基礎研究としてのアプローチとしても極めて高く評価できる。レーザー照射下でのその場観測や、今後に向けた装置の改良なども含め研究開始時の目標を超えて進捗している。

原子分解能での同位体検出という全く新しい研究手法を創出したことで、多くの分野に大きなインパクトを与えたものと考えられる。レーザー照射下での鉄クラスター移動のリアルタイム観察など、想定外かつインパクトの大きい成果もでており、今後は、同位体検出技術にとどまらず配置制御技術にまで発展すれば、さらに広い応用範囲が生まれることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 表面弾性波を用いたオプトスピンメカニクス

2. 個人研究者名

久富 隆佑（京都大学化学研究所 助教）

3. 事後評価結果

本課題は、表面弾性波(SAW)における角運動量の存在を光技術により実証し、光・電子スピン・フォノン間における角運動量相互変換の原理解明を目指した。

SAW を介して磁気物性を制御する試みは新規性が高く、物理として SAW とスピンや軌道との相互作用を調べることで、意義深い研究といえる。具体的な研究項目も一つ一つは妥当なものであり、実際にそれを着実に実行していることは評価できる。また、光による SAW の観測や、SAW と強磁性マグノンや軌道角運動量との結合の基礎研究として着実な成果が得られている。その一方で、「光によって（SAW を介して）電子物性や磁性を制御する」という、さきがけで期待された新しいコンセプトを実証する研究としてはやや計画性に乏しく、成果が発散したきらいがある。

非常にアグレッシブな姿勢で精力的に研究を進めており、SAW の定量光学測定手法以外は、領域内外との意見交換から生まれたものである。その意味では、まさに想定外の成果が本来のテーマを支えてきた、という本研究者の特性が出た研究であった。今後の研究の発展に期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索

2. 個人研究者名

道村 唯太（カリフォルニア工科大学物理・数学・天文学専攻 リサーチサイエンティスト）

3. 事後評価結果

本課題は、レーザー干渉計を用いた新発想の手法により、従来にない全く新しい軽量ダークマター検出法の開発を目指した。

リング共振器を用いたアクシオン検出という野心的な目標に対し、試行錯誤を繰り返しながら着実に研究を進め、研究開始時に比べて大きな進歩を遂げていることは評価できる。また、当初想定していなかった S 偏光、P 偏光の異方性の除去を新たな異なる波長を用いることで、問題解決を進めている点も評価できる。当初目標に比べてノイズレベルがいまだ 5 桁及んでいないとはいえ、長期的な視野に基づいて技術課題をひとつずつ克服しており、分野における技術的貢献とその波及効果は十分あると評価できる。

アクシオンの存在は理論的に予測されているが、実験で確認されておらず、最近、アクシオンに関する研究は各国で競争状態にある。引き続き研究を進め、是非、当初の目標であるアクシオンの初観測につなげて欲しい。アクシオンの検出に繋がれば科学技術上の大きなブレークスルーとなり、波及効果は計り知れない。