

戦略的創造研究推進事業  
個人型研究(さきがけ)  
研究領域事後評価用資料

研究領域  
「光の利用と物質材料・生命機能」

研究総括: 増原 宏

2015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 .....	1
(3) 研究総括 .....	1
(4) 採択課題・研究費.....	2
2. 研究領域および研究総括の選定について (JST 記載) .....	5
3. 研究総括のねらい .....	6
4. 研究課題の選考について .....	6
5. 領域アドバイザーについて .....	7
6. 研究領域の運営の状況について.....	8
7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況.....	15
8. 総合所見 .....	43



## 1. 研究領域の概要

### (1) 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」

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①、②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。

### (2) 研究領域

「光の利用と物質材料・生命機能」（平成 20 年度発足）

本研究領域は光との相関を新しい光源から探ることにより、情報通信、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、環境・エネルギー等の諸分野において、これまでにない革新技术の芽の創出を目指す研究を対象とするものである。

具体的には、光源として高出力、超短パルス、超長波長のレーザー、放射光、極微弱光、単一光子レベルの光も想定し、光の本質に迫る研究、光を使い尽くす研究、光でのみ可能になる合成・物性・機能の研究、光によって実現するプロセス、光が関わる細胞機能、光で初めて解き明かされる生体組織、光でのみ制御できる生命機能、これに加えてリアルな材料や生物を対象とした光計測法、イメージング法の研究などが含まれる。

### (3) 研究総括

増原 宏（台湾国立交通大学 講座教授）

## (4) 採択課題・研究費

(百万円)

採 択 年 度	研究者	所属・役職 上段：研究終了時 下段：応募時	研究課題	研究費 ※
平成 20 年度	井村 考平	早稲田大学先進理工学部 准教授 分子科学研究所 助教	プラズモニック物質の波動関数の光制御とその応用	51
	岩倉 いずみ	広島大学大学院理学研究科 助教 日本学術振興会 特別研究員(PD)	超高速分光による熱反応過程の直接観測と機構解明	60
	太田 薫	科学技術振興機構 さきがけ研究者 神戸大学分子フォトサイエンス 研究センター 特命助教	時空間波形制御技術の開発と微小空間領域での非線形分光計測への応用	42
	佐崎 元	北海道大学低温科学研究所 准教授 同上 准教授	不凍タンパク質作用発現機構の解明を目指したその場光観察	36
	須藤 雄気	名古屋大学大学院理学研究科 准教授 同上 助教	光機能的・制御性蛋白質による細胞・個体操作	45
	高木 慎介	首都大学東京大学院都市環境科学研究科 准教授 同上 准教授	分子間相対配置の操作による光化学過程の能動的制御	40
	永井 健治	大阪大学産業科学研究所 教授 北海道大学電子科学研究所 教授	ナノサイズ高輝度バイオ光源の開発と生命機能計測への応用	100
	新倉 弘倫	早稲田大学先進理工学部 准教授 カナダ国立研究機構 博士研究員	軟 X 線レーザーによる時間分解分子軌道イメージング	55
	西村 智	東京大学医学部 特任助教 日本学術振興会 特別研究員(PD)	光による生命のダイナミズム・不均一性・確率性の可視化	33
	深港 豪	北海道大学電子科学研究所 助教 九州大学大学院工学研究院 助教	単一分子蛍光計測で探るキラリティーの本質	38
藤田 祐一	名古屋大学大学院生命農学研究科 准教授 同上 准教授	光に依存した新規窒素固定酵素の創生	40	
平成 21 年度	足立 俊輔	京都大学大学院理学研究科 准教授 東京大学物性研究所 助教	真空紫外域の低次数高調波による超高速分光	51
	石坂 昌司	広島大学大学院理学研究科 准教授 北海道大学大学院理学研究院 助教	エアロゾル微小水滴のレーザー捕捉・顕微計測法の開発と展開	40
	雲林院 宏	カトリックルーバン大学化学学部 准教授 同上 上級博士研究員	リモート励起ラマン分光を用いたナノ計測法の開発とその展開	51

平成 21 年度	岡 寿樹	新潟大学研究推進機構超域学術院 准教授 大阪大学大学院工学研究科 特任助教	量子相関光子による光化学反応 制御	20
	小笠原 慎治	北海道大学創成研究機構 特任助教 理化学研究所 基礎科学特別研究員	光応答性核酸による単一細胞内 での光遺伝子制御	44
	奥津 哲夫	群馬大学大学院工学研究科 教授 同上 准教授	光化学反応を駆使した分子結晶 成長過程の制御	40
	小関 泰之	大阪大学大学院工学研究科 助教 同上 助教	誘導ラマンによる高感度光学活 性検出及び高分解能イメージン グ	40
	財津 慎一	九州大学大学院工学研究院 准教授 同上 助教	非振器位相整合非線形光学の開 拓と新光源への応用	40
	ニコラス アイザック スミス Nicholas Issac Smith	大阪大学免疫学フロンティア研究センター 准教授 同上 講師	生きた細胞内での生命機能分析 用プローブのレーザーを用いた その場作製	40
	玉作 賢治	理化学研究所播磨研究所 専任研究員 同上 専任研究員	X 線非線形回折を利用した局所 光学応答解析	40
	畑中 耕治	東京大学大学院理学研究科 准教授 同上 准教授	微小液滴と超短光パルスの構造 制御による超広帯域光変換	43
	樋口 ゆり子	京都大学大学院薬学研究科 特定助教 同上 特定助教	蛍光イメージングによる幹細胞 挙動解析法の創成	40
	増田 真二	東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センタ ー 准教授 同上 准教授	モジュールの組み合わせによる 光機能蛋白質の創出	44
	八ツ橋 知幸	大阪市立大学大学院理学研究科 教授 同上 准教授	高強度レーザーによる超多価イ オン生成と新規化学反応の開拓	46
志賀 信泰	科学技術振興機構 さきがけ研究者 情報通信研究機構時空標準グループ 専攻研究員	原子位相ロックを用いた究極的 時計レーザー安定化の追求	120	
平成 22 年度	岩長 祐伸	物質・材料研究機構先端フォトニクス材料ユ ニット 主任研究員 物質・材料研究機構量子ドットセンター 主任 研究員	転送光学に基礎をおく超解像顕 微鏡とメゾ機構のその場観察	44
	江波 進一	京都大学白眉センター 准教授 カリフォルニア工科大学 博士研究員	大気中および生体中の界面光反 応のその場計測	40

平成 22 年度	小阪田 泰子	京都大学物質-細胞統合システム拠点 特定拠点助教 科学技術振興機構 さきがけ研究者	光機能性量子ドットを用いた単 一分子神経活動イメージング	38
	香月 浩之	奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研 究科 准教授 自然科学研究機構分子科学研究所 助教	凝縮系波動関数の時空間マニピ ュレーションとイメージング	41
	岸本 哲夫	電気通信大学大学院情報理工学研究科 准 教授 電気通信大学先端領域教育研究センター 特 任准教授	連続発振原子波レーザーの開発 と微細加工技術への応用	43
	小島 大輔	東京大学大学院理学系研究科 講師 同上 講師	哺乳類のUV感覚にせまる光セ ンサー蛋白質の機能解明	40
	是枝 聡肇	立命館大学理工学部 准教授 東北大学大学院理学研究科 助教	光による熱の固有状態の創成と 波動制御の実現	44
	佐藤 琢哉	東京大学生産技術研究所 助教 同上 助教	フェムト秒光波制御による超高 速コヒーレントスピン操作	44
	東海林 篤	山梨大学大学院医学工学総合研究部 助教 同上 助教	磁気光学効果を利用した光の伝 搬特性制御	44
	高橋 優樹	科学技術振興機構 さきがけ研究者 同上 さきがけ研究者	単一イオンと単一光子間の量子 インターフェースの実現	40
	高橋 文雄	立命館大学生命科学部 助教 科学技術振興機構 さきがけ研究者	広範な藻類のもつ転写因子型光 受容体の機能解析とその応用	41
	中川 秀彦	名古屋市立大学大学院薬学研究科 教授 同上 准教授	二光子励起で発生させるガス状 細胞情報伝達分子を駆使したス トレス計測	40
	ビジュ ヴァスデヴァ ン ピライ Biju Vasudevan Pillai	産業総合研究所健康工学研究部門 主任研究員 同上 主任研究員	光分解性バイモーダルナノパー ティクルの開発と、がんの可視化 と治療への応用	35
	江口 美陽	筑波大学数理物質科学研究科 助教 同上 研究員	金属ナノ粒子配列におけるプラ ズモン特性の分子制御	40
			<b>総研究費</b>	1813

※ 各研究課題とも見込みの総額



平成 20 年度採択の西村智は「最先端・次世代研究開発支援プログラム」に採択されたため、研究を途中で終了しており、本評価では、さきがけ研究期間に限定して記載する。平成 21 年度採択の志賀信泰研究者(5 年型)と平成 22 年度採択の江口美陽研究者(ライフイベントによる研究期間の延長)を、H26 年度研究領域事後評価用資料に改めて加えた。

## 2. 研究領域および研究総括の選定について(JST 記載)

### (1) 研究領域の選定について

以下のような検討結果に基づいて本研究領域が選定された。

最先端レーザー等を他に類のない方法で活用する研究や戦略重点科学技術分野の重要な課題に対して徹底的に光科学技術にこだわって研究を推進することにより、未知未踏分野の開拓と新しい研究の方向性を創出するとともに、将来の光源開発に向けて高度な要求を顕在化することが期待できる。これは独創的で新しい発想によって、挑戦的に推進することが必要であり、さきがけとして選定することが適切である。

本研究領域と CREST「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」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研究領域であるが、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(光拠点)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

以下のような検討結果に基づいて研究総括が選定された。

増原宏は、光化学、マイクロナノ分光、極微化学における先駆的な研究活動を展開し、その成果により日本化学会賞、ポーターメダル、日本分光学会学術賞など多くの受賞歴をもち、最近ではレーザーの医療・バイオ分野への応用にも研究の幅を広げていることから、本研究領域を運営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見られる。

また、多くの優れた研究者を育成してきた実績と光化学協会、応用物理学会、レーザー学会、日本化学会、アジア光化学協会等の学協会要職を歴任してきたことから関連分野の研究者から信頼されており、本研究領域の研究者への指導とマネジメントを行うに適した経験・能力を有し、公平な評価を行いうると見られる。

なお、本研究領域の研究総括は、文部科学省で実施される光源・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

一・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。同氏は本戦略目標を提示する契機となった光科学技術の推進に関する懇談会に利用研究者側の委員として積極的に関与したほか、学会活動等の要職を務めた経験から、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

光科学技術は、エネルギー、時間、空間を同時に制御して、非接触、非破壊的に、材料や生物の計測、加工、機能発現を図ることを可能にする。光科学技術の研究は、材料の性質や生命機能の測定、材料・デバイス・チップなどの作製にきわめて有効であるが、それにとどまらず新しい物質システム、生命機能を生み出すメカニズムに関する概念や次世代の科学技術の発想を与える。その高いポテンシャルは他の科学技術に比べ際立っていると考えられ、この光科学技術の特徴を踏まえた、今までにない斬新なアイデアによる研究を求めた。新しい光源を切り口に展開するもよし、研究の結果新しい光源の必要性を提起するに至るもよしと考えた。具体的な方針としては、徹底的に光にこだわって研究を展開することを本研究領域の判断基準にしたいと考えた。

現在では光科学技術の研究開発は高価な装置を必要とすることが多く、複雑な装置を動かすために研究組織も大きくなっており、ともすれば現時点での評価基準が若い研究者に当てはめられがちである。しかしさきがけは個人研究であり、次の時代に実る新しい科学技術の源流を求めている。本研究領域では、若い研究者の直感と真摯な姿勢、リスクをものもしない無私の努力により、光科学技術の新しい地平が開かれると考え、そのようなチャレンジングな研究を後押しする方針で運営した。

### 4. 研究課題の選考について

選考の主な考え方は下記の通り。

- 1) 選考は「光の利用と物質材料・生命機能」研究領域に委嘱された領域アドバイザー12名の協力を得て研究総括が行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。
- 3) 光科学技術の研究は、光そのものに関わる科学技術を発展させるだけでなく、新しい物質システム、生命機能を生み出すメカニズムに関する概念や発想を与える。この光科学技術の特徴を踏まえた、今までにない斬新なアイデアによる研究課題を求めた。具体的には、数年から10年で新しい「光の利用」のストリームを作る可能性があるか、その代表者になれるか、実現可能性を示す手がかり、経験、あるいは背景はあるかを問う一方、他の研究費では実現できない研究として差別化出来ているか、個人研究であることを自覚しているかを考慮した。さらに国際的にもさきがけていること、採択する数十

件の研究課題が幅広い物質材料と生命機能の研究分野をカバーすること、年齢的にも地域的にもヘテロな研究者分布とすることを重要と考え、課題選考をおこなった。

## 5. 領域アドバイザーについて

氏名	所属	現役職	任期
石原 一	大阪府立大学	教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
伊藤 繁	名古屋大学	名誉教授	平成 22 年 6 月～平成 27 年 3 月
小原 實	慶應義塾大学	名誉教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
熊野 勝文	東北大学(元・リコー 研究開発本部副本部 長)	研究員	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
小杉 信博	分子科学研究所	研究総主幹	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
佐々木 政子	東海大学	名誉教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
七田 芳則	京都大学	教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
中島 信昭	大阪市立大学	名誉教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
三澤 弘明	北海道大学	グリーンテクノロジーセ ンター長	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
美濃島 薫	電気通信大学(元・産 業技術総合研究所室 長)	教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
三室 守	京都大学	教授	平成 20 年 6 月～平成 23 年 2 月
宮脇 敦史	理化学研究所	副センター長	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
吉原 経太郎	分子科学研究所	名誉教授	平成 20 年 6 月～平成 27 年 3 月
Frans De Schryver*1	KU Leuven ベルギー	名誉教授	平成 21 年 12 月～平成 27 年 3 月
Shimon Weiss*1	UCLA	教授	平成 22 年 4 月～平成 27 年 3 月
Din Ping Tsai*1	台湾中央研究院	応用科学研究セン ター長	平成 23 年 4 月～平成 27 年 3 月
Johan Hofkens*1	KU Leuven ベルギー	教授	平成 24 年 2 月～平成 27 年 3 月
中桐 伸行	(元・科学技術振興機 構技術参事)		平成 26 年 7 月～平成 27 年 3 月

\*1：外国人領域運営アドバイザー

領域アドバイザーの人選にあたっての方針は以下の通り。

1. ERATO、さきがけ精神を理解し、その理解に基づいて助言できる人をお願いする。
2. 物質材料から生命機能の広い研究領域をカバーするため物理、化学、バイオの各分野から数人ずつ領域アドバイザーを選ぶ。
3. 大学、国立研究所、民間企業出身者から領域アドバイザーを選び、異なる視点からの助言をお願いする。
4. 本研究領域のサイエンスとテクノロジーを研究総括がすべてカバーするのは不可能である。そのため本研究領域においては「担当アドバイザー制」を導入し、各研究者に一人以上の領域アドバイザーをはりつける。担当アドバイザーは、領域会議における討論はもちろん、サイトビジットに同行し、研究打ち合わせ、論文投稿に至るまで面倒を見てもらう。この研究総括の運営方針を理解し、実践してくれる領域アドバイザーを選ぶ。

## 6. 研究領域の運営の状況について

### (1) 3つの領域運営方針

「担当アドバイザー制」、「国際水準」、「一歩踏み込んだマネジメント」の3つを運営方針の柱とした。以下にそれぞれに関して、その趣旨と実際に行ってきたことについて説明する。その効果については平成26最終年度の活動をふまえてまとめ、分析、考察し、ここに報告する。

#### ①担当アドバイザー制(本研究領域独自の試み)

本研究領域では研究者の研究分野が、物理、化学、生物、さらには薬学、医学まで多岐にわたっている。この幅広い分野をカバーするために、様々な分野のトップレベルの専門家に領域アドバイザーをお願いした。各研究者に対して、専門が近い領域アドバイザーを一人、場合によっては複数名「担当アドバイザー」にアサインした。担当アドバイザーには、研究総括や技術参事が研究者の研究室を訪問する「サイトビジット」に同行いただき、研究者の研究現場を見ていただいた。さらには、半期ごとに研究者から提出される「半期報告書」や発表論文を担当アドバイザーに送付し、進捗状況を把握していただくと共に報告内容に対するコメントをいただいた。また領域会議などでの議論のみならず、日頃より様々なご指導をいただくシステムとした。

#### ②国際水準

研究者は常に自分の研究分野の動向把握に努めているが、おのずと限界がある。自分が活動している学会とは異なる学会で、同じような研究が行われている可能性もある。とくに学際的な研究においてはその可能性が高い。国内の情報は様々な学会やシンポジ

ウム、研究会などで情報が得られやすいが、国際的な状況把握には限界がある。このため、北米、欧州、アジアから計4名の外国人領域運営アドバイザーに就任していただき、領域会議や研究報告会への出席などを通して様々な議論やコメントをいただいた。また、研究者2名がオーストラリア人、インド人であり、合わせると外国人が6名になることもあり、領域会議は英語を公用語とした。研究者は研究期間の標準である3年半の間に、6回の領域会議で英語での発表や質疑応答を経験することになり、英語での発表・議論に抵抗感がなくなったものと思われる。約3分の1の研究者は外国での研究経験があり、これらの研究者が英語での討論に主要な役割をにない、英語で会議をしているにもかかわらず議論のつきる事がなかった。

### ③一歩踏み込んだマネジメント(本研究領域の新たな試み)

研究総括の増原が台湾国立交通大学の講座教授として台湾の新竹市に常駐しているため、中桐伸行技術参事に運営全般の補佐をお願いした。また、イノベーションを念頭に新しい研究を展開する際に必要な段取り、心構えをさきがけ研究者に授け、さらに必ず感じる不安に対処する事が若手研究者の育成に必要なとの認識にたち、研究者の考え方、心理にまで踏み込んだマネジメントを、研究領域の運営方針の一つとした。物理学者で吉田 ERATO プロジェクトの研究者であった中桐博士はこの方針を支持し、ともにこの方針を実践してきた。

具体的には、中桐技術参事は「anywhere, anytime」(どこでも、いつでも)と「現場重視」をモットーに、研究者のよろず相談係として、研究活動の様々な局面、予算、物品購入、論文作成、学会発表、特許出願、プレスリリースなどでサポートするのみならず、頻繁に研究者を訪問して常に状況の把握に努めた。様々な訪問や面談を総計すると約200回になる。訪問も様々なパターンを試みた。技術参事単独で研究者を訪問するのみならず、担当アドバイザーとともに研究者を訪問、逆に研究者と共に担当アドバイザーを訪問、他の研究者とともに研究者を訪問など様々な形態の訪問を試みた。さらに、多くの学会やシンポジウムに参加し、研究者の発表現場に立ち会うとともに、研究者の発表するセッションの状況把握、さらには参加しなかった研究者に関する発表があれば、その要旨などの情報を研究者に送付した。また、出張報告書などに要旨を記して記録として残した。

このような活動の基盤として、当時研究総括が特任教授(非常勤)を勤めていた奈良先端科学技術大学院大学に事務所を設置し、セクレタリー業務を担当してもらう人を雇った。セクレタリーには、研究総括や技術参事のスケジュール管理や、様々な書類の管理、領域会議などの日程、会場、スケジュールリングなど多岐にわたって事務所機能を担当してもらった。これにより研究総括や技術参事が効率的に領域運営、とくに研究者との時間を確保することができた。

## (2) 領域会議と様々な会合による議論

領域会議とは、研究者や、研究領域アドバイザー、研究総括、技術参事等の領域関係者が一同に会し、合宿形式で夜遅くまで議論する、さきがけ制度の特徴の一つである。この会議を中心として、研究交流会やアドバイザー・ミーティング、終了検討会を開催した。これらの会合は相互に補完するとともに、一つの会合が他の会合へ影響し、領域活動に刺激を与え、その結果、研究者の研究活動や研究者間の交流を活発化することができた。以下に各種の会合について記す。

### ① 領域会議

領域会議を 12 回開催した。第一回目を奈良で開催し、一期生 11 名と領域アドバイザー全員が一同に会した。すでにこの時点から「国際」を念頭に、この第 1 回領域会議発表用資料は英語で作成する事にした。一期生から三期生を採用する 3 年間の領域会議第 1 回から第 6 回までは、領域会議を基本的に 1 月と 6 月に開催し、札幌で開催した第 2 回は佐崎研究者(一期生)が所属する北大の低温研を見学、神戸で開催した第 4 回は玉作研究者(二期生)が所属する SPring-8 を見学、台湾国立交通大学で開催した第 6 回では、いくつかの同大学の研究室を見学した。

一期生の研究期間が終了する平成 24 年からは、3 月に開催する研究報告会に引き続き領域会議を開催することとし、その半年前には終了検討会とともに領域会議を開催することにして、第 7 回から 11 回までは 3 月と 9 月に開催した。

領域会議は「国際」を意図して、外国人領域運営アドバイザーの出席を得た第 3 回より以降はすべて英語でおこなった。さらに領域会議は進捗報告と議論に重きを置いた運営をおこない、発表時間 10 分に対し議論を 15 分とし、英語での 15 分の議論に耐えてもらう事とした。当初、議論 15 分では途中で議論が途切れてしまうのではないかと心配したが、常に活発な議論が行われ、むしろ時間切れで質問を打ち切る場合が続出した。

貴重な議論を発表者に記録として残して貰うため、領域会議ではすべてを録画し、各研究者の発表と議論計 25 分間分を切り出して本人に渡し、質疑応答を補足説明も加えて英語でまとめ、次回の領域会議の資料に綴じ込んだ。

開催場所は、基本的にアクセスの良さを重視し、新幹線沿いの都市を選んだ。とくに、研究報告会を開催した 3 月には領域会議を同時に開催したため、東京で 4 回開催した。一方、平成 23 年度 5 月末には、台湾・台北の中央研究院との合同シンポジウムを開催したのにあわせ、研究総括の研究室がある新竹の台湾国立交通大学で開催した。最終年度の平成 26 年 9 月は JST 東京本部別館にて最後の第 12 回領域会議を開催した。

### ② 研究交流会(本研究領域独自の試み)

領域会議は、進捗報告、緊張感のある発表と議論、英語、25 分と限られた時間、を特徴とする会議である。これに対し、自由、リラックス、母国語、1 時間から 1 時間半をか

けての自由な討論会が必要と考えた。そのため、企画・運営を研究者の自主性にまかせた研究交流会を12回開催した。分野別と採用年度別の2種類を開催した。前者では、物理系、化学系、生物系、レーザー関係の4回を開催した。しかし参加者に制限をもうけず、研究を修了した研究者にも案内を出し、ほとんどすべての交流会に参加した研究者もいた。後者では、一期生、二期生、三期生別で、各2回から3回開催した。これらの研究交流会では心行くまで自由に議論し、このようにして形成された40名の研究者ネットワークは、研究者にとって生涯の財産になるものと確信する。

### ③アドバイザー・ミーティング(本研究領域の独自の試み)

研究を終了する最終年度にあたる研究者を対象に領域会議以外にも様々な会議やミーティングを開催するため、開催時期を終了半年前の9月に設定した。領域会議に続き、研究者を除いたアドバイザー・ミーティングを開催し、領域アドバイザーの先生方より領域会議の発表や質疑応答を聞いていただいた上での様々なコメントをいただいた。いくつかの試みを行ったが、平成25年度では、領域会議中に各研究者の発表や質疑応答に対するコメントを、その場でノートPCにより作成していただいた。それらのコメントを休憩中に取り纏め、アドバイザー・ミーティングではプロジェクターで各研究者に対するコメントを一覧にして表示しながら、進捗状況や今後の方針などについて意見を伺った。ミーティングでは録音し、後日文字起こしをおこなって、領域アドバイザーの先生がたに配布した。いつものことであるが、同じ発表を聞いた上での所感であるが、聞く側の専門分野によってずいぶん異なった。

さらに、平成25年度の研究報告会では、3人の外国人領域運営アドバイザーに参加を得て、研究報告会中に各発表に対するコメントや評価を書きいただき、外国人アドバイザー・ミーティングを開催した。各研究者一人一人について順次、書き込んだコメントをもとに、さらに口答で所感を述べていただいた。発表した14名に対する所感を伺うのに約2時間を要した。一人あたり10分弱である。最終年度の平成26年9月に開催した第12回領域会議の際には、領域会議終了後にアドバイザー・ミーティングを開催し、本研究領域運営をはじめ日本における研究環境などについての幅広いご意見をいただいた。

### ④終了検討会(本研究領域の独自の試み)

平成23、24、25年度ともに、研究が終了する半年前に開催した。開催趣旨は、終了半年前において、残りの半年の間に何に集中して、何をやり遂げたいのか、何ををもって「さきがけ」た、と言うのか、などについて各研究者より発表してもらい、とくに担当アドバイザーからのコメントをいただいた。平成23年度は、この検討会を単独で開催したが、24年度と25年度は、領域会議とアドバイザー・ミーティングとを合わせて開催した。例えば、平成25年度は奈良の東大寺総合文化センターの会議室にて、9月2日朝から3日

の午後の前半まで領域会議、3日午後後半にアドバイザー・ミーティング、4日に終了検討会を開催した。最終年度の平成26年は終了該当者が2名のみであったが、9月に開催した領域会議の際に開催した。

以上のようにさきがけ制度の特徴である領域会議を中心として、その機能を補完あるいは充実させる目的で研究交流会とアドバイザー・ミーティングを開催することにより、研究者間の交流を活発化させるとともに、研究総括や領域アドバイザーからの評価を研究者に伝えることにより研究者が自身の研究の重要性を再認識することに役立った。このような活動を通じて出来上がった研究者ネットワークとその信頼関係は、さきがけならではの財産と考えている。

#### ⑤外国人有識者会議(本研究領域の独自の試み)

最終年度の平成26年、9月には欧州の3名のトップサイエンティスト(Marie-Paule Pileni 教授、Keitaro Nakatani 教授、Thomas Ebbessen 教授)、10月には米国の3名のトップサイエンティスト(Mostafa A. El-Sayed 教授、George C. Schatz 教授、Prashant V. Kamat 教授)と2人の若手教授(Christy Landes 助教、Stephan Link 准教授)ら欧米の外国人有識者と、さきがけ研究者40人の研究成果について発表と意見交換を行った。本会議の結果を踏まえて、本報告書の各研究者の評価を見直し、本報告書をまとめた。

選定した有識者8名の所属、役職及び専門分野は以下の通りである。

氏名	所属機関、役職	専門分野
Marie-Paule Pileni	ポール&マリー・キューリー大学 教授	ナノ物質の合成と物性
Keitaro Nakatani	カシヤン高等師範学校 教授	有機非線形光学材料、ナノ粒子のバイオ応用
Thomas Ebbessen	ストラスブルグ大学 教授	分子光学材料、ナノオプティクス
Prof. Mostafa A. El-Sayed	ジョージア工科大学 教授	分子動力学理論、プラズモニクス理論
George C. Schatz	ノースウエスタン大学 教授	化学・物理学・生物学の学際領域
Prashant V. Kamat	ノートルダム大学 教授	太陽エネルギー変換、ナノクラスター
Stephan Link	ライス大学 准教授	プラズモニクス、ナノフォトニクス
Christy Landes	ライス大学 助教	単一分子蛍光、一分子細胞計測



### (3) 広報活動

様々な機会を捉えて広報活動をおこなった。以下に代表的な活動について紹介する。

#### ①ホームページ

本研究領域のホームページを立ち上げ、研究者と研究課題を紹介するとともに、日頃より受賞やプレスリリース、会合などのお知らせを掲載した。研究報告会では、このホームページ経由で参加申し込みを受け付け、プログラムをかねたチラシの PDF 版をダウンロードできるようにした。さらに、研究者の論文を紹介するため研究者の研究成果ページに掲載した。この領域ホームページは事務所で仕様をまとめ、業者に依頼して作成した。業者からの納品時に日頃のアップデート時の更新方法についてマニュアルを納品してもらい、かつ実際の更新作業の実習を受けた。これにより日頃のホームページのアップデートはすべて事務所でおこなうことができた。

#### ②研究報告会

研究報告会は、3年型の研究者が研究を終了する3月に平成23、24、25年度すべて東京大学の施設(山上会館、一条ホール)で開催した。研究報告会開催にあたっては、プログラムをかねた日本語と英語のチラシを準備し、多数の研究機関・企業等へ案内を送った(平成25年度実績:340通)。発表内容が多岐にわたるため外部からの参加者は少なめで毎回約30名である。しかし、大多数が企業からの参加者で、企業にとって情報収集には有益な報告会とも判断できる。各研究者の発表における座長は担当アドバイザーにお願いした。研究者の研究内容を十二分にご存知の担当アドバイザーによる座長は、研究者の紹介や質疑応答時のコメントなどでこれに勝るものはない、という運営となった。さらに、報告会で発表する研究者も含め、研究者全員にポスター発表を行い、会場では質問できなかった参加者に対応するとともに、研究者間の交流の場としても活用した。

#### ③様々な合同シンポジウム

##### ・光拠点、CREST、さきがけの合同シンポジウム

文部科学省「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)」とCREST研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開(光展開)」と本研究領域「光の利用と物質材料・生命機能(光の利用)」の3つの光科学技術の研究開発プロジェクトが三位一体で、国主導により推進されてきた。これらの活動の広報として毎年1回程度シンポジウムを開催してきた。本研究領域では、領域活動の進展に合わせ、当初は研究総括、技術参事による領域紹介、その後は本研究領域を代表する研究者の口答発表や多くの研究者によるポスター発表などを通じて広報に努めた。以下は平成21年の第1回から平成26年の第7回までの文部科学省「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」シンポジウムの概要である。

第1回は、平成21年1月23日(金)東京大学の本郷キャンパス・小柴ホールにて開催され、増原研究総括が「さきがけ「光の利用と物質材料・生命機能」について」と題して講演を行った。

第2回は、平成22年2月2日(火)大阪・千里ライフサイエンスセンターにて開催され、中桐技術参事が「さきがけ『光の利用と物質材料・生命機能』の活動状況」と題して講演を行った。

第3回は、平成23年1月10日(月)電気通信大学にて開催され、深港豪研究者(一期生)が「単一分子蛍光の光制御」と題して講演を行った。

第4回は、平成23年11月14日(月)名古屋キャッスルプラザホテルにて開催され、本研究領域からは27名の研究者がポスター発表を行った。

第5回は、平成25年1月11日(金)日本未来館にて開催され、本研究領域からは19名の研究者がポスター発表を行った。

第6回は、平成25年6月30日(日)国立京都国際会館にて開催され、玉作賢治研究者(二期生)が「Nonlinear Optics in the Hard X-ray Region」と題して講演を行った。

第7回は、平成26年10月23日(木)東京大学本郷キャンパスの伊藤国際学術センターにて開催され、小関泰之研究者(二期生)が「Controlling laser pulses for stain-free biomedical imaging」と題して講演を行った。

#### ・複数のさきがけ領域による合同シンポジウム

さきがけ研究領域合同国際シンポジウム「持続する社会を先導する光科学：環境・エネルギー・機能材料」を日本化学会(慶応大学：平成24年3月26日(月)、27日(火))で開催した。「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」、「光の利用と物質材料・生命機能」、「太陽光と光電変換機能」、「光エネルギーと物質変換」の順で各4研究領域から研究者、研究総括が講演を行った。各研究領域担当時間帯は、研究総括の「研究領域紹介」、外国からの招聘研究者による「特別講演」、研究者3名の口頭発表、で構成した。「光の利用」研究領域では、招聘研究者として外国人領域運営アドバイザーの一人であるシモン・ヴァイス UCLA 教授にお願いした。研究者の発表は口頭発表が3件、ポスター発表が15件、計18名が発表した。

#### ・CREST・さきがけ合同シンポジウム

平成25年6月20日(木)に、CREST研究領域「光展開」と本研究領域「光の利用」の光科学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～」を東京大学弥生講堂・一条ホールで開催した。当研究領域からは、永井研究者、小関研究者、玉作研究者が講演を行った。一般参加者97名(参加申し込み150名)、参加者の内訳(大学23名、企業62名、団体12名)と盛況で、多くの、とくに民間企業の方に研究者の研究内容を知っていただく機会となった。また、このシンポジウムでは、

奈良先端大の大門寛教授には2台のプロジェクターによる3次元表示(偏光型)を使っての特別講演をしていただいた。その講演内容の一部は大門教授のCREST研究領域「光展開」の成果とのことであった。平成26年6月27日にも同じく東京大学弥生講堂・一条ホールにて、光科学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II～」を開催した。企業からの参加者を中心に100名を超す参加があり、2回目も盛況であった。このシンポジウムでは、光拠点プログラムディレクター(PD)で光産業創成大学院大学の加藤義章学長に特別講演として光拠点プログラムを紹介していただいた。

・台湾の中央研究院との合同シンポジウム

平成23年5月26日(木)～27日(金)、台湾の中央研究院において、本研究領域「光の利用」との合同シンポジウムを開催した。シンポジウム開催にあたり、JST側からは石田秋生上席主任調査員がJSTの活動を紹介し、増原研究総括が本シンポジウムの趣旨説明をして開会となった。本研究領域からは14名が口答発表、全員がポスター発表を行った。また、熊野領域アドバイザーと宮脇領域アドバイザーのお二人には座長を務めていただいた。台湾の研究者約100名を含む約160名の参加を得て、盛況なシンポジウムとなった。

## 7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況

本研究領域の大きな特徴はその領域名に「光の利用」とあるように、文字通りありとあらゆる分野の「光の利用」に対する提案があり、多様な分野の提案40件を採用して研究を実施してきた。助走を始めるための実験室を確保する研究者から、まさに飛躍しようとする研究者まで、研究のフェーズにおいても多様であった。しかし、各研究者は共通して真摯に各自の研究課題に取り組んできた。ここにこの状況を踏まえ、40名の研究成果を「研究領域のねらいに対する成果」と、「研究領域のねらいを達成し新しい研究ストリームを予期させる成果」とに分け、さらにそれぞれに対して「原子、イオン、光の閉じ込めと波動関数、量子状態の観測制御」、「新しい光源開発と物質の光計測制御」、「タンパク質、細胞の光計測と光制御」「医学、環境、食糧に貢献する光科学技術」の4つに分け、以下に成果を記載する。

なお、以下における、研究者の所属・役職は平成27年1月現在のものである。

### (1) 研究領域のねらいに対する成果

#### ①原子、イオン、光の閉じ込めと波動関数、量子状態の観測制御に関する成果

研究課題名：「プラズモニック物質の波動関数の光制御とその応用」

井村 孝平 研究者 (一期生) 早稲田大学 教授

貴金属ナノ構造は、光により自由電子の集団運動が励起されることからプラズモニック物質と呼ばれており、その特異な光電子特性からさまざまな応用が期待できる先進材料である。井村研究者は、プラズモニック物質の機能を光照射によりアクティブに制御することを目標とした。これは、新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。

井村研究者は、プラズモンの寿命程度の高い時間分解能をもつ近接場光学顕微鏡の開発を行うことにより、最高レベルの空間分解能と時間分解能を得た。開発した装置を用いて、ワイヤ型や円盤型のナノ構造体におけるプラズモン波動関数を観察した結果、同様な形状(マクロな大きさ)に誘起される機械的振動モードに類似していることを明らかにした。また、プラズモニック物質の二光子励起過程を明らかにするとともに、その近接分子からのラマン散乱強度とプラズモンの寿命との相関を見出した。さらに、励起パルス光の波形制御により、プラズモンにより生成される光電場の空間分布を変化させることに成功した。

井村研究者は、本研究課題を分子科学研究所の助教時に開始し、その後、早稲田大学に准教授として赴任し、現在は教授として学生・院生を指導しながら活発に研究を行っている。さらに、平成 25 年には、プラズモンのシンポジウム“Symposium on Plasmon-based Chemistry and Physics”を雲林院研究者(二期生)と共に企画してベルギーのルーバンで開催した。また、本研究課題の研究が認められ、宮坂博教授(大阪大学大学院基礎工学研究科)が領域代表の新学術領域「高次複合光応答分子システムの開拓と学理の構築」(平成 26~30 年度)の計画班に研究代表者として参加している。

現在、プラズモン共鳴の研究は、基礎から応用にわたりきわめて広範囲に展開されているが、井村研究者は、他にさきがけて光によるプラズモニック物質の波動関数を制御することを提案し実証に成功した。達成された「プラズモニック機能を波動関数によりアクティブに制御する」技術に基づき、独創的なナノ計測、反応制御へと展開していくことが期待できる。

### 研究課題名「量子相関光子による光化学反応制御」

岡 寿樹 研究者 (二期生) 新潟大学 准教授

光子間の量子論的性質「量子相関」や、「非局所的な量子相関」が示す「量子もつれ光子」についての研究が精力的に行われ、量子情報通信技術への応用が進められている。しかしながら、このような光の量子特性の化学反応に果たす役割や、化学反応制御への応用はいまだ未開拓分野である。これに対し岡研究者は、量子相関が化学反応の効率化に役立つかどうかを明らかにする「分子制御理論の構築」や、光合成における量子もつれの役割を明らかにする「量子論に基づく光化学反応場」と「エネルギー移動制御理論」の構築を目指した。岡研究者の提案は、新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので高いリスクではあるが果敢にトライアルすべき課題である。

とくに、量子相関の立場から光合成初期過程に取り組もうとするリスクな提案はさき

がけにふさわしいものと思われた。その結果、量子相関制御により 2 光子励起の高効率化や選択性向上が可能であることを明らかにした。さらに、光合成に関しては、エネルギー移動に量子もつれが存在し、高速なエネルギー移動に寄与していることを明らかにした。これは、Fleming ら世界の主流とは異なる、摂動論をもちいない光合成初期過程エネルギー移動過程の理論的説明に成功したことを意味するとともに、自然界の光プロセスに量子相関の立場から理解が必要であることを示す貴重な成果として評価される。

これは分子間エネルギー移動を説明する従来の Förster メカニズムを超える画期的な成果を示唆するものであり、今後の量子相関光の分子科学、分子技術への応用について新たな活用指針を提供することが期待できる。一人の理論屋が多くの先進的異分野研究者と必死でコミュニケーションする中から新しい手掛かりが生まれる、さきがけスタイルの成果と言える。今後、量子もつれ光によるエネルギー移動制御理論の構築や、様々な物理系での人工デバイス化の可能性などに対するさらなる研究の発展を期待する。

本研究課題の開始時はさきがけ専任研究者として大阪大学で研究活動を行っていたが、本研究課題終了前に新潟大学に准教授として赴任し、現在、独立して 7 名の学生・院生を指導しながら研究体制を整えた。今後、「定説」にさらなる挑戦をする研究を推進するものと期待できる。

#### 研究課題名「フェムト秒光波制御による超高速コヒーレントスピン操作」

佐藤 琢哉 研究者 (三期生) 九州大学 准教授

物性研究にフェムト秒光パルスが広く使われ始めているが、固体の磁性研究に用いられた例は少なかった。これに対し、佐藤研究者は、時間的に整形されたねじれ偏光ダブルパルスを用いて反強磁性体の磁化を 3 次元的に自在に制御すること、空間的に整形された円偏光パルスを用いてフェリ磁性体中にスピン波を生成し、その伝播方向を制御することが目標であった。佐藤研究者の提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。

興味深い成果がいくつか得られているが、とくに優れた成果として以下を例示できる。佐藤研究者がポンプ光の集光レンズの前側焦点面に長方形の開口を挿入し、試料表面でのスポット形状を楕円形にしたパルス光を照射したところ、全く新しい現象が見出された。すなわち、楕円の長軸が印加磁場に平行・垂直のとき、スピン波は磁場に対して垂直・平行方向に伝播する様子を動画として捉え、指向性をもったスピン波の発生を捉えることに成功した。この結果を纏め平成 24 年 9 月、Nature Photonics に論文を発表した。この論文では、Nature Photonics から取材を受け、「Spin-Wave Manipulation」というタイトルで論文と同じ号に実験室での著者らの写真とともに紹介された。この論文発表の反響は大きく、発表後の 1 年間に内外それぞれ 5 件程度の招待講演の依頼があり、これらの招待講演の旅費を特別に増額する必要も生じた。また、同時に「光パルス照射で磁気波の発生と伝播制御に成功」というタイトルでプレス発表を行った。さらに、本研究課題終了後にも Nature

Photonics に論文を発表し、同時に「光の任意の偏光状態を磁性体に書き込み・読み出すことに成功」と題してプレス発表を行った。このように本研究課題の成果で Nature Photonics の2つの論文を発表し、2つのプレス発表を行ったように、この分野をリードしている。

これらの成果は、スピン波伝搬を光で見てみたいというチャレンジ精神が、工夫と根気のいる観察を成功させ、新しい実験物理を拓くことにつながったものと考えられる。学術的な面白さを追求しながらも、新しい産業や既存産業の高度化につながるものが無いか、多様な価値の掘り起しができないかなどにも配慮したトライアルの成果であり、現在も様々なアイデアを温めており、今後の展開が多いに期待できる。

### 研究課題名「単一イオンと単一光子間の量子インターフェースの実現」

高橋 優樹 研究者 (三期生) 英国・サセックス大学 博士研究員

イオンと光子の相互作用の大きさは、イオンを光共振器に閉じ込めるとことで大きく増幅し、ある条件下では単一イオンと単一光子の相互作用の大きな強結合状態が起こる。このような物理系は、単なる学術的興味のみならず、量子情報ネットワークの基幹デバイスとして、あるいは新奇な量子光源または精密計測応用などの観点からも重要である。高橋研究者のアイデアは新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたものであり、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。これを実現するためには光共振器のミラー間の間隔を狭め、共振器の体積をできるだけ小さくすることである。高橋研究者は、光ファイバーを用いた新しい光共振器とそれと一体化した新たなデザインのイオントラップである「光ファイバー共振器一体型イオントラップ」を試作し、その動作実証を行った。装置の立ち上げ、とくにファイバー端面の加工方法の確立に時間を費やし、最後の数ヶ月で実証実験に成功した。立ち上げた装置で単一イオンがトラップできることを論文で発表するとともに、さらに本研究課題終了後には、ファイバー端面の加工方法についても論文を発表した。初期の目標達成にむけて重要な一步を踏み出したといえる。

### 研究課題名「連続発振原子波レーザーの開発と微細加工技術への応用」

岸本 哲夫 研究者 (三期生) 電気通信大学 准教授

レーザー光を用いて運動している原子を減速・冷却し、多数原子のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)生成が実現される。この方法は、様々な量子物理現象の研究に用いられてきたが、その生成にはいくつもの工程を切り替える必要があり、また用いられる冷却手法は適用できる原子種も限られていた。これに対し岸本研究者は、すべての工程を光学的手法とし、BECを連続的に実現する手法を提案した。この提案は、新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。岸本研究者は、各工程の検証を実験的に一つ一つ行い、それらの可能性を実証し、各工程を組み合わせることにより、連続的に BEC 原子集団の供給ができることを示した。これは新しいレーザーすなわち原子波レーザーの実現に道を開いた事になる。これにより必要な要素技術の開発や新しい

計画設定も可能となった。

#### **研究課題名「凝縮系波動関数の時空間マニピュレーションとイメージング」**

香月 浩之 研究者（三期生） 奈良先端科学技術大学院大学 准教授

香月研究者は、孤立分子系などを対象としたコヒーレント制御を永年行ってきた。本研究課題では、固体凝縮系中での波動関数を、光により時間空間の二次元において制御し、生成される波動関数をイメージングすることを提案した。この提案は新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。凝集系波動関数が制御できれば、対象とする系の様々な物理・化学的性質を制御することにつながるものと判断できる。研究期間中に異動があり、新たに閉サイクル冷凍機をベースとした光学クライオスタット系を作製し、それまでの経験を生かした装置を立ち上げる事ができた。この装置を使って、固体パラ水素結晶を作製し、まず空間変調を掛けた光パルスより二次元的な波動関数の分布を結晶内に生成し、その分布をプローブ光の散乱イメージとして測定できることを確認した。異動に伴う、装置の再構築に時間を要したが、現在固体パラ水素から有機分子結晶などへと初期の提案に沿って研究対象を広げつつある。

#### **研究課題名「磁気光学効果を利用した光の伝搬特性制御」**

東海林 篤 研究者（三期生） 山梨大学 准教授

光で磁場、電場を制御する研究は多々あるが、東海林研究者の磁場で光を制御する提案はこれまでほとんど報告がなかった。この提案は新しい光科学の概念と方法論の提案をめざすもので、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。東海林研究者の着眼点は、誘電率テンソルの非対角成分の実数部を積極的に活用することである。この非対角成分の実数部は、光を吸収する効果となることから、これまであまり着目されてこなかった。しかし光の波長と同程度の大きさの微小構造体においてこの実数部は、光によって物質内部に誘起される分極・光誘起分極の向きを変化させ、入射光とは異なる方位へ光を散乱させるという特異な効果をもたらす。この実証実験を行うために2次元の磁性フォトニック結晶を試作し、実際に期待される効果が実現することを確認した。種々の実験的工夫を凝らし、初期の考えを実証することに成功してアイデア実現の一里塚とすることに成功した。2次元の磁性フォトニック結晶の作製には、物質・材料研究機構の「NIMS ナノテクノロジープラットフォーム」の技術支援を利用した。

#### **研究課題名「転送光学に基礎をおく超解像顕微鏡とメゾ機構のその場観察」**

岩長 祐伸 研究者（三期生） 物質・材料研究機構 主任研究員

超解像顕微鏡の技術開発と応用展開は盛んになっていたが(2008年当時)、岩長研究者は世界の主流の研究と全く別の角度からの超解像顕微鏡の開発とそれによる動的観察を提案した。すなわち、メタマテリアルを活用することにより回折限界以下の分解能で観察でき

る光学顕微鏡の開発をめざした。新しい光科学の概念と方法論の提案であり、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。提案の最重要点の一つは絶縁体と金属膜からなる多層膜の半円球状レンズの作製である。使用する光の波長に対して最適化した多層膜を設計し、様々な困難を伴ったが、分解などの評価に耐えうるレンズの作製に成功して分解能を評価した。その結果、作製した多層膜レンズと通常の光学顕微鏡との組み合わせで、約 70nm(波長の 5.7 分の 11)の分解能が得られる事を示した。また、多層膜レンズを 2 次元に配列する事で、観察領域の制限を解決できる事も示した。得られた成果は、本研究課題終了後に論文にて発表した。

## ②新しい光源開発と物質の光計測制御に関する成果

### 研究課題名「非振器位相整合非線形光学の開拓と新光源への応用」

財津 慎一 研究者 (二期生) 九州大学 准教授

非線形光学にもとづく光源開発はこれまでも活発に行われてきたが、今後は物質材料を積極的に制御することにより、さらに新しい可能性が開かれると考えられる。財津研究者の提案は、群速度分散が厳密に制御された光共振器、「分散補償型高フィネス共振器」による新しい光源開発をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。この光源装置自体が新規共振器内非線形・量子光学的現象の観測、および、それらのデバイス・光源・計測法としての新しい応用が期待できる。共振器に充填する気体の正の分散と、負の分散を持つ共振器鏡とにより、分散を打ち消すように設計した「分散補償型高フィネス共振器」を提案し、「位相整合条件」を満たした非線形光学により、最も周波数の高い連続発振光波変調器や最も繰り返し周波数の高い超短光パルス列が得られることを実証した。さらに、共振器内の極微量分子を検出することが可能な「共振器増強位相整合ラマン分光法」を試み、従来法に比べ 1000 倍もの高い感度が得られる事を示した。

### 研究課題名「微小液滴と超短光パルスの構造制御による超広帯域光変換」

畑中 耕治 研究者 (二期生) 台湾中央研究院 副研究員

高強度レーザーパルスと液体や固体凝縮系との相互作用では、多様な非線形過程が関与しており、多くの研究者にとって興味深い研究対象である。畑中研究者の提案は、フェムト秒レーザーパルスを金ナノコロイド溶液に照射することにより、「近赤外パルス光→電子→パルス X 線/THz 波」の高次非線形過程に関わる超広帯域光変換を実現するものであった。この新しい光源開発をめざした提案は成功すれば影響力ある課題である。立ち上げた装置を用いて、形状やサイズの異なる金ナノ微粒子を含む金ナノコロイド液滴試料に対し、パルス幅内の周波数変化を制御したフェムト秒レーザーパルスを照射し、実際に X 線から THz 光までの超広帯域の電磁波を発生させた。同量の金を含む場合、金イオン溶液に比べ金ナノコロイド溶液をレーザー照射すると、X 線発生強度が 3 桁近くも高いことを示したが、コロイドのサイズや形状には大きな依存性は見られなかった。一方、照射するレーザーパル



ス幅内の周波数変調により発生する X 線を制御できる事も見いだしており、X 線から THz 光までの高帯域のパルス光源を開発するというアイデアの基本的可能性を実証した。

#### **研究課題名「真空紫外域の低次数高調波による超高速分光」**

足立 俊輔 研究者（二期生） 京都大学 准教授

レーザー研究では、より短波長、より短パルスを求めて、世界中の研究グループが開発競争を行っている。物質材料研究の視点からみると、必要な波長を自由に発振し、自らの研究室に置いて簡便に使えるレーザー光源の開発は最重要と考えられる。足立研究者のデスクトップ型短波長超短パルスレーザー光源開発の提案は、新しい光源開発をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。足立研究者は、これまでのレーザー開発経験を活かし、この課題に対するソリューションを探索した結果、波長 810nm のレーザー光を基本波とし、結晶による 3 次波、さらにクリプトンガスによる 3 次高調波、と基本波の 9 次高調波に相当する波長 90nm のみを、50fs パルス巾で、しかも高効率で発生させることに成功した。レーザー光源の利用者である一期生の須藤研究者や他の研究者との共同研究を開始できたことは、開発された光源の有用性を示すものであり、この開発した光源が分光研究に多大な貢献を果たすことを期待する。

#### **研究課題名「高強度レーザーによる超多価イオン生成と新規化学反応の開拓」**

八ツ橋 知幸 研究者（二期生） 大阪市立大学 教授

超多価イオンは、未知の化学反応を誘起できる可能性がある新規活性種である。高強度レーザー照射により、物質から瞬時に多数の電子を脱離させ、超多価状態を創り出す事ができる。八ツ橋研究者の提案は、様々な超多価イオンの生成と、生成した方向性を持つ高エネルギー多価イオンによる新規な化学反応の開拓である。新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。価数の大きな超多価分子イオンを生成するため、照射レーザーの波長や超多価イオン生成に有利と思われる分子の選択など、様々な試みを検討した。その結果の一つとして、4 原子分子の 4 価の多価イオンが安定して存在することを見いだした。少数原子の分子であることから理論的な検討も行うことができ、その安定性を理論的に説明する事にも成功した。その他にも、種々の多価イオンの生成に成功した。当初の目的であった多価イオンによる新規化学反応の開拓については、本研究課題終了後の課題として残された。

#### **研究課題名「単一分子蛍光計測で探るキラリティーの本質」**

深港 豪 研究者（一期生） 北海道大学 助教

分子のキラリティーの測定と分子構造との相関は化学研究者にとって歴史的に重要な課題の一つであり、近年は単一分子キラリ計測が注目を集めている。深港研究者は、単一分子蛍光計測を応用し、円偏光励起単一分子蛍光検出および単一分子円偏光蛍光検出により

単一分子のキラリティーを直接測定し、キラリティーの起源を検討するという基本的な問題に光測定を用いるという提案である。新しい「光の利用」をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。アーティファクトの影響がほとんどない蛍光検出円二色性(FDCD)計測系を構築する一方、優れた蛍光特性と大きなキラル応答を示す蛍光性キラル分子を合成した。光学分割した蛍光性キラル分子を高分子媒体中に固定し、単一分子 FDCD 計測を行った結果、同一のキラル分子を計測しているにも関わらず、分子毎に大小・正負と異なる幅広い分布をもったキラル応答を示し、その分布は各異性体間で鏡像の関係となることを見いだした。この分布はおもに薄膜中の分子配向の違いによって生じることが明らかとなり、理論的な解析によっても説明することができた。この成果は、応用範囲の広い高分子フィルムにおけるキラリティーの化学的起源を明らかにしたことになるものと評価できる。

#### 研究課題名「金属ナノ粒子配列におけるプラズモン特性の分子制御」

江口 美陽 研究者 (三期生) 物質・材料研究機構 主任研究員

金属微粒子に光を照射すると局在表面プラズモンが誘起され、電子の集団振動によりナノ粒子表面には増強光電場が発生することにより、表面増強ラマン散乱・蛍光増強など特異な現象が観察されてきた。江口研究者は、表面が特定の結晶面からなる金属単結晶微粒子に分子を吸着させることにより局在表面プラズモンがどのような影響を受けるかを明らかにして応用することを提案した。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力がある課題である。「構造制御された金ナノ粒子の合成」と「色素分子の配列制御」の二つの技術を駆使し、局在表面プラズモンと分子内電子の動きを共鳴的に結合させることに取り組んだ結果、層状ケイ酸塩を介した立方体金属ナノ粒子と色素分子の複合化した系において、消失スペクトルに明確な分裂が観察された。この観察された分裂は強結合によるものであると考えられる。単量体の色素を用いた強結合が観察されたことを意味する。さらに、層状ケイ酸塩を介した金属ナノ粒子—色素複合体においても微弱ながらスペクトル分裂を確認した。この成果は、プラズモン特性の分子制御につながるものと期待できる。共同研究にも積極的に取り組みその成果は論文にもなっているが、とくに高木研究者(一期生)との共同研究により飛躍の糸口をつかんだ。

#### 研究課題名「時空間波形制御技術の開発と微小空間領域での非線形分光計測への応用」

太田 薫 研究者 (一期生) 神戸大学 特任准教授

波面補償光学は天体望遠鏡や眼底検査などに実用化され、化学・生物などへ応用され始めている。散乱体の透過、反射条件下ではレーザー光の時空間特性は大きく変化するため、波面制御は極めて困難であり、計測等への応用はこれからという状況であった。時間と空間の両方を自在に制御する技術は未開拓領域として残されていることから、太田研究者の提案は、超短パルス光の振幅と位相を時間、空間両領域で同時に波形制御する新規計測法

の開発により新しい「光の利用」を目指すもので、成功すれば影響力がある課題である。具体的には、太田研究者は超短パルス光の振幅と位相を時間、空間両領域で同時に波形制御する新規手法を開発し、3次非線形分光法と融合することにより、微小空間領域で新しい分光計測を行うことを目標とした。組み上げたシステムを用いて、散乱体を通じた散乱光を位相制御により任意の場所に集光できることを実証したことにより、研究はまだ道半ばであるが、手がかりを得つつあり、今後の大いなる発展に期待したい。

### ③タンパク質、細胞の光計測と光制御に関する成果

#### 研究課題名 「がんの可視化と光線治療に向けた光分解性バイモーダルナノパーティクルの開発」

Vasudevan Pillai Biju(ビジュ) 研究者 (三期生) 産業技術総合研究所 主任研究員

X線のような放射線治療は放射線障害による健康リスクが問題となるため、磁場や低出力レーザーを用いた磁気共鳴画像(MRI)・蛍光イメージング法と光線療法に関心が集まってきた。結果として、蛍光ナノ粒子、MRI造影剤や光線療法薬剤はがんの検出・治療のための治療的診断法用として広く研究が行われているが、既存のナノ粒子や薬剤はそのサイズの大きさのため生体器官への蓄積が問題となっている。この問題を解決するためビジュ研究者は、蛍光・MRIイメージング両方に使用できるバイモーダル造影剤として、新規の無毒性かつ光分解可能なナノ粒子の開発を提案した。この提案は、新しい「光の利用」をめざした成功すれば影響力ある課題である。

ビジュ研究者の開発したナノ粒子は光照射によって分解・断片化して尿により排泄されるため、生体器官に蓄積されてしまう問題を解決できることが示された。さらに、がん細胞やマウスのバイモーダルイメージを得るだけでなく、光線力学的療法に有用な一重項酸素の産生をも可能にした。このような光分解ナノ粒子は、薬剤送達・遺伝子の制御やがん細胞の検出・イメージング、そしてがん細胞の画像誘導温熱療法・光線療法への候補物質となることが見込まれる。

広く認識されている課題に果敢に挑戦し、非常に活発に研究活動を行ってきたことは、多くの論文などのアウトプットからも明らかである。さらに、使用後に光照射により分解して尿中に排出できるバイモーダル造影剤の開発に成功した事は、この分野に新しい概念を提供した事になる。新しい可能性を示す事は、他の研究者の参入を促し、この分野の研究活動が活発化する。まさに「さきがけ」研究らしい研究活動であった。これらの研究活動が認められ、2010年にAsian and Oceanian Photochemistry Associationから“Asian and Oceanian Photochemistry Award for young scientists”を、2011年には光化学協会から光化学協会奨励賞を受賞した。

外国人として本研究領域に採用されたビジュ研究者とスミス研究者、さらには4名の外国人領域運営アドバイザーの参加により領域会議を英語で行うことが自然に受け入れられ、参加者全員が英語で議論する機会を多く持つことができた。とくにビジュ研究者は活発な

議論に多大な寄与があった。

#### 研究課題名「光応答性核酸による単一細胞内での光遺伝子制御」

小笠原 慎治 研究者 (三期生) 北海道大学 助教

細胞内では、必要に応じて特定のタンパク質が特定の場所や時間、さらには周期的に発現する。このような生命活動のメカニズムを解明するには、細胞内のタンパク質発現を時間的空間的に操作する手段の開発が必要である。これに対して、小笠原研究者は光の照射により、タンパク質発現を自由にコントロールできる手法の開発を試みた。この研究提案は新しい「光の利用」をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。

タンパク質の発現は翻訳開始因子(eIF4E)が mRNA の 5' 末端にある 7-メチルグアノシン(cap)に結合することから始まる。eIF4E と結合できないトランス体と結合できるシス体があるが、波長の異なるレーザー光を照射することによりトランス体からシス体へ、またその逆へと可逆的に変化させることができる cap 分子の開発に成功した。この cap 分子により、蛍光タンパク質の発現量を周期的に制御することや、細胞内の特定の場所でのみ発現させることが光制御により可能であることを実証した。

光遺伝学的手法ではその応用には限界がある。すなわち、DNA に組み込むと翻訳され続けるが、mRNA を注入する方法では一定時間後に分解されてなくなるのが有利な点である。mRNA からタンパク質作製を ON-OFF できる小笠原研究者の手法はこれまでに例のないもので、そのアイデアの初めての实証でもある。本研究課題の終了後には、光を照射している間のみ神経細胞内に導入した mRNA によりタンパクが作られて軸索が成長し、光照射を OFF にすると伸びていた軸索がもとのように縮小する様子の観察に成功した。さまざまな試行錯誤の後に得た成果である。

応答波長の改善など様々な解決すべき課題はあるものの、他に例のない生きた細胞でタンパク質発現の可逆的光制御法を提案し実証したことは、「さきがけ」研究にふさわしいチャレンジの成果であったと考えており、今後の生命科学研究に寄与できる手法として発展させていくことが期待できる。

#### 研究課題名「不凍タンパク質作用発現機構の解明を目指したその場光観察」

佐崎 元 研究者 (一期生) 北海道大学低温科学研究所 教授

北極圏など極寒地域の海水は塩分を含んでいるため零下となるが、このような環境下においても魚類は生息している。体内の水分が凍結するのを防いでいるのは、不凍タンパクと呼ばれる生体高分子であることがわかっており、このような機能を用いて、食品や移植用臓器の保存に用いられる試みが始まっている。しかしながら、細胞内の水分が凍ることを妨げているメカニズムとしていくつかのモデルが提唱されているが、いまだ解明されていない。このような状況下で、佐崎研究者は氷の結晶成長と不凍タンパクとの関係を実験的に明らかにすることを目的に、光学顕微鏡で氷の結晶成長を観察することを目指した。

この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。

結晶成長は結晶面で一層ずつ積み上がって成長するものと推測される。氷の場合水の分子の大きさを一層ずつ成長するため、光学顕微鏡の分解能としてはオングストローム(0.1 nm)が必要となる。単に高分解能の問題のみならず、水から氷が成長する場合、その界面は水と氷であり、共に水分子から構成されるため屈折率にほとんど差が無く、界面での光の反射率が極度に低くなる。あえてこのような困難が予想される観察手法の開発に挑んだ理由は、様々な生体分子の結晶成長の観察手法としての将来性を佐崎研究者が確認確信したからである。

まず、水分子 1 層が観察できるレベルの分解能が得られるようになった段階で、屈折率の差が大きい気相・固相界面の観察を試みた。その結果、氷の結晶成長を示す水分子 1 層からなるステップの動的振る舞いを観察する事に成功した。この結果は、Proc. Nat. Acad. Sci. で論文を発表するとともに、プレス発表をおこなった。さらに、ゼロ度以下の温度で氷が溶解し、形状がことなる 2 種類の液体相が存在する現象を発見した。この結果も Proc. Nat. Acad. Sci. に論文として発表すると共に、プレス発表を行った。この 2 つめのプレスリリースに対する反響は大きく、確認できただけでも新聞などで 19 件取り上げられた。

さらに、当初の目的であった、不凍タンパクを含む液相と氷の液相・固相界面の観察を行った。その結果、蛍光色素で標識した不凍タンパクの位置を確認すると、不凍タンパク質が氷結晶の分子層の横方向への成長を阻害する事を見出した。今後の研究によって不凍タンパクが氷の成長を阻害するメカニズムの解明が期待されると共に、開発された高分解能光学顕微鏡がさまざまな分子の結晶成長の観察に利用されるものと期待される。外国人有識者会議においては優れた研究課題として注目された。

### 研究課題名「モジュールの組み合わせによる光機能蛋白質の創出」

増田 真二 研究者 (二期生) 東京工業大学 准教授

受光による光受容体蛋白質の構造変化は、別のタンパク質により認識され、情報が伝わり、最終的に具体的な機能をもった蛋白質の活性を調節する。この光情報伝達は、いくつかの蛋白質の部品(モジュール)の 組み合わせで多様化していることが知られている。増田研究者は各モジュールの機能を組み合わせることにより、任意の酵素活性と遺伝子発現を自在に制御できる技術の確立を目指した。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。

これらの成果の集大成として、PICCORO と名付けた光依存的転写因子制御法を開発し、具体的応用例として、ゼブラフィッシュの尻尾を形成する転写因子に適用して光の照射により尻尾の形成不全が起こることを示すことに成功した。この手法は、個体発生のどの段階にも応用可能で、転写因子の活性を光で制御することが可能となった。

この成果は、個体発生においてどの段階で何がどう働いて発生が制御されているかという発生学における 最も基本的な課題の解明に寄与できる手法を開発できたことを意味し

ている。外国人領域運営アドバイザーや研究者からも注目を集めており、本研究課題の目標の一つである光による個体発生の制御を実現したことは、新しい「光の利用」研究フィールドを開拓したものと高く評価できる。外国人有識者会議においては独創的な研究課題として注目された。

一般に植物の光制御の活用法としては食糧増産、バイオマスの生産などがあるが、増田研究者の成果の活用としては、もっとインテリジェントな応用展開が有望と思われる。たとえば季節、月ごと、毎週、毎日色が変わる花を咲かせることにより、オフィス、病院、老人ホーム、公共の場における雰囲気制御を考案、新しい表示、センサーを考え、ひいては健康、安全、安心につながる植物の応用を考える光技術という位置づけができる。

東京工業大学大学院・生命理工学研究科と東京工業大学・情報生命博士教育院が共催で生命理工国際シンポジウムを開催している。3rd Bioscience and Biotechnology International Symposium は平成 27 年 1 月 14 日に東京工業大学・すずかけ台キャンパスのすずかけホールで開催する。増田研究者はこの企画に携わっており、中川研究者(三期生)が招待講演する。これも本研究領域内の研究者間交流の成果である。

#### **研究課題名「哺乳類のUV感覚にせまる光センサー蛋白質の機能解明」**

小島 大輔 研究者 (三期生) 東京大学 講師

昆虫は紫外線(UV)で“見ている”ことが知られている。昆虫より高等動物である鳥類でも UV センサーを持っている事が分かっている。小島研究者は、新たな UV センサー蛋白質をマウスにおいて発見し、この UV センサーがヒトでも機能する可能性を見出していた。本研究課題では、この新規 UV センサー蛋白質がどのような生体機能に関与するかを調べることにより、哺乳類の UV 感覚の生理的役割を明らかにすることを提案した。この提案は新しい「光の利用」をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。

本研究課題では、この OPN5 遺伝子が人間にも存在し、試験管内での再構成実験により、ヒト光受容蛋白質 OPN5 が UV センサーとして機能することを明らかにした。また、マウスを用いた実験では、光受容蛋白質 OPN5 は、体表にある組織(網膜や耳介)のごく限られた細胞に存在することを実証した。一方、霊長類(ニホンザル)の OPN5 遺伝子の解析から、光センサー蛋白質をコードしない splicing variant mRNA の存在を見だし、現在は、その機能解明にむけて研究中である。

新たな発見が、新たな疑問を生み出す典型のような研究展開となった。これまで認識されていなかった霊長類の OPN5 遺伝子の発見と、その遺伝子のスプライシングにより作られる蛋白質のバリエーションはいったい何のためなのか、興味のつきない課題に遭遇して本研究課題の研究を終了した。本研究課題らしい研究展開であり、今後もバイオニアとしてこの研究領域を開拓していくものと期待される。

動物の光受容体が生理機能や行動に及ぼす研究は長い研究歴史があるが、最近、新たな知見が得られつつあり注目が集まっている。小島研究者は 2015 年 8 月 23 日から 28 日にポ

ーランドのクラコフで開催される ICCPB2015 (The 9<sup>th</sup> International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry) にシンポジウム “Photoreception regulating animal physiology and behavior” を Kristin Tessmar-Raible (Univ. Vienna, Austria) と共に提案し、採択された。この例が示すように、国際会議でも先導的に活動を行っている。

#### 研究課題名「生きた細胞内での生命機能分析用プローブのレーザーを用いたその場作成」

Nicholas Smith(スミス) 研究者 (二期生) 大阪大学 特任准教授

スミス研究者は以前、細胞内の金微粒子により細胞内部の分子を検出できることを示したが、細胞外部から導入する金微粒子を細胞内の所望の場所に誘導することは困難であった。これを解決するため、レーザー照射により生細胞の任意の場所に金微粒子を作製する着想を得た。この新しいナノ加工技術を用いて細胞内部の加工、細胞のより深い理解と正確な観察、さらには、細胞活性の光制御も可能にする手法の開発を目指すというユニークな提案である。新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。金イオンを含む分子を生きた細胞内に分散させ、波長 532nm の半導体レーザーを細胞内の任意の場所に照射し作製することを試み、実際に金微粒子を局所的に作製する事に成功した。今のところ細胞は死んでしまうが、この手法は細胞内部に様々なナノ構造物を作製できることを意味している。また作製した金微粒子からの表面増強ラマン散乱スペクトロの計測にも成功し、分析手法を検討した。得られた成果は、本研究課題終了後に Nature Communications に論文として発表した。

#### 研究課題名「光機能性量子ドットを用いた単一分子神経活動イメージング」

小阪田 泰子 研究者 (三期生) 大阪大学 助教

ナノ粒子を利用した生体イメージングは、生体分子の細胞内でのダイナミクスや動物レベルでの分子の可視化のツールとして期待されており、多くの関連研究が行われている。革新的光イメージング技術の開発に向けての新しい特性をもった光機能性ナノ粒子の開発という小阪田研究者の提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。小阪田研究者は、光によって発光を自在に制御できる光機能性ナノ粒子として、スイッチングの鍵となる分子であるジアルルエテンをドーピングした蛍光性ポリマーナノ粒子を合成した。このナノ粒子を用いることで、第一励起光による発光が第二の励起光による光異性化によって制御できることにより、培養した細胞レベルでの蛍光スイッチングが可能となった。また、硬 X 線を照射することで発光し生体適合性も高いナノ粒子として、イリジウム錯体をドーピングしたポリマーナノ粒子やタンパク質により内包された金クラスターを開発した。生体深部に照射できる X 線により、発光させるシンチレーションとして機能させるのみならず、ガスメディエーターを放出させるなどの様々な応用が期待され中川研究者(三期生)とアイデアを温めている。

#### ④医学、環境、食糧に貢献する光科学技術に関する成果

##### 研究課題名「光に依存した新規窒素固定酵素の創成」

藤田 祐一 研究者（一期生） 名古屋大学 准教授

ニトロゲナーゼは、窒素分子をアンモニアに変換する農業的に大変重要な酵素である。本研究課題は、クロロフィル生合成系の光に依存する酵素(光依存型プロトクロロフィリド還元酵素：LPOR)を改変することで、光に依存して反応する新規なニトロゲナーゼの創出を目指した。これが実現すると、窒素肥料が不要な作物を作り出せる可能性があり、大量の化石燃料を消費して作られる化学肥料の使用を減少させ、さらに二酸化炭素排出の減少にも寄与することが期待できる。藤田研究者の提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

LPOR と同じ反応を光に依存せずに誘起する暗所作動型プロトクロロフィリド還元酵素(DPOR)の立体構造を解明し、ニトロゲナーゼとの共通構造基盤を明らかにした。これにもとづき LPOR を構造鋳型とする新規な光依存型窒素固定酵素創成の可能性を指摘した。光依存性の構造基盤となる LPOR の分子内ループを除き還元酵素としての基本構造のみを残した不完全な LPOR 遺伝子に、ランダムな DNA 断片を挿入することで新たな LPOR 創成を目指した。その過程で、recJ 欠損株の利用によるラン藻の高効率形質転換系の確立、終止コドン排除した合成 DNA 断片の設計など新たな基盤技術を構築した。これにより、これまで大腸菌などの従属栄養生物に限られていた酵素選抜系に光合成生物の系が加わり、新規な光依存型酵素の創成に向け可能性を大きく広げることができた。

当初目的である「新規なニトロゲナーゼの創出」は達成できず、その一步を踏み出したばかりであるが、暗所作動型プロトクロロフィリド還元酵素の立体構造を明らかにし、他にさきがけて反応機構を予測するなど、大きな一步を達成した。

本研究課題を終了した平成 23 年に、JST の先端的低炭素化技術開発(ALCA)に対して提案した「有用光合成生物への窒素固定能移入が導く“窒素革命”」が採択され、研究を継続してきた。その結果、窒素固定能をもつシアノバクテリアから、窒素固定に必須の制御タンパク質を発見した。CnfR と名付けたこのタンパク質は、細胞が窒素不足のときに発現し、細胞内の酸素のレベルが充分低いことを感知して初めて、窒素固定遺伝子群の発現を誘導し、ニトロゲナーゼによる窒素固定を開始する役割を担う主要制御タンパク質であることを明らかにした。この成果を纏めた論文が Proc. Nat. Acad. Sci. で平成 26 年 4 月 22 日に公開された。同時にプレス発表を行い、読売新聞などで取り上げられた。まだ最終目的には至っていないが、その信念に基づく研究姿勢がこれらの成果を生んだものと思われ、学術的な貢献のみならず、その研究姿勢は「光の利用」研究領域の他の研究者への励みとなっている。

##### 研究課題名「広範な藻類のもつ転写因子型光受容体の機能解析とその応用」

高橋 文雄 研究者（二期生） 立命館大学 助教



植物は、太陽光を光合成に利用するのみならず、その効率化を行うための信号として利用している。さらに、形態を変化させたり、細胞内の小器官を移動させたりすることにも光を活用している。植物が、光を信号として受け取るのが光受容体で、藻類は陸上植物とは違った光受容体を持つ可能性が示唆されていたにも関わらず、その光受容体の実在は確認されていなかった。高橋文雄研究者は、2007年に藻類から新規青色光受容体発見し、オーレオクロムと名付けた。本研究課題の目的は、その作用機構を解明することである。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

本研究領域研究では、様々な藻類の青色光受容体オーレオクロムを単離し、それが DNA 結合能と光受容能を持ち合わせていることを明らかにした。そのオーレオクロムの構造変化をタンパク質レベルで確認し、光によって誘導もしくは減少する遺伝子群の特定を行った。また青色光受容体オーレオクロムを持つ藻類の光応答反応について、実験室内で用いられる方法を開発し、多くの光誘導現象を発見した。

最近、エネルギー、食料、環境問題に対して水性植物を活用しようとする研究が活発化している。これらはすべて水性植物の太陽光利用に基づいている。藻類を研究対象として、光受容タンパクの様々な機能を明らかにしたことは、藻類学のみならず植物の光生物学に大きな進展をもたらし、赤潮対策の糸口にもなる可能性があり、今後の研究進展が多いに望まれる。

赤潮は長い間研究されてきているが、発生のメカニズムが完全に理解されたわけではなく、毎年多大な被害がある。とくに日本は海産立国であり、この問題(赤潮)を解決する必要がある。赤潮藻類(シャットネラ)は黄色植物に属し、珪藻や昆布等と同じ仲間の藻類で、他の藻類が少なくなったときに大量に増殖し、光の条件(青)によって海面に上がることに よって赤潮が起こる。そこで、赤潮若手研究者(瀬戸内海区水産研究所：紫加田博士)との共同研究で、赤潮の光によって海面へ上昇する日周鉛直運動の解明に取り組んでいる。原理(遺伝子：光受容体)が明らかになれば、光を用いた赤潮撲滅への対処が可能になる可能性があり、新しい「光の利用」研究の展開として期待できる。

#### 研究課題名 「大気中および生体中の界面光反応のその場計測」

江波 進一 研究者 (三期生) 京都大学 特任准教授

地球温暖化や PM2.5 など、地球の気候変動や大気汚染物質による人体への影響に関心が集まっている。前者を理解する上で重要な反応は雲の形成過程で起こり、後者では肺の内部で起こる気体と液体の境界相での界面反応が鍵となる。このような化学反応においては、界面に生成する短寿命のラジカル種を直接その場で検出することが困難であることから、これまでほとんど研究が進んでいなかった。江波研究者は、この課題を解決するために新規質量分析法と光分解用レーザーを組み合わせた界面光反応のその場計測手法を開発して計測することを提案した。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば

影響力ある課題である。

開発された手法で得られる情報は、液体の表面部分厚さ 1nm 以下に存在する化学種のダイナミックな組成変化であり、それにより大気中や生体中での界面ラジカル反応のメカニズムを解明することに成功した。前者(大気中)の系では気候変動の鍵となる大気エアロゾルの気液界面に生成するペロキシラジカルを直接検出し、後者(生体中)の系ではオゾンやPM2.5を吸引したときに肺の表面で起こる界面活性タンパク質のラジカル酸化反応を直接測定した。得られた研究成果の一部は、平成26年1月10日に「水の界面で起こるフェントン反応のメカニズムを解明  $-Fe(IV)=O$  中間体の直接検出に成功」と題してプレス発表を行った。

今後は、interface/surface toxicology とも言うべき分野を目指して発展させていってもらいたい。この手法で取り扱うことのできる界面反応は、様々な身近なところで起こっている基本的で重要な化学反応である。江波研究者の主張するように、開発した手法は気象、環境、バイオ、ナノなどが様々に関わる学際的な研究への展開が期待でき、環境問題や人体に及ぼす影響などに対する基礎研究手段となるものと思われ、外国人有識者会議においても重要な研究課題として注目された。

#### 研究課題名「エアロゾル微小水滴のレーザー捕捉・顕微計測法の開発と展開」

石坂 昌司 研究者 (二期生) 広島大学 准教授

飛躍的なコンピューターの性能向上により、地球規模の気候シミュレーションの精度も向上してきた。しかしながら、気候変動への影響が最も大きいと言われる雲に関しては、雲粒の基本的な物理・化学測定法はいまだ確立されておらず、報告されているデータの信頼度の検討も必要である。これに対し、石坂研究者は雲粒に相当する水滴を一粒ずつレーザーで捕捉し、様々な物理・化学データを直接取得することを提案した。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたものであり、成功すれば影響力ある課題である。

その結果、捕捉した液滴一粒のサイズの他、ラマンスペクトル計測により液滴の温度や含まれる硫酸アンモニウムの濃度などが計測可能となった。以前の手法では、例えば温度は液滴周辺の温度が計測されていたが、本法では液滴自体の基本的な物理量や化学量がすべて光学的手法で計測できるようになったことになる。さらに、零下 100℃まで冷却できる実験装置を開発し、零度以下の過冷却状態の水滴が氷る凝固温度の硫酸アンモニウム濃度依存を得ることに成功した。

石坂研究者は平成22年にエアロゾル学会において「計測賞」を受賞した。本研究課題期間中に、北海道大学・助教から広島大学・准教授に赴任した。研究終了後、平成26年8月に開催された日本分析化学会第63年会において発表した内容は、「光ピンセットで雲をつかむ」というタイトルで学会よりプレス発表された。

すべての計測値が捕捉された水滴一粒から直接得たものであり、これまでの手法では得られない信頼度と新しい視点を提供する。粘性などさらなるパラメーターの計測にも取り

組んでいる。今後、単一の微小水滴レベルでの分光計測・解析する分析技術としてさらに発展させるとともに、気候変動の研究者と共同チームを組んで、雲の物理化学と単一水滴レベルの情報を関連させる研究を展開し、この分野における光技術のポテンシャルを示してくれることが期待できる。さらに、このような研究は、環境科学分野へレーザートラッピング化学を一般化することにも通じるものであり、今後の展開に注目したい。

#### 研究課題名「光による生命のダイナミズム・不均一性・確率性の可視化」

西村 智 研究者（一期生） 自治医科大学 教授

生きた動物で細胞・遺伝子を「見て」働きを「知る」技術を開発し、三大疾病の克服を目指すという西村研究者の光の医学への応用は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。高速・深部・高解像度での生体内イメージング技術を改良・開発し、新たな形態・機能プローブを適応することで、光を用いた遺伝子発現の生体内での可視化を実現しようとするものであった。活発で精力的な研究活動を行い、本研究課題期間中の平成 21 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。その後、平成 23 年に最先端・次世代研究開発支援プログラムに採用され本研究課題を中止した。現在は自治医科大学の教授として研究を続けている。

### (2) 研究領域のねらいを達成し新しい研究ストリームを予期させる成果

#### ①原子、イオン、光の閉じ込めと波動関数、量子状態の観測制御に関する成果

##### 研究課題名「原子位相ロックを用いた究極的時計レーザー安定度の追求」

志賀 信泰 研究者（二期生） 情報通信研究機構 研究員 5 年型大挑戦

通常、原子時計の周波数計測精度は測定時間  $\tau$  に対して  $\tau^{-1/2}$  に比例する。精度を上げるには長い計測時間が必要となる。これは、測定を繰り返すと平均値の偏差は測定回数  $N$  に対して  $N^{-1/2}$  に比例することに対応している。志賀研究者は、位相を定期的に測定してその情報をフィードバックする「原子位相ロック」という方法を提案した。この提案は新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

志賀研究者の手法が実現すれば、周波数の偏差を  $\tau^{-1}$  のスピードで改善することが可能になる。これは、測定を繰り返すと平均値の偏差は測定回数  $N$  に対して  $N^{-1}$  に比例することに対応している。志賀研究者は、本研究課題期間中に、着想を論文で発表し、実証実験に用いる装置開発にも成功して論文を発表、さらには実証実験を成功させて論文を発表するとともにプレス発表を行った。実証実験の準備を進めるうちに、当初の提案した「弱い測定」を用いる方式よりも、イオン群の位相を部分毎に測定していく方式の方が優れていることを見出し、この「部分測定」を用いて 3 回の連続的位相測定に成功した。

一期生を募集した平成 20 年度に初めて 5 年型が発足し、二期生を募集した平成 21 年度

から新たに大挑戦という制度が開始された。志賀研究者は、この制度による 5 年型大挑戦として採用した本研究領域でただ一人の研究者である。研究実施機関が情報通信研究機構で、原子時計に関する情報や技術にアクセスできる環境ではあるが、新しい着想を実験で実証するためには、実証実験を行う装置をゼロから開発する必要がある。着想が正しいかどうか、実証実験装置の開発に成功するかどうか、さらに実証実験に成功するかどうか、という 5 年型の大挑戦にふさわしい提案であると判断した。我が国の時計研究のレベルは高く JST の ERATO でも推進しているが、本研究はその時計研究に新しい方式を持ち込む仕事でありまさに大挑戦であった。その結果として、装置の開発過程で新たなアイデアの着想を得て実証実験に成功し、当初の目的を達成したことは高く評価できる。外国人有識者会議においては挑戦的な研究課題として非常に注目された。

本研究課題の最終年度、新たに発足したさきがけ研究領域「社会と調和した情報基盤技術の構築」研究総括：安浦 寛人(九州大学 理事・副学長)に、研究課題名「超分散型標準時を基盤とした時空間計測のクラウド化」を提案して採用された。これまでの「最新鋭の原子時計を作る」研究成果を社会実装へと導く助けにもなるものと考えられる。

#### 研究課題名「軟 X 線レーザーによる時間分解分子軌道イメージング」

新倉 弘倫 研究者 (一期生) 早稲田大学 准教授

アト秒のパルス幅を持つ軟 X 線(XUV)レーザーを用いた時間分解光電子分光法、および時間分解・分子軌道イメージング法を開発し、化学反応途中の分子における電子準位や分子軌道の空間分布の変化を実時間測定することを目指した。本研究課題は、新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。

高強度レーザーパルスを気相の原子や分子に照射すると、軟 X 線高次高調波が発生する。アト秒の 時間精度で赤外高強度レーザーパルス(基本波)の偏光方向を制御し、その関数として分子から発生した軟 X 線高次高調波の偏光方向を測定することで、 $\pi g$  対称性を持つ二酸化炭素分子の最高占有軌道など、様々な分子軌道の対称性と広がりを測定する方法を開発した。また分子からの高次高調波の偏光方向は、分子軌道の空間分布や位相に依存することから、その変化を追跡することで分子軌道の変化をアト秒精度で捉えることが出来ることを示した。

分子軌道の時間依存性を観測するための新しい時間分解分光法を提案し、実証したことは化学反応における分子軌道変化の直接測定に大きな一歩を踏み出したものと評価できる。本研究課題期間中に発表した論文をもとに平成 22 年 7 月 27 日に「分子中での電子の空間分布を測定する新たな方法を開発」と題してプレス発表を行った。さらに、平成 23 年 8 月 29 日にも「分子内の超高速の電子運動を測定」と題するプレス発表を行った。後者のプレス発表に対しては、朝日新聞から取材を受け、平成 23 年 10 月 10 日の朝日新聞科学欄で「電子の一瞬を切り取る光」と題する記事の中で紹介された。また、本研究課題終了後、新倉研究者のアト秒サイエンスへの研究活動が認められ、平成 24 年度文部科学大臣表彰科学技

術賞と平成 25 年度日本学術振興会賞を受賞した。本研究課題の申請時はポスドクであったが、研究期間中に准教授に登用された。

新倉研究者が直接測定に成功したように、アト秒科学では分子内の電子状態の時間変化等の研究が新しいサイエンスとなることが期待できる。時々刻々と変化する分子結合に関わっている電子状態を波動関数の観察によって直接調べることは、今後のレーザー化学の一つの潮流になるものと期待している。

### 研究課題名「光による熱の固有状態の創成と波動制御の実現」

是枝 聡肇 研究者（二期生）立命館大学 准教授

熱伝導は一般に拡散過程として認識されているが、波動として振る舞う事も古くから指摘されており、第 2 音波という名前もつけられている。しかし、その実験結果の報告もごく少数で、熱がコヒーレントな波動として伝搬するというような認識はなかった。是枝研究者は、「量子常誘電体」と呼ばれる物質に着目し、誘導ブリルアン散乱の手法を用いて、光で低温の量子常誘電体内部に熱の波動を光で励起することを試みることを本研究課題として提案した。新しい光科学の概念と方法論の提案をめざした提案で、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

是枝研究者は、高温超伝導体としてよく知られているチタン酸ストロンチウムをとりあげ、熱の波動の振動数(波長)を自由に制御できることまでを示した。このとき、誘起された熱の波動は、励起領域内で完全に位相を揃えて振動しており、「コヒーレントな熱の波動」が生成されたことを確認した。用いたチタン酸ストロンチウムはペロブスカイト構造と呼ばれる結晶構造を持つ物質群で、金属や絶縁体、さらには超伝導など様々な電気伝導特性、さらに、強誘電体、反強磁性などの様々な物性相を有し、それらの間の相転移が温度変化などにより誘起されることで長い間研究対象となっており、現在も大変注目を浴びている。このペロブスカイト構造で熱の波動を光で励起して観測できたことは大変興味深く、外国人有識者会議でも野心的な研究課題として注目された。相転移温度近辺での熱の波動励起には、未知の現象が起こる可能性もある。是枝研究者は、研究終了した平成 25 年 4 月に東北大学の助教から立命館大学の准教授に赴任し、学生を受け入れると共に即座に装置を立ち上げ、その年の秋の学会でさっそく学生たちと連名で研究発表を行った。

これまで第 2 音波が報告されていたのは 3 例のみで、極めて希な現象であると思われてきた。量子常誘電体で第 2 音波励起が確認できたことは、量子常誘電体と総称される物質群は勿論、同様のフォノン分枝を持つ他の多くの物質においても第 2 音波が励起できる可能性がある。そうすれば、より一般的な物理現象として捉えることが可能となり、熱も固有関数で記述でき、熱波動の共振器や熱レーザーの実現など、熱波動科学とよべる新しい研究分野が開拓されるものと期待している。

## ②新しい光源開発と物質の光計測制御に関する成果

### 研究課題名「ナノサイズ高輝度バイオ光源の開発と生命機能計測への応用」

永井 健治 研究者（一期生） 大阪大学 教授 5 年型

蛍光タンパク質を利用したバイオイメージング技術により、動植物の生理機能を可視化できるようになり、蛍光プローブが広く普及している。しかし、蛍光に必要な光照射による試料の光損傷や、自家蛍光によるコントラストの低下、さらには意図しない活性化を引き起こすなどの問題もある。永井研究者は、これらの問題あるいは課題を解決する手段として、励起光照射を必要としない化学発光タンパクに着眼した。これはタンパクが自ら発光することから、新しい光源開発をめざすもので成功すれば影響力ある課題である。

化学発光タンパクを使用する上での最大の課題は高輝度化であった。ウミシイタケルシフェラーゼをもとに、ランダム変異の導入などにより、10倍以上の輝度の化学発光タンパクを開発し、ナノランタン(Nano-lantern)と名付けた。さらに、特定の生体因子の結合に伴い構造が変化するペプチドを挿入し  $\text{Ca}^{2+}$ 、cAMP、ATP を検出する各種機能プローブを開発した。これにより、光遺伝学ツールを用いた光刺激依存的な神経興奮を  $\text{Ca}^{2+}$  の上昇を化学発光としてとらえることに成功しただけでなく、葉緑体に Nano-lantern (ATP) を局在発現させた植物体を作製し、光合成依存的な ATP 産生を世界で初めて化学発光により観察する事にも成功した。

一期生を募集した平成 20 年度に初めて 5 年型が発足した。永井研究者は 5 年型にふさわしいスケールの大きな研究計画を提案し、一期生でただ一人 5 年型として採用した。得られた成果はバイオサイエンスとして画期的なものであるが、それにとどまらず化学エネルギーにより働く Nano-lantern は細胞の中から照らす新しいタイプのナノ光源となり得ることを示したとことになる。この成果を纏めた論文は Nature Communications に掲載された。この論文の公開にあわせてプレス発表を行ったところ、読売新聞(2012年12月14日)、BSジャパン「NIKKEI BS LIVE 7PM」(2012年12月26日)、毎日新聞(2013年1月5日)、Nature Methods(2013年1月号)、Nature Photonics(2013年1月号)、東海道新幹線テロップ(2013年2月13日)等、多くのメディアで取り上げられた。この研究は二期生の樋口研究者との共同研究でもあり、領域内での共同研究による成果の良い一例ともなった。加えて、その研究姿勢や領域会議における議論、他の研究者との共同研究など、あらゆる場面で際立った貢献があった。

永井研究者は、このさきがけ 5 年間の間に、他のさきがけ研究領域「細胞機能の構造的な理解と制御」(平成 23 年度)の領域アドバイザーに就任し、さらに新学術領域研究「少数性生物学-個と多数の狭間が織りなす生命現象の探求-」(平成 23 年~27 年)の領域代表者となった。さきがけ制度の人材育成機能にも貢献したと思われる。

化学発光の研究は古く歴史がある。これをバイオプローブに適用しようという試みは世界中で試みられてきた。この中で永井研究者は世界でさきがけて、その夢を実現したわけであるが、今後を象徴的に示すものとして、彼は化学発光樹林を提示した。これは新しい

視点をもたらしたと考えられる。すなわちあらゆる化学エネルギーを蛋白質の改変により発光エネルギーとして使うことが可能になるのではないかと。動物細胞、動物組織だけではなく、植物細胞、植物組織にもこの考え方を拡張できるのではないかと。丸の内のビル街の街路樹自体が光れば街路灯も不要となり、民家や農家の木も光れば防犯に役立ち、ブドウ園の中に植えれば虫はそこに集まり、被害が低減できるのではないかと。本研究課題の成果は化学者から農業技術者までに、新しい研究と技術開発の発想を与えるものと考えられる。

### 研究課題名「X線非線形回折を利用した局所光学応答解析」

玉作 賢治 研究者（二期生） 理化学研究所(SPring-8) グループリーダー

極端紫外～真空紫外光に対する電子の局所光学応答を計測できれば、結晶内の性質の異なる電子の分布が得られる。しかしながら、空間分解能は波長程度であるため、原子レベルでの分解能で計測することは困難であった。これに対し玉作研究者は、波長1Å程度の硬X線領域における非線形光学現象の一つであるX線パラメトリック下方変換を利用して局所光学応答を解析する新しい研究手法を提案した。この提案は、新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。とくに、大型装置に関わる研究者としては珍しく個人的発想の提案であった。

玉作研究者の測定法では、照射する波長1Å程度の空間分解能と、非線形光学現象により放出される極端紫外～真空紫外光の光学応答を得ることができる。この着想を理論計算により確認するとともに、ダイヤモンドを用いた実験を行い、原子の荷電子と原子間の結合電子のそれぞれの分布を求めることにより実証した。

得られた実験結果を取り纏めた論文は平成23年7月にNature Physicsに掲載された。それにあわせて「“姉妹”光子の共同作業で観察波長の限界を突破-物質を調べる波長と分解能を決定する波長を分離する手法を考案-」と題したプレスリリースを行ったところ5誌の新聞に記事として掲載された。さらに論文の内容自体、そのアイデアの新規性と実証実験に成功したことが高い反響を呼び、論文発表後、10件を越す国際会議での招待講演依頼を受けた。大型放射光ならではのX線光源を個人研究に駆使したこの研究は、まさに大型設備を使う研究者の個人研究「さきがけ」の成功例としてインパクトを与えるものであり、今後の「光の利用」研究のさらなる広がりが期待される。

平成25年6月に米国サンノゼでCLEO(Conference on Lasers and Electro-Optics)2013が開催され、総計1751件の講演・発表がなされた。この会議は毎年開催されるが、毎年この程度の件数がある大変大きな会議である。この会議で、Stephan Harris(Stanford University)による「Parametric Down Conversion Over Fifty Years: From Microwave to X-rays」と題するプレナリー講演が行われ、題目の「to X-rays」の例として玉作研究者のデータを紹介して講演を終えた。まさに玉作研究者の研究は50年間におよぶ「Parametric Down Conversion」の最先端を切り開いた成果である。

本研究課題終了後も、「Multi-Photon process」や「Two-Photon absorption」、「Vacuum nonlinearity」などに関する実験を行い、論文を発表しており、X線非線形光学というフィールドを開拓している。このような活動に対して外国人有識者会議においては独創的で秀逸な取り組みとして注目された。国内では「X線非線形光学」と題する本の執筆を依頼されており、すでにこの分野で第一人者として認められつつある。

### 研究課題名「超高速分光による熱反応過程の直接観測と機構解明」

岩倉 いずみ 研究者（一期生） 神奈川大学工学部 准教授

分子振動の伸縮運動や変角運動は赤外吸収分光やラマン分光などにより計測されてきたが、それらの振動周期は数十 fs である。これらの分子振動を直接計測する方法として 5 fs パルスレーザーを用いた超高速分光が開発され報告されていた。この手法を熱反応に応用しようとするのが岩倉研究者のアイデアであった。5 fs パルス光により振動の位相がそろった分子振動を励起し、さらに 5 fs を用いた超高速分光法で、その後の振動状態を追跡することにより、特定の振動の消滅、あるいは新しい振動の出現などの情報から遷移状態を突き止めることが可能となる。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。

アリルビニルエーテルを用いて熱クライゼン転位反応の機構の遷移状態の実験的に解明することを試みた。「案じるより産むが易し」の格言のごとく、5 fs パルス光照射で熱反応生成物と同じアリルアセトアルデヒドが生成される痕跡を見いだした。そこで当初の目的である高速分光により分子振動の時間変化を調べた。クライゼン転位反応は、これまで 100 年以上にわたり、様々な理論計算や速度論的同位体効果を用いた機構解析がなされいくつかの提案があったが、反応機構はいまだ不明のままであった。岩倉研究者は実験結果より、最初に C-O 結合が弱まり Bis-Allyl 型中間体が生成し、その後、弱い C-C 結合が形成されることで、芳香族性 6 員環イソ型中間体が生成し、さらに、C-O 結合開裂と C-C 結合生成が同時に進行することでアリルアセトアルデヒドが生成する、という 3 段階反応であることを初めて明らかにした。

本研究課題は JST のさきがけ専任研究者(研究場所：電気通信大学)として開始した。実験は研究実施研究室の高速分光装置で行っていたが、その後、広島大学に助教として赴任したため、赴任先で高速分光装置を立ち上げるために必要な予算を増額した。このような機動的な支援はさきがけならではの制度である。その後、神奈川大学に助教として赴任し、現在は同学の准教授として独立し 7 名の学生・院生を指導している。本研究課題の成果が認められ、Royal Society of Chemistry (英国王立化学会)の“PCCP Prize 2010”を受賞し、2012 年には「資生堂 女性研究者サイエンスグラント」受賞、さらに化学会の 2015 年進歩賞を受賞することとなった。

実験に使用した 5 fs パルスはブロードバンドで、525~725 nm の波長成分から構成されている。これにより、複数のラマン活性な分子振動を励起することで可能であるが、スペ



クトルの波長成分の強度分布を整形することにより、熱反応とも光反応とも異なる反応を誘起できることも見いだした。任意の分子振動のみを高効率に励起することで、新規化合物合成手法としても発展する可能性がある。このことは、熱でもない光でもない新しいレーザー誘起反応の可能性を切り開いたもので、新しい反応研究の潮流が生まれると期待している。

### ③タンパク質、細胞の光計測と光制御に関する成果

#### 研究課題名「光化学反応を駆使した分子結晶成長過程の制御」

奥津 哲夫 研究者（二期生） 群馬大学 教授

タンパク質の機能解明にとって立体的構造の解明はその基本であり、X線構造解析には結晶化が必要である。タンパク質の多くは結晶化が困難であるが、奥津研究者は光誘起反応による結晶化法を開拓してきた。本研究課題は、タンパク質自身の光反応による結晶の核生成と成長のメカニズムを解明し、光照射によるタンパク質結晶の作製に関する方法論を確立するという新しい「光の利用」をめざしたもので、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

結晶の核生成と成長のメカニズムの研究の結果、光誘起の化学反応により結晶核となるタンパク質二量体が生成され、その二量体がテンプレートとして働くことにより結晶が成長するメカニズムを明らかにした。また、金ナノパターン上で発生するプラズモン共鳴を利用したタンパク質の結晶成長技術を開発して特許を出願し、結晶化プレートを開発した。和光純薬はこの結晶化プレートを平成25年秋に試験販売し、平成26年10月から正式な製品として販売している。さらに、脂質膜の光相転移を利用した膜タンパク質の結晶化法を提案し、実際に結晶化に成功した。この結晶化法に対して外国人有識者会議においては注目すべき成果と評された。

結晶化に成功した結晶はつくばの高エネルギー研究所との共同研究で結晶解析を進めている。さらに、宇宙航空研究開発機構(JAXA)との共同研究では、平成26年年3月26日にロシアのバイコヌールからロケットを打ち上げ、宇宙ステーション「きぼう」でタンパク質結晶化の第一回目実験を行った。二回目の実験は平成27年8月に予定されており、プラズモン共鳴が結晶化を誘起する効果が無重力の宇宙ステーションでどのような影響があるかを明らかにする予定であり、今後の展開が楽しみである。

このように基礎研究、特許出願、製品化と展開してきた奥津研究者のアプローチは、「光の利用」研究を体現したモデルケースであり、今後もこのような研究活動を継続発展させ、我が国ならではのタンパク質研究に関する光技術開発の一大潮流を作り出すことが期待できる。とくに結晶化困難であった膜タンパク質の結晶への道を開いたことは、薬品会社に眠る膨大な不結晶化膜タンパクを結晶化することに「光の利用」が応用できることを意味するものと考えられる。

#### 研究課題名「リモート励起ラマン分光を用いたナノ計測法の開発とその展開」

雲林院 宏 研究者（二期生） ベルギー・ルーバンカトリック大学 准教授

雲林院研究者自身が提案したプラズモン導波路を用いたリモート励起表面増強ラマン法による「単一細胞内視鏡法」の実現を目指した。この手法は、これまでに全く報告のない、新しい細胞の非侵襲計測法の斬新な提案である。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

プラズモン導波路用の銀ナノワイヤーを化学合成により作製し、プラズモン導波路として機能させるための光カップリング効率を検討し、リモート励起表面増強ラマン法の実現が可能であることを実証し、銀ナノワイヤー表面上の単一分子蛍光観察にも成功した。さらに径 100 ナノメートル以下の銀ナノワイヤープローブを 4 軸 マニピュレーターに装着し、生きた He-La 細胞内に挿入実験を行った。細胞外部の銀ナノワイヤー中心部にある光カップリング部にレーザー光を照射することにより、生細胞内に存在するプロテインなどからのラマン散乱を位置選択的に観測することに成功し、世界に先駆けて本手法実現のめどをつけた。

様々な技術的課題に対し、一つずつ光技術を駆使して解決して当初の目的に目処を付け、生細胞内の狙った位置毎の分光情報を与えるこの新しい光計測法を世界に先駆けて実現したのは見事である。しかも、本研究課題の研究期間中に階下の実験室からの塩素漏れ事故により主要な装置が使用不要となった。これに対し、JST からの特別な予算増額を得て、チャレンジングな目的を達成した。このよう予算対応も「さきがけ制度」ならではである。今後は実際に生命機能の研究分野で使われていく事を期待している。

本研究課題の開始時はベルギー最古の名門大学のカトリック ルーバン大学の研究員であったが、現在は同大・准教授として独立し、ポスドクや院生と共に研究を行っている。平成 25 年 7 月 19 日～20 日ベルギーのルーバンで開催したシンポジウム“Symposium on Plasmon-based Chemistry and Physics”を井村研究者(一期生)と共に企画・開催した。外国人有識者会議においては先駆的で優れた研究課題として注目された。

#### ④医学、環境、食糧に貢献する光科学技術に関する成果

##### 研究課題名「誘導ラマンによる高感度光学活性検出及び高分解能イメージング」

小関 泰之 研究者（二期生） 東京大学 准教授

小関研究者は、生体を染色せずに高コントラストかつ高感度な 3 次元イメージングを可能とする誘導ラマン散乱顕微法の着想を独自に得て、誘導ラマン散乱顕微鏡(SRS 顕微鏡)を立ち上げ、実際に顕微法として優れた機能を有することを実証した。同時期に米国やドイツのグループからも誘導ラマン散乱顕微法が提案された。本研究課題では、当初、上記のねらいを実現するための具体的な研究内容として、空間分解能向上と光学活性検出機能の実現に取り組む計画を提案した。この提案は新しい光科学の概念と方法論の提案をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。

当時使用していたレーザー光源(フェムト秒チタンサファイアレーザー及び光パラメトリック発振器)はSRS顕微鏡にとって最適な光パルスを生産できるものではなく、また、顕微鏡システムの感度や観察速度も不十分であった。そこでまず、レーザー光源の開発と顕微鏡システムの性能向上に取り組んだ。その結果、繰り返しが2倍異なる2波長同期光源を用いた理論限界感度の実証し高速分光イメージング機能による分子識別能向上に成功した。その結果、理論限界感度を達成するとともに高速分光イメージングを実現し、誘導ラマン散乱顕微法が高速性と分子識別機能を兼ね備えた染色を必要としない生体顕微法として優れた手法であることを自ら示した。

この成果を取り纏め、平成24年Nature Photonicsに論文を発表するとともに、「波長が変化するレーザーを用いた新しい顕微鏡を開発—染色せずに生体の三次元構造などの観察が可能に—」と題してプレス発表を行った。その内容は複数の新聞で紹介されるとともに、その研究成果は高く評価され多くの国際会議から招待講演の依頼を受けた。研究成果が認められ、平成22年には応用物理学会で講演奨励賞を受賞した。

同時期にSRS顕微鏡を提案した米国やドイツのグループ、とくに米国のグループが精力的な研究を行って論文を発表していたが、小関研究者が本研究課題で実現した高速性能と分子識別能は世界最高であり高く評価する。この顕微法には更なる高性能化、高機能化の余地があると考えられ、一層の努力によりこれからもこの顕微法の開発をリードするものと期待している。光学メーカーと共同研究しており、製品化も視野にあるものと思われる。本研究課題終了時に大阪大学の助教から東京大学の准教授に赴任した。その後の平成26年度には新たに発足した内閣府革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の「セレンディピティの計画的創出(合田圭介プログラムマネージャー)」プログラムのプロジェクトリーダーとして参加している。

基礎医学、臨床医学において、病変部位の診断や組織形成の研究のための生体組織をその場で迅速に観察することは最も基本となる手法である。通常の光学顕微鏡では、観察する際は組織の加工や染色が必要で、試料作製や観察に多くの工程や熟練が必要であった。小関研究者が開発した誘導ラマン散乱顕微法では染色が不要でかつ3次元分解能を持つ観察手法を提供する。実際に、ラットの肝臓(厚さ0.1mm)を観察し、脂肪滴、細胞質、細胞核、線維、および類洞などの2次元分布や、血管壁の線維の3次元分布を可視化することに成功した。また、マウスの小腸の絨毛を構成する細胞の3次元配置をとらえ、細胞の種類を形態的に識別することにも成功した。これらの成功から、医療分野においては組織の異常を調べるための高感度で再現性のある検査技術としての応用が期待され、数年以内の医療現場での実用化も可能であるものと考えられる。これに成功すればフェムト秒レーザーを社会に広く普及させる先駆けとなる可能性を秘めているものと期待している。

**研究課題名 「二光子励起で発生させるガス状細胞情報伝達分子を駆使したストレス計測」**

中川 秀彦 研究者 (三期生) 名古屋市立大学 教授

一酸化窒素(NO)や硫化水素(H<sub>2</sub>S)は毒性ガスとして知られているが、生体では機能の維持に重要な役割を果たしており、常温常圧でガス状の物質であることから、“ガス状細胞情報伝達分子(ガス状メディエーター)”と呼ばれている。これらのガス状メディエーターの研究は、病気の治療や、さらには生命現象の解明にも貢献できる可能性がある。しかしながら、これらのガス状メディエーターの研究はその毒性と取り扱いの困難さゆえ、あまり進んでいないのが現状であった。中川研究者は本研究課題で、通常条件下では安定で、光照射したときのみ、特定のガス状メディエーターを発生する化合物(ガス状メディエーターの光ドナー化合物)を開発し、生命現象解明や治療法開発に応用することで、この技術を実現することを目指した。本研究課題は、新しい「光の利用」をめざしたもので成功すれば影響力ある課題である。

光照射によりNO、H<sub>2</sub>S、HNO、ONOO-といったガス状メディエーターを発生する光ドナー化合物を分子設計して合成し、薬理作用を実現することを目指した。合成した化合物を細胞内に導入し、光を照射することによりガス状メディエーターを細胞内の狙った位置に発生させることを実証した。さらに、二光子励起によりNOを発生する化合物を開発してマウス脳内に投与し、光照射を行った場所と時間でだけNOを発生させ、照射部位の血管径を拡張させることにも成功した。生体内の主要なガス状メディエーターを光照射により放出できる化合物を系統的に開発し、その薬学的効果を確認している。このことは、中川研究者が目指している多様なガス状メディエーターを駆使した新しい光線力学療法の開発に目処をつけたことになる。開発した、あるいはこれから開発する化合物から、光照射により照射部位に発生させるガス状メディエーターの生体に対する薬学的研究、さらには治療への展開が多いに期待できる。

薬は血管を通して全身に分布するため、患部以外の場所では薬理作用がない薬が望ましい。中川研究者の研究は、これに対する解決策を与える手法を提供するものである。すなわち、薬理作用がない化合物を投与して、患部にのみ光を照射することによりその化合物から薬理作用を有する分子が解放され、治療効果を発揮する。それ以外の体内に存在する化合物は副作用を及ぼすことなく、体外に排出される。このように光サイエンスを薬学に持ち込むことにより今後の研究ストリームを作り出すことを目指しており、本研究領域の戦略目標に対する研究総括の考える「光の新しい利用法」として将来の展開が大いに期待できる。

#### 研究課題名「光機能性・制御性蛋白質による細胞・個体操作」

須藤 雄気 研究者 (一期生) 岡山大学 教授

須藤研究者は、本研究課題の提案時まで培っていたロドプシン分子の学理と技術をもとに、新しいロドプシンの探索、光センサー型ロドプシンやイオンポンプ型ロドプシンの波長制御機構の解明、吸収波長変換などの研究を組織的に展開してきた。本研究課題では、光受容蛋白質で細胞機能を操作することを目的とし、とくにキナーゼ活性化・不活性化、

及び転写調節は生命科学分野で極めて重要な研究課題であることから、これを人為的に制御し、光を駆使した手法による細胞・個体操作を提案した。この提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。

本研究課題の実施においては、(1)新しいロドプシンの取得、(2)それらを含めたロドプシン分子の性質の解析、(3)ロドプシンを用いた細胞や個体の操作を同時並行的に実施して、それぞれに対して成果を得た。とくに、最終段階では、藍藻由来のロドプシンを用いて光によるタンパク質発現誘導システムを開発し、このシステムを大腸菌に導入することにより細胞の運動性制御が可能なること、プロトンポンプ型ロドプシンを線虫に導入することにより個体の運動性制御が可能なることを実証した。これらの成果は、光照射により蛋白質の機能を制御することにより、細胞や個体を操作するという初期の目的を実現したものである。

本研究課題の研究期間中、さらには終了後も積極的に論文を多数発表し、平成 21 年 7 月には「細菌が緑色を感じる仕組み—色素たんぱくは質の新しい色決定機構」というプレス発表を行った。また、特許も 2 件出願した。このような積極的な姿勢は領域会議での議論でも顕著であり、さらに本研究領域内で開催した「研究交流会」では、生物系の交流会のみならず物理系などの分野別交流会にすべて参加したことにも現れている。このように、圧倒的な活動量は顕著であり、本研究課題の期間中に助教から准教授に昇格し、終了後の平成 26 年 4 月 1 日、岡山大学大学院医歯薬学総合研究科の教授に就任した。

光は医療現場で広く用いられている。例えば、顕微鏡による観察やレーザーメス、さらには光線力学的治療である。須藤研究者は、薬学の発展という観点からみると、第一の薬は自然界から採集できる薬で、第二の薬は人工的に合成した化合物、第三の薬は光であると考えている。普段は薬理作用を持たない化合物あるいはタンパクを生成する光応答遺伝子を与えておいて、必要な場所と時間に光を照射することにより薬理作用を発現させようとするもので、「光の利用」をより積極的に薬学にも取り入れようとする考えである。

### 研究課題名「蛍光イメージングによる幹細胞挙動解析法の創成」

樋口 ゆり子 研究者 (二期生) 京都大学 特任講師

幹細胞を血流に乗せて特定部位に届けることにより新しい治療分野が開拓できる可能性がある。樋口研究者の目標は、幹細胞の接着や分化などの挙動に応答してスイッチが on/off するように設計した蛍光標識法を開発し、幹細胞が、いつ、どこで、どのように分化するかを可視化することである。この樋口研究者の提案は、新しい「光の利用」をめざしたもので、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき課題である。

樋口研究者は、まず生きたマウスの組織内に体外から幹細胞を導入しその挙動をリアルタイムでイメージングする手法の開発を目指した。これを実現するため、マウス体内に導入する細胞を識別できるようにするための細胞の蛍光標識法と生きたマウスを顕微鏡下で固定する方法の開発が必要である。前者に対しては、約 1 ヶ月もの長期間にわたって蛍光

機能が維持できる標識法を開発し、後者に対してはマウスの観察部位を固定する治具を考案して特許も出願した。開発した装置は製品化を視野に入れつつ他の研究者の要望により提供もしている。この装置により、マウスの臓器に細胞が運ばれていく動態の直接イメージングに成功した。この成果は高い評価を得ており、平成 26 年 12 月 15 日～16 日に東京ガーデンパレスで開催された日本 DDS 学会創設 30 周年記念シンポジウムにおいてバイオイメージング技術のセッションで「顕微鏡を用いた生体内リアルタイム蛍光イメージング」と題する招待講演を行った。

細胞、薬学、医学に強く、ノウハウの蓄積もあり、本研究領域の研究者に対する情報提供や技術提供などを通して、研究チームの組織を広げて新しいテーマを設定していくアプローチが印象的であった。永井研究者との共同研究、生きたマウスの癌部の化学発光イメージングはその成功例である。さらにはスミス研究者(二期生)への技術提供、小笠原研究者(三期生)との共同研究も進行中である。これらの成果と活動を基に、光を駆使した幹細胞の体内動態光観察・光制御および光分化制御を実現し、新規細胞療法の開発につなげていくことが期待できる。

本研究領域の大きな特徴は、40 名の研究者の研究分野が物理系から化学、生命化学、医学、薬学までと、とくに幅広いことである。このため参加した研究者にとって、普段参加する学会では聞くことのない分野の研究活動の最先端に触れる機会となった。すぐには研究者間の共同研究には結びつかないような研究分野も将来展望に少なからず刺激を与えられたものと思われる。それを示す例として樋口研究者が企画・実施したシンポジウムを紹介したい。平成 26 年 9 月 4 日～6 日に大阪大学で開催された第 23 回日本バイオイメージング学会学術集会において、樋口研究者は「20 年後に見えているもの」というシンポジウムでオーガナイザーを勤めた。このシンポジウムでは、玉作研究者が「X 線光学はどこまですすむか？」という題目で、新倉研究者が「超高速分光の未来～アト秒・zeptasecond とイメージング～」と題する講演を行った。バイオ系での学会で物理系の最先端研究が紹介されるのは、本研究領域に参加した研究者ならではの企画である。

本研究課題で目処をつけた幹細胞の観察手法は、生きている動物の器官に幹細胞が届けられる様子を観察することを可能とする。さらに、届けられた幹細胞がその後どう振る舞うかの観察手法の開発も試行中で、幹細胞を薬として投与した場合の治療プロセスを明らかにする新しい光科学技術の流れを生み出すものと考えられる。

## 研究課題名「分子間相対配置の操作による光化学過程の能動的制御」

高木 慎介 研究者 (一期生) 首都大学東京 准教授

高木研究者は、分子間相対配置を制御し思い通りの光化学過程を進行させ、“光をより有効に使い尽くす”ことを目的として、本研究課題を提案した。具体的には、ナノ層状化合物上における色素分子の配列・配向制御技術として提案してきた“Size-Matching Effect”を更に発展させ、色素分子間の相対配置を制御する事により、新奇な光化学過程

の能動的制御技術を開発するという内容であった。新しい「光の利用」をめざしたもので、成功すれば影響力ある課題である。

ナノ層状化合物である各種粘土鉱物(ホスト材料)を水熱合成し、透明分散溶液または透明膜を作製して色素分子(ゲスト分子)と組み合わせ、ホスト材料を選択することにより、2.3 nm から 3.0 nm の範囲で平均分子間距離を制御できることを明らかにした。さらに、ホスト材料上の各色素間でエネルギー移動がほぼ 100%の効率で進行することを明らかにした。これにもとづき、粘土鉱物-ポルフィリン複合体が人工光捕集系構築に有望であることを示した。さらに、粘土鉱物上において、50℃で 1 日加熱するにより、ポルフィリンが一部積層構造をとっていることを示し、三次元構造の構築が可能であることを提案した。

以上のように、粘土鉱物と色素分子との組み合わせにより、様々な構造、多様な機能が実現できる可能性を示すとともに、粘土鉱物の酸化還元反応による構造制御、鑄型合成、単層膜化によるさらなる展開を図っており、我が国で芽生えたリアルな粘土系のナノ光化学として注目されている。外国人有識者に研究内容を紹介した際においても揃って優れた研究課題と評された。

さらに本研究課題の終了後、平成 23 年度、福島第 1 原子力発電所の事故をうけ、総合科学技術会議のもとに設定された科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」に始まる一連のプロジェクトに参加し、主にセシウムイオンの粘土鉱物への吸着メカニズムの解明を担当してきた。その結果、特定の粘土鉱物がセシウムイオンを特異的に強く吸着することがわかっており、そのような粘土鉱物を効率よく作製する手法について明らかとした。また、なぜ特定の粘土鉱物のみが特異的に強いセシウム捕捉能を示すのかを明らかとするため研究を継続中である。このような研究の発展は JST の戦略目標の一つである「有害副産物の無害化」にも合致する。このように粘土鉱物のナノ化学の第一人者として認知されつつあり、活動の場を広げることにより新しい潮流を作り出す好例となったと考えている。

## 8. 総合所見

### (1) 研究領域と研究総括の選定について

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。このことや政策的な背景等をもとに、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」が、平成 20 年度に設定された。

同戦略目標に向けて、研究領域「光の利用と物質材料・生命機能」では、さきがけの特徴である独創的・挑戦的で先駆的な研究提案を募集・採択・推進した結果、戦略目標で目指した、光技術の高度な利用展開にこだわった最先端科学を先導する研究を数多く推進し、

広範な分野を専門とする研究者が密接に連携する「バーチャル・ネットワーク型研究所」体制を構築できた。

研究総括は、光化学、マイクロナノ分光、極微化学、レーザーの医療・バイオ分野等の多様な研究バックグラウンドを有するため、広範にわたる研究課題を集結した効果が得られたと考えられる。また、研究総括自らのネットワークを生かし、CREST 研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」や文部科学省「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」等、国が推進する光関連のプログラムとの連携などを実現できたほか、外国人の領域運営アドバイザーの参画をさせることにより、本研究領域研究者の人材育成に有効で魅力的な場を与えることができた。

## (2) 研究領域マネジメントについて(課題選考、領域運営)

光科学技術の研究は、光そのものに関わる科学技術を発展させるだけでなく、新しい物質システム、生命機能を生み出すメカニズムに関する概念や発想を与える。この光科学技術の特徴を踏まえた、今までにない斬新なアイデアによる研究課題を求めた。具体的には、数年から10年で新しい「光の利用」の潮流を作る可能性があるか、その代表者になれるか、実現可能性を示す手がかり、経験、あるいは背景はあるかを問う一方、他の研究費では実現できない研究として差別化出来ているか、個人研究であることを自覚しているかを考慮した。さらに国際的にもさきがけていること、採択する数十件の研究課題が幅広い物質材料と生命機能の研究分野をカバーすること、年齢的にも地域的にもヘテロな研究者分布とすることを重要と考え、課題選考をおこなった。

これらの視点から各提案を吟味し、新しい「光の利用」をめざした課題か、新しい光源開発をめざした課題か、新しい光科学の概念と方法論の提案をめざした課題かの三種に分けて考え、その上で成功すれば影響力ある提案か、高いリスクではあるが果敢に挑戦すべき提案かを判断し採択した。

さきがけた研究内容は、さきがけた領域運営から生まれると考え、運営に創意と工夫を凝らした。研究総括が光化学、物理化学を専門とする化学者なので、技術参事にかつてのERATO 吉田ナノ機構プロジェクトのグループリーダーで、ナノテクノロジーの研究開発とマネジメントの経験がある物性物理学者を選び、その上で「担当アドバイザー制」、「国際水準」、「一步踏み込んだマネジメント」の3つを本研究領域の新たな試みとし運営の柱とした。「光の利用」研究領域は原子物理から医薬学の分野までをカバーするので、各研究者に対して、専門が近い「担当アドバイザー」を一人ないし場合によっては複数名アサインし、本研究領域の専門性を保証してもらった。「国際水準」を確かなものにするため、欧米から外国人領域運営アドバイザーをお願いし、領域会議と資料作成は英語で行った。さらに最終年度には欧州と米国で有識者会議を開催し、40人の研究成果について6人のトップサイエンティスト、2人の若手教授と意見交換を行った。「一步踏み込んだマネジメント」は、さきがけの趣旨、戦略目標を研究者に徹底させるとともに、さきがけた研究の遂



行に必要な精神的成長を促すためである。中桐伸行技術参事には研究者の考え方、心理にまで踏み込んだマネジメントをお願いした。中桐技術参事は“anywhere, anytime”（どこでも、いつでも）と“現場重視”をモットーに、本研究領域の趣旨に沿って研究推進が行われているかについて研究者と議論するとともに、研究者のいわばよろず相談係として、研究活動の様々な局面、予算、物品購入、論文作成、学会発表、特許出願、プレスリリースなどでサポートした。メールでのやり取りはもちろん、深夜の電話相談にも応じるなど「一歩踏み込んだマネジメント」で研究者の圧倒的な信頼を勝ち得た。サイトビジットも 200 回に及び、頻繁に研究者を訪問するとともに、国際会議、国内学会に参加して常に研究者の活動と本研究領域の関連分野の状況把握に努めた。この切れ目ないコミュニケーションにより研究総括の意向も十分伝わり、多くの研究者が大きく成長、飛躍したことが、本研究領域の大きな特徴である。

### (3) 研究領域としての成果

「光の利用」研究領域に関する研究成果は、研究者の研究開始年度によらずその内容に従って、以下の 4 類に分類しまとめた。

(1) 原子、イオン、光の閉じ込めと波動関数、量子状態の観測制御に関する成果

志賀、新倉、是枝、井村、岡、佐藤、高橋優、岸本、香月、東海林、岩長、

(2) 新しい光源開発と物質の光計測制御に関する成果

永井、玉作、岩倉、財津、畑中、足立、八ツ橋、深港、江口、太田

(3) タンパク質、細胞の光計測と光制御に関する成果

奥津、雲林院、ビジュ、小笠原、佐崎、増田、小島、スミス、小阪田、

(4) 医学、環境、食糧に貢献する光科学技術に関する成果

小関、中川、須藤、樋口、高木、藤田、高橋文、江波、石坂、西村

さらにさきがけならでの新しい科学技術の潮流が生まれる可能性を判断し、「7.1 研究領域のねらいに対する成果」と「7.2. 研究領域のねらいを達成し、新しい研究ストリームを予期させる成果」に分けて報告している。40 人中のうち 15 人が提案の実現に向けて着実な進歩を示し、12 名が提案を達成あるいは方針を変更したが提案に匹敵するレベルを達成したと判断している。残りの研究者 13 人(名前の下にアンダーラインをつけた)は、研究領域のねらいを達成し、さらに本研究課題から次への新しい研究潮流を感じさせており、予期以上のレベルに到達したと考えている。

### (4) 科学技術イノベーション創出への展望

本研究領域は光科学技術の研究と開発の裾野を広げ、将来のイノベーションにつながる研究潮流を作り出すことを目指してきた。光の利用、光源開発、概念と方法論の提案の三

つの視点から約 550 件の申請を選考し、採択した 40 人の成果は、新しい発想の提案、方法論の提案、光源開発、計測と制御の装置開発から、ナノ材料、タンパク質、細胞、医学、環境、食糧に関わる分野に広がっている。したがって科学技術イノベーションの芽は、製品、装置などの具体的なレベルから、概念、方法論の提案に基づく新技術の創出へ、さらには夢のある、社会的なインパクトの大きい研究開発の潮流の提案にまで至り、まさにさきがけ研究らしい展開になったと自負している。

- 1) 製品販売に至ったケース：奥津研究者の「タンパク質の光結晶化プレートの開発」
- 2) 専門家間で使われ始め製品化も期待できるケース：樋口研究者の「生きているマウスのその場イメージングを可能にする治具の開発」
- 3) メーカーと共同開発されており数年後に製品化されると期待されるケース：小関研究者の「SRS 顕微鏡システム」、佐崎研究者の「1 Å の表面分解能を持つ顕微鏡」
- 4) 専門家向け装置として将来実用化の可能性のあるケース：佐藤研究者の「超高速コヒーレントスピン操作」、足立研究者の「短波長超短パルス光源」、畑中研究者の「超広帯域光源」、永井研究者の「化学発光によるナノバイオ光源」
- 5) 新しい概念に基づき将来実用化の可能性のあるケース：雲林院研究者の「リモートラマン分光」、高木研究者の「粘土による有害物質の除去」
- 6) 従来にない発想によりイノベーションの新しい指針を与えたケース：志賀研究者の「原子位相ロックによる原子時計」、岩倉研究者の「熱でもない、光でもない、第三の反応誘起法」、藤田研究者の「光に依存して反応するニトロゲナーゼ」
- 7) 全く新しい技術革新の発想を与えるケース：永井研究者の「化学発光樹林」、増田研究者の「植物の光制御開花」、須藤研究者と中川研究者の「光制御医薬品」

いずれも本研究領域ならではの革新的イノベーションにつながる基盤であると考えており、各研究者の今後の努力を期待するとともに、さらなる発展のためには、研究開発費の十分な手当てが必要であると考えます。

#### (5) 本研究領域を設定したことの意義、科学技術に対する貢献、問題点等(研究開始以前と終了時点の比較を念頭において)

光拠点、戦略目標を共にする CREST 研究領域「光展開」とセットに本研究領域が設定されたので、これらの活動を念頭に研究課題の設定から運営までを考えた。具体的には、本研究領域「光の利用」の役割は、光科学技術の裾野を広げることにあると考え、研究推進と運営に創意と工夫を凝らした。立ち上げ時のキャッチフレーズは、「光を使い尽くす研究」、「若い研究者を光に押し出す研究」、「市民を光に引き付ける研究」であった。研究成果については、「7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況」で報告しているが、光科学技術の裾野を広げ、次世代の光の利用の多くの道を拓くことができた。これらの研究成果は、論文、学会で発表するだけでなく、定期的に行なわれてきた研究報告会、光拠点のシンポジウム、CREST 研究領域「光展開」との合同シンポジウムにおいて一般向けにも報告して

きている。「光の利用」の研究を通して光科学技術の持つ素晴らしい可能性を民間企業や市民にも共感を持って理解されるよう努力してきた。終了にあたって、本研究領域の研究活動と得られた研究成果により、光科学技術が今後の社会にもたらすインパクト、光科学技術研究の将来性がより具体的に考えられるようになったと思っている。

#### (6) 今後の期待や展望

研究総括は2007年3月に大阪大学工学研究科応用物理学教室を定年退職し、奈良先端大学院大学客員その後特任教授(いずれも非常勤)に就任するとともに、2008年4月より台湾の新竹市にある国立交通大学の理学院応用化学系および分子科学研究所(台湾で言う研究所は日本の大学院の独立専攻にあたる)において講座教授として研究と教育を行っている。ここではこの台湾の経験と欧米有識者会議での意見交換に基づいて、今後のさきがけ研究プログラムについて感じていることを述べる。有識者会議については6.で述べたが、本研究領域の最終年度である平成26年に、欧州のMarie-Paule Pileni 教授、Keitaro Nakatani 教授、Thomas Ebbesen 教授を、米国の Mostafa A. El-Sayed 教授、George C. Schatz 教授、Prashant V. Kamat 教授、Christy Landes 助教、Stephan Link 准教授らと、本研究領域40人の研究成果について意見交換を行ったものである。

台湾の人口は2300万人で面積は九州ぐらいである。このくらいのサイズの国が組織的な基盤研究を展開するのは楽ではない。孤軍奮闘している台湾としては、実用的なアウトプットが期待できる分野に、テーマを絞らざるをえない。アメリカから帰ってきた台湾の研究者は、ナノ、バイオ、イメージング、単一分子、プラズモン、太陽電池など流行の研究をさっとやり、インパクトファクターの高い雑誌に得意の英語ですぐまとめ発表する。Nature、Scienceに載るとボーナスが出る。トップレベルの研究者でも、学問の基本的なことはアメリカか日本がやればいい、役立ちそうだとわかったものは台湾がすぐやるつもりだと言う。欧州において台湾サイズの国は多くあるが、一国で革新的な科学技術の研究を推進するのはやはり無理のようで、EU共同体としてのファンディングによりEU内共同研究を広く展開している。

翻って日本を考えるに、基盤研究とともに科学技術の革新を担えるサイズであり、経済的に停滞期にあるとはいえ、その遂行を行うべき国際的立場にあり、またその体力を持っている。このような認識のもと、機会あるごとにさきがけ研究プログラムの趣旨、実態を説明してきたが、アジアはもちろん欧米でも大変うらやましいという反応が一般的である。世界中でさきがけのようなユニークな研究プログラムに匹敵するものはないようである。有識者会議で似たファンディングはないかと尋ねたところ、テニュアトラックの若い Assistant Professor が受け取る資金が内容的にはさきがけに相当するというコメントを、アメリカ人教授からもらった。このようなユニークなさきがけ研究プログラムを、1992年から推進してきたJSTに敬意を表するとともに、さらに発展させることを切望している。

今後のさきがけ研究プログラムの方向として一層の国際化、グローバル化の推進を提言

する。さきがけ研究プログラムでは、本研究領域募集当時とは異なり、現時点では、応募時に海外にいる研究者であっても、日本国内の研究機関でさきがけ研究を遂行する場合は、外国人の応募を可能としているが、これらの継続・強化を是非推奨する。本研究領域が募集していた当時は、現在日本に居る外国人、外国にいる日本人はさきがけに参加できたため、日本に滞在しているインド人、オーストラリア人とベルギー、イギリスにいる日本人を採択した。加えて本研究領域の畑中研究者は終了後、東京大学准教授より、台湾中央研究院の副研究員に異動しており、日本との懸け橋になることを志向している。このような国際的雰囲気、とくにアジアとの深い交わりの中でさきがけとなる研究を推進することは、今までにない革新性を科学技術の開発にもたらすものと考えている。

我が国も、大学も、研究所もグローバル化時代に突入している。常に研究プログラムとして世界で先頭を走ってきたさきがけも、そのユニークな仕組みを国際的な場で展開する 때가来ているのではないか。とくにアジアでの試行が期待される。

#### (7) 人材育成について

本研究領域「光の利用」においても非常に多くの研究者が、期間中あるいは終了直後に昇格の機会に恵まれている。中にはポスドク、助教から教授にまで一気に駆け登った研究者がいるのがその好例である。それを可能にしたのが、研究総括、技術参事、内外の領域アドバイザーとの切れ目ないコミュニケーションであると考えている。まず採択時に、研究課題の妥当性を議論する中で、戦略目標を理解させ、科研費との差別化をはっきりさせ、研究目標を具体化した。次に研究推進中は、領域会議、各種研究会、会合を通して、研究方向、問題点、実験技術の議論から、発表、発信、論文化、特許提案まで論議をした。最後に終了一年前から、いかに本研究領域の研究としてのアウトプットにまとめ上げるかを練りに練った。この三段階にわたるコミュニケーションを十分尽くす中で、どんどん成長し、素晴らしい飛躍を示した研究者が多かった。各段階において担当アドバイザーが果たした役割は非常に大きかったことをとくに指摘しておきたい。担当アドバイザーは、サイトビジットに同行することから始まり、科学的な討論はもちろん、必要な技術や材料の紹介、研究者ネットワークへのコンタクトの労をお取りいただいた。本研究領域「光の利用」は、原子物理から、医薬学までをカバーしており、光化学者、物理化学者の研究総括と物性物理学者である技術参事の二人では、十分な研究推進を図ることが難しいからであった。研究者 1 人 1 人に領域アドバイザーをはりつけた本研究領域の運営は、研究者の成長に役立ち、研究者の信頼を獲得することができており、当を得たものであったと確信している。

私は研究総括として、さきがけ本来の趣旨を生かす研究推進と運営を図るべく努力してきた。その実現に向けて、研究総括を信じ、強くサポートしてくれた JST に感謝している。技術参事は若手研究集団の研究推進の要であり、現場に貼りついて、研究者側に立って活動している。この技術参事の身近な存在が、上に述べた三段階にわたる研究者とのコミュニケーションを可能にした。さきがけ研究費が科研費と同様、研究機関を通して渡される

時代になった以上、戦略研究であるさきがけにおいては、研究総括、技術参事は身近な存在としてメンターの役割が重要であり、決定的である。とくに昨今、若手研究者、女性研究者を独立させ多額の研究資金を投じているが、経験不足ゆえ未熟なところも多く、誤った方向に進みかねないことを危惧するむきも出てきた。研究総括として、若手・女性研究者育成のためにいままでのさきがけ研究プログラムのシステムの長所を生かすことが、今後の人材育成の一つの答えと思っている。

#### (8) 感想その他

8年にわたる活動を終える現在、さきがけは今なお研究者のブランドであると強く感じる。1992年以來このさきがけを維持発展させてきたJSTに敬意を表す。今後も時代に応じて、しかし初心忘れず、我が国が世界に誇るこのユニークな研究プログラムを発展させてほしい。自分の研究を続けあるいは科学技術の将来展開を吟味しながら、若い研究者とコミュニケーションを持つことができた研究総括と技術参事は、研究者人生の醍醐味を味わうことができた。

以上