

戦略的創造研究推進事業 －CRESTタイプ－

研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」

研究領域中間評価用資料

平成 25 年 3 月 17 日

目次

1. 研究領域の概要	3
(1) 戦略目標	3
(2) 研究領域	6
(3) 研究総括	6
(4) 採択課題・研究費	7
2. 研究総括のねらい	8
3. 研究課題の選考について	8
4. 領域アドバイザーについて	10
5. 研究領域の運営について	10
6. 研究の経過と所見	13
7. 総合所見	18

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の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①②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。

①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。

②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「課題7: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「課題9: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シング、分子イメーシ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、平成17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、平成17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・新素材の創成等を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。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(1) 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、希薄なガスを用いたBECの制御、15桁の周波数精度を持つ一次元の光子時計の研究等が行われている。

(2) 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。

(3) 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。

①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。

②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

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＞

(1) 極短パルス光による原子・分子の量子制御に関する研究

(2) 極短パルス光の照射エネルギーを利用した研究

(3) 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」(平成20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

氏名 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	中間評価時 所属・役職	研究課題	研究費*
平成 20 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	264
	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	284
	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	441
	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	256
	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	428
	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～	250
平成 21 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	435
	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	232
	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	398
	竹内 繁樹	北海道大学 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	227
	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	371
	細貝 知直	大阪大学 特任准教授	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	244
平成 22 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	236
	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	462
	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	237
			総研究費	5,001

* 研究費:平成 24 年度上期までの実績額に平成24年度下期以降の計画額を加算した金額

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。

2. 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。

3. 研究課題の選考について

平成20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りました。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。

平成21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ました。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。

平成22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。

4. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー 名	現在の 所属	役職	任期
潮田 資勝	物質・材料研究機構	理事長	平成 20 年 5 月～
江馬 一弘	上智大学	教授	平成 20 年 5 月～
太田 俊明	立命館大学	教授	平成 20 年 5 月～
岡田 龍雄	九州大学	教授	平成 20 年 5 月～
菊地 眞	(財)医療機器センター	理事長	平成 21 年 4 月～
小舘 香椎子	日本女子大学	名誉教授	平成 20 年 5 月～
笹木 敬司	北海道大学	教授	平成 20 年 5 月～
菅原 充	株式会社 QD レーザ	代表取締役社長	平成 20 年 5 月～
瀬川 勇三郎	理化学研究所	客員主管研究員	平成 20 年 5 月～
橋本 秀樹	大阪市立大学	教授	平成 20 年 5 月～
山内 薫	東京大学	教授	平成 20 年 5 月～
山西 正道	浜松ホトニクス(株)	顧問	平成 20 年 5 月～平成 21 年 4 月

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。

5. 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申請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ている。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。

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のさががけ「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を通じて積極的に連携し、情報交換を通じて積極的な研究の発展を図っている。

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)藤田順彦氏、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ました。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(現在までに58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ている。

年1回の2日間に亘る領域の研究状況報告会では、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深める努力を行っている。このことを通じて、佐藤チームと今村チーム、腰原チームと辛チームなど、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。

先の運営方針にも述べた如く、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」の毎年の研究拠点シンポジウムに参加し、ポスターセッションへの合同参加を通じて積極的な情報交換を通じて積極的な研究の発展を図っている。

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ている。

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ている。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ですが、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いるが、現在の所は指導に至った例は無い。

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、それに対する率直なアドバイスを行っている。辛チーム、今村チーム、田中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、研究が順調に進んでいる課題については、研究の拡大のための追加予算などの支援を行っている。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・支援を行っている。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例などもある。

4) 研究費の配分について

1の(4)「採択課題・研究費」の所でも記載したが、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、追加予算に恵まれたことから、今村チームのように適切な時期に顕微鏡用のレーザーを追加導入できたことにより研究が大きく進捗し、民間企業からも注目された例、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。

国際シンポジウム開催、国際共同研究支援も研究の進捗に役立っている。

6. 研究の経過と所見

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つつある。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いと思われる。得られた成果の国際誌への掲載は 400 報を超えると共に、7 名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 25 件(うち国外特許 4 件)を出願済みである。

中間評価については平成 20 年度、21 年度発足分が終了しているが、研究の成果は概ね高く評価されており、研究成果発表会での平成 22 年度発足分の成果報告を含めて、いくつかの課題では予想以上の進展が認められる。一方、いくつかの課題では工程表に遅れや、チーム内のグループの個々の成果の課題全体としての位置付けや集約が見え難いものなどもあり、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がなされている。

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、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、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議論できるバーチャルラボを形成する意義は大きいと考えられる。

以下に、16 課題のそれぞれについて特筆すべき成果と進捗状況、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ている。さらに、CEP 安定化パルス光の導入を図っており、それを用いた位相緩和の観測への発展が成功すれば、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なると期待される。

(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や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ることに成功し、世界をリードしていると評価される。また、新規ピコ秒レーザー光源を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 *in vivo* 観察する成果を上げ、バイオイメーシ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ている。

(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 8 eV 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 $70 \mu\text{eV}$ 、試料温度 1.5 K 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、方法論的にも応用面でも今後の発展を期待させる非常にインパクトのある成果といえる。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つつある。著名な雑誌に多数の論文発表をしており、新聞報道なども秀でている。

(4) 鈴木チーム: 深紫外・真空紫外領域の極短パルスが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化学反応解析に適用した。その分子ダイナミクスの研究成果は、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実現により当初計画の想定以上の他に類をみない成果が得られ、同じ分子を気相と溶液相で測定できることも特徴であることから、今後の主要テーマとしての展開が期待される。なお、深紫外・真空紫外超高速光電子イメージング測定にはやや遅れが見られるので、今後の加速を期待したい。

(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、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ている。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の高いジャーナルへ多数発表しており、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ており、一層の連携体制に努め、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や光格子時計などの量子計測などについて社会的に大きなインパクトを与える成果を期待する。

(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 計測のプロー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を明らかにした。得られた重要な成果について、インパクトの大きな学術雑誌への発表が遅れていることは大変惜しい。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。いくつかの問題点に関する適切な見直しにより研究が順調に進むことを期待したい。

(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、医学応用のためにさまざまな最適化の努力をした結果、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、臨床応用レベルの 900 μ m 深さでの観察、骨髄内部観察に向けた補償光学素子制御による波面補正、レーザー長波長化によるより深い部位での観察など、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ている。当初計画になかった北大根本グループの参加による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ている。佐藤チームによるベクトルビームの導入構想も望ましい展開である。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に大きく寄与することが期待される。

(8) 川田チーム: 微小光源励起システムの試作と光電変換膜の開発に関しては、電子線励起ナノイメージングシステムを設計・試作して、50nm 以下の回折限界を超えた分解能を有することを示したが、実用化に向けて発光効率の高い蛍光体の開発はまだ試行錯誤の段階である。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、多くの種類の細胞を培養できるようになっている。一方、電子線の直接励起によるナノイメージングの展開などの新たな方向性も出ている。数ナノメートルレベルで生体内物質の挙動観察が真に実現出来れば、その成果のインパクトは極めて大きい。原理検証に留まらず、是非とも実用化に至ることを期待したい。

(9) 腰原チーム: 10fs 光源を用いた Co 酸化物における光誘起高スピンポーラロン凝縮による金

属・絶縁体相転移の室温での実現、動的 X 線技法を用いた Mn 酸化物薄膜における光励起状態での新しい電荷・スピン・軌道秩序状態の観察、などに成功している。さらに、特筆すべきは fs 時間分解 PEEM 装置の開発であり、フェムト秒の時間分解能とナノメートルの空間分解能を有しており、光誘起相転移ダイナミクスに関連する物性のみならず、半導体デバイス関係の量子閉じ込め構造の研究者、電荷の動的過程の研究者の関心を引き、共同研究が進んでいることは、研究の発展に望ましい展開である。物性分野のみならず、デバイスや医療の分野への大きな貢献が期待される。非平衡状態にあつてこそ機能を発揮する物質・材料の特性評価に向けた動的構造解析手法の開発は、その原理提案を含めて極めて重要であり、これらの成果は権威ある雑誌に多数掲載され、新聞報道なども秀でている。

(10) 竹内チーム: 低いチャープ度 (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 (820nm, 周波数換算 200 THz) でのもつれ光発生に成功した。それと平行してモノサイクルもつれ光発生用の高いチャープ度を持つ擬似位相整合素子の開発も順調に進捗している。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分解能についての量子 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ており、権威ある雑誌に多数発表されている。今後のモノサイクルもつれ光の利用として、準備の進んでいるナノ光ファイバーと結合した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観測などの基礎研究とともに、量子 OCT の実用化といった社会インパクトのある成果についても実現を期待したい。

(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照射による非線形光学現象としての半導体キャリアの巨大増幅現象に関しては、半導体中での非摂動論的領域の現象という未知の世界を拓き、得られた成果は予想外の世界初のデータであった。物理として重要だけでなく、デバイス分野へも大きく貢献する成果である。さらに、世界で唯一のテラヘルツ実時間近接場顕微鏡の構築を行い、応用研究として、生細胞、メタマテリアルなどのイメージングなど、広い分野での利用価値を実証し、技術的インパクトは高い。これら研究成果を著名雑誌に掲載するとともに、著名な国際会議で招待講演を行っている。企業を含めたグループ間の協力体制も良好であり、特許も 9 件申請している。

(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を電子源として、動的イメージングを目指した高性能パルス電子源開発を計画通り進め、指向性のよい安定な電子ビーム発生と方向性制御技術を確立した。当初計画を変更し、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、当初計画よりもパフォーマンスの高いレーザーバーチャルカソードの実現が可能となった。これらの成果は学術論文発表や特許出願を行っている。比較的少ない投資で大規模装置の成果

を挙げている点は高く評価される。全ビームラインの完成にはまだかなりのステップが予想されるので、イメージングについては段階的にテストを実施し、衝撃誘起構造相転移だけでなく、より幅広い物性研究への応用も期待したい。また、高品位の極短パルス電子ビームは、高エネルギー加速器分野の電子銃源としても世界的な注目を集めるものと期待される。

以下の課題については、中間評価を未実施のため、進捗状況を記載する。

- (13) 大森チーム: 超高速量子シミュレーターを開発し、そこで得られた固体結晶系の量子コヒーレンスの観測制御スキームを実在のバルク固体に適用することにより、世界に先駆けて凝縮系のコヒーレント制御と新たな量子機能を実現させることを目標としている。超高速原子・分子量子シミュレーター実験の準備として、高密度光双極子トラップ中のリュードベリ波束運動、波束干渉の原子密度依存性、ピコ秒パルスレーザーを用いた超高速光会合による第一励起状態での分子生成、バルク固体では固体パラ水素中で非局在したフレンケル型励起子の量子干渉の制御などに成功しており、理論のサポートの下に具体的な光格子原子結晶によるシミュレーター実験と分子性イオン結晶の量子状態制御への発展が期待される。
- (14) 尾松チーム: 未開拓の極限トポロジカル光波の「全角運動量」を駆使して、物質のナノ構造・物性などの新機能創出による機能性デバイスの創成を目標としている。ファイバー増幅器中でガウスビームをトポロジカル光波へ変換する独自の方法により、ナノ秒光源ではパルスエネルギー 1mJ、ピコ秒光源では最大平均出力 25W 以上を達成し、KTP 結晶を用いた光パラメトリック発振器において 2 μ m 帯トポロジカルレーザーの開発などに成功した。トポロジカル光波を物質(金属)に照射すると、「全角運動量」の螺旋性が金属に転写されて、金属ナノ針が光加工で創成される現象について、螺旋金属ナノ針の螺旋周波数と角運動量の大きさ、符号の関係に関して、興味ある成果が得られており、研究の更なる発展が期待される。
- (15) 小林チーム: 高性能多色超短パルスによる新奇光イメージング法と光制御(刺激)法の開拓と、紫外光励起・2光子励起による分子の光劣化・脱ケージ・光解離機構の解明を目標としている。これまでに、生体試料を対象とした単色での自然放光イメージング、パルス及び CW 光源を用いた量子ドットで標識した生体細胞の誘導放光イメージングに成功した。また、サブ 10fs の UV, DUV レーザーの開発、フォトニック結晶ファイバーを用いた白色光をプローブ光とした多チャンネルロックイン検出器によるマルチプレックス誘導ラマン顕微鏡の構築を行った。ケージド化合物として、光制御用分子の合成収率の改善、光制御実用分子の神経生理への適用など、研究は順次進展している。しかし、改築で研究室移転を余儀なくされたために光源再構築に時間を要し、今後のグループ間の本格的連携が待たれる。
- (16) 山内チーム: コヒーレント X 線による走査・透過 X 線顕微鏡の構築と白金製剤(抗がん剤)の

作用・副作用機序解明を目標としている。光学系では、空間分解の向上の鍵となるスペックルフリーで動作する高精度形状可変ミラーの開発、試料各部からの回折パターンを用いて像を再構成するタイコグラフィ法を用いて 10nm 分解能を達成、波面位相計測法の開発、ビーム位置の安定化、像回復アルゴリズムの開発等を行った。生物系では、高分解能走査型蛍光顕微鏡による白金製剤投与細胞の観察、X線小角散乱法による染色体内DNAの折りたたみ構造に関する新知見などが獲得された。計画通りの進展が見られ、研究の成果は薬理的・医学的にも極めて有用な情報を与えることが期待される。

7. 総合所見

1) 研究領域としての成果の見通し、今後の期待や展望

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却って、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ており、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期待される。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行われている。比較的基礎よりの研究課題が多く取り上げられたが、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の挙動、ウイルスゲノム除去、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、量子情報処理、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への新たな展開が期待されるテーマが数多くある。研究は概ね順調に進展しており、研究の達成目標・到達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、波及効果を含むイノベティブな展開を期待させるものである。

2) 研究領域のマネージメントについて

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索」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ている。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、心より感謝する。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ている。個々の分野の特殊性はあるにしても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、領域代表より早めにアドバイスしている。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ている。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ている。

3) 本研究領域を設定したことの意義・感想

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においても光・量子科学技術はナノサイエンス・ナノテクノロジーなどと共に、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。

これらを背景として発足した本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のさががけ「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、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」とも連携しており、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る。このことを踏まえて、本CRESTでは各研究課題の目標達成への期待はもちろんのこと、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、個々の研究課題に閉じることなく新たなグループの組み合わせで“次の”最先端研究企画が生まれることも期待される。本CRESTの研究発展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を実感している。

結びに当たり、本CREST運営におけるJSTの各メンバーの方々の様々なサポートに感謝すると共に、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に生まれる先端研究課題

に対して、これを実現し、発展させる次の機会の受け皿をJSTとして是非お考えいただければ幸いです。

以上