

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
研究領域事後評価用資料

研究領域「先端光源を駆使した光科学・
光技術の融合展開」

研究総括：伊藤 正

2016年2月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	4
(3) 研究総括	4
(4) 採択課題・研究費.....	5
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	6
3. 研究総括のねらい.....	7
4. 研究課題の選考について.....	7
5. 領域アドバイザーについて.....	9
6. 研究領域の運営について.....	10
7. 研究を実施した結果と所見.....	13
8. 総合所見	20

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

① 戦略目標名

「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」

② 本戦略目標の具体的な内容

光科学技術は、情報通信、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の戦略重点科学技術分野における研究開発を先導し、ブレークスルーをもたらす基盤的研究分野である。

従来から多くの研究者が個々に光を使った研究を実施してきているが、光源・計測法等の性能を熟知した研究・開発者とレーザーなどの光源を利用した広範囲の研究者とが密接に連携してオリジナルな研究を推進する体制が不十分であったため、最先端科学を先導する研究になっていない。

本戦略目標では、次の(i)(ii)の条件を満たす研究開発に取り組むことにより、戦略重点分野における先端科学を先導し、光のエネルギーによって原子の結合状態を変化させることによる新規物質の創成や有害副産物の無害化、被曝することなく鮮明な透視画像で異物や腫瘍が発見できる技術等の開発による非侵襲医療の実現などのイノベーションへと繋げることを目指す。

(i) 既存の光源等を独自に改良する、新しい利用法を考案するなどして、今ある最先端の光源等を徹底的に使い尽くす研究であること

(ii) 全く新しい発想による研究にチャレンジすることにより、各重点分野における光の利用研究で世界トップの成果を目指すものであること

③ 政策上の位置付け

第3期科学技術基本計画には「新たな知の創造のために、既存の分野区分を越え課題解決に必要な研究者の知恵が自在に結集される研究開発を促進するなど、異分野間の知的な触発や融合を促す環境を整える必要がある。」との記述があるが、光科学技術は、まさに、情報通信、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス等の各分野と光学、量子力学、電磁気学等の基礎科学とが領域を越えて融合することにより、新たなイノベーション創出に繋がる分野である。

また、本戦略目標に関連して、分野別戦略のナノテクノロジー・材料分野の基盤技術として「量子ビーム高度利用計測・加工・創製技術」が挙げられているとともに、情報通信分野の重要な研究開発課題として「融合技術課題(テラヘルツデバイス、医療IT、ITS技術の高度化)」や「将来デバイス(先端光デバイス、ポストシリコン、MEMS応用、磁束量子回路など)」等の光関連技術課題が列挙されている。この他にも、分野別戦略に列挙されてい

るバイオイメージング、分子イメージング等の重要研究開発課題の実施にとって、光科学技術は不可欠な基盤的技術である。

④当該研究分野における研究振興方策の中での本研究事業の位置づけ、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

一部の光科学技術については、これまで科学研究費補助金や運営費交付金等により理論的・萌芽的研究が実施されてきた。また、戦略的創造研究推進事業においても、2005年度から、戦略目標「光の究極的及び局所的制御とその応用」の下で、「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」(CREST)及び「光の創成・操作と展開」(さきがけ)、「物質と光作用」(さきがけ)といった光科学技術の研究領域を設けて、研究開発に取り組んできている。

しかしながら、科学研究費補助金等による研究では、各研究者の個人的発想や興味に基づいて、個々バラバラに光科学研究が従来の光源を用いて行われている。

また、2005年度からスタートしているCRESTでは、新物質材料や新機能デバイスの開発を中心とした新機能・新素材の創成等が研究領域の主眼として設定されており、必ずしも、最先端の光源や計測法等を使い尽くした光の基盤的研究が実施されているわけではない。さきがけでは、光と物質の相互作用など光の本質に関わるような基礎的研究課題が選定され、先導的な研究が一部なされているが理論的研究が主体であり、応用への展開に必要な光源・計測法等の開発者との連携・融合研究が実施されているわけではない。

本事業では、光源開発者、光の基盤的研究者、ユーザー研究者等において、これまで必ずしも十分ではなかった連携・融合への取組を飛躍的に改善する。これまでとは異なり、最先端の光の発生原理や性能、計測手法等に精通した光源開発者等の支援の下で、最先端の光源等の性能・性質を十分に使い尽くした光の基盤的研究及び利用研究を実施するものであるため、各重点分野で世界最先端の研究成果や画期的イノベーションの創出に繋がることが期待される。

⑤この目標の下、将来実現しうる成果等のイメージ、他の戦略重点科学技術等に比して優先して実施しなければならない理由、緊急性、専門家や産業界のニーズ

本戦略目標の下、ユーザー研究者が光源開発者等と協力して光の利用研究を行うことにより、これまで必ずしも十分ではなかった光科学技術分野のシーズと他分野のニーズとの有機的連携・融合が進展し、次のような画期的なアウトカムが期待できる。

- ・単に、光を利用した各研究分野において質の高い論文が得られるだけでなく、全く新しい概念の構築など画期的な科学的知見が得られること
- ・新しい光を用いることで、従来不可能だったことが可能になること、あるいは、各分野における重要な技術的課題について解決・克服できるようになること
- ・産業界等が関心をもって、最先端の光を利用した共同研究や受託研究等を始めるようになることで、産業技術への展開が見込まれること

研究例毎に、具体的に将来実現しうる代表的な成果のイメージを列挙する。

(i) 極短パルス光による原子・分子の量子制御に関する研究

光パルスの振幅や位相情報を制御することによって生じる選択的な化学反応への適用、ボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)現象に基づく超伝導メカニズムの解明と高温超伝導物質の設計、光格子時計の周波数標準器としての活用等

(ii) 極短パルス光の照射エネルギーを利用した研究

極短パルス光の照射エネルギーを利用した新しい物質や状態の創成、極短パルス光の照射によるプラズマから発生させたX線や陽子線等の量子ビームを用いた超高感度・時間分解型の分析装置等

(iii) 未踏波長領域光を用いた高コントラスト・高感度のイメージング法などに関する研究

水の窓領域のコヒーレント軟X線を用いた生体細胞内部の連続観察、テラヘルツ領域での波面補償光学系を用いた高精細イメージング及び光CT法の実現等

⑥本研究事業実施期間中に達成を目指す研究対象の科学的裏付け

研究例毎に関連研究の進捗をまとめると以下のとおり。

(i) 極短パルス光による原子・分子の量子制御に関する研究

着目した化学反応に必要な、電子の遷移状態を選択的に変化させるためのパルスの波形整形法や液体中・表面等における化学反応の動的過程の計測に関する基礎的研究、希薄なガスをを用いた BEC の制御、15 桁の周波数精度を持つ次元の光子時計の研究等が行われている。

(ii) 極短パルス光の照射エネルギーを利用した研究

極短パルス光の照射による表面プラズモンを用いたメタマテリアルやプラズモニックデバイスの研究、物質の内部・表面の組成改質の研究、極短パルス光による電子の加速や量子線の発生等の研究が行われている。

(iii) 未踏波長領域光を用いたイメージングに関する研究

数 10nm までの離散的な波長のコヒーレント X 線が発生されている。また、0.1~40THz の波長領域の光が発生可能であり、このテラヘルツ光の波長選択性を利用した研究等が行われている。

⑦この目標の下での研究実施にあたり、特に研究開発目標を達成するための留意点

本戦略目標では、最先端の光源等を使い尽くした各戦略重点科学技術分野の利用研究を実施するものであるが、この利用研究で得られる成果を更に発展させるためには、これまでにない全く新しい光源や計測法等を実現するための研究拠点型プロジェクトを文部科学省で並行して実施する。

このような 2 つの異なる研究プロジェクトを相互補完しあいながら効果的に運営していくためには、以下の研究運営体制を構築する必要がある。

(i) 本プロジェクト(利用研究)の研究総括は、光源等開発プロジェクトと連携し研究管理運営を行うこと

(ii) 単に論文数や特許出願等の既存の定量的評価項目のみによる評価ではなく、他分野への波及効果、社会・経済へのインパクト等にも重点をおいた評価とすること

(参考) 本研究事業実施期間中に達成を目指す政策的な目標

本事業では、各戦略重点科学技術分野において光を利用している研究者(ユーザー研究者)が、最先端の光源等を他に類のない方法で活用して、全く新しい研究の方向性や新領域の開拓にチャレンジすることを目標とする。このため、ユーザー研究者は、最先端の光の発生原理や性能、計測法等に精通した光源開発者等の支援を得ながら、特色ある光を使い尽くした研究を推進する。

<研究例>

(i) 極短パルス光による原子・分子の量子制御に関する研究

(ii) 極短パルス光の照射エネルギーを利用した研究

(iii) 未踏波長領域光を用いた高コントラスト・高感度のイメージング法などに関する研究

これにより、最先端レーザー等を用いて、他に類のない日本独自の研究成果や画期的イノベーションの創出を目指す。また、本事業の実施により、最先端の光の特性等に精通したユーザー研究者群を開拓・養成する。

(2) 研究領域

「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」(2008年度発足)

本研究領域は、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異なる分野で個別に行われている光利用研究開発ポテンシャルの連携、融合を加速し、「物質と光の係わり」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す。

具体的には、高度な性能をもつ最先端レーザーに代表される各種の先端光源をブラックボックス化することなく、光源の特徴を徹底的に駆使した特色ある「物質と光の係わり」に関する研究を推進する。

光利用科学技術のブレークスルーを生み出す先導研究や、ライフサイエンス、環境・エネルギーなどの幅広い分野における目的基礎研究を対象としますが、事象の解析や原理の解明だけに終わることなく、実用化も念頭においた、波及効果の大きい技術シーズ創出に資する研究を対象とする。光源開発そのものは対象としないが、研究の過程で要求される光源に対する的確で高度なニーズを光源開発にフィードバックし、光利用科学技術をより実効的に発展させる研究も含む。

(3) 研究総括

伊藤 正 (大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター 特任教授)

(4) 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	研究終了時の所属・役職	研究課題	研究費*
2008年度	岩井 伸一郎	東北大学 教授	先端超短パルス光源による光誘起相転移現象の素過程の解明	268
	佐藤 俊一	東北大学 教授	ベクトルビームの光科学とナノイメージング	288
	辛 埴	東京大学 教授	高繰り返しコヒーレント軟X線光源の開発と光電子科学への新しい応用	481
	鈴木 俊法	京都大学 教授	真空紫外・深紫外フィラメンテーション極短パルス光源による超高速光電子分光	259
	高橋 義朗	京都大学 教授	超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発	433
	本田 文江	法政大学 教授	光ピンセットによる核内ウイルス RNP 輸送と染色体操作～ウイルスゲノム除去への挑戦～	249
2009年度	今村 健志	愛媛大学 教授	新規超短パルスレーザーを駆使した <i>in vivo</i> 光イメージング・光操作のがん研究・がん医療への応用	548
	川田 善正	静岡大学 教授	電子線励起微小光源による光ナノイメージング	235
	腰原 伸也	東京工業大学 教授	光技術が先導する臨界的非平衡物質開拓	402
	竹内 繁樹	京都大学 教授	モノサイクル量子もつれ光の実現と量子非線形光学の創成	287
	田中 耕一郎	京都大学 教授	高強度テラヘルツ光による究極的分光技術開拓と物性物理学への展開	412
細貝 知直	大阪大学 准教授	光制御極短シングル電子パルスによる原子スケール動的イメージング	256	
2010年度	大森 賢治	自然科学研究機構 教授	アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御	236
	尾松 孝茂	千葉大学 教授	トポロジカル光波の全角運動量による新規ナノ構造・物性の創出	244
	小林 孝嘉	電気通信大学 特任教授	高性能レーザーによる細胞光イメージング・光制御と光損傷機構の解明	511
	山内 和人	大阪大学 教授	コヒーレントX線による走査透過X線顕微鏡システムの構築と分析科学への応用	236
			総研究費	5345

*) 各研究課題とも5年間の見込み総額

当初の重点配分は、毎年度の採択に際して、申請額と共に、大型設備の整備が必要な課題や実用化に向けての試作等が見込まれる課題を少数に絞って取り上げた。年度進行に伴い、研究成果が著しく予想以上の進展が望める場合、研究遂行上当初予想を上回る人材投入が必要と判断される場合、海外との共同研究や国際シンポジウム開催が研究の発展・国際交流・情報交換および評価に寄与すると判断される場合、東日本大震災を含む予期しない研究機材の故障・修理・更新が必要と判断された場合などに、総括裁量経費や年度ごとの追加配分を充て、研究の加速を図った。特に、高橋、小林、山内チームなどの海外との共同研究、および川田、細貝、腰原チームなどの国際ワークショップ開催のための国際強化支援、評価会を経て辛、田中、今村チームに企業等との連携につなげる加速としての予算追加、さらに、今村チームには佐藤チームの開発した新規小型レーザーの導入による研究の1年延長のための追加配分などを行った。

2. 研究領域および研究総括の選定について

(1) 本研究領域の選定について

本研究領域は、光を利用している情報通信、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、環境・エネルギー等の戦略重点科学技術分野の研究者が、最先端レーザー等の発生原理・性能・計測法に精通した光源開発者の支援を得ながら、特色ある光を徹底利用した研究を推進することにより先端科学技術を加速的に牽引し、「物質と光の係わり」に関する画期的なイノベーションを生み出すことを目標に推進されるものである。

本研究領域では、最先端レーザー等を異なる戦略重点科学技術分野で利用する研究者同士が連携することや光源を知り尽くした開発者の支援を得ることによって、「物質と光の係わり」に関して、個別分野における一過性の成果獲得に留まらず、未踏の先端科学技術を先導し、異分野へも波及し得るような、光科学・光技術のイノベーション基盤創出に資する研究を対象としている。これは最先端レーザー等の利用研究者が光源に関して高度な技能や知見を有する協力者を得て推進することが必要であり、CRESTとして選定することが適切である。

この研究領域は戦略重点科学技術分野における光科学技術利用研究を主体的に推進するプロジェクトであるが、文部科学省による光源・計測法等の研究開発等を実施する研究拠点公募型プロジェクトと連携することにより、先端科学技術全体に貢献する基盤を形成することも十分に意識されており、戦略目標の達成に向けて適切に選定されている。また広範な分野を対象としつつも光科学技術の利用展開による新潮流創成型の研究を条件としていることから、斬新で優れた研究提案が多数見込まれる。

(2) 研究総括の選定について (JST 記載)

伊藤正は、超微粒子・薄膜の光物性、光機能性材料、近接場分光等の光と物質の相互作用

用に関わる基礎研究から新しい光機能物質を開発する応用研究まで幅広い研究を着実に展開しており、関連分野の研究者から信頼されており、本研究領域を推進するのに必要な知見・先見性・洞察力を十分に有していると思われる。

また、最先端の光科学技術に関する ERATO 等の評価委員や日本学術振興会の審査委員として、極めて適切な評価と公平な選考を行っており、さらには長年にわたり大阪大学大学院基礎工学研究科副研究科長、ナノサイエンス・ナノテクノロジー研究推進機構企画推進室室長を務めていることから特定の分野に偏らない視野を有していると思われる、広範な各分野の専門家である領域アドバイザーの支援を適切に得ながら、それらを総合して統率し、マネジメントを柔軟に行う能力を有していると思われる。

なお、本研究領域の研究総括は通常の研究領域運営に加え、文部科学省による光源・計測法等の研究開発等を実施する研究拠点公募型プロジェクトのプログラムディレクター・プログラムオフィサー・採択拠点チーム研究者等と密接に連携を取りながら、必要な支援を要請することや光源の仕様についての要望を提示し協働することにより、利用研究と光源開発の加速・展開をもたらす役割を担うことも求められている。同氏はこれまでも独自に光源を改良して、その利用を図る研究を展開してきたことや、基礎的な理論・実験研究と応用技術開発の連携を着実に敷衍してきたことから、本研究領域を推進するに際して、すぐれた調整能力を発揮すると見られる。

3. 研究総括のねらい

本研究領域では、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異なる分野で個別に行われている光利用研究開発ポテンシャルの連携、融合を加速し、「物質と光の係わり」に関する光科学・光技術の利用と開発研究を主体的に推進することで、実用化や波及効果の大きな技術シーズを生み出すと共に、光源開発にもフィードバックをかける役割を担う。そのため、高度な性能をもつ最先端レーザーに代表される各種の先端光源をブラックボックス化することなく、光源の特徴を徹底的に駆使した特色ある「物質と光の係わり」に関する研究を推進する。光技術のニーズが明確であれば、未踏波長の開拓や位相・出力・パルス幅等を精密に制御する技術開発が含まれた研究も対象とする。また、医療・環境など人類にとって差し迫った難題解決に最先端レーザー科学・技術を導入駆使することでブレークスルーを生み出す利用研究も対象とするものである。

光利用科学技術のブレークスルーを生み出す光源、光学装置、分光技術、光新機能材料に関する先導的研究に留まらず、ライフサイエンス、環境・エネルギーなどの幅広い分野における「物質と光との係わり」を基礎とする光科学・光技術におけるイノベーション創出基盤の形成を目指す。

4. 研究課題の選考について

2008 年度は、63 件の応募があった。「物質と光の係わり」に関する光科学・技術の幅広

い適用を反映して、その内容は、ハイパワーレーザー利用、光波制御(波形整形応用)、医学・生命科学応用、放射光複合利用、量子情報、光物性、光化学、新奇光源技術など極めて多岐に亘った。選考においては、研究総括、領域アドバイザー10名で、「物質と光の係わり」に関する光科学・光技術の利用と開発研究を主体的に推進する本研究領域の趣旨に沿っているか、国際レベルをリードする研究であるか、当該テーマでオリジナリティを発揮しているか、5年間で明確な進歩目標が提示されているか、研究実施体制は真に有機的に連携・統括されているか、異分野にも波及するものか、息の長い技術シーズを生み出すものか、産業的、社会的ニーズにどのように繋がるか、といった様々な観点で評価を行った。書面審査により12件の提案を選択し、面接審査により以下の6件の提案を採択した。面接選考にあたっては、研究提案者の提案内容と関係が深いテーマでの他の研究費の取得状況や内容の棲み分け等を勘案して質疑応答を行った。選考過程においては、新たに医用工学専門家1名に査読を依頼し、書類選考後半で全アドバイザーによる再査読を実施したことから幅広い分野に亘って評価を共有し議論を深めることができた。

その結果、超短パルス光源による光誘起相転移現象の解明、ベクトルビームによるナノイメージング、コヒーレント軟X線光源の開発と光電子科学への応用、極端紫外域光源を利用した化学反応の電子状態イメージング、超狭線幅光源による光量子制御、光ピンセットによる生体細胞内操作を各々目指す提案を採択した。いずれも光源の究極的利用、「物質と光の係わり」に新局面を開くもの、光技術応用として極めて挑戦的なものである。予算規模は種別Ⅰが4件、種別Ⅱが2件である。

2009年度は、60件の応募があった。「物質と光の係わり」に関する光科学・技術の幅広い適用を反映して、その内容は、ハイパワーレーザー利用、光波制御(波形整形応用)、医学・生命科学応用、放射光複合利用、量子情報、光物性、光化学、新奇光源技術など極めて多岐に亘った。選考においては、研究総括、領域アドバイザー11名で、「物質と光の係わり」に関する光科学・光技術の利用と開発研究を主体的に推進する本研究領域の趣旨に沿って、前年度と同様の評価基準と共に、極めて優れたものを除き前年度採択課題とは異なるジャンルを優先することを含む様々な観点で評価を行った。書面審査により18件の提案を選択し、面接選考により以下の6件の提案を採択した。面接選考にあたっては、研究提案者の提案内容と関係が深いテーマでの他の研究費の取得状況や内容の棲み分け等を勘案して質疑応答を行った。

その結果、新規超短パルスレーザーを駆使した *in vivo* 光イメージング、電子線励起微小光源による光ナノイメージング、モノサイクル量子もつれ光の実現、高強度テラヘルツ光による分光技術開拓、原子スケール動的イメージングを各々目指す提案を採択した。いずれも光源の究極的利用、「物質と光の係わり」に新局面を開くもの、光技術応用として極めて挑戦的なものである。予算規模は種別Ⅰが3件、種別Ⅱが3件である。

2010年度は、53件の応募があった。「物質と光の係わり」に関する光科学・技術の幅広い適用を反映して、その内容は、光波制御、医学・生命科学応用、放射光複合利用、量子

情報、光物性、光化学、光加工、光計測、新規光源開発など極めて多岐に亘った。選考においては、研究総括、領域アドバイザー11名で、「物質と光の係わり」に関する光科学・光技術の利用と開発研究を主体的に推進する本研究領域の趣旨に沿って、昨年度と同様の評価基準を含む様々な観点で評価を行った。書類選考により12件の提案を選択し、面接選考により以下の4件の提案を採択した。面接選考にあたっては、研究提案者の提案内容と関係が深いテーマでの他の研究費の取得状況や内容の棲み分け等を勘案して質疑応答を行った。

その結果、アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御、トポロジカル光波の全角運動量による新規ナノ構造・物性の創出、高性能レーザーによる細胞光イメージング・光制御と光損傷機構の解明、コヒーレントX線による走査透過X線顕微鏡システムの構築と分析科学への応用を各々目指す提案を採択した。いずれも光源の究極的利用、「物質と光の係わり」に新局面を開くもの、光技術応用として極めて挑戦的なものである。予算規模は種別Ⅰが3件、種別Ⅱが1件である。

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	終了時の所属	役職	任期
潮田 資勝 *1	物質・材料研究機構	前理事長	2008年5月～2016年3月
江馬 一弘	上智大学	教授	2008年5月～2016年3月
太田 俊明	立命館大学	客員教授	2008年5月～2016年3月
岡田 龍雄	九州大学	教授	2008年5月～2016年3月
菊地 眞 *2	(公財)医療機器センター	理事長	2009年4月～2016年3月
小舘 香椎子	日本女子大学	名誉教授	2008年5月～2016年3月
笹木 敬司	北海道大学	教授	2008年5月～2016年3月
菅原 充	株式会社 QD レーザ	代表取締役社長	2008年5月～2016年3月
瀬川 勇三郎	理化学研究所	客員主管研究員	2008年5月～2016年3月
橋本 秀樹 *3	関西学院大学	教授	2008年5月～2016年3月
山内 薫	東京大学	教授	2008年5月～2016年3月
山西 正道	浜松ホトニクス(株)	顧問	2008年5月～2009年4月
高松 哲郎	京都府立医科大学	特任教授	2014年4月～2016年3月

*1 2015年12月31日まで物質・材料研究機構 理事長

*2 2012年3月31日まで防衛医科大学校 副校長・教授

*3 2015年3月31日まで大阪市立大学 教授

人選に当たっては、光科学技術の特化した領域に深い見識を持ち、さらに幅広い光科学技術領域に理解と見識があり、公平な判断が可能な立場にある選考時点で現役の学界の有

識者を集めた。企業関係者からも参加を求めると共に、医学応用における専門知識を有するアドバイザーを1年目の審査段階から追加した。

また、中間評価でのご指摘(融合研究を強力に推進する観点からは、先端光源を徹底的に使い尽くす研究に関して実績のあるユーザー側のアドバイザーがもう少し多く参画するのが望ましい。2014年4月から、京都府立医科大学の高松先生にご参加頂き、イメージングと医学応用の観点からご意見を頂いた。

6. 研究領域の運営について

(1) 研究領域の運営方針について

各研究代表者に対しては、各研究課題の遂行は科学研究費の新学術領域研究のような研究グループ間の有機的な連携の下に領域の学術水準の向上を図るものとは異なることを述べ、CRESTの趣旨は研究代表者が自ら企画立案した特化した研究課題を遂行し世界的な成果を上げるために研究チームを組織し、必要に応じてチーム内に複数の研究グループを設けるものであり、自らリーダーシップを持って研究全体を統括し成果を自らに集約する研究スタイルを踏むものであることを念頭に研究組織を立ち上げ、各研究課題を運営することを求めている。

さらに、基礎的研究にあっても事象の解析や原理の解明に留まることなく、必要に応じて実用化も念頭に置いた波及効果の大きい技術シーズに資する研究を目指すことも求めた。その程度は研究課題によって大きな差があることから、国際的競争の中で研究発表と知財出願のバランスを考えながら、実用化フェーズに近いものは積極的に企業とのコラボも推奨した。例えば、高橋チーム：低損失誘電体多層膜鏡の開発(日本航空電子工業株式会社)、今村チーム：新規2光子励起顕微鏡の開発(株式会社ニコン)、田中チーム：リアルタイムテラヘルツ近接場顕微鏡の開拓と応用(オリンパス株式会社)などである。

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」を一にするJSTのさきがけ「光の利用と物質材料・生命機能」(増原宏研究総括)と平行して推進されており、文部科学省の「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」も同時期に発足していることから、毎年研究拠点シンポジウムに参加し、研究課題報告とポスターセッションへの合同参加などを通じて積極的に連携し、情報交換を通じて双方の研究の発展を図った。また、さきがけ「光の利用と物質材料・生命機能」(増原宏研究総括)とは、2013、2014年度の2回に亘りCREST・さきがけ光科学光技術合同シンポジウム「進化する光イメージング技術～百聞はイメージングに如かずI、およびII～」を公開で開催(参加者延べ210名)し、一般の方々を含めて本CRESTの意義や成果の一部をわかりやすく説明した。

(2) バーチャルラボとしての研究領域のマネジメントについて

毎年の研究課題採択後に、領域運営アドバイザー(最初の3年間は領域参事)藤田順彦、JST 領域担当とともに、各チーム研究代表者の研究室のサイトビジットを行い、研究体制・研究環境を確認するとともに、複数の研究グループから構成されている場合は、各グループの代表にも CREST の趣旨を理解していただくよう説明に努めた。以降は、研究総括と領域担当、領域運営アドバイザーが分担しながら、研究課題班会議などの折りに出席し、少なくとも隔年、多くは毎年サイトビジット(合計85回)を行って、研究代表および各グループ内の研究者からの研究進捗状況の報告や研究遂行上の問題点について意見交換を行った。

また、研究領域中間評価でのコメントに基づき、2013年度よりライフサイエンス分野に精通し、レーザーを駆使した研究に実績のある京都府立医科大学の高松哲郎教授を領域アドバイザーに迎え、ライフサイエンスと光科学・技術の融合分野を目指す今村・川田・小林・山内の各チームへの適切な評価とアドバイスと共に、ライフサイエンスを研究手法の応用分野に含む竹内・田中・佐藤チームへのアドバイスを含めて、この分野の研究のより緻密な助言と積極的な発展を図った。

年1回の1~2日間に亘る領域の研究状況報告会では、研究終了したチームも毎回含めて16の各研究課題チーム内のグループメンバーを含む100名余りが一堂に会し、若手にも発表のチャンスを持てるポスターセッションを併用し、かつ守秘義務を課して、研究課題の異なるチーム間での未公開の研究成果を含む活発な討論を行い、多彩な分野に跨がる光科学・光技術の研究者間の情報交流を持続的に深める努力を行った(最終回のみ全体の成果が見える形で一般公開)。このことを通じて、佐藤チームの開発した小型半導体レーザー光源を今村チームのがん研究に応用する共同研究に発展し、その結果今村チームの2光子顕微鏡のベッドサイド利用への可能性を目指す研究として1年延長が実現した。また、腰原チームと辛チームとのコラボを含めて課題チーム間を横断したメンバーとの共同研究への発展が期待される例も見られる。

また、JST の支援により1つの研究課題チームが国際シンポジウムを主催する場合には、関連のある他の研究課題チームにも参加を求めるなど課題間の交流、国際的評価を得る機会にも努めた。

なお、研究環境の整備に関しては、実験装置を設置する部屋の環境確保や改修工事に伴う実験室の移転、研究代表者の所属機関変更に伴う機器の移動など、CREST の研究遂行上支障が懸念される事象については、研究経費の考慮や研究総括から当該研究機関関係者への直接の説明や支援方依頼なども必要に応じて行った。また、東日本大震災に伴う研究上の支障については、現地視察や事情聴取を行うなどにより、復旧に対する支援を速やかに行うよう努めた。東北大学を本拠地とするチームが2つあるが、関係者の努力により幸いにして重大な研究の遅延には至らなかった。

もう1つ若手人材の雇用に関しては、研究の加速的進展のためには不可欠だが、一方、人材育成と課題終了後の再就職の観点から、適当な陣容に留める必要を感じており、研究

計画終了後も若手が引き続き活躍できる実績と環境作りが望まれるが、幸いにして指導に至った例はなく、本研究領域の若手からは、さきがけ研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」に1名、「光の極限制御・積極利用と新分野開拓」に2名の参画が実現している。

(3) 研究課題の指導について

課題採択時の審査結果によっては研究開始時にマイナーな研究方針の変更を求めた例(辛チーム：空間分解能の計画一部変更、竹内チーム：サブモノサイクルもつれ光からの出発、小林チーム：一部メンバーの貢献度の調節、など)もあったが、基本的には優れた能力のある研究者集団であるから、各研究課題の研究代表者の提案時の研究方針にて研究を開始していただいた。その後、サイトビジットおよび毎年の領域研究状況報告会および中間評価会においては、研究総括、領域アドバイザーより主に研究方針、研究成果について状況を聴取し、それに対するアドバイスを行ってきた。辛チーム、今村チーム、田中チーム、今村チーム、尾松チームなどでチーム内グループの新たな結成を行った例もある。それに基づき、研究が順調に進んだ課題については、研究の拡大のための追加予算などの支援を行った。一方、研究進捗がやや遅れていたり、研究項目がやや発散気味と思われる課題、課題内の研究グループ間の連携が十分でないと思われる課題については、サイトビジットに於いてその原因となる研究方針の整理や先鋭化、共同研究や共著論文の推進を要請する等の指導・支援を比較的きめ細かく行った。研究課題の中には、鈴木チームのように研究手法の開拓以外に当初主要目標にはなかった液体の光電子分光の成功により、この研究が極めて重要な喫緊の課題であるとの判断からアドバイザーの了解の下に CREST の中心課題に据える修正を行ったり、今村チームのように佐藤チームで開発された小型半導体レーザーを導入するために研究期間の1年延長を認めたことにより市販レーザーを凌駕する成果が得られたり、竹内チームにはサブモノサイクルもつれ光による研究を優先させるよう求めた事により世界最高広帯域のもつれ光発生に成功したこと、尾松チームにはトポロジカル光波を持つレーザーを金属に照射することで生じる針状構造体の発生メカニズム解明を課題に加える事を求めたことにより光の角運動量が物質の角運動量に転写される様子が実験的にも理論的にも明らかになるなど、当初計画を上回る成果を導いた。

(4) 研究費の配分について

1の(4)「採択課題・研究費」の項でも記載したが、年度進行に伴い、研究成果が著しく予想以上の進展が望める場合、研究遂行上当初予想を上回る人材投入が必要と判断される場合、海外との共同研究や国際シンポジウム開催が研究の発展・国際交流・情報交換および評価に寄与すると判断される場合、東日本大震災を含む予期しない研究機材の故障・修理・更新が必要と判断される場合などに、総括裁量経費や年度毎の追加配分を充て、研究の加速を図った。特に、今村チームのように追加予算に恵まれたことから適切な時期に顕

微鏡用のレーザーを追加導入した成果が民間企業からも注目された例、さらに同じく今村チームへの総括裁量経費の投入による1年研究延長により佐藤チームが新規開発した小型半導体レーザーを用いた実用化に耐えるイメージング性能の確認が行えた例、東日本大震災復旧のための追加予算による早期の復旧が行えた例などがあり、メリハリのある支援が行えたことに感謝している。国際強化支援の積極的利用による国際シンポジウム開催、国際共同研究支援も多くの研究の進捗や国際展開に役立った。

7. 研究を実施した結果と所見

(1) 研究総括の狙いに対する研究の進捗状況

光源・分光系の装置開発、基礎光物性、応用光工学、生物・医学応用に跨がり、光源の特徴を徹底的に駆使して「光と物質の係わり」に関する新しい光科学・光技術の開拓と推進を行うという研究総括の狙いに違わず、各研究課題チームでは光源・分光法の限界や未開拓領域に挑み、光と物質の様々な係わりを通じて原子・分子から結晶、生物材料の物性や光誘起による物性の変化、各種イメージング、それらを通じて、光加工や医学・薬学応用に至るまでの幅広い分野の研究の展開がなされ、計画に沿って順調に発展したと考える。東日本大震災による研究の一時的中断を余儀なくされたチームやグループもいくつかあったが、幸い各人の努力と JST の時期を得たサポートによる早期の復帰により計画全体への影響は大きくなかったと判断される。得られた成果の国際誌への掲載は約 800 報を数え、16 件が国内外の機関からの受賞の対象になっている。基礎科学よりの研究領域ではあるが、波及効果が望めるものについては、領域運営アドバイザーの助言などにより、特許出願 56 件(うち国外出願 8 件)を数えている。

各チームの中間評価結果において、いくつかの課題では工程表に遅れや、CREST で最も重要なチーム内のグループの個々の成果の課題全体に対する位置付けや集約が見え難いものなどもあったが、複数回のサイトビジットを通じて焦点を絞ることやチーム内の統一した研究方向付けへの見直しなどの助言を行った結果、事後評価における各研究チームの成果は概ね高く評価されており、いくつかの課題では予想以上の進展が認められた。

(2) 領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果の見通し

光科学技術の中で、光源の特徴を徹底的に駆使する「光と物質の係わり」に関する研究に絞った本研究領域でもカバーする分野は多岐に亘る。大まかな分類をすると、①光源の限界を駆使した物性探索(岩井チーム、辛チーム、鈴木チーム、腰原チーム、田中チーム)、②光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能(佐藤チーム、細貝チーム、尾松チーム、山内チーム)、③最先端光量子を駆使した原子・分子・集合系の量子制御(高橋チーム、竹内チーム、大森チーム)、④イメージングや光操作によるバイオ・医学応用(本田チーム、佐藤チーム、今村チーム、川田チーム、小林チーム)となる。アプローチの仕方、研究手法、得

られる成果は多岐に亘るが、これらチームの個々の成果に留まらず、佐藤チームのようにまったく交流のなかった分野間に跨がる課題への波及効果の大きな研究テーマも多いため、CREST「光展開」として幅広い分野から100名を超える優秀な光科学技術の研究者が1つに纏まり、領域全体に亘る課題についてさまざまな観点から議論できるバーチャルラボを形成した意義は極めて大きかったと考えている。

以下に、16課題のそれぞれについて進捗結果と特筆すべき成果、今後への期待を纏める。

①岩井チーム

赤外領域の極超短時間数サイクルパルスを予定よりも早く実現し、これを用いたポンププローブ法で有機強相関電子系の光誘起絶縁体-金属相転移を調べた結果、光励起直後の10-50fs以内に、多体電子コヒーレント振動や、分子内の原子振動との相互作用を始める様子などを世界で初めて捉えることに成功した。さらに、キャリアエンベロープ位相制御(CEP)安定化パルス光の導入を図った結果、これを用いた位相緩和の観測への発展に成功した。著名な雑誌に多くの論文発表を行った。当初目標の「強相関電子系における非平衡ダイナミクスの研究を新たなフェーズへと移行させる」ことにつながり、光誘起相転移分野に大きな貢献を与え、光材料・光産業の分野に広く波及する成果に繋がるものと期待される。(日本物理学会論文賞受賞)

②佐藤チーム

ベクトルビームの理論的解析に基づき、共振器ミラーの加工と共振器の調整によりレーザーから直接に高次ベクトルビームを自在に発生させることで世界をリードし、特殊な偏光変換器を既存の顕微鏡に取り付け容易にベクトルビームを発生させ、光トラップ力の測定や共焦点二光子顕微鏡に応用し空間分解能を3割向上させることにも成功した。また、利得スイッチング方式の新規ピコ秒小型半導体レーザー光源とファイバーアンプを組み合わせ、パルス幅10ps以下、出力5Wの超安定光源を開発し、二光子顕微鏡と組み合わせ、マウス脳の深部の海馬CA1ニューロンを世界で初めて深さ1.6mmまで*in vivo*観察する成果を上げ、バイオイメージングとして脳科学に大きなインパクトを与える成果が得られた。その成果は今村チームのがんイメージングの進化とベッドサイド実用化研究にも大きく貢献している。ベクトルビームの顕微鏡への利用、レーザー光源などの要素技術に関して知財出願に努力した。(文部科学大臣表彰)

③辛チーム

ファイバーレーザーとKBBF結晶の組み合わせによって固体結晶を用いた波長変換では世界最短の8eVの準CWピコ秒レーザー光の開発に成功したこと、光電子分光でエネルギー分解能70μeV、試料温度1.5Kの極低温での実験を実現したこと、この手法を鉄系超伝導系に応用し、電子軌道由来の新しい超伝導機構を見出したこと、など、光電子分光研究の方

法論的にも応用面でも非常にインパクトのある成果である。さらに、研究総括の判断で研究テーマの分散を防ぐ目的で当初計画の重点項目から外した高空間分解能についても、当初目標を超える空間分解能 2nm に迫る性能を持つレーザー光電子顕微鏡を開発し、高エネルギー分解能、超高速時間分解能、高空間分解能を各々備えた光電子分光計測システムとしては世界トップの地位に達した。質の高い著名な雑誌にこれら性能を駆使した新規物性研究に関する多数の論文発表を行っており、新聞報道なども盛んに行った。

④鈴木チーム

深紫外・真空紫外領域の極短パルスを発生する新手法として希ガスフィラメンテーション四波混合を完成させ、光電子の速度角度分布を可視化する光電子イメージング法を用いてピラジンや二硫化炭素などの化学反応解析に適用した。その分子ダイナミクス研究成果は、雑誌の Breakthrough of the year に選ばれた。また、液体試料に対する磁気ボトル型 TOF を用いた高感度の超高速光電子分光の世界初の成功により水面下直近にある水和電子の安定化エネルギーや励起状態ダイナミクスに関して当初計画の想定以上の初の成果が得られた。同じ分子を気相と溶液相で測定できることも本研究成果の特徴である。なお、開発されたフィラメンテーション光源と液体の光電子分光とを組み合わせた装置開発が進行しており、今後の更なる成果を期待したい。(文部科学大臣表彰、日本化学会賞受賞)

⑤高橋チーム

極めて線幅の狭い超安定な光源を開発し、光格子点の磁気共鳴イメージング法の開発、フェルミとボース原子気体混合の新しい量子多体系の実現(被引用件数 112 件)、世界初のスピンスクイーミングの量子フィードバック技術の開発等において世界トップレベルの成果を挙げた。原子冷却の実験分野は、研究者人口が高く、競争が激しい分野であるが、初期の目標に見合った注目度の高い論文をインパクトファクターの高いジャーナルへ多数発表し、新聞報道も秀でている。多彩で開拓的なサブテーマの一つ一つは着実に進展し、連携体制により、最終的に、大規模量子多体系の量子シミュレーションなどの量子情報処理の基礎や光格子時計の精度などの量子計測などにも成功した。今後は社会的にも大きなインパクトを与える成果を期待したい。(Fellowship on the American Physical Society、宅間宏記念学術賞、仁科記念賞受賞)

⑥本田チーム

光トラッピング捕捉搬送による単一ウイルス感染システム、細胞・核内環境計測システム、ウイルス感染細胞変化計測、染色体 DNA 操作ツール等の開発を行い、開発した単一細胞の温度・pH 計測のプロブを用いて感染細胞における温度上昇および ATP 消費量の増大等の観測に成功した。また、マイクロ流体チップの光ピンセットによる核内の単一ウイルスを単一細胞まで輸送し、特異的に静止期に感染することなどを明らかにした。得られた

重要な成果について、光ピンセット法の優位性は示しながらも医学的な新規知見としての十分な検証が研究期間内に間に合わなかったことは惜しまれるが、本研究の成果は、インフルエンザウイルス以外の動物ウイルスの感染機構などの解析への利用など広い応用展開に繋がり、その波及効果も極めて大きいので、当初の意欲的な研究目標を見失わず、異分野融合の困難さを乗り越えて、今後も着実な成果に結びつく研究の発展を期待したい。

⑦今村チーム

新規 2 光子励起顕微鏡システムの開発、がん細胞の *in vivo* 光イメージングに挑戦し、レーザー光学、顕微鏡光学の研究者との緻密な連携により、医学応用のためにさまざまな最適化の努力を行った。がん細胞の深部イメージング、および、骨髄内のがん細胞イメージングにおいて、補償光学素子制御による波面補正を導入し、臨床応用レベルの 900 μm 深さでの観察、レーザー長波長化による 1mm より深い部位での観察、細胞周期を可視化できる各種 Fucci-がん細胞の作製と抗がん剤開発への応用など、民間企業との連携も活用し、医療・診断への応用展開の実現に繋がる多くの成果を得た。当初計画になかった北大根本グループの参加を得て骨髄中のがん細胞の可視化とともに脳神経の深部可視化などにも成功した。また、がん幹細胞に対して治療抵抗性に影響を与える細胞周期と骨髄ニッチに注目したアプローチを提案し、新たながん診断・治療法の開発に道を拓いた。さらに、1 年研究延長で佐藤チームの開発した半導体レーザーをベースとする小型光源を既存レーザー光源と比較し、同等またはそれを凌駕するイメージング性能を実証し、ベッドサイド装置への可能性を示した。このような成果の大半は、多くの医学系ジャーナルにも報告されており、医学系の国際シンポジウムにおいても高く評価されている。学内に創設されたイメージング研究センターにおいて複数の企業との共同研究も行われている。また、研究成果は科学研究費新学術領域「細胞機能と分子活性の多次元蛍光生体イメージング」(松田道行研究代表)に引き継がれており、今後はがん細胞の機能と環境を解析することで、がん転移の機構解明、さらに将来は病理検査にも大きく寄与することが期待される。

⑧川田チーム

走査型電子顕微鏡の電子ビームにより薄膜を介した微小光源励起システムを考案し、スパッター ZnO 膜のアニールにより実用に耐える高効率の電子光変換膜の開発に成功した。開発した光ナノイメージングシステムにより、回折限界を超えた 50nm の分解能、1 フレーム/秒で生きた細胞の動画イメージングに成功した。一方、当初計画になかった薄膜透過電子線の直接励起による自家発光ナノイメージングでは 30 フレーム/秒の動画撮影に成功し、電子線照射による損傷の問題はあるものの、新たな高分解能顕微鏡の可能性を示した。システムの最適化には民間企業も参画し、試作展示された。観察用の生物試料のマニピュレーション法の確立に関しては、SiN 基板に細胞を培養するための表面改質や培養手順の検討などを進め、多くの種類の細胞の培養を実現した。また、多くの論文発表を行っている。

本手法は、生きた細胞の実時間非染色観察を可能とするのみならず、液中のナノ粒子の動態観察、微結晶の成長機構解明など工業的応用も期待され、そのインパクトは極めて大きい。是非とも実用化に至ることを期待したい。

⑨腰原チーム

時間分解振動分光法、時間分解電子線回折法、ps-動的X線回折法、時間分解光電子顕微鏡などの異なる手法を用いて物質構造の相転移現象を観測することにより、特に光誘起相転移の際の過渡的非平衡物質相である「隠れた物質相」を構造学的に世界に先駆けて捉えた。一方、空間分解能 100nm、時間分解能 100fs の光電子顕微分光装置の開発により、相転移現象のみならず、半導体表面での光励起電子(正孔)の密度と位置の時間変化の実測を可能とし、電子デバイスの動作解析などの種々の共同研究が開始されている。また、超高速時間分解赤外分光装置、X線構造解析装置を用いて、発光過程における発光中心金属周辺の配位原子構造の動的変形を観測することから、光触媒と非平衡構相変化の関連が解明され、新化学構造設計への貢献が期待される。実験・理論・海外研究拠点との連携等の広範囲な共同研究にリーダーシップを発揮した。研究成果を世界的権威のある学術雑誌に極めて多数発表し、世界的認知により Humboldt 賞を受賞した。24 件のプレスリリースにも努力した。(文部科学大臣表彰)

⑩竹内チーム

チャープ度 10%を持つ擬似位相整合素子を用いて、新たな非同軸法で世界最大の超広帯域(320nm, 周波数換算 200 THz)でのモノサイクルに迫るもつれ光発生に成功した。電子ビーム加工ナノ電極を用いてモノサイクルもつれ光発生用のより高いチャープ度を持つ擬似位相整合素子や、パラメトリック光子対の数を増強できるスラブ導波路を用いた高効率素子の開発にも成功し、非線形材料としての設計自由度を広げた。もつれ光を用いた量子 OCT と古典 OCT の比較実験により、群速度分散補償能力や世界最高レベルの $0.54\mu\text{m}$ の光軸方向分解能を達成し、量子 OCT の優位性を初めて実証するなど当初計画以上の成果を挙げ、一部は民間との共同研究へと発展している。成果を権威ある雑誌に多数発表し、国際ワークショップ開催で内外の研究者との交流にも努力した。今後は、モノサイクルもつれ光利用による単一発光体ともつれ光との相互作用の研究、量子もつれ光二光子吸収などの基礎研究とともに、眼科系の専門家との共同研究による従来より 1 桁高い分解能を持つ量子 OCT の実用化を期待したい。(日本学術振興会賞受賞)

⑪田中チーム

シングルサイクルテラヘルツ光の発生に関して高強度テラヘルツ光の発生を優先した結果、目標値を超えて世界最高強度(1THz で 1MV/cm 以上)を実現した。高強度テラヘルツパルスの照射による半導体中のキャリアの巨大増幅現象は、非摂動論的領域の非線形光学現象

という予想外の世界初のデータであり、物理現象として重要なだけでなく、デバイス分野へも大きく貢献する成果であり、論文の被引用件数は 119 件に達した。さらに、企業と連携し世界で唯一のテラヘルツ実時間近接場顕微鏡の構築では、波長の 100 分の 1 程度の 10 μm の空間分解能、ビデオレート実時間動作を実現し、THz を近接場効果により増強する金属構造体素子の電場可視化、メタマテリアル材料の二次元電場応答の実測評価、テラヘルツデバイスの評価、多孔質ポリマーにおけるガス吸着過程のイメージング分析、光渦の振幅・位相分布画像の取得、小さい脂肪細胞のイメージング等、興味深い多くの成果を上げ、技術的インパクトは高い。これら研究成果を著名雑誌に多数掲載するとともに、著名な国際会議で招待講演を行っており、企業を含めたグループ間の協力体制で特許も国内外 13 件出願している。今後は、高強度テラヘルツ光の利用とテラヘルツ実時間近接場顕微鏡の実用化を期待したい。(文部科学大臣表彰)

⑫細貝チーム

極短パルス、大電荷量、低エミッタンスをもつレーザー航跡場加速電子源の開発を行い、従来の常識を覆す高い位置安定性で指向性の高い大電荷電子ビームを毎ショット安定に生成することに成功した。さらに、二段レーザー航跡場加速の実施、レーザー駆動の光キャビティを用いた位相回転によるビームの高品質化、新しい極短電子パルス輸送法の導入等により、レーザー加速を電子「加速器」に近いものにすることに成功した。これらの技術は特許出願されている。加速後の電子ビームを磁場フィルターで切り出して単色電子ビームを生成し、回折実験可能なシステムを構築し、金単結晶においてシングルショットで電子線回折像を得ることに成功した。これは、レーザー生成電子ビームを用いた電子線回折としては世界初であり、100fs レベル時間分解能で 1 ショットで電子線回折を可能とするものとして原子スケール動的イメージングの発展が待たれる。一方、開発されたレーザー生成電子ビーム源は、種々の条件・理由から卓上型小型高エネルギー加速器や小型 XFEL 装置の利用を求める領域・市場での具体的ニーズが期待され、成果を引き継いだ ImPACT 「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・超寿社会の実現」(佐野雄二 PM)における産業イノベーションにつながる実用化を期待したい。(主たる共同研究者が日本金属学会功績賞受賞)

⑬大森チーム

通常極低温リユードベリ原子集団研究で利用される狭帯域連続波レーザーの代わりに、広帯域のパルスレーザーを導入する独自手法によって、極低温原子分子集団に桁違いの強相関状態を発生させ、アト秒の超高速コヒーレント制御手法により量子シミュレーターのプロトタイプを開発した。これを用いてレーザー波長、強度、パルス波形によりモデル条件を制御し、超高速電子ダイナミクスのアト秒精度での観測・制御に成功した。当初計画にはなかった原子数密度の高い Rb 原子の BEC による高密度光格子の形成に到達し、より精度

の高い超高速量子シミュレーターの基盤技術を完成させた。一方、固体結晶中の励起電子コヒーレンス寿命の励起密度や格子欠陥数依存性を観測し、リユードベリ電子コヒーレンス寿命の原子・分子空間密度や空間不規則性依存性との類似性から量子シミュレーターの有効性を検証した。Humboldt 賞を受賞するとともに、この分野の継続発展のために国外の研究者との超高速量子シミュレーターに関する研究拠点ネットワークを形成している。

⑭尾松チーム

光の全角運動量(J)を有するトポロジカル光波を物質に照射すると、レーザーアブレーションで物質が溶融すると同時にトポロジカル光波の「全角運動量」を受け取り、螺旋状のナノ構造体(キラル構造体)へ変形するという光のカイラリティが物質に転写される新規現象を見出し(被引用件数 64 件)、その物理的原理を含めてメカニズムを解明した。金属や Si のナノニードル創成、アゾポリマーキラル構造体成長、アミノ酸単結晶成長における光のカイラリティによる多型制御、非常に指向性の良い微小液滴の発生などに成功した。また、光の角運動量精密測定法や深紫外～テラヘルツ波帯のあらゆる波長域でトポロジカル光波を自在に発生できる光源開発技術を確立した。著名な雑誌に発表数も多く、国内外の一流学会で多数の報告を行っており、招待講演 56 件、新聞発表、知財化も積極的に行った。レーザー加工などの実用化に向けて企業との共同研究も開始されており、簡便なトポロジカル光波発生用の螺旋位相板も商品化されている。今後は、産業イノベーションにつながる日本発の応用展開を期待したい。

⑮小林チーム

同時多色イメージングのために、①誘導放出誘起蛍光消光イメージング、②誘導放出誘起プローブ光増幅イメージング、③光熱(PT)イメージング、④誘導放出誘起光増幅減衰時間イメージングの 4 つの手法を開発した。特に、PT 法は非染色で 3 次元高解像イメージングを可能とした。逆輪帯照明法、PT 信号非線形効果の利用による高解像化、位相・振幅の独立検出などによる高感度化を図った。当初計画にはなかった半導体レーザーの利用は、安価、コンパクトなイメージング技術の開発につながった。特に PT イメージングと蛍光イメージングを組み合わせた 2 モードイメージングで、マウス脳の切片試料において、ニューロン網とグリア細胞網の 3 次元超解像同時イメージングに世界で初めて成功した。このように多色多モード超解像イメージング法は、多くの構成要素からなる生態システムを非侵襲に同時にイメージングすることのできる有力手段である。レベルの高い学会誌に極めて多数の論文を発表しており、Humboldt 賞および日本化学会賞を受賞し、国内外で 12 件の特許出願を行った。今後は、医学・生物系の研究者の本格的参加による装置の使い易さの追求と基礎生理学への本格的応用展開を期待したい。(主たる共同研究者が上原賞受賞)

⑩山内チーム

X線形状可変鏡を設計・試作し、各種ビーム診断手法も開発して、回折限界下で集光径を100nmまで制御出来る高性能X線集光システムを世界に先駆けて完成させた。それを用いたX線集光系とアポダイズドビームを組合せたX線顕微鏡を新たに開発した。X線顕微鏡による回折・蛍光イメージングの組み合わせの成果として、タンパク質や脂肪酸に結合した金属元素等の細胞内での分布の可視化を実証した。抗癌剤である白金製剤の細胞内での働き(主作用・副作用機序の解明)や、脂肪酸の代謝研究に強力な研究手段を提供するものであり、診断や創薬など医療分野への貢献を含めて科学技術イノベーションに資することが期待される。特に、ゲノムのDNAの収納において、ヌクレオソームが不規則に細胞内に納められていることを突き止め、従来の教科書に述べられているDNAの折りたたみ構造が誤りであることを示した。(被引用件数99件)これら優れた成果は、医学・生物学の専門家グループと長く共同研究体制を構築してきた成果である。学会誌への論文発表も着実に、X線形状可変鏡技術に関しては主要な特許も取得し、商品化につなげているので、X線自由電子レーザーなどを利用したX線顕微鏡における欠くことのできない技術として世界的に普及する事を期待したい。

8. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメントについて(課題選考、領域運営)

課題選考に当たっては、光源を使い尽くすとの観点から、光源や分光測定系を単に既存の手段として利用する研究は除外し、光源、光測定系に何らかの工夫を行うことを前提に「光を使い尽くし、光と物質の係わりを探る」意欲的な研究課題の採択に努めた。特に、ユーザーサイドに近い立場の研究課題チームの場合、チーム内の研究グループに光源や光測定の専門家を含む組織体制を持つことが必要と考えた。また、CREST研究の趣旨から、ある分野の底上げ的な研究スタイルのグループ研究は研究代表者への成果の集約が行われず発散的となるため、良いものでも残念ながら除外しました。これらについて、領域アドバイザー(領域内課題評価を兼ねる)と意思統一を行った上で、応募課題の評価を行い、結果として選ばれた16課題は光科学・光技術の幅広い領域をカバーし、波及効果も多く期待されるものとなった。

16課題はそれぞれ進捗状況に差はあるものの、ほぼ期待通りの進展を遂げた。これは、応募書類およびヒヤリング審査会、サイトビジットへの同行、毎年の研究状況報告会、課題の中間評価会等における領域アドバイザーの評価と進言に負うところが極めて大きく、心より感謝したい。領域アドバイザーの専門は、全体として幅広い領域をほぼカバーしており、その適切な進言は研究総括を通じて研究代表者に伝えられており、以降の研究計画に反映されている。サイトビジットでは、研究テーマが多くやや発散気味である場合、領域内グループ間の共同研究が見えづらい場合、研究の進捗度が遅れている場合など、研究

の目標達成のための軌道修正や研究方針を進言した。個々の分野の特殊性はあるにしても慎重の余り研究発表が遅れ気味であったり、知財に対する意識が低いと思われる場合なども、研究総括、および領域運営アドバイザーより早めにアドバイスした。また、様々な機会に、課題内のグループメンバーが研究代表の意向に沿って研究課題が全うされるように、個々のグループの成果を研究代表者に集約するように努めて頂くようお願いした。さらに、バーチャルラボであることから、研究総括は運営に関するアドバイス以外に、研究内容にも出来るだけ関与し、議論を通じてお互いの知識を高め、共通認識を持てるように努めた。

年1回の1~2日間に亘る領域の研究状況報告会では、研究終了したチームを含めて毎回16の各研究課題チーム内のグループメンバーを含む100名余りが一堂に会し、守秘義務を課して、研究課題の異なるチーム間での未公開の研究成果を含む活発な討論を行い、多彩な分野に跨がる光科学・光技術の研究者間の情報交流を持続的に深める努力を行った。また、さきがけ「光の利用と物質材料・生命機能」(増原宏研究総括)とは、2013、2014年度の2回に亘りCREST・さきがけ光科学光技術合同シンポジウム「進化する光イメージング技術~百聞はイメージングに如かずI、およびII~」を公開で開催した。

2013年度よりライフサイエンス分野に精通し、レーザーを駆使した研究に実績のある京都府立医科大学の高松哲郎教授を領域アドバイザーに迎え、ライフサイエンスと光科学・技術の融合分野を目指す今村・川田・小林・山内の各チームへの適切な評価とアドバイスと共に、ライフサイエンスを研究手法の応用分野に含む竹内・田中・佐藤チームへのアドバイスを含めて、この分野の研究の積極的な発展を図った。

(2) 研究領域としての成果

光源の特徴を徹底的に駆使する「光と物質の係わり」に関する研究に絞った本研究領域でカバーする分野は多岐に亘りました。大まかな分類をすると、①光源の限界を駆使した物性探索(岩井チーム、辛チーム、鈴木チーム、腰原チーム、田中チーム)、②光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能(佐藤チーム、細貝チーム、尾松チーム、山内チーム)、③最先端光量子を駆使した原子・分子・集合系の量子制御(高橋チーム、竹内チーム、大森チーム)、④イメージングや光操作によるバイオ・医学応用(本田チーム、佐藤チーム、今村チーム、川田チーム、小林チーム)となる。これらチームの個々の成果に留まらず、分野間に跨がる課題への波及効果の大きな研究テーマも多いために、CREST「光展開」として幅広い分野から100名を超える優秀な光科学技術の研究者が1つに纏まり、領域全体に亘る課題についてお互いに議論し、情報交換しあえたことは今後繋がる大きな成果であったと考えている。以下に、16課題の特筆すべき成果を掲げる。

①光源の限界を駆使した物性探索に関しては、光源のスペクトル分解能、空間分解能、強度・波長の限界での物質探索に挑戦したものである。

岩井チーム：赤外領域の極超短時間数サイクルパルスを用いたポンププローブ法で有機

強相関電子系の光誘起絶縁体-金属相転移において、光励起直後の 10-50fs 以内に、多体電子コヒーレント振動や、分子内の原子振動との相互作用を始める様子を世界で初めて捉えた。さらに、キャリアエンベロープ位相制御(CEP)安定化パルス光を用いて位相緩和の観測にも成功した(科学技術の進歩に貢献する成果)。

辛チーム：ファイバーレーザーと KBBF 結晶を用いた波長変換で世界最短の 8eV の準 CW ピコ秒レーザー光を開発、光電子分光でエネルギー分解能 $70\mu\text{eV}$ を実現し、鉄系超伝導系の電子軌道由来の新しい超伝導機構を見出した。さらに、当初目標を超える空間分解能 2nm に迫るレーザー光電子顕微鏡を開発した(科学技術イノベーションに資する成果)。

鈴木チーム：希ガスフィラメンテーション四波混合により深紫外・真空紫外領域の極短パルス発生に成功し、角度分解光電子イメージング法により化学反応動的解析に適用した。さらに液体試料に対する高感度超高速光電子分光に成功し水面直下にある水和電子のダイナミクスを世界で初めて明らかにした(科学技術イノベーションに資する成果)。

腰原チーム：時間分解振動分光法、時間分解電子線回折法、ps-動的 X 線回折法を用いて光誘起相転移における過渡的非平衡物質相「隠れた物質相」を構造学的に世界に先駆けて捉えた(科学技術の進歩に貢献する成果)。さらに、時間分解光電子顕微分光装置の開発により半導体表面の光励起電子の密度と位置の時間変化の実測を可能とし、電子デバイスの動作解析への応用が期待される(科学技術イノベーションに資する成果)。

田中チーム：シングルサイクル高強度テラヘルツ光の発生で世界最高強度(1THz で 1MV/cm 以上)を実現し、この光照射による非摂動的な非線形光学現象として半導体中のキャリアの巨大増幅現象を世界で初めて捉えた(科学技術イノベーションに資する成果)。さらに、企業と連携しテラヘルツ近接場顕微鏡を構築し、 $10\mu\text{m}$ 空間分解能、ビデオレート動作による各種現象の THz イメージングに成功した(具体的応用に繋がった成果)。

- ②光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能に関しては、電子のレーザー航跡場加速、光のベクトル性や角運動量の新規利用、高空間分解能 X 線顕微鏡開発等に挑戦したものである。

佐藤チーム：共振器ミラーの加工と共振器の調整により高次ベクトルビームを自在に発生させることで世界をリードし、特殊な偏光変換器を既存の顕微鏡に取り付け容易にベクトルビームを利用した空間分解能向上を実現した(具体的応用に繋がった成果)。

細貝チーム：極短パルス、大電荷量、低エミッタンスをもつレーザー航跡場加速電子源を毎ショット安定に生成することに成功した。加速後の電子ビームを単色化し、金単結晶においてシングルショットレーザー生成電子ビームを用いた回折像を得ることに成功した。開発された電子源は小型高エネルギー加速器や小型 XFEL 装置への応用も期待される(科学技術イノベーションに資する成果)。

尾松チーム：トポロジカル光波を物質に照射すると、物質が溶融すると同時にトポロジカル光波の「全角運動量」を受け取り、螺旋状のナノ構造体(キラル構造体)へ変形する

新規現象を発見し、物理的原理を含めたメカニズムを解明した。金属や Si のナノニードル創成、アゾポリマーキラル構造体成長、アミノ酸単結晶成長における光のカイラリティによる多型制御、非常に指向性の良い微小液滴の発生などに成功した。光の角運動量精密測定法や深紫外～テラヘルツ波帯の波長域でトポロジカル光波の自在発生技術を確立した(科学技術イノベーションに資する成果)。

山内チーム：X線形状可変鏡を設計・試作し、世界最高性能の高性能 X 線顕微鏡を完成させた(具体的応用に繋がった成果)。回折・蛍光イメージングの組み合わせでタンパク質や脂肪酸に結合した金属元素の細胞内での分布の可視化を通じて抗癌剤の白金製剤の細胞内での働きを捉えた(具体的応用に繋がった成果)。また、ゲノム DNA の収納においてクレオソムが不規則に細胞内に収められるという、世界の通説を覆す発見をした(科学技術イノベーションに資する成果)。

- ③最先端光量子を駆使した原子・分子・集合系の量子制御に関しては、究極の光源狭線化、超広帯域もつれ工発生、量子シミュレーションや量子 OCT に挑戦したものである。

高橋チーム：極めて線幅の狭い超安定な光源の開発、光格子点の磁気共鳴イメージング法の開発、新しい量子多体系の実現、スピンスクイーミングの量子フィードバック技術の開発等において世界トップレベルの成果を挙げた。大規模量子多体系の量子シミュレーションの量子情報処理の基礎や光格子時計の精度などの量子計測にも成功した(科学技術の進歩に貢献する成果)。

竹内チーム：擬似位相整合素子と新たな非同軸法を用いて世界最大の超広帯域(820nm, 周波数換算 200 THz)でのモノサイクルに迫るもつれ光発生に成功した。電子ビーム加工ナノ電極を用いてモノサイクル光発生用の擬似位相整合素子も開発した。もつれ光を用いた量子 OCT では、古典 OCT を凌駕する群速度分散補償能力や世界最高レベルの $0.54 \mu\text{m}$ 分解能を達成した(科学技術イノベーションに資する成果)。

大森チーム：極低温リユードベリ原子集団に広帯域パルスレーザーを照射する独自手法によって、桁違いの強相関状態を発生させ、アト秒の超高速コヒーレント制御手法により量子シミュレーターのプロトタイプを開発した。固体結晶中の励起電子コヒーレンス寿命の励起密度や格子欠陥数依存性を観測し、量子シミュレーターの有効性を検証した(科学技術の進歩に貢献する成果)。

- ④イメージングや光操作によるバイオ・医学応用に関しては、光源、非線形光学、位相補償、光計測、光操作などを駆使して生体観察の限界に挑むものである。

本田チーム：光トラッピング捕捉搬送による単一ウイルス感染システム、細胞・核内環境計測システム、ウイルス感染細胞変化計測、染色体 DNA 操作ツールの開発を行い、感染細胞における温度上昇および ATP 消費量の増大等の観測に成功した。また、光ピンセットによる単一ウイルス輸送により、特異的に細胞静止期に感染することを見出した(研

究途上だが将来的に大きな成果に繋がる可能性のあるもの)。

佐藤チーム：利得スイッチング方式の新規ピコ秒小型半導体レーザー光源とファイバーアンプ、二光子顕微鏡を組み合わせ、マウス脳の深部の海馬 CA1 ニューロンを世界で初めて深さ 1.6mm まで in vivo 観察することに成功した(具体的応用に繋がった成果)。

今村チーム：新規 2 光子励起顕微鏡システムに民間企業との連携による補償光学素子制御による波面補正を導入し、骨髄内のがん細胞イメージングにおいて、臨床応用レベルの 900 μm 深さでの観察に成功した。がん幹細胞に対して治療抵抗性に影響を与える細胞周期と骨髄ニッチに注目した新たながん診断法を提案した。1 年研究延長で佐藤チームの開発した半導体レーザーをベースとする小型光源の導入を図り、既存レーザー光源を凌駕するイメージング性能を得てベッドサイド装置への可能性を示した(科学技術イノベーションに資する成果)。

川田チーム：走査型電子顕微鏡の電子ビームによる微小光源励起システムを考案し、実用に耐える高効率電子光変換膜の開発に成功した。開発した光ナノイメージングシステムにより、回折限界を超えた 50nm の分解能、1 フレーム/秒で生きた細胞の動画イメージングに成功した。一方、当初計画になかった薄膜透過電子線の直接励起による自家発光ナノイメージングにも成功した(具体的応用に繋がった成果)。

小林チーム：誘導放出誘起蛍光消光イメージング、誘導放出誘起プローブ光増幅イメージング、光熱 (PT) イメージング、誘導放出誘起光増幅減衰時間イメージングの 4 つの手法を開発した。PT イメージングと蛍光イメージングを組み合わせ、マウス脳の切片試料で、ニューロン網とグリア細胞網の 3 次元超解像同時イメージングに世界初で成功した(科学技術の進歩に貢献する成果)。

(3) 科学技術イノベーション創出への展望

基礎的研究にあっても事象の解析や原理の解明に留まることなく、必要に応じて実用化も念頭に置いた波及効果の大きい技術シーズに資する研究を目指すことも求めた。その程度は研究課題によって大きな差があったことから、研究終了時点で応用に繋がった研究は佐藤チームの半導体光源、川田チームの光ナノイメージングシステム、田中チームの THz 近接場光学顕微鏡、山内チームの X 線形状可変鏡などに留まるが、今後の科学技術イノベーションに資する研究としては、辛チームの時間、空間、エネルギー分解能に優れた光電子顕微鏡の開発、鈴木チームの液体光電子分光、腰原チームの時間分解光電子顕微分光、田中チームの高強度 THz 光による半導体の非線形現象、細貝チームのレーザー航跡場加速電子源、尾松チームのトポロジカル光波による角運動量の物質への転写、竹内チームの量子 OCT、今村チームのがん幹細胞の骨髄内イメージングなどが挙げられる。また、山内チームのゲノム DNA の収納に関する通説を覆す発見も加えたい。これらの中で、光電子分光技術に限って見ても、鈴木、辛、腰原チームはいずれも「物質と光の係わり」の基礎研究のイノベーションを目指したものであったが、結果的に光源を使い尽くすことから科学技術

イノベーションに資する装置開発に繋がったと言える。

また、基礎研究面で科学技術の進歩に貢献した岩井、高橋、腰原、大森、小林チームでは、いずれも光源の極限的性質の利用を追求し、その結果物質の新たな光との係わりを見出しており、これらは将来材料科学や量子シミュレーションのブレークスルーを生み出す要素を含んでいる。

本田チームのインフルエンザウイルスの光操作は、発足当時鳥インフルエンザウイルスのパンデミックが議論されていた時期でもあり、極めて挑戦的な課題であった。結果的にはまだ道半ばではあるが、科学技術イノベーションに向けて本 CREST をベースに息の長い研究を続けて欲しい。

国際的競争の中で研究発表と知財出願のバランスを考えながら、実用化フェーズに近いものは積極的に企業とのコラボも推奨した。例えば、高橋チームの低損失誘電体多層膜鏡の開発、今村チームの新規 2 光子励起顕微鏡の開発、田中チームのリアルタイム THz 近接場顕微鏡の開拓と応用などが上げられる。

佐藤チーム、高橋チーム、今村チーム、小林チームなどでは半導体レーザーを活用したイノベティブな研究が進展している。もともと日本は固体レーザーに比べれば、半導体レーザーを含む半導体微細加工製造技術を豊富に有しているが、半導体デバイス製造が国内で縮小される中で、今後の光科学技術の発展を考えると、佐藤チームに代表されるような新規小型半導体レーザーが国産で容易に手に入る技術環境を国内に維持する事が重要と考えられる。

(4) 本研究領域を設定したことの意義・科学技術に関する貢献・問題点等

光科学・光技術は、もともと光物性、光化学を中心とした基礎科学としては日本が強い分野である。レーザー、さらには放射光・自由電子レーザーなどの最先端光源を駆使して、21世紀に入った今日、グリーン・ライフイノベーションに資する基礎基盤科学技術としての新展開が期待されている。国の第4期科学技術基本計画、引き続き第5期においても光・量子科学技術はナノテクノロジー・材料などと共に、新たな価値創出のコアとなる強みを有する技術、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術として研究開発を推進することが謳われている。

このような背景のもとに発足した本CREST「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」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」を一にするJSTのさきがけ「光の利用と物質材料・生命機能」(増原宏研究総括)と平行して推進され、また同時に発足した文部科学省の「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム(光拠点プログラム)」とも連携し、日本の光科学・光技術を光源開発からエンドユーザーまでの多数の分野の光の研究者・技術者をシームレスに繋ぐことにより、光科学・光技術に革新的な進展をもたらすための国家的プロジェクトの一環と位置づけられた。このことを踏まえて、本CRESTでは各研究課題の目標達

成による科学技術に関する貢献への努力はもちろんのこと、バーチャルラボとして多くの異分野の研究者が一堂に会し、議論することを通じて個々の研究課題の成果に閉じることなく新たなグループの組み合わせで、予想外の“次の”最先端研究企画が生まれることを期待し毎年合同の成果報告会を開催した。また、さきがけとの合同シンポジウム開催、光拠点プログラムのシンポジウムへの参加や研究報告会への最先端の光創成を目指したネットワーク研究拠点プログラムのPD、POの招待も図った。その結果、少なくとも本CREST内では個々の研究チームの成果を全体で共有できたために、いくつかの新たな研究展開がチーム間で生まれた事は成果であった。今後も、本CRESTの参加者が個々の研究の発展のみならず、科学技術に関する貢献のための新たな枠組みを継続的に追求する事を期待したい。

(5) 今後への期待や展望、感想

研究総括の狙いは、光源の特徴を徹底的に駆使して「光と物質の係わり」に関する新しい光科学・光技術の開拓と推進を行うことにあったが、領域アドバイザーの評価、助言により、光源・分光系の装置開発、基礎光物性、応用光工学、生物・医学応用と幅広い分野の研究が比較的バランス良く採択され、装置開発、基礎光物性の研究はもちろんのこと、応用光工学、生物・医学応用の課題でも、光源や光測定法の基本に立ち返って、これらを改良したり、新たな光源を探索するなど、意欲的に光を使い尽くす努力を行ったことで、そこから多種多様な光科学・光技術のイノベティブな新展開が進んだ。光の波長領域はサブミリ波からX線域まで6桁に及び、一部放射光もあるが、大部分はレーザーを出発光源とし、光の様々な究極の性質を引き出し、その光を直接に、または電子線に変換して、物質の様々な性質のイメージングを含む各種情報として獲得することができた。比較的基礎よりの研究課題が多く取り上げられたが、その意図はオリジナルな基礎研究から真のイノベーションが生まれるとの信念に基づくものであった。その結果、生体系の高空間分解能イメージング、テラヘルツ光や光電子分光による水分子内の電子の挙動、ウイルスゲノム操作、がん細胞の動態イメージング、創薬・治験、光誘起新機能材料、量子シミュレーション、量子計測、光格子時計、半導体デバイス動作計測、新奇光加工、加速器光源技術などの新たな着実な展開が進められた。研究の達成度、科学技術イノベーションへの貢献度には差があるものの、個々の研究課題の成果に留まらず、波及効果を含む今後のイノベティブな展開を期待させるものである。

本CREST研究の成果の重要性を改めて強く感じると共に、研究総括としての責任の重さも実感した。結びに当たり、本CREST運営・内部評価における領域アドバイザーの方々の適切な助言とサポート、JSTの各メンバーの様々なサポートに深く感謝すると共に、今後の更なる研究の発展により実用化が望める研究課題や新たな研究者の枠組みで生まれる先端研究課題に対して、これを実践し発展させる受け皿としてのJSTの戦略的創造研究推進事業を始めとする各種競争的資金の充実を切に望みたい。