

戦略的創造研究推進事業  
CREST(チーム型研究)  
追跡評価用資料

研究領域  
「先端光源を駆使した光科学・光技術の  
融合展開」  
(2008 年度～2015 年度)

研究総括: 伊藤 正

2022 年 3 月



## 目次

要旨 .....	1
第 1 章 研究領域概要.....	3
1.1 戦略目標.....	3
1.2 研究領域の目的.....	3
1.3 研究総括.....	4
1.4 領域アドバイザー.....	4
1.5 研究課題および研究代表者.....	5
第 2 章 追跡調査 .....	8
2.1 追跡調査について.....	8
2.1.1 調査の目的.....	8
2.1.2 調査の対象.....	8
2.1.3 調査方法 .....	8
2.2 追跡調査概要.....	10
2.2.1 研究助成金.....	10
2.2.2 論文 .....	15
2.2.3 特許 .....	19
2.2.4 受賞 .....	21
2.2.5 招待講演 .....	22
2.2.6 報道 .....	22
2.2.7 共同研究や企業との連携.....	22
2.2.8 実用化・製品化.....	24
2.2.9 ベンチャー.....	24
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果.....	25
2.3.1 研究領域の展開状況(展開図).....	25
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	30
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献.....	34
2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合).....	37
第 3 章 各研究課題の主な研究成果.....	39
3.1 2008 年度採択研究課題 .....	39
3.1.1 研究課題「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」 (岩井伸一郎) .....	40
3.1.2 研究課題「ベクトルビームの光科学とナノイメージング」(佐藤俊一)....	41

3.1.3	研究課題「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」(辛埴)	42
3.1.4	研究課題「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」(鈴木俊法)	43
3.1.5	研究課題「超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発」(高橋義朗)	44
3.1.6	研究課題「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~」(本田文江)	45
3.2	2009 年度採択研究課題	46
3.2.1	研究課題「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・光操作のがん研究・がん医療への応用」(今村健志)	47
3.2.2	研究課題「電子線励起微小光源による光ナノイメージング」(川田善正)	48
3.2.3	研究課題「光技術が先導する臨界的非平衡物質開拓」(腰原伸也)	49
3.2.4	研究課題「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」(竹内繁樹)	50
3.2.5	研究課題「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」(田中耕一郎)	51
3.2.6	研究課題「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」(細貝知直)	52
3.3	2010 年度採択研究課題	53
3.3.1	研究課題「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」(大森賢治)	54
3.3.2	研究課題「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」(尾松孝茂)	55
3.3.3	研究課題「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」(小林孝嘉)	56
3.3.4	研究課題「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」(山内和人)	57

## 要旨

本報告書は、戦略的創造研究推進事業のCREST(チーム型研究)の研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」(2008年度～2015年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)事業及び事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

本研究領域は、従来個別に行われた物質・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光を利用した研究開発を融合し、高性能・最先端レーザー光源技術を徹底的に駆使することで「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研究プロジェクトである。

本研究では、既存の光源の独自改良あるいは新規考案により最先端光源を徹底的に使い尽し、全く新しい発想に基づく研究への挑戦を通して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ことが根幹的研究態勢として求められた。その結果、戦略重点分野における先端科学を先導して光のエネルギーにより原子の結合状態を変化させ、新規物質の創成、有害副産物の無害化、無被曝・鮮明画像で異物や腫瘍の発見を可能にする非侵襲医療の実現、などの光科学・光生物学・光医学において数多くのイノベーションが創出された。

本研究領域終了後に研究成果が発展し、発表された学術論文は 458 報(CREST 研究期間中は 1404 報だが、これは主たる共同研究者の論文も含む)、招待講演は国内学会 120 件、国際学会 286 件に達した。特許出願は国内 22 件(研究期間中は 52 件:ただし主たる共同研究者の出願も含む)、海外 7 件(研究期間中 14 件)、特許登録は国内 5 件(研究期間中 33 件)、海外 2 件(研究期間中 7 件)であった。また受賞については、紫綬褒章 1 件、文部科学大臣表彰科学技術賞 4 件、宅間宏賞 2 件、仁科記念賞 1 件、島津賞 1 件など著名な賞を含む合計 20 件の受賞に輝いた。さらに特筆事項として、本研究領域では多くの研究テーマが、研究終了後に 1 億円を超える研究助成金プロジェクト事業に継承されている。JST の新たな戦略的創造研究推進事業 CREST「最先端光科学技術を駆使した革新的基盤技術の創成」に 5 件、ACCEL に 3 件、さらに日本学術振興会の科研費特別推進研究 2 件、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)6 件、科研費基盤研究(S)7 件、文部科学省 Q-LEAP 3 件、内閣府 ImPACT 1 件など、合計 49 件に及んでいる。

本研究領域は 16 の研究課題があるが、以下の 4 つの分野に分類できる。

- (1) 光源の限界を駆使した物性探索(腰原、田中、岩井、辛、鈴木各チーム)
- (2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能(尾松、佐藤、細貝、山内各チーム)
- (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、竹内、大森各チーム)
- (4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用(今村、本田、川田、小林各チーム)

特に科学技術および社会・経済への波及効果が大きい代表的な研究成果の発展は、以下に見ることが出来る。

腰原伸也は、時間分解光電子顕微鏡などを用いて光誘起相転移(隠れた物質相)を世界で初めて確認し、分子結晶の誘起瞬時スイッチの観測、遷移金属酸化物強誘電相のテラヘルツ

(THz)光誘起分極の制御、金属錯体・人工光合成材料の光励起・マイクロ反応機構の解明などに成功し、光と物質の一体的量子動力学が生み出す新しい光誘起協同物質の開拓を行った。田中耕一郎は、THz 光非線形分光物理学を探索し、世界で初めて固体(グラフェン)の9次高調波の観測や高強度 THz 光照射特有の光・固体一体化電子状態・動的対称性の観測などに成功した。さらに THz 技術の普及を目指し、半導体を基軸とする THz 技術のボディ・スキャナーなどのセキュリティへの新たな応用を開拓した。尾松孝茂は、トポロジカル光波(光渦)を用いて物質表面・内部における世界初のサブ  $\mu\text{m}$  螺旋構造体形成に成功し、光硬化樹脂による螺旋ファイバーの実現や、蜂蜜状高粘度液膜による極細・超解像スピンドレット状の秩序化の発見など、光渦による螺旋ナノ構造創製を開拓した第一人者として世界の潮流を牽引した。高橋義朗は、極狭線幅・超高安定レーザー光を用いて、光格子中のレーザー冷却 Yb 原子多体系におけるサウレスポンプ現象を世界で初めて実証し、量子シミュレーター応用に必要な Yb 分子光会合による量子多体状態制御や、Yb 原子間のトンネル現象による格子点の空間断熱移送の制御に成功した。今村健志は、2光子励起顕微鏡を基軸とし、第2高調波発生(SHG)による生体深部観察、近赤外蛍光標識剤の利用、長波長色素蛍光吸収など多様な光技術を駆使して、非アルコール性脂肪肝炎の新たな線維化診断法や変形性関節症の早期診断法、細胞外マトリックス構築に対するコンドロイチン硫酸の重要性の検証、マウス脳血管の深部イメージングなど、多くの先進医療技術を開発した。

本報告書では、上記のような研究終了後の進展を、以下の構成に沿ってまとめた。

第1章では、研究領域の戦略目標と目的、研究総括、領域アドバイザー、研究課題と研究代表者および主たる共同研究者をまとめた。

第2章では、本追跡調査について、調査目的、調査対象項目、調査方法を記述した。調査対象項目として、研究課題の研究代表者を中心に、本研究期間中と研究終了後の研究助成金(総額1000万円以上)の獲得状況、論文、特許、受賞、新聞記事情報、招待講演、共同研究や企業との連携状況、実用化・製品化・ベンチャーなどの情報をまとめた。加えて、研究終了後の展開と発展の様子について、全貌を判り易く把握するために展開図にまとめて提示すると共に、各研究課題の代表的研究成果、およびこれらから生み出された科学技術や社会・経済への波及効果をまとめた。

第3章では、2008年度、2009年度および2010年度採択研究課題ごとに、代表的な研究成果に関連する図を添えて、研究成果の発展、科学のおよび社会・経済への波及効果および特記事項を各1頁に簡潔にまとめた。

## 第 1 章 研究領域概要

### 1.1 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

### 1.2 研究領域の目的

本研究領域は、従来個別に行われた物質・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光を利用した研究開発を連携/融合し、高性能・最先端レーザー光源技術を徹底的に駆使することで「物質と光の係わり」に関する光科学・光技術のイノベーション創出基盤の形成を目指す研究プロジェクトである。

このため本研究では、

- (i) 既存の光源等を独自に改良、あるいは新しい利用法を考案して、現存の最先端光源を徹底的に使い尽くすこと
- (ii) 全く新しい発想による研究に挑戦することにより、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こと

の2つの根幹的条件を満たす研究開発に取り組む。これにより戦略重点分野における先端科学を先導して光のエネルギーにより原子の結合状態を変化させ、新規物質の創成、有害副産物の無害化、無被曝・鮮明画像で異物や腫瘍の発見を可能にする非侵襲医療の実現、などのイノベーションを創出することを目指す。

本研究領域のアウトカムの指標は、光源開発者とユーザー研究者間の融合により

- ・ 学術論文の質的向上に留まらない新概念に基づく画期的な科学的知見を得る
- ・ 新規光源の導入により、従来困難もしくは不可能とされた技術課題を克服する
- ・ 産業界の多大な関心を誘発し、産学連携を通して産業技術への展開を図る

を掲げている。

以上の背景に基づいて、本研究領域の目的は、以下のテーマおよび課題の究明にある。

- (1) 光源の限界を駆使した物性の探索、即ち光誘起相転移、軟 X 線光電子科学、超高速光電子分光、臨界非平衡物質科学、THz 分光物性物理学の各課題の究明。
- (2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能の開拓、即ちベクトルビーム光科学、電子パルス励起顕微、光渦励起ナノ構造物性、X 線顕微・分析科学の各課題の究明。
- (3) 最先端光量子を駆使した原子・分子・集合系の量子制御、即ち量子操作・計測技術、量子もつれ・非線形光学、凝縮系コヒーレント制御の各課題の究明。
- (4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用、即ちベクトルビーム光ナノ観察、光操作・ウイルス制御、in vivo 光操作がん研究、電子線励起光ナノ観察、細胞超解像顕微観察の各課題の究明。

### 1.3 研究総括

伊藤正(大阪大学名誉教授。就任時：大阪大学大学院基礎工学研究科教授、その後：大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター 副センター長、特任教授：2010年4月～2021年3月現在)

### 1.4 領域アドバイザー

本研究領域は、最先端光源技術に着目し、これを駆使した新物質材料科学、生命科学など先端科学への展開と研究を進めてきた。この研究領域の概要に沿って研究を行うため、当分野で著名な研究業績を上げている13人の研究者で構成された領域アドバイザーを定め、研究者の指導に当たった。表1-1に領域アドバイザーを示す。

表1-1 領域アドバイザー

領域 アドバイザー	所属	役職	任期
潮田 資勝 *1	国立研究開発法人物質・ 材料研究機構(NIMS)	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	㈱QD レーザー	代表取締役社長	2008年5月～2016年3月
瀬川 勇三郎	国立研究開発法人理化学 研究所(理研)	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(東大)	教授	2008年5月～2016年3月
山西 正道	浜松ホトニクス(株)(浜 ホト)	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

(注) 所属と役職はCREST終了時点に記載

\*1 2015年12月31日までNIMS 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



## 1.5 研究課題および研究代表者

研究課題(研究代表者)の公募は2008年度から3年間、3期にわたってなされ、総計16件の研究課題が採択された。表1-2に各期の研究課題、研究代表者、採択当時の所属と役職、終了当時の所属と役職並びに追跡調査時点での所属と役職を示した。また、各研究チームの主たる共同研究者を表1-3に示した。

表1-2 研究課題と研究代表者(第1期、第2期、第3期)

期 (採択年度)	研究課題	研究代表者	採択時の 所属 役職	終了時の 所属 役職	追跡調査時の 所属 役職
第1期 2008年度	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	岩井 伸一郎	東北大学大学院理学研究科 教授	同左	同左
第1期 2008年度	ベクトルビームの光科学とナノイメージング	佐藤 俊一	東北大学多元物質科学研究所 教授	同左	同左
第1期 2008年度	高線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	辛 埴	東京大学物性研究所 教授	同左	東京大学物性研究所 特別教授
第1期 2008年度	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	鈴木 俊法	京都大学大学院理学研究科 教授	同左	同左
第1期 2008年度	超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発	高橋 義朗	京都大学大学院理学研究科 教授	同左	同左
第1期 2008年度	光ピンセットによる核内ウィルスRNP輸送と染色体操作～ウィルスゲノム除去への挑戦～	本田 文江	法政大学生命科学部 教授	同左	日本大学薬学部 上席研究員/東京農工大学 客員教授
第2期 2009年度	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・光操作のがん研究・がん医療への応用	今村 健志	(公財)がん研究会がん研究所生化学部 部長	愛媛大学大学院医学系研究科 教授	愛媛大学大学院医学系研究科/プロテオSセンター 教授
第2期 2009年度	電子線励起微小光源による光ナノイメージング	川田 善正	静岡大学工学部 教授	同左	同左
第2期 2009年度	光技術が先導する臨界的非平衡物質開拓	腰原 伸也	東京工業大学大学院理工学研究科 教授	同左	東京工業大学大学院理学院 教授
第2期 2009年度	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	竹内 繁樹	北海道大学電子科学研究所 教授	同左	京都大学大学院工学研究科 教授
第2期 2009年度	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	田中 耕一郎	京都大学物質-細胞統合システム拠点 教授	同左	京都大学大学院理学研究科 教授

期 (採択年度)	研究課題	研究代表者	採択時の 所属 役職	終了時の 所属 役職	追跡調査時の 所属 役職
第2期 2009年度	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	細貝 知直	大阪大学光科学セ ンター 特任准教 授	同左	大阪大学産業科学 研究所 教授
第3期 2010年度	アト秒精度の凝縮系 コヒーレント制御	大森 賢治	大学共同利用機関 法人自然科学研究 機構分子科学研究 所(分子研) 教授	同左	同左
第3期 2010年度	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	尾松 孝茂	千葉大学大学院融 合科学研究科 教 授	同左	千葉大学大学院工 学研究院 教授
第3期 2010年度	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	小林 孝嘉	電気通信大学先端 超高速レーザー研 究センター 特任 教授	同左	東京大学 名誉教 授/電気通信大学 客員教授
第3期 2010年度	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	山内 和人	大阪大学大学院工 学研究科 教授	同左	同左

表 1-3 各研究チームの主たる共同研究者リスト

研究代表者	主たる共同研究者
岩井 伸一郎	佐々木 孝彦(東北大学金属材料研究所 教授) 岸田 英夫(名古屋大学大学院工学研究科 教授) 高橋 聡(名古屋工業大学工学研究科 教授) 妹尾 仁嗣(理研 専任研究員)
佐藤 俊一	横山 弘之(東北大学未来科学技術共同研究センター 教授) 根本 知己(北海道大学電子科学研究所 教授)
辛 埴	小林 洋平(東京大学物性研究所 准教授) 渡部 俊太郎(東京理科大学総合研究機構 教授)#
鈴木 俊法	藤 貴夫(理研 専任研究員)
高橋 義朗	井戸 哲也(国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT) 研究マネージャー) 江藤 和幸(日本航空電子工業(株) UV 技術シニアエキスパート) 山下 眞(NTT 物性科学基礎研究所 主任研究員)
本田 文江	新井 史人(名古屋大学大学院工学研究科 教授) 杉浦 忠男(奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 准教授)
今村 健志	佐瀬 一郎(㈱ニコン 主幹技師) 成瀬 清(大学共同利用機関法人自然科学研究機構基礎生物学研究所 准教授) 根本 知己(北海道大学 教授) 出口 友則(国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研) 主任研究員) 佐藤 俊一(東北大学多元物質科学研究所 教授) 横山 弘之(東北大学未来科学技術共同研究センター 教授)
川田 善正	寺川 進(常葉大学 教授)
腰原 伸也	石原 純夫(東北大学理学研究科 教授) 米満 賢治(中央大学理工学部 教授) R. Schoenlein(ローレンスバークレー国立研究所 ALS 副所長・研究員)
竹内 繁樹	栗村 直(NIMS 主幹研究員) Holger F. Hofmann(広島大学大学院先端物質科学研究科 准教授)
田中 耕一郎	角屋 豊(広島大学大学院先端物質科学研究科 教授) 青木 隆朗(早稲田大学理工学術院 教授)
細貝 知直	荒河 一渡(島根大学総合理工学部 准教授)
大森 賢治	中村 一隆(東京工業大学応用セラミックス研究所 准教授) 萱沼 洋輔(大阪府立大学 21 世紀科学研究機構 特任教授(2013 年 3 月まで))
尾松 孝茂	森田 隆二(北海道大学大学院工学研究院 教授) 栗村 直(NIMS 主幹研究員)
小林 孝嘉	安倍 学(広島大学理学研究科 教授) 河西 春郎(東京大学医学系研究科 教授)
山内 和人	西野 吉則(北海道大学電子科学研究所 教授) 志村 まり(国立研究開発法人国立国際医療研究センター研究所 室長) 前島 一博(国立研究開発法人情報・システム研究機構国立遺伝学研究所 構造遺伝学研究センター 教授)

※ 主たる共同研究者の所属および役職は調査時点のもの。

# 故人

## 第 2 章 追跡調査

### 2.1 追跡調査について

#### 2.1.1 調査の目的

追跡調査は研究終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST(科学技術振興機構)の事業および事業運営の改善に資するために行うもので、研究終了後の研究者の研究課題の発展状況等を調査した。

#### 2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、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」(2008 年度～2015 年度)を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

	CREST 研究期間	CREST 終了後の調査対象期間	研究課題数
第 1 期	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～2021 年 調査終了月	6
第 2 期	2009 年 10 月～2015 年 3 月*	2015 年 4 月～2021 年 調査終了月*	6
第 3 期	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2021 年 調査終了月	4

※ 今村チームの研究期間は 2009 年 10 月～2016 年 3 月。同チームの調査対象期間は 2016 年 4 月～2021 年 調査終了月。

#### 2.1.3 調査方法

##### (1) 研究助成金

調査対象期間は、本研究領域の期間中を含めて調査対象月とし、本研究領域の研究代表者が研究の代表を務める研究助成金を調査した。その中から、原則、研究助成金の総額が 1 千万円/件以上のものを抽出した。

ただし、各研究課題の開始後に研究助成を受け、当該研究課題が終了する前に、その助成期間が終了してしまう事案および当該研究課題終了と同年度に助成期間が終了する事案に関しては対象外とした。

研究助成資金の獲得状況の調査については、主に以下の WEB サイトを利用した。

- ・ 調査対象研究代表者所属大学の研究者データベース
- ・ 調査対象研究代表者の所属する研究室、本人の WEB サイト
- ・ 競争的研究資金の機関データベース  
(科学研究費助成事業データベース、厚生労働科学研究成果データベース)
- ・ 民間女性研究成果概要データベース(学術研究データベース・リポジトリ 国立情報学研究所[[https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta\\_pub/CsvSearch.cgi](https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/CsvSearch.cgi)])

- ・公益財団法人助成財団センター ([http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap\\_search.php5](http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap_search.php5))
- ・日本の研究.com (<https://research-er.jp/>)

## (2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとして Scopus を用い、文献タイプは Article、Review、Conference Paper を対象とし、最終的には研究代表者にご判断頂いた。研究期間中は研究代表者及び主たる共同研究者(あるいは研究終了報告書の成果論文で責任著者となっている研究者)が著者になっている論文、研究終了後は研究代表者が著者になっている論文を著者名検索により抽出した。著者名から論文リストを作成し、①CREST の成果と認められるもの、②CREST の発展と認められるもの、③CREST と無関係と考えられるものの3つに分類し、それぞれ論文リストを作成した。また、CREST の成果(①)および発展(②)に関する論文について、責任著者として研究代表者が First 又は Last Author、あるいは連絡先著者となっている論文数を調べた。さらに、同一出版年の論文の中で被引用数が 0.01%、0.1%、1%、及び 10%以内に入る論文数を求めた (Top%以内)。加えて、Field Weighted Citation Impact [FWCI] 値<sup>1</sup>を記した。

## (3) 特許

特許出願および登録状況は、出願日(もしくは優先権主張日)が研究課題開始以降で、研究代表者が発明者になっているものを抽出した。検索にはデータベースとして PatentSQUARE を用いた。

## (4) 受賞、招待講演、報道、共同研究や企業との連携等

研究終了以降から現在に至るまでの受賞、国内外の主要な会議における招待講演、報道、共同研究や企業との連携等について、ウェブ検索を用い、各研究代表者の研究室ホームページ、科学研究費補助金(科研費)ホームページなどを参考にし、それぞれのリストを作成した。さらに研究代表者の確認により追加した。

なお、本追跡調査に当たっては、研究代表者に依頼して、各リスト(研究助成金、論文、特許、受賞、招待講演、ベンチャー、報道など)及び、調査報告書の第3章等の草稿の確認につき可能な限りご協力を頂いた。

---

<sup>1</sup> FWCI 値とは、当該文献の被引用数を、同じ出版年・同じ分野・同じ文献タイプの文献の世界平均で割った値である。すなわち、この論文が類似の論文と比較してどの程度引用されているかを示す指標で、FWCI 値が 1 を上回る論文は、平均よりも多く引用されていることを意味する。

## 2.2 追跡調査概要

### 2.2.1 研究助成金

本研究領域の研究が開始して以降、各研究代表者が代表者として獲得した助成金のリストを表 2-2 に示した。ここでは、調査対象者が研究領域の研究代表者で、かつ研究助成金総額が 1 千万円/件以上のものを掲載している。終了後、1 億円を超える大型の研究助成金を獲得した研究代表者は、岩井、辛、鈴木、高橋、今村、川田、腰原、竹内、田中、細貝、大森、尾松、山内の 13 名である。

表 2-2 研究助成金獲得状況

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	科研費 <span style="color:blue">■</span> JST <span style="color:red">■</span> 内閣府 <span style="color:green">■</span> 文科省 <span style="color:orange">■</span> AMED <span style="color:purple">■</span>																				金額 (千万円)
				2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	
岩井伸一郎	2008～2013	JST (CREST)	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	■	■	■	■	■														26.8		
	2011～2014	科研費 (基盤研究 (A))	赤外 10 フェムト秒パルス列による強相関電子系の電子-フォノンコヒーレント制御			■	■	■														4.8		
	2015～2018	科研費 (基盤研究 (A))	5 フェムト秒極超短赤外パルス光による強相関電子系の動的局在と秩序形成の研究						■	■	■											4.3		
	2018～2027	文科省 (Q-LEAP)	強相関量子物質におけるアト秒光機能の開拓										■	■	■	■	■	■	■	■	■	20.0～60.0		
	2019～2024	JST (CREST)	キャリアエンベロープ位相制御による対称性の破れと光機能発現												■	■	■	■	■			15.0～49.8		
佐藤俊一	2008～2013	JST (CREST)	ベクトルビームの光科学とナノイメージング	■	■	■	■															28.8		
	2015～2017	科研費 (基盤研究 (A))	光波から電子波への波面転写							■	■											4.0		
	2020～2022	科研費 (基盤研究 (B))	電子波の回折限界に迫る回折素子の作製												■	■	■					1.8		
辛埴	2008～2013	JST (CREST)	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	■	■	■	■															48.1		

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (千万 円)	
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
				8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2		
	2012 ～ 2016	文科省 (X線自由 電子レーザ ー利用推進 計画)	固体と液体及び界面の 電子状態、スピン状態 のダイナミクスの研究																			15.0～ 250.0	
	2013 ～ 2017	文科省 (光・量子融 合連携研究 開発プログ ラム)	極限レーザーと先端放 射光技術の融合による 軟X線物性科学の創成																			約 89.9	
	2013 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (S))	極低温・超高分解能レ ーザー光電子分光の開 発と低温超伝導体の超 伝導機構の解明																				15.6
	2019 ～ 2023	科研費 (基盤研究 (A))	レーザー光電子分光が 拓く新しい超伝導体の 研究																				4.3
鈴木 俊法	2008 ～ 2013	JST (CREST)	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																			25.9	
	2012 ～ 2014	科研費 (基盤研究 (A))	水和電子の電子構造と 化学反応																				4.8
	2015	科研費 (基盤研究 (A))	空間整列した分子の超 高速光電子イメージン グによる非断熱化学反 応の研究																				3.4
	2012 ～ 2016	文科省 (X線自由 電子レーザ ー利用推進 計画)	溶液化学のXFEL時間分 解分光の開拓																				15.0～ 250.0
	2015 ～ 2019	科研費 (基盤研究 (S))	液体の超高速光電子分 光による溶液化学反応 の研究																				19.0
高橋 義朗	2008 ～ 2013	JST (CREST)	超狭線幅光源を駆使し た量子操作・計測技術 の開発																			43.3	
	2013 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (S))	光格子中イッテルビウ ム量子気体の究極的操 作・観測が拓く新奇量 子凝縮相研究の新展開																				21.5

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (千万 円)			
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
				8	9	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	
	2016 ～ 2017	科研費 (新学術領 域研究(研 究領域提案 型))	量子気体顕微鏡による 光格子中原子スピンと フォトンのハイブリッ ド量子制御																					1.4	
	2016 ～ 2017	科研費 (新学術領 域研究(研 究領域提案 型))	トポロジカルポンピ ング現象の冷却原子を用 いた新展開																						1.1
	2016 ～ 2021	JST (CREST)	冷却原子の高度制御に 基づく革新的光格子量 子シミュレーター開発																						15.0～ 49.8
	2018 ～ 2022	科研費 (新学術領 域研究(研 究領域提案 型))	極低温原子で紐解く階 層横断エキゾチック物 性現象																						12.2
	2018 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (S))	光格子中超低温原子気 体の軌道及びスピン自 由度を駆使した新量子 物性の開拓																						18.8
本 田 文 江	2008 ～ 2013	JST (CREST)	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～																					24.9	
今 村 健 志	2009 ～ 2015	JST (CREST)	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・光操 作のがん研究・がん医 療への応用																					54.8	
	2015 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (B))	がん骨転移と骨代謝を 繋ぐ細胞間相互作用解 明のための革新的イメ ージングシステム開発																						1.7
	2015 ～ 2019	科研費 (新学術領 域研究(研 究領域提案 型))	革新的イメージング技 術とがんモデルメダカ を駆使したがん転移研 究																						14.6



研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (千万 円)		
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
				8	9	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7
	2016 ～ 2021	科研費 (新学術領 域研究(研 究領域提案 型)『学術 研究支援基 盤形成』)	先端バイオイメージ ング支援プラットフォー ム(研究分担者) <sup>*1</sup>																					9.0
	2018 ～ 2023	AMED (CREST)	新しい4次元モデルシ ステムを用いた腸管線 維化の病態解明(研究分 担者) <sup>*1</sup>																					
川 田 善 正	2009 ～ 2014	JST (CREST)	電子線励起微小光源に よる光ナノイメージ ング																					15.0～ 49.8
	2016 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (B))	ファインバブル解析の ための電子線励起発光 顕微鏡の開発とその応 用展開																					1.7
	2015 ～ 2020	JST (A-STEP)	電子線検出によるイオ ン分布のナノイメージ センシングシステム																					30.0 (最大)
	2020 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (B))	電子線直接照射による ナノ領域の生細胞刺激 法の開発																					1.8
	2020 ～ 2025	JST (CREST)	光と電子の融合による 超高分解能細胞機能イ メージング・制御																					
腰 原 伸 也	2009 ～ 2014	JST (CREST)	光技術が先導する臨界 的非平衡物質開拓																					40.2
	2016	JST (ACCEL_FS)	ナノスケール・フェム ト秒電子ダイナミクス 直接観測装置開発と光 電子材料開拓手法の革 新																					1.0 (最大)
	2015 ～ 2019	科研費 (基盤研究 (A))	超高速電子線回折法を 利用した非平衡物質科 学の開拓																					3.4
	2018 ～ 2022	科研費 (特別推進 研究)	光と物質の一体的量子 動力学が生み出す新し い光誘起協同現象物質 開拓への挑戦																					63.0
竹 内 繁 樹	2009 ～ 2014	JST (CREST)	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																					28.7
	2014 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (S))	光量子回路を用いた大 規模量子もつれ状態の 実現と応用																					19.0

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (千万 円)			
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
				8	9	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	
	2016 ～ 2021	JST (CREST)	大強度広帯域周波数も つれ状態の実現と応用																					15.0～ 49.8	
	2018 ～ 2027	文科省 (Q-LEAP)	量子もつれ光子対を利用 した量子計測デバイ スの研究																						20.0～ 60.0
田 中 耕 一 郎	2009 ～ 2014	JST (CREST)	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																					41.2	
	2016	JST (ACCEL)	半導体を基軸としたテ ラヘルツ光科学と応用 展開																						1.0 (最大)
	2014 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (A))	超高強度テラヘルツ電 磁場による半導体電子 状態の動的制御																						4.1
	2017 ～ 2021	JST (ACCEL)	半導体を基軸としたテ ラヘルツ光科学と応用 展開																						150.0
	2017 ～ 2021	科研費 (基盤研究 (S))	テラヘルツ高強度場物 理を基盤とした非線形 フォトエレクトロニク スの新展開																						21.1
細 貝 知 直	2009 ～ 2014	JST (CREST)	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																					25.6	
	2014 ～ 2018	内閣府 ImPACT	ユビキタス・パワーレ ーザーによる安全・安 心・長寿社会の実現(PM 佐野雄二) 1A: レーザープラズマ 電子加速技術の開発																					74.1	
	2018 ～ 2027 ただしSG 評価 あり	JST 未来社会創 造事業(大 規模プロジ ェクト型)	レーザー駆動による量 子ビーム加速器の開発 と実証(PM 熊谷教孝) レーザー駆動電子加速 技術開発																					22.6 (2018 ～2020 までの 実績) 継続中	
大 森 賢 治	2010 ～ 2015	JST (CREST)	アト秒精度の凝縮系コ ヒーレント制御																					23.6	
	2016 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (A))	アト秒精度の超高速コ ヒーレント制御を用い た量子格子模型の研究																					4.6	
	2016 ～ 2020	科研費 (特別推進 研究)	アト秒精度の超高速コ ヒーレント制御を用い た量子多体ダイナミク スの探求																					55.4	

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (千万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2018 ～ 2027	文科省 (Q-LEAP)	アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用																			20.0～ 30.0
尾松孝茂	2010 ～ 2015	JST (CREST)	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																			24.4
	2015 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (B))	光渦励起パラメトリックレーザーに立脚するトポロジカル非線形光学																			1.7
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術領域研究(研究領域提案型))	光圧で拓く:多粒子相互作用の選択的制御による構造と現象の創造																			27.5
	2018 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (A))	光渦が誘導する超巨大キラル質量移動の学理に立脚したキラルデバイス工学																			4.4
	2019 ～ 2024	JST (CREST)	光渦が拓く超解像スピンドジェット技術																			15.0～ 49.8
小林孝嘉	2010 ～ 2015	JST (CREST)	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																			51.1
	2016	JST(先端計測)研究代表者:徳永英司	無標識・同時多色・3次元・超解像を実現する光熱変換顕微鏡のための調査研究※2																			1.3
山内和人	2010 ～ 2015	JST (CREST)	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																			23.6
	2016 ～ 2020	科研費 (基盤研究 (S))	高精度形状可変ミラー光学系の構築と X 線自由電子レーザーのアダプティブ集光																			18.4

※1 金額は分担金 ※2 小林研究代表者からの申請で掲載

2020年4月30日検索  
2020年11月25日更新  
2021年3月21日確認

### 2.2.2 論文

論文数は、学術的な視点で見た研究代表者の研究活動を示す重要な指標として取り扱うことができる。本研究領域の研究代表者が研究期間中および研究終了後に発表した原著論

文の数を、CRESTの成果および発展の論文(原著論文)数として表2-3にまとめた。同表には、①CRESTの成果と認められるもの、②CRESTの発展と認められるものに分類し、それぞれ論文数、責任著者論文数、平均FWCI値、Top10%とTop1%以内の論文数を掲載した(なお本調査では、Top0.1%以内の論文は研究期間中から調査時点までの間では認められなかったため、表中には記していない)。ここで研究終了後の論文数の集約期間は、第1期、第2期、第3期の研究課題がそれぞれ6年間、5年間、4年間となっており、研究期間中5年間の論文数と単純に比較することはできない。また、研究期間中の論文は研究代表者に加えて主たる共同研究者の双方を含むのに対し、研究終了後は研究代表者のみの論文から成る。図2-1は、①CRESTの成果と認められるもの、②CRESTの発展と認められる論文数およびTop10%以内の論文数を示した。また、図2-2には各研究代表者の論文数の分布、図2-3には各研究代表者の研究期間中、及び終了後の論文数として、①CRESTの成果、②CRESTの発展に関する論文数およびTop10%以内論文数を示した。

領域全体の論文数では、研究期間中1404報(このうちTop10%以内は174報)に対し、研究終了後458報(このうちTop10%以内は65報)と減少している。この傾向は、各研究代表者の論文数分布に反映されており、全体として研究期間中に対し研究終了後は論文数が減少している。これは、研究期間中は研究代表者に加えて主たる共同研究者の論文も合算されているのに対し、研究終了後は研究代表者のみの論文によるためである。ただし研究終了後の研究助成金の獲得数および獲得金額を考慮すると、多くのグループで研究期間中の成果がJST、科研費、文科省、内閣府などの主要な関連事業に継承され、活発に研究活動が展開されている様子が伺える。

研究代表者別では、各研究代表者間でばらつきはあるが、①CRESTの成果の論文を最も多く発表した研究代表者は、第3期の小林で191報、次いで第2期の今村で142報、腰原で132報、第1期の辛で125報と続く。これに対し、②CRESTの発展の論文では、第1期の辛が105報で最も多く、次いで第3期の尾松が39報、第1期の鈴木が37報、第2期の田中が36報と続く。一方、CRESTの発展のTop10%以内の論文数は、辛が25件で最も多く、続いて高橋、田中、尾松がそれぞれ9件、7件、5件と多い。同様のTop1%以内については、辛が4件、高橋、田中、山内が各1件となっている。

表 2-3 CREST の成果および発展の論文(原著論文)数

期 (採択 年度)	研究 代表者	①CREST の成果					②CREST の発展				
		論文数	責任著 者論文 数	平均 FWCI 値	Top%論文		論文数	責任著 者論文 数	平均 FWCI 値	Top%論文	
					10%	1%				10%	1%
第 1 期 (2008 年 度)	岩井 伸一郎	111	4	0.98	7	0	8	4	1.01	1	0
	佐藤 俊一	67	1	1.49	9	1	24	1	1.32	3	0
	辛 埴	125	0	1.99	31	4	105	1	2.03	25	4
	鈴木 俊法	44	29	1.56	2	0	37	25	1.15	4	0
	高橋 義朗	75	2	1.73	13	2	29	0	3.07	9	1
	本田 文江	92	2	1.38	18	0	9	2	0.38	0	0
第 2 期 (2009 年 度)	今村 健志	142	5	1.38	20	1	13	2	1.88	3	0
	川田 善正	82	8	0.80	5	0	33	2	0.45	1	0
	腰原 伸也	132	1	1.04	13	0	23	0	0.84	2	0
	竹内 繁樹	67	10	1.50	7	1	29	12	1.14	2	0
	田中 耕一郎	82	2	1.80	16	2	36	3	1.74	7	1
	細貝 知直	52	1	0.70	0	0	15	1	0.36	0	0
第 3 期 (2010 年 度)	大森 賢治	41	5	0.72	2	0	6	0	0.45	1	0
	尾松 孝茂	67	12	1.65	9	2	39	14	1.08	5	0
	小林 孝嘉	191	35	0.90	10	1	25	6	0.33	0	0
	山内 和人	95	2	1.63	20	1	31	0	1.69	3	1
領域全体		1404	119	1.32	174	14	458	73	1.41	65	7
		(58)	0		(8)	1	(4)	0		(1)	0

1 各研究代表者の論文数は重複論文を含むため、領域全体の論文数の合計数は一致しない。( )中の数値は重複論文数。領域全体の論文数には重複論文数は含めない。①は佐藤と今村 31 報、岩井と腰原 6 報、竹内と田中 2 報、辛と山内 2 報、竹内と尾松 11 報、今村と小林 1 報、今村と田中 1 報、佐藤と今村と小林 1 報、佐藤と本田と今村 2 報、細貝と山内 1 報(計 58 報)、②は辛と田中が 1 報、腰原と田中が 3 報の重複があった。

2 責任著者とは Corresponding Author と同義。

3 平均 FWCI 値は、調査最終年マイナス 1 年まで(今回の調査では 2019 年末まで)の論文を対象とし、FWCI 値が得られる論文(FWCI 値=0 含む)で平均した数値とする。

4 Top%値は FWCI 値ベースとする。また Top%論文は「論文数」でリストアップした論文を対象とする。

5 各 Top%論文数は“以内”を意味し、例えば Top10%の欄には 1%も含む件数がカウントされる。

2020 年 5 月 23 日調査  
2020 年 11 月 13 日更新  
2021 年 3 月 21 日確認  
(FWCI と TOP%の値は 2020 年 11 月 25 日時点)

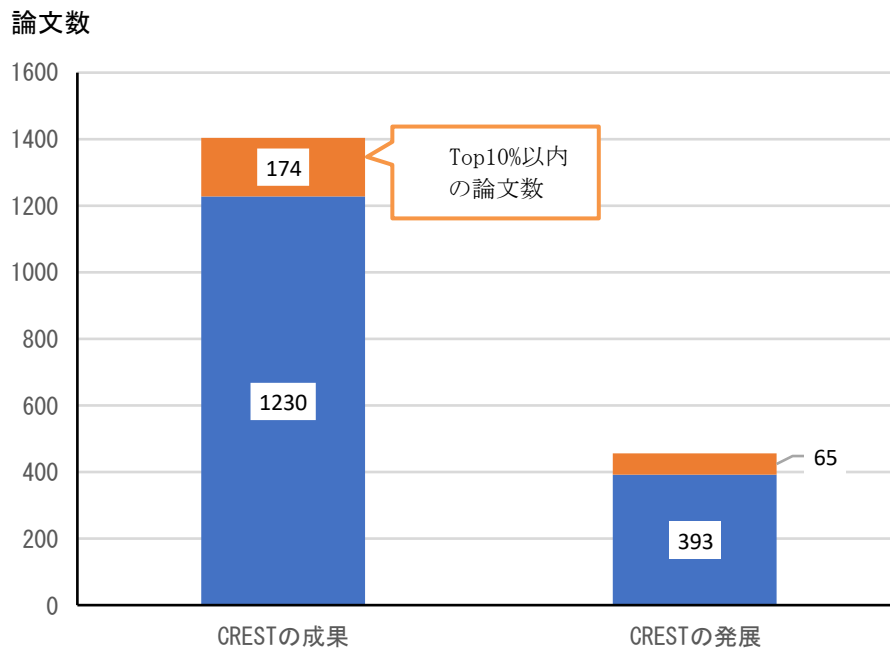


図 2-1 CREST の成果および発展に関する論文数

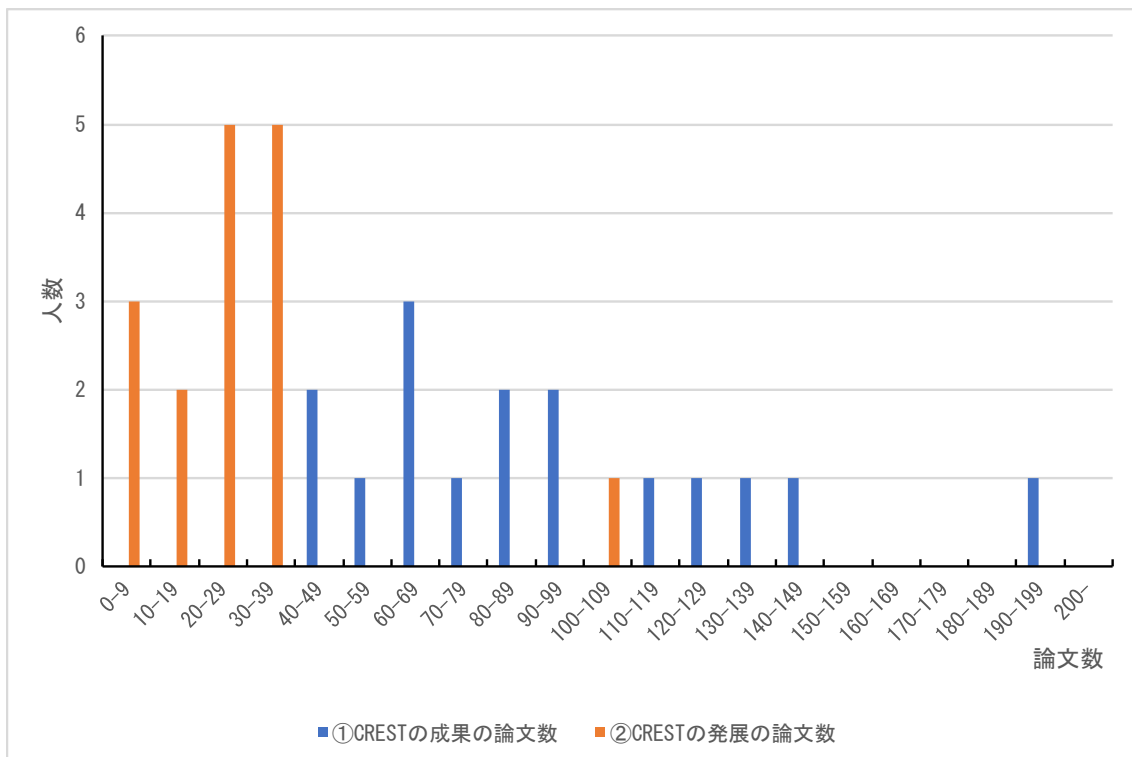


図 2-2 各研究代表者の論文数分布

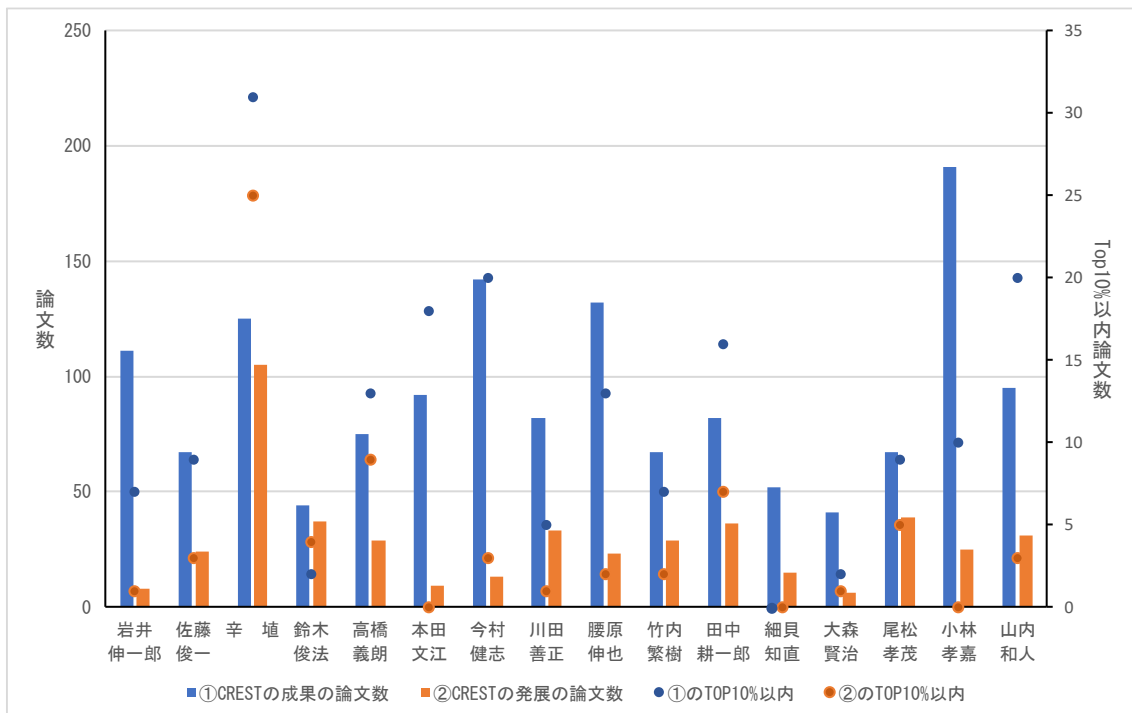


図 2-3 各研究代表者の研究期間中・終了後の論文数

### 2.2.3 特許

特許出願および特許登録は、研究目的と開発段階によりその数は異なるが、当該研究が基礎研究段階から一定の成果を収めて最終的に実用化に至る産業への貢献度を分析する重要な指標である。以下に研究代表者毎に特許の出願や登録数を一覧表にまとめる。表 2-4 および図 2-4 は、研究期間中および終了後の国内・海外での特許の出願と成立状況を示す。本研究領域全体では、研究期間中の国内および海外出願数は 52 件および 14 件、研究終了後の国内および海外出願数は 22 件および 7 件である。一方、登録件数は研究期間中が国内・海外で 33 件および 7 件、研究終了後が国内・海外で 5 件および 2 件となっている。出願・登録共に、研究期間中に比べて研究終了後が減少している。研究代表者別では、第 3 期の尾松が個人最多で、CREST 研究開始以降今日の調査時まで、国内と海外でそれぞれ 10 件と 4 件、特許登録がなされており、極めて特筆される。次いで多く出願・登録している研究代表者は、研究期間中では第 2 期の田中、研究終了後では同じく第 2 期の細貝である。本研究領域は基礎研究の研究課題も多かったためか、研究期間中・終了後を通じて特許出願していない研究代表者が 1 名、研究期間中又は研究終了後のいずれかで特許出願していない研究代表者が 4 名、研究終了後で 1 件のみ特許出願した研究代表者が 5 名となっている。

表 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

採択年度	研究代表者	研究期間中				研究終了後			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
		国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
2008 年度	岩井 伸一郎	0	0	0	0	2	0	0	0
	佐藤 俊一	5	2	4	2	1	0	0	0
	辛 埴	0	0	0	0	1	1	0	0
	鈴木 俊法	0	0	0	0	0	0	0	0
	高橋 義朗	3	1	3	0	0	0	0	0
	本田 文江	2	0	0	0	1	0	0	0
2009 年度	今村 健志	3	0	3	0	1	0	0	0
	川田 善正	3	2	3	1	0	0	0	0
	腰原 伸也	1	0	0	0	1	1	0	0
	竹内 繁樹	2	0	2	0	1	0	0	0
	田中 耕一郎	11	1	3	0	1	0	1	0
	細貝 知直	2	0	2	0	4	1	1	1
2010 年度	大森 賢治	0	0	0	0	1	2	0	1
	尾松 孝茂	8	4	8	4	5	2	2	0
	小林 孝嘉	8	4	2	0	1	0	1	0
	山内 和人	4	0	3	0	2	0	0	0
	領域全体	52	14	33	7	22	7	5	2

- 1) PCT 出願、海外国への個別特許申請のいずれかがあれば、海外としてカウントした。
- 2) 国内特許出願し PCT 出願あるいは直接 PCT 出願された場合は国内出願件数に含めてカウントした。

2020 年 5 月 7 日調査  
2020 年 11 月 16 日更新  
2021 年 3 月 21 日確認



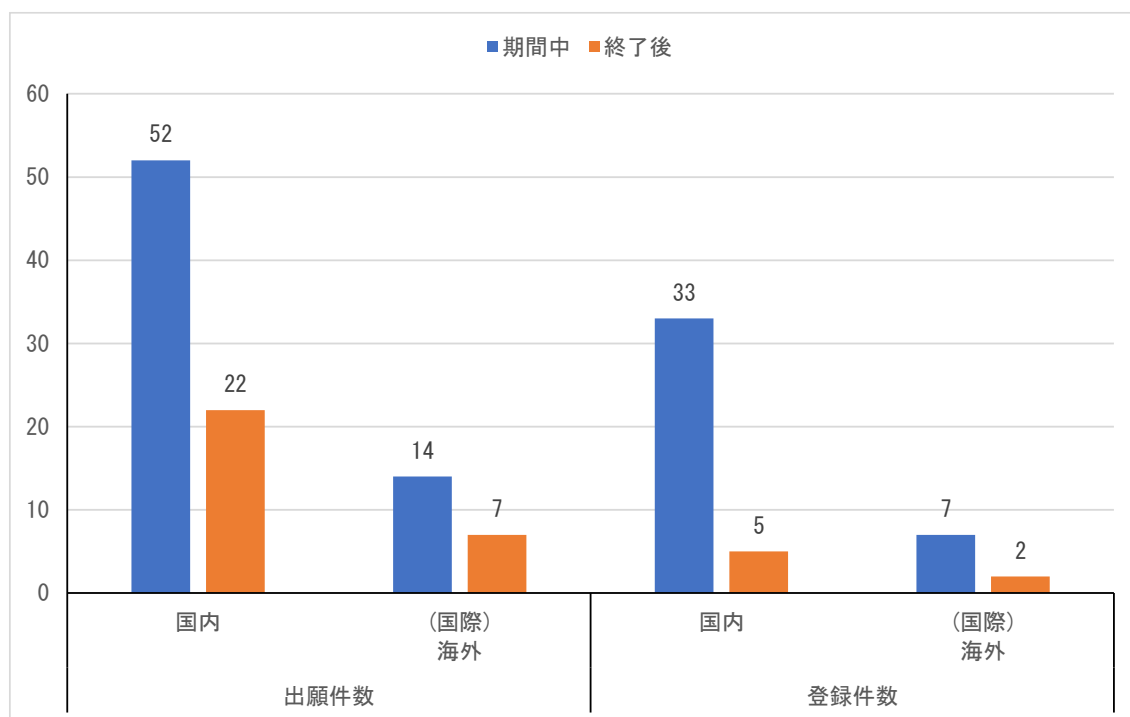


図 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

#### 2.2.4 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞が挙げられる。表 2-5 に研究終了後の研究代表者の受賞を示す。高橋の紫綬褒章、竹内、田中の光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)、大森の松尾財団宅間宏記念学術賞、田中の仁科記念賞、腰原の島津賞は永年の研究成果の集積によるものであり、本研究課題の成果もその一部である。佐藤、大森、尾松、山内の4名の文部科学大臣表彰科学技術賞には本研究課題の成果も貢献していると考えられる。またレーザー・放射光技術に関する辛の放射光科学賞、山内の泰山賞レーザー進歩賞は、まさしく本CREST「光展開」の中核課題である最先端レーザー光源の研究成果が大きく貢献していると考えられるほか、尾松のOSA及びSPIE Fellow受賞は、国際的に大きく活躍している証左である。

表 2-5 研究終了後の受賞リスト

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1	佐藤 俊一	2015年度 文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2015
2	辛 埴	2019年度 第3回 放射光科学賞	日本放射光学会	2020
3	鈴木 俊法	The KAIST Kim Yong Hae Lecturer Award	KAIST	2014
4		第11回 分子科学会賞	分子科学会	2020
5	高橋 義朗	紫綬褒章	日本国政府	2020

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
6	川田 善正	2019年度 静岡大学研究フェロー	静岡大学	2019
7	腰原 伸也	第39回島津賞	(公財)島津科学技術振興財団	2019
8	竹内 繁樹	第33回大阪科学賞	(一財)大阪府大阪市大阪科学技術センター	2015
9		第17回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)	(公社)応用物理学会	2015
10	田中 耕一郎	第64回仁科記念賞	(公財)仁科記念財団	2018
11		第20回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)	(公社)応用物理学会	2018
12	大森 賢治	松尾財団宅間宏記念学術賞	(公財)松尾学術振興財団	2017
13		2018年度 文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2018
14	尾松 孝茂	OSA Fellow	The Optical Society	2016
15		2016年度 文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2016
16		衛藤細谷記念財団賞	(公財)双葉記念財団	2016
17		SPIE Fellow	SPIE	2019
18	山内 和人	2016年度 文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2016
19		泰山賞レーザー進歩賞	(公財)レーザー技術総合研究所	2019

### 2.2.5 招待講演

研究代表者の研究成果を学会の招待講演として発表した件数は、研究終了後に国際・国内それぞれ286件および120件あった。特に、国際会議では尾松が48件、高橋が39件、国内会議では岩井が24件、今村が23件と多い。

### 2.2.6 報道

研究終了後に報道機関から報じられた件数は、総数が407件に上った。研究代表者別では、大森が78件で最も多く、次いで辛が61件、高橋が59件、川田が36件、田中と山内が34件、竹内が29件と続き、研究成果が社会的にも大いに注目されていることが伺われる。

### 2.2.7 共同研究や企業との連携

研究終了後、多くの研究代表者は多数の国内外の大学、研究機関との共同研究や企業との産学連携を行っている。

岩井は、鉄系強誘電体における光強電場効果に関して東京工業大学(東工大)(腰原チーム)と、また遷移金属酸化物の光誘起効果に関してフランス国立科学研究センター(CNRS)、ナント大学(ナント大)、レンヌ第一大学(レンヌ第一大)(以上フランス)、および東大、東北大学、東工大、京都大学(京大)と各共同研究を行っている。

佐藤は、ベクトルビームのイメージング応用に関して愛媛大学(今村チーム)および大学共同利用機関法人自然科学研究機構生命創成探究センター(根本チーム)と、また日本学術振興会二国間交流事業のもとで光ビームの位相制御に関し、東ウクライナ国立大学(東ウクライナ大)(ウクライナ)およびヴロツワフ工科大学(ポーランド)と各共同研究を行っている。

辛は、266nm・513nmのCWレーザー、11eVパルスレーザー、半導体リソグラフィ用193nm光源、NEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016年度～2020年度、プロジェクトリーダー：小林洋平東大教授)を支援し、新規高出力レーザーに関して複数の企業および25法人と各共同開発を行っている。またレーザー光電子の研究に関してIBS(韓国基礎研究所)と共同研究を行っている。

高橋は、冷却原子量子シミュレーションに関して分子研と共同研究を行っている。

今村は、免疫応答のメカニズムや超解像顕微鏡の解析技術等に関して製薬企業と、また2光子顕微鏡に関してエレクトロニクスメーカーおよび精密機器メーカーとそれぞれ共同開発を行っている。さらに新規蛍光カルシウムセンサーの開発に関して東大およびスタンフォード大学(米国)と共同研究を行っている。

川田は、電子線励起超解像イメージングシステム(D-EXA)の改良・高機能化に関して国内企業およびAcademia Sinica(台湾)と共同開発を行っている。また開発した同システムによる試料観察の評価技術およびシステムの販売に関して複数の企業と実用化を進めている。

腰原は、半導体材料に関して三菱電機(株)(他1社)および大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)(福本恵紀グループ)と、また光触媒に関して(株)豊田中央研究所(豊田中研)および九州大学(恩田健グループ)と、さらに新型フェムト秒光電子顕微鏡(fs-PEEM)装置の製品化に関して企業3社およびKEK(福本グループ)と共同開発を行っている。またfs-PEEM利用分子構造解析に関してマックス・プランク研究所(ドイツ)、トロント大学(カナダ)、CNRS(フランス)、ニーデオメルハリスデミール大学(Nigde大)(トルコ)と各共同研究を行っている。

竹内は、周波数もつれ光源用擬似位相整合素子に関して企業と共同開発を、またフンボルト大学ベルリン、ハノーバー大学(以上ドイツ)、南京大学(中国)、香港城市大学(香港)、シドニー工科大学(豪州)、The Israeli Institute for Advanced Research(イスラエル)と各共同研究を行っている。

田中は、JSTのACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017年度～2021年度)を通じてテラヘルツ(THz)半導体発生・検出素子の開発とボディ・スキャナーのプロトタイプの開発を行っている。またモントリオール工科大学(カナダ)と共同研究を行っている。

細貝は、高強度レーザー駆動の電子ビーム利用技術、高速パルス電源およびレーザー駆動電子源に関して民間企業、さらには海外において応用光学研究所(フランス)、EU PRAXIA(ドイツ放射光プロジェクト)、ELI-Beamlines(チェコ:欧州超高強度レーザー施設)、上海交通大学(中国)と各共同開発を行っている。さらに、放電プラズマ標的光導波路を、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所(量研機構関西研:京都木津)など関連分野の研究グループ・機関に提供し、超音速ガス標的を欧州・米国・中国などの研究機関に提供するなど、実用化に向けて成果の民間利用を進めている。

大森は、超高速量子シミュレーターに関して、浜松ホトとの緊密な共同開発や電気通信大学(電通大)、東工大、奈良先端科学技術大学院大学(奈良先端科技大)、ハイデルベルク大学(ドイツ)、オックスフォード大学(英国)、ストラスブルグ大学(フランス)、インスブルック大学(オーストリア)との共同研究により実用化を行っている。

尾松は、電子デバイスの融着を目指した光渦レーザー加工、超解像スピンジェットに関して複数の国内企業と共同開発を行っている。また光渦伝送ファイバー、キラル結晶化技術に関してセント・アンドルーズ大学(英国)、デューク大学(米国)、マッコーリー大学(豪州)、国立交通大学(台湾)、北海道大学(北大)、大阪大学(阪大)、大阪府立大学と各共同開発を行っている。

山内は、X線自由電子レーザー用形状可変ミラーに関して理研(SPring-8 II)、(公財)高輝度光科学研究センター(JASRI)、アルゴンヌ国立研究所先端放射光施設(APS)(米国)と共同開発を行っている。

### 2.2.8 実用化・製品化

本研究領域の研究代表者による実用化に関しては、山内が、X線自由電子レーザーや次世代リング型放射光施設で有用な形状可変ミラーにおけるピエゾ素子・ミラー基板の接合技術に関して実用化を達成したとの報告があるが、時期、製品化担当企業、製品名などの詳細公開情報は入手できていない。本報告の関連情報としては、山内がさらに通常型・長尺型形状可変ミラーに関して企業2社と実用化を実施中であり、SPring-8には既に提供し、APS(米国)には納入を予定している、との情報が得られている。また、大森が、超高速量子シミュレーターの実用化を目指して浜松ホトと緊密な共同開発を行っている。

### 2.2.9 ベンチャー

本研究領域では、研究期間中、及び終了後共にベンチャーの設立の例はなかった。

## 2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### 2.3.1 研究領域の展開状況(展開図)

本研究領域では、2008年度から2010年度にかけて合計16件の研究課題を採択し、「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」という戦略目標の下で研究を遂行した。研究終了後の展開と発展の様子を判りやすい形で図2-5に展開図として示した。本展開図では、研究領域を以下の4つの分野に分類した。

- (1) 光源の限界を駆使した物性探索 (腰原、田中、岩井、辛、鈴木)
- (2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能 (尾松、佐藤、細貝、山内)
- (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、竹内、大森)
- (4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用 (今村、本田、川田、小林)

その主な研究成果は以下の通りである。

#### (1) 光源の限界を駆使した物性探索

腰原は、時間分解光電子顕微鏡などを用いて光誘起相転移(隠れた物質相)を世界で初めて確認し、分子結晶における誘起瞬時スイッチの観測、遷移金属酸化物強誘電相のテラヘルツ(THz)光誘起分極の制御、金属錯体・人工光合成材料の光励起・マイクロ反応機構の解明を行った。これらの研究成果は、科研費特別推進研究「光と物質の一体的量子動力学が生み出す新しい光誘起協同現象物質開拓への挑戦」(2018年度～2022年度)に継承され、2019年第39回島津賞を受賞した。

田中は、THz 光非線形分光物理学を探究し、世界で初めて固体の高次高調波(グラフェンによる9次高調波)の観測に成功した。また高強度THz光照射特有の光・固体一体化電子状態(フロケ状態)および動的対称性の観測に成功した。さらに、THz 技術の普及を目指して、ACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017年度～2021年度)を継承し、ボディ・スキャナーなどのセキュリティへの新たな応用を開拓し、2018年第64回仁科記念賞、2018年第20回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏)賞を受賞した。

岩井は、極超短・強電場光パルスを用いて、世界で初めて有機金属の絶縁体化を実現した。さらに有機超伝導体の光照射瞬時光誘導放出など、量子多体系の光強電場現象を開拓し、文科省Q-LEAP「強相関量子物質におけるアト秒光機能の開拓」(2018年度～2027年度)およびCREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「キャリアエンベロープ位相制御による対称性の破れと光機能発現」(2019年度～2024年度)へと技術を発展的に継承した。

辛は、超高分解能・角度分解レーザー光電子分光により、世界で初めて高温超伝導体最表面のトポロジカル超伝導(TSC)状態を発見した。また絶縁体-金属相の未知の相転移を発見して光による物質の自在な制御(絶縁体-金属間変換)の可能性を示し、2020年第3回放射光科学賞を受賞した。

鈴木は、液体中の真空紫外・超高速光電子分光技術を用いて、有機分子における電子の非断熱遷移・全電子緩和過程の観測に成功した。また溶媒和電子の励起状態の寿命や溶媒和ダイナミクスの高精度評価や束縛エネルギー分布の観測などに多くの新しい知見を得た。

## (2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能

尾松は、トポロジカル光波(光渦)を用い、世界で初めて物質表面・内部にサブ  $\mu\text{m}$  の螺旋構造体が形成されることを発見した。以後、光硬化樹脂で螺旋ファイバーを実現し、蜂蜜状高粘度液膜で極細・超解像スピンジェット状の秩序化を発見し、飽和  $\text{NaClO}_3$  溶液中の金の 3 量体ナノ構造で CEE(鏡像体過剰率:キラルバイアス)の増大や結晶化の円偏光依存性を発見した。こうして光渦による螺旋ナノ構造創製のパイオニアとして世界の潮流を牽引した。これらは、CREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「光渦が拓く超解像スピンジェット技術」(2019 年度~2024 年度)に継承されている。なお、尾松は、研究期間中・終了後を通じた国内・海外の特許出願・登録件数が本研究領域で最多となっており、以下の通りである。

- ・研究期間中： 特許出願(国内/国際) = (8/4) 特許登録(国内/国際) = (8/4)
- ・研究終了後： 特許出願(国内/国際) = (5/2) 特許登録(国内/国際) = (2/0)

尾松は長年の光渦サイエンスへの貢献から、文部科学大臣表彰科学技術賞の受賞に加えて、国際的に広く活躍されていることから、OSA 及び SPIE 学会の Fellow 称号も得ている。

佐藤は、ベクトルビームを光源とする高分解・超解像顕微鏡を用いて、HeLa 細胞微小管の分解能 100nm 以下の蛍光画像の観察や、波面制御ベクトルビームの微小なスポット加工およびシングルショット加工で厚み数 10nm の金属・半導体薄膜や 35nm 厚みのシリコン薄膜のナノ加工の開発に成功した。

細貝は、レーザー航跡場加速器のビームの安定化を目指して、超高強度レーザーパルスに耐えるプラズマ利用集光素子・光導波素子を開発し、GeV 級レーザー駆動プラズマ加速器およびこれを用いた X 線自由電子レーザー(XFEL)の開発に貢献した。

山内は、放射光 X 線源への適用を目指して、凹凸面状の形状可変ミラーによる小型・高制御のアダプティブ集光系を実現、また XFEL や次世代リング型放射光施設で有効な長尺形状可変ミラーを実現した。加えて、極小 XFEL の形状をワンショットで計測できる X 線ビーム診断新技術の開発にも成功した。

## (3) 最先端光量子を駆使した原子・分子・集合系の量子制御

高橋は、極狭線幅・超高安定レーザー光を用いて、光格子に捕獲されたレーザー冷却 Yb 原子多体系におけるサウレスポンプを世界で初めて実証した。さらに量子シミュレーターへの応用に必要となる同現象の制御技術として、Yb 分子光会合による量子多体状態の制御や、Yb 原子間のトンネル現象による格子点の空間断熱移送の制御に成功した。本成果は、理論・実験双方で世界のサウレスポンプの研究に多大なインパクトを与え、2020 年紫綬褒章を受章した。

竹内は、モノサイクル量子もつれ光を用いて、高分解能(3 $\mu\text{m}$ )量子光干渉断層撮影(OCT)、スラブ・リッジ導波路による大光量・広帯域量子もつれ光源、量子赤外吸収分光装置、シリコン半導体リング共振器によるオンチップ周波数量子もつれ光源・光量子回路を実現し、CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」の研究課題「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」(2016年度～2021年度)、および文科省(Q-LEAP)「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」(2018年度～2027年度)に継承された。

大森は、光格子中のRbを用いたレーザー冷却リユードベリ原子集団を利用してフェムト秒超高速多体電子の挙動をアト秒精度で制御・観測できる世界唯一の超高速量子シミュレーターを開発し、これに超短パルスレーザー(～10ps)を照射してリユードベリ軌道の電子を生成・調節できる新物質(金属状の量子気体)を世界で初めて創出した。本成果は量子シミュレーターの実現に画期的なプラットフォームを提供し、科研費特別推進研究「アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求」(2016年度～2020年度)、および文科省(Q-LEAP)「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレーターの開発と量子計算への応用」(2018年度～2027年度)に継承されたほか、2017年宅間宏記念学術賞および2018年文部科学大臣表彰科学技術賞の受賞に輝いた。

#### (4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用

今村は、2光子励起顕微鏡を用いて以下の技術を開発した。(i)第二高調波発生(SHG)による非アルコール性脂肪肝炎の新たな線維化診断法および変形性関節症の早期診断法。(ii)SHGによる生体深部の観察で細胞外マトリックスの構築におけるコンドロイチン硫酸の重要性の検証。(iii)近赤外蛍光標識剤PREX710を利用したマウス脳血管の深部イメージング。(iv)長波長色素の蛍光吸収測定により生きたマウスの神経・シナプス活動を超高感度・超高速で計測できる赤色蛍光カルシウムセンサー。これらは生体分子と光の相互作用を駆使することから、科研費新学術領域研究「Resonance Bio～共鳴誘導で革新するバイオイメージング～」(2015年度～2019年度)に継承されている。

本田は、光ピンセットを用いたウィルスの細胞感染、細胞内移動、核膜通過の挙動および増殖メカニズムの解明に関し、東工大、名古屋大学(名大)との共同で、超高感度センシング用ウィルス濃縮デバイスおよび蛍光標識感染細胞の温度計測システムを開発した。また蛍光標識したウィルスの細胞付着の観察を通じてウィルスの違いに依存した細胞への結合状態や細胞質中の移動・核膜通過・通過後の停止などの観察に成功した。

川田は、イオン感応膜を導入した高分解能・電子線励起超解像イメージング技術を用いて、最適な電子線照射による細胞刺激法、およびSiN基板の疎水性表面に厚み～15nmの親水性膜を形成する細胞培養法を開発し、HeLa細胞の鮮明なイメージング像を確認した。これらの成果はA-STEP「電子線検出によるイオン分布のナノイメージセンシングシステム」(2015年度～2020年度)およびCREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「光と電子の融合による超高分解能細胞機能イメージング・制御」(2020年度～2025年度)に継承されている。

小林は、測定分子の蛍光標識が不要で実用化に有利な特長を有する光熱(PT)顕微イメージングの開発に集中的に取り組み、対物レンズに輪帯開口或いは逆輪帯開口を導入した解像度の向上(25%)、ガルバノ鏡掃引による2次元高速・超解像イメージングの回折限界の向上(34%)、さらにマウス皮膚の正常組織とメラノーマの病理組織の観察で正常細胞とガン化した悪性細胞の効果的な判別法など、医療現場で有効性を発揮するPT顕微鏡の新技術を多数創出した。



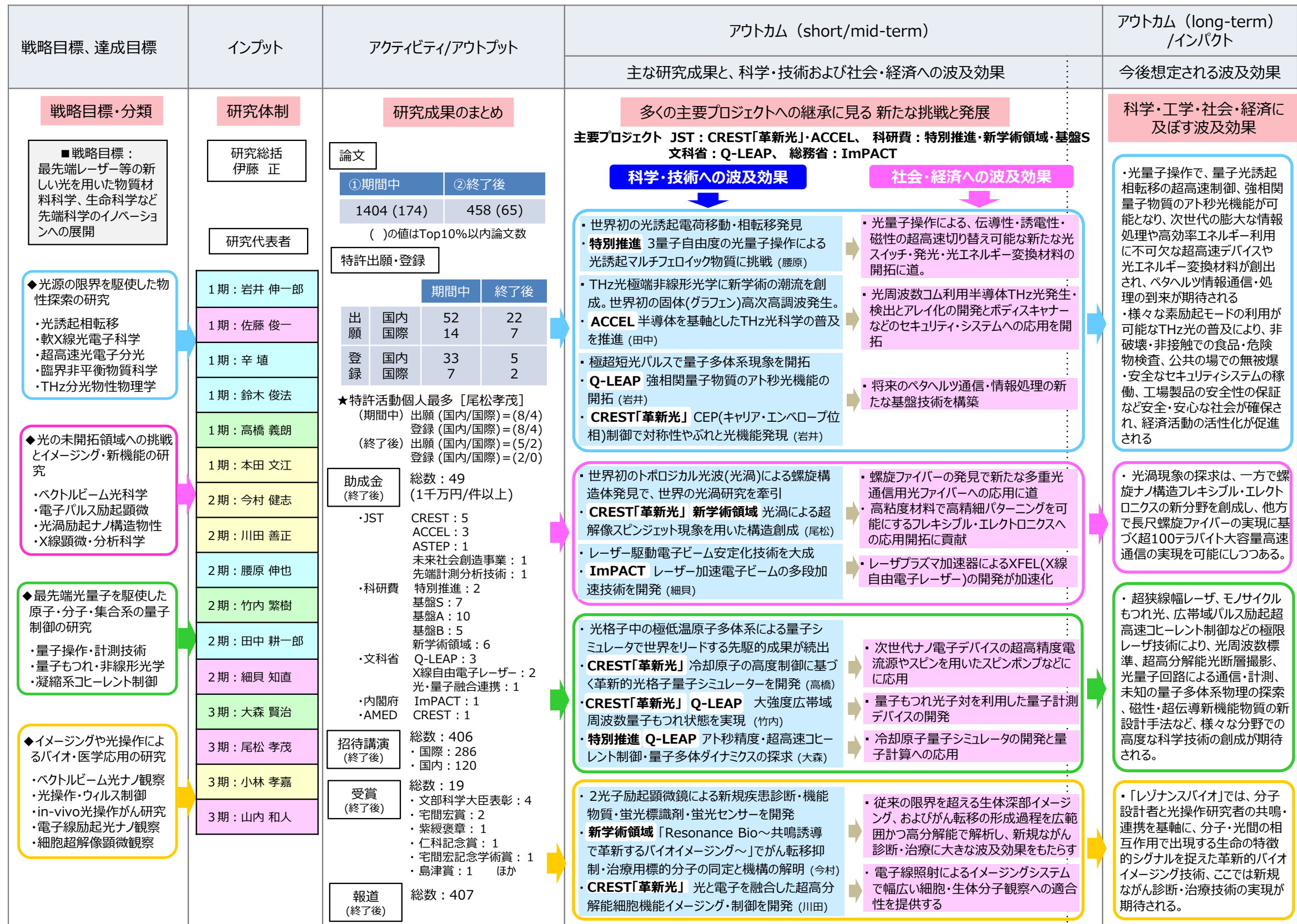


図 2-5 CREST 研究領域の展開図

### 2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

研究成果の科学技術の進歩への貢献につき、2.3.1で分類した4つの分野に分けて代表的事例を以下に示す。

#### (1) 光源の限界を駆使した物性探索に関する科学技術の進歩の事例

腰原は、ナノメートル・200fs級の空間・時間分解フェムト秒光電子顕微鏡(fs-PEEM)を開発した。X線・電子線パルス融合超高速・動的構造解析技術と併せて、光誘起電荷移動・相転移(隠れた物質相)の空間ダイナミクスを世界で初めて確認し、新たな光スイッチ・発光・光エネルギー変換材料への応用に道を拓いた。また隠れた物質層の探索を、初期の有機結晶での検討から無機材料に拡大展開し、超高速時間分解電子線回折法を用いて、分子結晶における新たな光誘起瞬時スイッチの観測や、遷移金属酸化物における強誘電相のTHz光誘起分極の制御に成功した。更に超高速分子構造解析により金属錯体中の光励起反応過程および人工光合成材料のマイクロ反応機構を解明するなど、光誘起相転移に関する多くの学術的成果を挙げた。これらは、科研費特別推進研究「光と物質の一体的量子動力学が生み出す新しい光誘起協同現象物質開拓への挑戦」(2018年度~2022年度)に継承されている。これらの業績により、2016年日本物理学会「物理学70の不思議-17」に選出されて高い評価を得たほか、2019年第39回島津賞を受賞するなど、多くの科学・技術的波及効果の創出に貢献している。

田中は、世界最高強度(電場振幅:超1MV/cm)のTHz光発生装置を開発した。THz光源は、構築のし易さから国内外の多くの研究者に多用され、極端非線形光学現象の発生から固体物質の新機能発現や機構解明に至る幅広い研究の加速に多大な貢献をした。論文の被引用数も2019年10月4日時点で607に上る。これらのうち、半導体へのTHz光照射によるキャリア増幅の発見は、限界光駆動半導体物理と呼ばれる新たな学術的潮流を創出した。グラフェンを用いた60THzでの9次高調波の観測は、従来困難とされた固体の高次高調波発生を世界で初めて可能にした。同時に得られたTHz光の楕円偏光依存性は、グラフェンのディラック・コーンに起因する固体の高次高調波発生機構の解明に貢献した。さらに、強い赤外レーザーと弱い近赤外レーザーを単層MoS<sub>2</sub>に入射し、高強度レーザー光照射固有の現象である光と固体の一体化された電子状態(フロケ状態)とその新たな対称性(動的対称性)を世界で初めて観測した。本成果は、将来の量子情報技術の深い理解に資する。他方、田中は様々な素励起モードを利用したTHz技術の普及を目指し、安価、小型で取り扱いが簡易な半導体のTHz光発生・検出器の開発にも取り組んだ。本研究はACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017年度~2021年度)に継承され、ボディ・スキャナーなどのセキュリティ分野へのTHz応用を目指している。この他、高解像度THz光近接場顕微鏡の開発とバイオセンサーや機能性材料のイメージングにも優れた成果を創出しており、これらの業績により2018年第64回仁科記念賞、2018年第20回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)を受賞している。

岩井は、極超短光パルス(7fs、1.3サイクル)の高周波強電場効果により有機金属(BEDT-TTF系)の絶縁体化を初めて実現した。また、有機超伝導体に極めて強い光パルスを照射し

た瞬間に光が増幅される誘導放出現象を発見し、量子多体系の光強電場現象を開拓した。これらの成果は文科省 Q-LEAP「強相関量子物質におけるアト秒光機能の開拓」(2018 年度～2027 年度)および CREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「キャリアエンベロープ位相制御による対称性の破れと光機能発現」(2019 年度～2024 年度)に継承されている。本研究は、将来のペタヘルツ通信・情報処理の新たな基盤技術の構築に重要である。

辛は、高温超伝導体では広く予見されている  $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$  最表面のトポロジカル超伝導 (TSC) 状態を、超高分解能・角度分解レーザー光電子分光装置を用いて世界で初めて発見した。最表面電子はマヨラナ粒子の可能性を秘めて安定で擾乱に強いことから、本研究成果は量子コンピューターへの応用開拓につながる可能性がある。また、励起子絶縁体  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  とバンド絶縁体  $\text{Ta}_2\text{NiS}_5$  に高次高調波レーザーを照射して電子構造を直接観測し、絶縁体から金属相への未知の相転移を発見して、光による物質の自在な制御(絶縁体-金属間変換)の可能性を示した。これらの業績により、2020 年第 3 回放射光科学賞を受賞した。

## (2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能に関する科学技術の進歩の事例

尾松は、軌道角運動量を有する光渦(トポロジカル光波)を物質に照射すると物質表面・内部にサブ  $\mu\text{m}$  の螺旋構造体が形成され、螺旋度が軌道角運動量の大きさに強く依存することを世界で初めて発見した。これにより世界的な光渦研究の潮流が形成され、その後今日まで当該分野での世界的リーダーの一人として活躍している。この光渦の技術は多種の材料に適用された。光渦の光硬化樹脂への適用では、光空間ソリトン効果によりファイバーが自己組織的に線引きされ、螺旋ファイバーができることを発見した。本発見は新たな空間多重光通信用光ファイバーへの応用に道を拓く。また、蜂蜜状高粘度液膜への適用では、液膜が光渦の中心に集まって極細・超解像スピンジェットに秩序化する事を発見した。本発見は、従来のインクジェット法では不可能な高粘度材料(金属ペーストなど)の高精細パターンニングを可能にするフレキシブル・エレクトロニクスへの応用開拓に貢献すると考えられる。更に飽和  $\text{NaClO}_3$  溶液中の金の 3 量体ナノ構造への適用では、螺旋結晶化直後の CEE(鏡像体過剰率:キラルバイアス)の増大や結晶化の円偏光依存性を発見した。さらにアミノ酸結晶への適用では結晶成長速度の飛躍的な加速現象を発見した。これらの研究は、CREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「光渦が拓く超解像スピンジェット技術」(2019 年度～2024 年度)の戦略的推進事業に継承され、光渦技術の更なる学術・産業応用双方の深耕に幅広く展開されている。CREST 開始から今日までの国内および海外特許出願は各々 13 件および 6 件、国内および海外特許登録は各々 10 件および 4 件に及んでいる。光渦研究のパイオニアとして尾松は 2016 年文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞しているほか、国際的な活躍から、OSA 及び SPIE の 2 つの学会から Fellow 称号も得ている。

細貝は、超高強度レーザーパルスに耐えるプラズマ利用集光素子・光導波素子をレーザー航跡場加速に用いてビームを安定化した。さらに内閣府 ImPACT「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現(PM 佐野雄二) 1A: レーザープラズマ電子加速技術の開発」(2014 年度～2018 年度)および JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビー

ム加速器の開発(PM 熊谷教孝)レーザー駆動電子加速技術開発」(2018年度～2027年度)を通して GeV 級レーザー駆動プラズマ加速器およびこれを用いた X 線自由電子レーザー(XFEL)を開発するなど、超小型化高エネルギー加速器の研究を着実に展開している。また、高強度レーザー駆動の電子源や利用技術で、国内(企業)、レーザー駆動電子源開発で応用光学研究所(フランス)、EU PRAXIA(ドイツ放射光プロジェクト)、ELI-Beamlines(チェコの欧州超高強度レーザー施設)、上海交通大学(中国)と共同開発が進展中である。さらに放電プラズマ標的(光導波路)や超音速ガス標的などの成果を、それぞれ国内(量研機構関西研)や海外研究機関(欧州・米国・中国など)に提供するなど、幅広い国内・国際連携を行っている。

山内は、放射光 X 線源を対象に、凹凸面状の形状可変ミラーによる小型・高制御のアダプティブ集光系を実現した。現在、APS への導入が決定し、阪大・企業連合による導入計画が進行中である。また XFEL や次世代リング型放射光施設で有効な長尺形状可変ミラーを実現した。さらに極小 XFEL の形状をワンショットで計測できる X 線ビーム診断の新技术を開発した。本研究成果は、X 線非線形光学現象の開拓のみならず、蛋白質構造の高解像観察、疾病の原因究明や新薬の開発など、医学・薬学・生物学の進展にも波及効果をもたらす。

### (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する科学技術の進歩の事例

高橋は、レーザー光の定在波が作る光格子中でレーザー冷却された 2 電子系原子を用いて、将来の電子ナノデバイスの超高精密電流源や量子現象のコヒーレント操作に必要な量子シミュレーターの実現に重要な成果をもたらした。まず、サウレスポンプ、即ち周期的ポテンシャルに捕獲された電子のポンプ(輸送)量が、周期場の時間・空間制御下で一定になる(トポロジカル不変量)現象を、電子の代わりに光格子中にレーザー冷却された極低温の Yb 原子多体系において世界で初めて実証した。次いで、モット絶縁体-超流動相転移におけるエネルギー・粒子の散逸過程の影響を光格子中の極低温 Yb 原子多体系で探索し、レーザー照射による Yb 分子光会合による量子多体状態の制御技術を確立した。更に、最小 3 格子点からなる光格子(リーブ光格子)の格子点に捕獲された Yb 原子の量子力学的トンネル現象をレーザー照射で操作し、格子点の空間断熱移送に成功した。これらは、量子多体系におけるサウレスポンピング理論を実証し、ポンプ量の精密制御技術を創出したことにより世界のサウレスポンプ研究を牽引することとなり、多大な科学的波及効果をもたらした。さらに本成果はトポロジカル物理学分野でも広く引用され、理論・実験双方の発展に大きく寄与した。これらの功績により、2020 年紫綬褒章を受章した。

竹内は、モノサイクル量子もつれ光を利用して、古典・量子ハイブリッド化による高分解能(3 $\mu$ m)量子光干渉断層撮影(OCT)、スラブ・リッジ導波路による大光量・広帯域量子もつれ光源、量子赤外吸収分光装置、並びにシリコン半導体リング共振器によるオンチップ周波数量子もつれ光源・光量子回路を実現した。これらの成果は、CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」の研究課題「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」(2016年度～2021年度)、文科省(Q-LEAP)「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」(2018年度～2027年度)に継承された。また産学連携(京大、NICT、(株)島津製作所)により、量子 OCT 装置のプロトタイプや可視～中赤外域もつれ光源と量子吸収分光へ

の応用を目指した新たなセンシング・テクノロジーを開発している。更に、新規な光量子回路の通信・計測への応用も目指しており、科学技術のみならず社会・経済的な波及効果は大きい。

大森は、光格子にトラップされた強相関・極低温 Rb リュードベリ原子集団におけるフェムト秒超高速・多体電子のダイナミクスをアト秒精度で制御・観測できる、世界唯一の超高速量子シミュレーターを開発した。また、極低温の Rb 原子気体を光格子にトラップし、超短パルスレーザー(～10ps)を照射してリュードベリ軌道(直径～0.5 $\mu\text{m}$ 以上)に励起された空間的重なりを持つリュードベリ電子を生成・調節できる新物質、“金属状の量子気体”を世界で初めて創出した。この新物質は量子シミュレーターの画期的プラットフォームとして期待されている。本研究は、科研費特別推進研究「アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求」(2016年度～2020年度)、文科省(Q-LEAP)「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレーターの開発と量子計算への応用」(2018年度～2027年度)に継承されている。本超高速量子シミュレーターは、量子多体系の未知の物理現象や物性の探索に極めて有用とされ、超高速コヒーレント制御と極低温物理が融合した新しい科学技術を創出し、さらに磁性・超伝導材料などの新機能物質の設計・計算手法の開発に向けて多大な貢献が期待される。これらの業績により、2017年松尾財団宅間宏記念学術賞、2018年文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞している。

#### (4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用に関する科学技術の進歩の事例

今村は、新規長波長パルス光源と波面補正光学素子を備えた新たな2光子励起顕微鏡システムを用いて、以下に示す新たな疾患診断法、新機能物質、新蛍光標識剤、および新蛍光センサーの開発を行った。

- (i) 第二高調波発生(SHG)を用いて、非アルコール性脂肪肝炎の新たな線維化診断法、変形性関節症の早期診断法、AIによる自動診断法を開発した。
- (ii) SHGによる生体深部の観察では、コンドロイチン硫酸がコラーゲン分子の発現や同線維の正しい配列に関わり、細胞外マトリックスの構築に重要であることを明らかにした。
- (iii) 化学的安定性・耐光性に優れた近赤外蛍光標識剤 PREX710 を利用して生体深部イメージング技術を駆使し、マウス脳血管の深部イメージングに成功した。
- (iv) 2光子顕微鏡による長波長色素の蛍光吸収測定技術を駆使し、生きたマウスの神経・シナプス活動を超高感度・超高速で計測できる赤色蛍光カルシウムセンサーの開発に成功した。

生体分子と光の相互作用を駆使した本研究は、科研費新学術領域研究「Resonance Bio～共鳴誘導で革新するバイオイメージング～」(2015年度～2019年度)に継承され、分子設計者と超解像顕微システム技術者の共鳴による従来の限界を超える生体深部イメージングに挑戦している。これらの成果が新規ながん診断・治療にもたらす医学上の波及効果は極めて大きい。

本田は、光ピンセットを用いて、ウイルスの細胞感染、細胞内移動、核膜通過の挙動および増殖などのメカニズム解明に多くの知見を得た。東工大グループとの共同研究では、超高度センシングを目指し、マイクロ流路に陽イオン交換膜のブリッジを付与した構造のウイルス濃縮デバイスを開発した。名大グループとの共同研究では、蛍光標識感染細胞の温度計測システムを開発した。また蛍光標識したウイルスの細胞付着の観察では、ウイルスの型の違いに依存した細胞への結合状態やウイルスの細胞質中の移動・核膜通過・通過後の停止などを観察した。これらは、ウイルス感染メカニズム解明の一助となる他、医療・ライフサイエンスなどに幅広い応用が期待される。さらに、世界を震撼させるパンデミック(新型コロナウイルス COVID-19 など)の様な人類の危機を救済する医療技術の進展に、本研究成果が、直接的・間接的に貢献することが世界規模で強く期待される。

### 2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

研究成果の社会・経済への波及効果につき、2.3.1 で分類した4つの分野に分けて代表的事例を以下に示す。

#### (1) 光源の限界を駆使した物性探索に関する社会・経済への波及効果の事例

腰原の研究は、筑波大学(筑波大)グループと共同で科研費特別推進研究「光と物質の一体的量子力学が生み出す新しい光誘起協同現象物質開拓への挑戦」(2018年度~2022年度)に継承されている。このプロジェクトは、3つの量子自由度(電荷・電子軌道・スピン)の光量子操作により伝導性・誘電性・磁性相転移の超高速切り替えが可能な光マルチフェロイック物質の実現を目指すものである。次世代の膨大な情報処理や高効率エネルギー利用に不可欠な超高速光相スイッチ材料や光エネルギー変換材料には、エネルギー緩和過程を伴う古典型光誘起相転移は原理的に困難を伴う。そこで腰原が見出した光励起特有の新秩序状態(隠れた状態)を利用し、3つの自由度の操作で量子光誘起相転移(量子振動と光子の強結合)を超高速に制御する技術が注目されている。現在、産学連携により半導体材料、光触媒、および新型 fs-PEEM 装置の製品化と、新たなスピン偏極・超高速時間分解・超短パルス電子線回折装置の開発が計画されている。

田中が取り組んでいる THz 光は、可視光が不透明な物質でも透過し、被爆の恐れが少なく、分子の振動・回転を含む様々な素励起モードを内在し、固有の吸収スペクトル計測による各種の物質・材料の検査が可能である。さらに THz 光照射により線形応答だけでなく物質の制御に基づく広帯域波長光源、中赤外検出器、超高速変調・スイッチ素子、磁気ヘッド、センサーなどへの応用が可能であり、新たな市場・産業の創出が期待される。前出の ACCEL 事業では、産学連携により小型・安価で取り扱いが簡易な半導体での THz 光発生・検出およびアレイ化・モジュール化の実現を目指している。2台の波長可変レーザーの波長安定化に光周波数コムと共鳴トンネルダイオード(RTD)を取り入れ、レーザーの2波長間ビート検出と THz 発振・検出に単一走行キャリア・フォトダイオード(UTC-PD)を採用して実用化を目指している。さらにボディ・スキャナーへの応用と2021年プロトタイプの開発を計画している。こうした THz 技術の普及は、非破壊・非接触の工場内材料検査、食品・危険物検査や、



高分解能・無被爆で安全・安心なセキュリティ装置/システムなど、幅広い応用の開拓を促す。さらに交通機関はじめ公共の場でのセキュリティ強化、工場での製品の安全性の確保など、安全・安心な社会が確保され経済活動の活性化を促すものとして、社会・経済的波及効果は大きく計り知れない。

鈴木は、高時間分解能(25fs)を有する真空紫外・超高速光電子分光を用い、有機分子の基底電子状態から起こる非断熱遷移と基底状態の全電子緩和過程の観測に成功した。また溶媒和電子の第一電子励起状態の寿命や、励起および基底状態のスペクトル分離による内部転換後の溶媒和ダイナミクスを正確に評価することに成功した。さらに、高次高調波の極端紫外光を用いた溶媒和電子の束縛エネルギー分布の測定から、液体の光電子スペクトルで歪み除去スペクトル回復法を開発した。従来、液体ジェットの高速度光電子分光の研究はあるが、技術的困難のため普及が阻害されていた。本研究の成果が溶液化学分析にもたらす波及効果が期待されている。

## (2) 光の未開拓領域への挑戦とイメージング・新機能に関する社会・経済への波及効果の事例

尾松は、軌道角運動量を有する光渦を光硬化樹脂に集光し、光硬化により屈折率が增大してファイバーが自己組織的に線引きされる光導波路自己形成作用と光渦の軌道角運動量的作用を利用し、画期的な螺旋ファイバーの形成法を発見した。英国セント・アンドルーズ大学との国際共同研究による最新の成果では、非回折現象が発現しない従来の光渦(ラゲール-ベッセルビーム)ではなく、螺旋型位相版と円錐レンズを用いて発生させた非回折光渦(1次ベッセルビーム)を用いて、従来の100倍(超1cm)の長尺螺旋ファイバーを世界で初めて実現した。本研究成果は2020年7月15日のOptics Lettersにオンライン掲載された。大容量・高速通信を実現する手段として、光渦を利用した次世代光通信が注目される中、この研究成果は、複数の光渦にデータを幾重にも重ねることで、毎秒100TBを超える大容量高速通信に貢献する可能性を秘めており、今後の展開が大いに期待される。

佐藤は、ベクトルビームのスーパーオシレーション現象や光スポット形状を自在に制御する点像分布関数の差引法を適用した高分解・超解像顕微鏡を開発し、HeLa細胞微小管の蛍光画像の観察で100nm以下の分解能を確認した。本成果は、汎用蛍光プローブで簡便な顕微鏡操作による生きた細胞の高速イメージングが可能なることから実用性に富み、幅広い用途の創出に多大な波及効果を有する。一方、波面制御ベクトルビームの微小なスポット加工や2光束干渉法を用いたベクトルビームのシングルショット加工で、厚み数10nmの金属・半導体薄膜や35nm厚みのシリコン薄膜のナノ加工法を開発した。本研究成果は10nmレベルの薄い膜中のナノ加工が可能で、且つ電子ビームの透過率が高いことから、特に電子顕微鏡における渦電子流の発生や位相素子への応用が期待される。

### (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する社会・経済への波及効果の事例

高橋は、スイス工科大学(ETH Zurich)と共同で、レーザー励起による光格子の周期ポテンシャルに低温冷却原子気体を配置した系で、サウレスポンプの原理を世界で初めて実証した。サウレスポンプは元来電子を輸送するシステムである。空間的な周期ポテンシャルを時間的にも周期的に変化させることで、電子の輸送(ポンプ)量を不変に保つことが可能となる。電子の不変な輸送量がトポロジカル不変量と呼ばれ、輸送現象がノイズなどの擾乱を受けない非常に安定な特長を有する。サウレスポンプ自体の提唱は1980年代だが、従来の半導体ナノデバイスでは空間的、時間的な周期ポテンシャル構造の実現が困難で検証には至らなかった。今回、電子の代わりにレーザー冷却されたYb原子を光格子の周期ポテンシャルに配置してサウレスポンプを実現し、輸送される原子の量がパラメータの変化に影響されず安定であることを実証し、サウレスの提案が正しいことを証明した。これは、実際の電子系でも構造さえ構築できれば超高精度の電流源が出来る可能性を意味する。因みに、現在、電気抵抗の国際標準は量子ホール効果で決定される。電気抵抗がやはりトポロジカル不変量のため非常に高精度に決定できることに由来する。サウレスポンプが電流の国際標準に使える超高精度な電流源になり得ることは1990年に指摘されていたが、半導体ナノデバイスでは実現されていなかった。光格子を用いた冷却原子系は操作性が良好なため、従来理論提案のみに終わっていた新原理に基づく物理現象やデバイスの検証などへの適用が期待される。将来の電子ナノデバイスにおける超高精度電流源や、電子の持つスピンを取り入れたスピンプンプなどへの応用は有望である。本研究成果は、2016年12月Nature Physics 電子版に掲載された。

大森は、量子多体系の量子波を光で制御するコヒーレント制御技術として、従来の連続波レーザーではなく広帯域パルスレーザーを用いることで、光格子に捕獲された極低温リユードベリ原子集団をアト秒精度で制御する超高速量子シミュレーターを世界に先駆けて開発した。本量子シミュレーターはD-Wave2000(カナダ量子コンピューター企業の製品)の $10^3$ 倍以上の高効率性能を有し、量子多体系の未知の物理現象や物性の探索に極めて有用である。このため超高速コヒーレント制御と極低温物理が融合した新しい科学技術の創出のみならず、前述したように、磁性・超伝導材料などの新機能物質の設計・計算手法の開発に与える多大な波及効果が予見される。

### (4) イメージングや光操作によるバイオ・医学応用に関する社会・経済への波及効果の事例

今村は、新規な2光子励起顕微鏡システムを開発し、新疾患診断法、新機能物質、新蛍光標識剤および新蛍光センサーの開発を行った。継承された科研費新学術領域研究「Resonance Bio～共鳴誘導で革新するバイオイメージング～」(2015年度～2019年度)では、分子設計研究者と光を駆使する研究者が共鳴的に分子と光の相互作用を究める革新的バイオイメージング技術を開発している。今村は、「革新的イメージング技術とがんモデルメダカを駆使したがん転移研究」(2015年度～2019年度)のテーマで、色素、光学顕微鏡、イメージングソフトウェア、サンプル調製を包括する技術革新の輪を広げている。本研究は、



全身の高解像度蛍光イメージングが可能なメダカをモデルに、がん転移の抑制・治療のための標的分子の同定とそのメカニズムの解明を目指している。がんモデルとしては、蛍光標識されたヒトの膵がんを発症する遺伝子導入メダカ系統を開発し、さらにゲノム編集された免疫不全メダカに蛍光標識したヒトがん細胞を移植したモデルメダカを開発する。さらにがんモデルメダカ全身の広視野・均一照明・3次元観察が可能な光シート型顕微鏡を開発する。こうした技術により、革新的ながんモデルメダカ、蛍光イメージング技術と光操作技術を統合することで、がん転移の形成過程が広範囲かつ高分解能で時空間的にダイナミックに解析される時代が到来すると考えられる。バイオイメージングを中心に捉えた学際的な共同研究の成果は、様々な生物学分野におけるパラダイムを揺り動かす効果が期待される。

川田は、微小光源を励起するために蛍光膜をイオン感応膜に置換した高分解能・電子線励起超解像イメージングシステム(D-EXA)を開発した。これにより、細胞のナノ領域に電氣的刺激を与える際に電子線照射量が最適となる細胞刺激法を確立した。また、SiN基板の疎水性表面に厚み~15nmの親水性膜を形成する細胞培養法を開発し、HeLa細胞の鮮明なD-EXA像が得られることを確認した。これらの研究は、A-STEP「電子線検出によるイオン分布のナノイメージセンシングシステム」(2015年度~2020年度)、およびCREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」の研究課題「光と電子の融合による超高分解能細胞機能イメージング・制御」(2020年度~2025年度)に継承された。本技術は、様々な基板の水に対する親和性を制御し、細胞培養に適した表面を実現する有力な手段、およびD-EXAの幅広い細胞・生体分子への適合性を提供するものであり、医学・生物学の発展に大きく貢献することが期待される。

小林は、神経細胞の同時多色イメージングが可能な光熱(PT)顕微イメージング法の性能向上を図った。PTイメージング法は測定分子の蛍光標識が不要なため実用化に有利な利点を有する。解像度の性能に関しては、顕微鏡の対物レンズに輪帯開口或いは逆輪帯開口を導入して3次元解像度の向上(25%)に成功した。ガルバノ鏡掃引による高速化では、2次元イメージングで高速・超解像イメージングの回折限界を34%向上させた。またマウス皮膚の正常組織とメラノーマの病理組織のPTイメージ観察では、グレーレベル同時生起行列解析を行って正常細胞とガン化した悪性細胞の判別に成功した。こうしたPT顕微鏡は医療現場で観察実験が可能となるまでに性能が向上した。一方、細胞・分子状態の光制御に関して東京理科大学と共同で光誘起力による吸収スペクトル変化を追跡し、水溶液分子の単量体からJ会合体への生成過程を世界で初めて観測した。この結果は、溶媒中の未知の分子やイオンの集合状態を観測しつつ分子会合体や結晶を創成する実用性を秘めており、科学的のみならず社会・経済的な波及効果も高いと考えられる。

#### 2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合)

本研究領域研究終了以降の、研究代表者および主たる共同研究者の研究メンバーに関する特記すべき活動状況については、以下の代表的事例が挙げられる。

腰原グループでは、超高速分子構造解析により隠れた物質相の探索に貢献した恩田健(研究期間当時、腰原グループ・研究員)は、研究終了後に九州大学・教授となり、科研費新学

術領域「革新的光-物質変換・ソフトマテリアル」の継承研究を牽引している。また同グループの福本恵紀(研究期間当時、腰原グループ・研究員)は、研究終了後に KEK 准教授となり、広帯域・波長可変光源を融合した新型フェムト秒光電子顕微鏡の製品化を目指し、産学連携による共同開発に邁進している。

今村グループでは、主たる共同研究者の根本知己(研究期間当時、北海道大学教授)が、研究終了後に大学共同利用機関法人自然科学研究機構生命創成探究センター教授に異動して、生物個体用 *in vivo* 2光子励起顕微鏡の高度化の研究を推進している。

田中グループでは、同グループの青木隆朗(研究期間当時、特定准教授)は、研究終了後に早稲田大学教授に就任している。また同グループの廣理英基(研究期間当時、特定拠点准教授)は、研究終了後に京大准教授に就任している。

## 第 3 章 各研究課題の主な研究成果

### 3.1 2008 年度採択研究課題

- ・ 研究課題「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」(岩井伸一郎)
- ・ 研究課題「ベクトルビームの光科学とナノイメージング」(佐藤俊一)
- ・ 研究課題「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」  
(辛埴)
- ・ 研究課題「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」(鈴木俊法)
- ・ 研究課題「超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発」(高橋義朗)
- ・ 研究課題「光ピンセットによる核内ウィルス RNP 輸送と染色体操作 ～ウィルスゲノム除去への挑戦～」(本田文江)

### 3.1.1 研究課題「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」(岩井伸一郎)

#### 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

岩井伸一郎 (東北大学大学院理学研究科・教授)

研究期間 2008年10月～2014年3月

展開している事業:

科研費基盤研究(A)(2)、文科省(Q-LEAP)、JST(CREST)

#### CREST の成果:

赤外光領域の極超短パルス(12fs、～3 サイクル)光やテラヘルツ光などの先端パルスを強相関電子系における光誘起相転移の研究に適用し、初期電子ダイナミクスの解明や新たな電荷-スピン液体の発見に成功した。

#### ■ 発展:

##### 1. 極超短光パルスで有機金属の絶縁体化を初めて実現<sup>1,2,3</sup>

光による絶縁体から金属への相転移の報告はあるが逆(金属から絶縁体)は一般に困難である。今回、近赤外極超短パルス(パルス幅 7fs、1.3 サイクル)の高周波強電場効果により有機金属(BEDT-TTF 系)の絶縁体化に初めて成功。ここでは高周波強電場に伴う赤外領域の反射率変化の観測から、金属内電子のホッピングの抑制(運動の凍結・秩序化)即ち動的局在効果に基づく機構を解明した(図1)<sup>1</sup>。

##### 2. 有機超伝導体における光の増幅現象を発見<sup>4</sup>

有機超伝導体に極高強度光パルスを照射した直後の光増幅現象(誘導放出)を発見。誘導放出スペクトルの観測と量子多体効果の解析から、本結果は通常の誘導放出現象ではなく、強い光電場に基づく非線形電荷振動の同期現象に起因し、かつ超伝導の機構に関係していることを解明した(図2)。

##### 3. 有機超伝導体におけるペタヘルツ(PHz)非線形電流を観測<sup>5</sup>

近赤外 6fsパルスの光強電場の非線形・非散逸効果によって、空間反転対称性を持つ超伝導物質から、本来禁制である第二高調波発生(SHG)が起こることを発見。SHG のキャリアエンベロープ位相依存性と量子多体計算による解析から、超伝導体に PHz 非線形電流が生じていることを明らかにした(図3)。

#### ■ 科学的あるいは社会・経済波及効果

本研究は発展1～3を通して、通信用近赤外波長帯の極超短パルス光(最短4fs)を有機金属・超伝導体などに適用して量子多体系の光強電場現象を開拓した。これらの成果は文科省 Q-LEAP「強相関量子物質におけるアト秒光機能の開拓」および CREST「革新光」の2019年度採択課題「キャリアエンベロープ位相制御による対称性の破れと光機能発現」に継承されている。本研究は、オンライン化が進む通信トラフィックの問題解決に向けた今後の PHz 通信・情報処理の基盤技術として重要な科学的波及効果をもたらすことが期待される。

#### ■ 特記事項

◆国内国際連携: 鉄系強誘電体における光強電場効果に関して東工大(腰原伸也チーム)、遷移金属酸化物の光誘起効果に関して CNRS、ナント大、レンヌ第一大(以上フランス)、および東大、東北大、東工大、京大と各実施中。

◆招待講演: 国際 20 件、国内 24 件。 ◆発表論文: 8 報。 ◆特許: 国内出願 2 件。 ◆報道: 13 件。

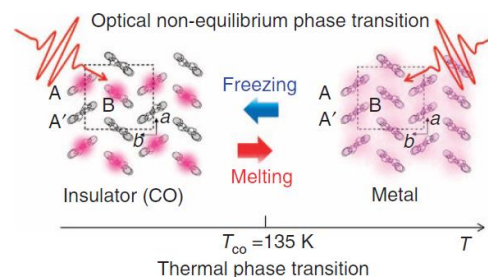


図1. 電荷秩序型絶縁体の光誘起相転移<sup>1</sup>

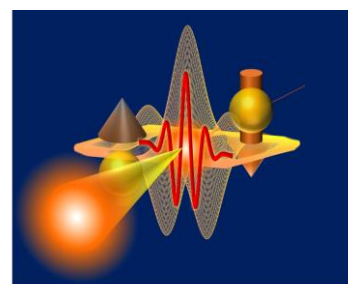


図2. 光強電場により変調を受ける超伝導(クーパ対)の概念図<sup>4</sup>

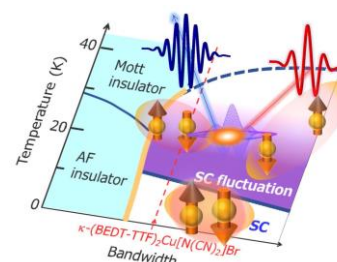


図3. 超伝導体の PHz 非線形電流による SHG の概念図<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ishikawa T, et al, Nature Communications, 5, 5528 (2014). <sup>2</sup> Naitoh Y, et al, Phys. Rev. B 93, 165126 (2016). <sup>3</sup> Kawakami Y, et al, Phys. Rev. B 95, 201105(R) (2017). <sup>4</sup> Kawakami Y, et al, Nature Photonics 12, 474 (2018). <sup>5</sup> Kawakami Y, et al, Nature communications 11, 4138 (2020).

ベクトルビームの光科学とナノイメージング

佐藤俊一 (東北大学多元物質科学研究所・教授)

研究期間 2008年10月～2014年3月

展開している事業:

科研費基盤研究(A)、科研費基盤研究(B)

CREST の成果:

ベクトルビームの強度・位相・偏光分布の制御による光の新しい特性を創出した。また低次～高次の単一モード・高品質ベクトルビームの発振を実現し、超解像誘導放出抑制(Stimulated Emission Depletion: STED)顕微鏡などのナノイメージングに応用して、～100nmの空間分解能を実現した。



■ 発展:

1. ベクトルビームを用いた超解像顕微鏡の開発<sup>1,2</sup>

ベクトルビームのスーパーオシレーション現象(強いサイドローブと局所的な微小スポットが共存)や、光スポットの形状を自在に制御するPSF(点像分布関数)の差引法を適用して高分解共焦点顕微鏡を開発した。動径偏光ビーム(RP-LG<sub>3,1</sub>)を用いた計算および HeLa 細胞微小管の蛍光画像の観察では、～100nmの分解能を確認した(図1)<sup>1</sup>。また動径および方位偏光ビームの Bright spot、Dark spot 間の差引法を用いた計算およびラベル付き COS-7 細胞の画像観察では、100nm以下の高分解能が確認された<sup>2</sup>。

2. ベクトルビームを用いたナノ加工法の開発<sup>3,4</sup>

波面制御ベクトルビームの微小なスポットや縞状のスポットを用いて、厚み数10nmの金属・半導体薄膜のナノ加工法を開発した。高アスペクト比の高速穿孔では、微細孔の側壁での多数回反射に有利な大開口数(NA=0.85)レンズと方位偏光ビームの組み合わせで優れた加工性能を示した<sup>3</sup>。また2光束干渉法を用いたベクトルビームのシングルショット加工では、厚み35nmのSi薄膜におけるフォーク状ホログラフィック・パターン加工を実現した(図2)<sup>4</sup>。

■ 科学的あるいは社会・経済的波及効果

発展1は、汎用蛍光プローブで簡便な顕微鏡操作による生きた細胞の高速イメージングが可能のため、高い実用性と幅広い用途を備えた生体イメージング技術の発展に貢献すると考えられる。また発展2は、数10nmの極めて薄い膜中のナノ加工を実現しており、電子ビームに対する透過率が高いことから、特に電子顕微鏡における渦電子流の発生や位相素子への利用が期待される。

■ 特記事項

◆国内共同研究: ベクトルビームのイメージング応用に関し、愛媛大学(今村健志チーム)、生命創成探究センター(根本知己チーム)と実施中。

◆国際連携: 日本学術振興会二国間交流事業のもとで、光ビームの位相制御に関し、東ウクライナ大(ウクライナ)およびヴロツワフ工科大学(ポーランド)と実施し、共著論文を発表<sup>5</sup>。

◆招待講演: 国際2件。◆発表論文: 24報。◆受賞: 文部科学大臣表彰科学技術賞(2015年)。

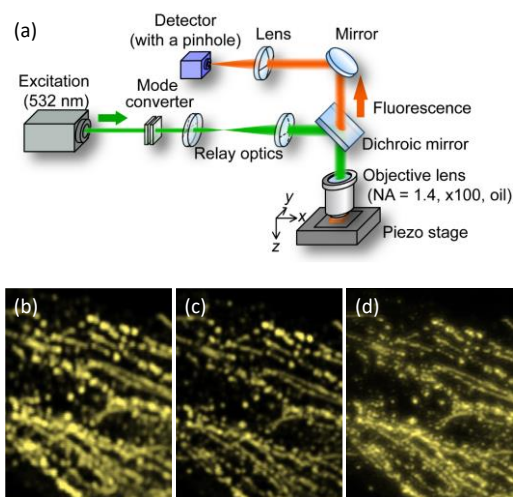


図1 (a)超解像顕微鏡による蛍光画像観察装置。(b)および(c):直線偏光ビーム像。(d):高分解能スーパーオシレーション像<sup>1</sup>

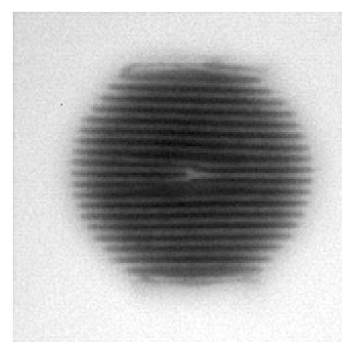


図2. ベクトルビームの2光束干渉法によるSi薄膜のフォーク状ホログラフィック・パターン加工例<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Kozawa Y, et al, Optica, 5, 86–92 (2018). <sup>2</sup> Yoshida M, et al, Optics Letters, 44, 883–886 (2019). <sup>3</sup> Matsusaka S, et al, Optics Letters 43, 1542–1545 (2018). <sup>4</sup> Uesugi Y, et al, Optics Express, 27, 20958–20964 (2019). <sup>5</sup> Khoroshun A, et al, OSA Continuum 2, 320–331 (2019).



### 3.1.3 研究課題「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」(辛埴)

#### 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

辛埴 (東京大学物性研究所・特別教授)

研究期間 2008年10月～2014年3月

展開している事業:

文科省(X線自由電子レーザー利用推進計画)、文科省(光・量子融合連携)、科研費基盤研究(S)、科研費基盤研究(A)

#### CRESTの成果:

高繰り返し・真空紫外高調波レーザーを開発し、高エネルギー分解能・時間分解光電子分光および高空間分解能・電子顕微分光に適用して、世界最先端の数値目標(100 $\mu$ eV以下の超高分解能)を達成した。また最先端の開発装置を用いて、超伝導・重い電子系・スピントロニクス・光誘起相転移など様々な系で多くの学術的新知見を得た。



#### ■発展:

##### 1. トポロジカル物質(超伝導体・絶縁体)を相次いで発見<sup>1,2,3</sup>

超高分解能・角度分解レーザー光電子分光装置を用いて、高温超伝導体で広く知られるFeTeSeの最表面はトポロジカル超伝導(TSC)であることを世界で初めて発見した。本発見の鍵はスピン偏極したディラック・コーン(X字電子バンド)の観測にある。また超伝導ギャップの直接観測から超伝導転移温度が15Kであることも明らかにした(図1)<sup>1</sup>。一方、擬一次元結晶 $\beta$ -Bi<sub>4</sub>I<sub>4</sub>を用いた顕微・角度分解光電子分光の観測により、無散逸で理想的なスピン流が期待される弱いトポロジカル絶縁体を世界で初めて発見した<sup>3</sup>。

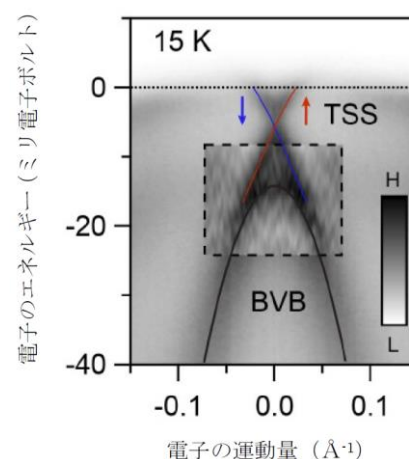


図1 FeTeSeの電子状態。TSS:最表面の観測でX字のディラック・コーン。赤・青矢印はスピンの向き。BVB:バルクの観測で放物線状バンド<sup>1</sup>

##### 2. 光による絶縁体から未知の金属相への相転移を発見<sup>4</sup>

励起子絶縁体 Ta<sub>2</sub>NiSe<sub>5</sub>とバンド絶縁体 Ta<sub>2</sub>NiS<sub>5</sub>に高次高調波レーザーを照射して、時間・角度分解光電子分光により非平衡状態(光照射)での電子構造を直接観測し、これらの絶縁体が金属相に相転移することを発見(図2)。本金属相は熱平衡状態では実現できない未知の金属相であることも解明した。

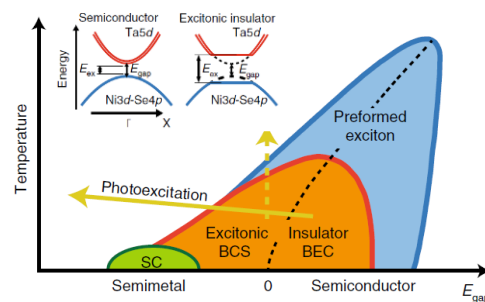


図2. 励起子絶縁体(BEC)-超伝導体(SC)間光誘起相変化を示す概念図。<sup>4</sup>

#### ■科学のおよび社会・経済的波及効果

発展1で得られたトポロジカル超伝導体・絶縁体は、最表面の電子がマヨラナ粒子の可能性を秘めて安定で擾乱に強いとされ、量子コンピューターへの応用が期待される。また発展2で得られた未知の金属相は、光による物質の自在な制御、即ち絶縁体を金属に、金属を超伝導体に変換できる可能性をもつもので、いずれも科学的な波及効果は大きい。

#### ■特記事項

- ◆産学連携: 複数の企業と、266nm・513nmのCWレーザー、11eVパルスレーザー、半導体リソグラフィー用193nm光源の共同開発が進行中。またNEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016年度-2020年度、プロジェクトリーダー:小林洋平東大教授)を支援して新規高出力レーザーを開発中。
- ◆国際連携: レーザー光電子の研究でIBS(韓国基礎研究所)と進行中で、若手を含む人事交流も展開中。
- ◆特許の実施許諾・技術移転: 企業と実施中(非公開)。
- ◆招待講演: 国際会議29件。
- ◆論文発表: 105報。◆報道: 61件。◆受賞: 第3回放射光科学賞(2020年)。

<sup>1</sup> Zhang P, et al, Science 360, 6385, 182-186 (2018). <sup>2</sup> Zhang P, et al, Nature Physics 15, 1, 41-47 (2019). <sup>3</sup> Noguchi R, et al, Nature 566, 518 (2019). <sup>4</sup> Okazaki K, et al, Nature Communications 9, 1 (2018).

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

鈴木俊法（京都大学大学院理学研究科・教授）

研究期 2008年10月～2014年3月

展開している事業：

文科省(X線自由電子レーザー利用推進計画)、科研費基盤研究(A)(2)、科研費基盤研究(S)

CRESTの成果：

フィラメンテーション四光波混合によって複数波長の深紫外・真空紫外光パルスを20 fs以下の極短時間で発生する方法を開発し、分子気体の超高速光電子分光を実現した。また直径20μm程度の液体流を用いて液体の超高速光電子分光に成功し、さらに電子移動反応の実時間観測や溶媒和電子のエネルギー測定を世界で初めて実現した。



■発展：

1. 真空紫外・超高速光電子分光により非断熱緩和過程を観測<sup>1</sup>

フィラメンテーション四光波混合に基づく133 nm真空紫外・超高速光電子分光を用い、有機分子(ピラジン)のS<sub>2</sub>(p, p\*)状態から起こる非断熱遷移と基底電子状態の全電子緩和過程の観測に成功した(図1)。

2. 光電子分光により溶媒和電子の超高速内部転換を観測<sup>2</sup>

非直線型パラメトリック増幅器で25fsの高時間分解能を実現し、溶媒和電子の第一電子励起状態の寿命を正確に決定した。また、スペクトル回復法を用いて励起および基底状態のスペクトルを分離し、内部転換後の基底状態における溶媒和ダイナミクスを正確に評価した(図2)。

3. 高次高調波発生を利用した液体の超高速・極端紫外分光で進展<sup>3</sup>

高次高調波による極端紫外光を用いて、溶媒和電子の束縛エネルギー分布を測定し、形状が単一ガウス関数であることを明確化した。これを用いて液体の光電子スペクトルで歪み除去スペクトル回復法を開発した(図3)。

■科学的あるいは社会・経済的波及効果

高次高調波発生による極端紫外極短パルスの生成は普及しつつあるが、深紫外領域の極短パルス発生は技術的に困難であった。このため本研究のフィラメンテーション四光波混合は重要性が再認識されつつある。この中で液体ジェットの超高速光電子分光は技術的困難さが普及を阻害していたが、本研究で技術革新が進み、溶液化学分析への波及効果が大きいと期待される。液体の超高速光電子分光は類似研究があるが、本研究は多数の先駆的業績で高く評価されている。

■特記事項

◆国際連携： R. Signorellグループ(スイス)と共著論文発表。<sup>4</sup>

◆招待講演： 国際17件(内基調講演4件)、国内4件。

◆発表論文： 37報。 ◆報道： 11件。

◆受賞： The KAIST Kim Yong Hae Lecturer Award(2014)。 第11回分子科学会賞(2020年)。

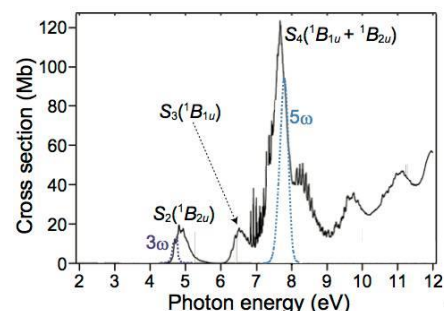


図1. ピラジンにおける全電子緩和過程を示す光電子分光スペクトル<sup>1</sup>

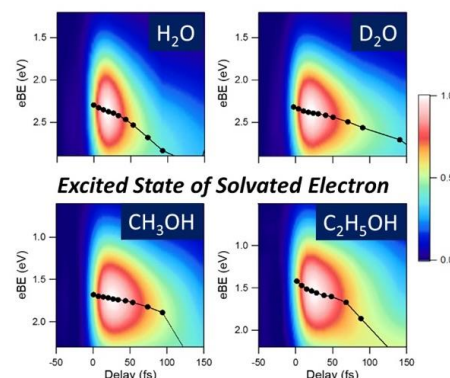


図2. 溶媒和電子の寿命測定<sup>2</sup>

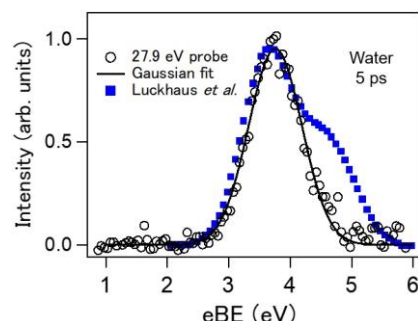


図3. 単一ガウス関数を示す溶媒和電子の束縛エネルギー分布<sup>3</sup>

<sup>1</sup> T. Horio, et al, Journal of Chemical Physics, 145, 044306 (2016). <sup>2</sup> S. Karashima, et al, J. Phys. Chem. Lett. 10, 4499-4504 (2019). <sup>3</sup> J. Nishitani, et al, Science Advances 5(8), eaaw6896 (2019). <sup>4</sup> D. Luckhaus, et al, Science Advances 3(4), e1603224 (2017).

超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発

高橋義朗 (京都大学大学院理学研究科・教授)

研究期間 2008年10月～2014年3月

展開している事業:

JST(CREST)、科研費新学術領域

(3)、科研費基盤研究(S)(2)

CREST の成果:

ヘルツレベルの非常に狭いエネルギー共鳴線幅をもつ光学遷移を励起する超狭線幅・超高安定な光源を開発した。レーザー光の定在波が作る光格子中でレーザー冷却された2電子系原子にこの光源を適用し、量子多体系のレーザー分光やスピン・スキージング等を駆使した新量子計測技術の開発に成功した。

■発展:

1. 世界初のサウレスポンピングの実証<sup>1</sup>

サウレス(2016年ノーベル物理学賞)が約30年前に予言したサウレスポンプは、周期的ポテンシャルに捕獲された電子の輸送(ポンプ)量が、周期場の時間・空間制御下で一定になる(トポロジカル不変量)現象である。本研究では光格子の周期ポテンシャルを用い、レーザー冷却された極低温のYb原子多体系でポンプ移動量がパラメータの変化に影響されず(トポロジカル不変量)安定であることを示し、サウレスポンプを世界で初めて実証した(図1)。

2. 光会合による量子多体状態の制御技術を確立<sup>2</sup>

モット絶縁体-超流動相転移におけるエネルギー・粒子の散逸過程の影響を光格子中の極低温Yb原子多体系で探索し、レーザー照射によるYb分子光会合体の形成が散逸過程を著しく減速する効果(量子ゼノ効果)を観測し(図2)、さらにこの現象が理論計算により説明できることを確認した。

3. 光格子間遷移確率の精密制御で格子点間の空間断熱移送に成功<sup>3</sup>

非標準型リーブ光格子の格子点に捕獲されたYb原子の量子力学的干渉(トンネル現象)をレーザー照射で操作し、中間点を經由せずに分離した2格子点を移動する現象(空間断熱移送)を初めて観測。実験では、レーザー照射量でトンネル確率を制御し、バンドマッピング法を応用して原子数万個の同時断熱移送の観測に成功した。

■科学的あるいは社会・経済的波及効果

サウレスポンピング理論は、電子ナノデバイスの超高精密電流源や量子現象のコヒーレント操作に必要な量子シミュレーターの実現に重要な役割を果たす。本研究は、発展1で同理論を実証し、発展2および3でポンプ量の精密制御技術を創出することで世界のサウレスポンプ研究を牽引した。これらは多大な科学的波及効果をもたらしたと言える。さらに本成果はトポロジカル物理学分野でも広く引用され、理論と実験の双方の発展に大きく貢献している。

■特記事項

- ◆国内共同研究: 冷却原子量子シミュレーションに関して分子研と実施中。
- ◆国際連携: コペルニクス研究所(ポーランド)と共著論文。
- ◆実用化: 量子シミュレーターのクラウドサービスを検討中。◆受賞: 2020年秋の紫綬褒章。
- ◆招待講演: 国際39件、国内16件。◆発表論文: 29報。◆報道: 59件。

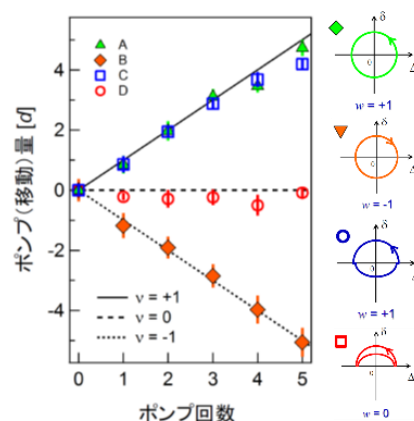


図1. サウレスポンプの実証<sup>1</sup>

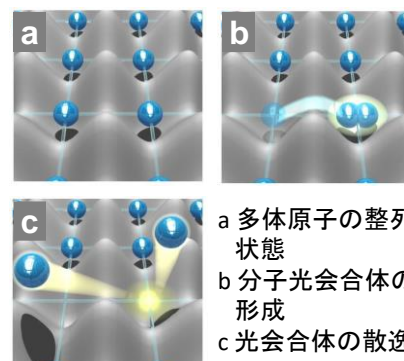


図2 光会合体により量子相転移が減速するモデル図<sup>2</sup>

<sup>1</sup> S. Nakajima, et al, Nature Physics 12, 296-300 (2016). <sup>2</sup> T. Tomita, Science Advances 3, e1701513-1-8 (2017). <sup>3</sup> S. Taie, et al, Nature Communications, 11, 257-1-6 (2020).



### 3.1.6 研究課題「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～」(本田文江)

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～

本田文江 (日本大学薬学部・上席研究員/東京農工大学・客員教授)

=====

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

#### CREST の成果:

光ピンセットを用いた単一ウイルスの捕捉・搬送および細胞への感染システム、細胞・核内の環境計測システム等を開発し、マイクロ流体チップ内でのウイルスのナノ操作で、単一細胞への触診・感染を可能にする技術を開拓した。



#### ■ 発展:

##### 1. 超高感度センシングのためのウイルス濃縮デバイスを開発<sup>1</sup>

高感度センシング用高速・連続駆動・簡便・低コストのインフルエンザ・ウイルス濃縮デバイスとして、東工大(山本貴富喜グループ)と共同でマイクロ流路に陽イオン交換膜(Nafion)のブリッジを付与した構造を提案(図 1)。ブリッジ端近傍の正・負イオン枯渇領域を利用してウイルス(負に帯電)の濃縮を実現し、蛍光蛋白質・生物ウイルスなどを用いて最大 2.3 倍の濃縮率を観測した。更なる最適設計で医療・ライフサイエンスなどに幅広い応用が期待される。

##### 2. ウィルス感染細胞の温度上昇計測システムを開発<sup>2</sup>

ウイルスの増殖は大量の代謝物(ヌクレオチドなど)を要する一方、ウイルス感染による細胞内の代謝システムの始動では大量のエネルギー消費による細胞の温度上昇が推察される。そこで名大(新井史人グループ)ほかと共同で蛍光標識感染細胞の温度計測システムを構築し(図 2)、ウイルス感染により細胞温度が約 5°C 上昇する事を究明した。感染メカニズム解明の一助となることが期待される。

##### 3. 細胞～核膜におけるウイルス RNP の付着・移動・通過を観察

蛍光標識したウイルスの細胞付着量を観察し、同一 HA 型ウイルスでは一細胞に 1 粒子のみ結合し(割合: ~80%)、異なる HA 型では各粒子が分離した結合を確認。さらにウイルスの細胞質中の移動および核膜通過、通過後の停止を観察。また異なる波長の光照射細胞にはウイルス増殖・発現遺伝子に違いがあり、近赤外の照射ではウイルス増殖が約 2~3 倍になることを確認した。これらの成果は早期の論文投稿が待たれる。

#### ■ 科学的あるいは社会・経済的波及効果

発展 1~3 は、他大学と共同でウイルスの細胞感染、細胞内移動、核膜通過の挙動および増殖などのメカニズム解明に多くの知見を提供している。本成果は、世界を震撼させるパンデミック(新型コロナウイルス COVID-19 など)の様な人类的危機を救済する医療技術の進展に、直接的・間接的に貢献することが世界規模で強く期待される。

#### ■ 特記事項

◆ 実用化: 特定波長で 2~4 倍増殖するインフルエンザ・ウイルスをワクチン用ウイルスとして特許出願済み。

◆ 共同研究: 東工大(山本貴富喜グループ)、名大(新井史人グループ)と実施中。

◆ 国際連携: カルカッタ大(インド) と共同論文発表<sup>3</sup>。◆ 発表論文: 9 報。◆ 特許: 国内出願 1 件。

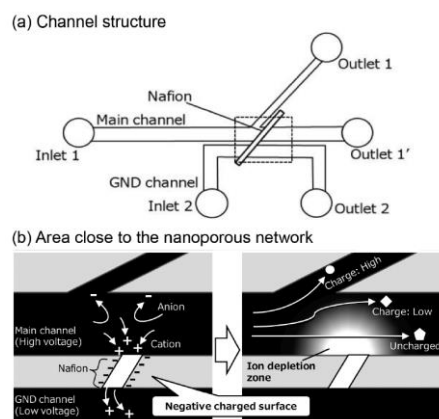


図 1.(a)マイクロ流路システム。(b)Nafion 近傍のイオン枯渇領域(右図)<sup>1</sup>

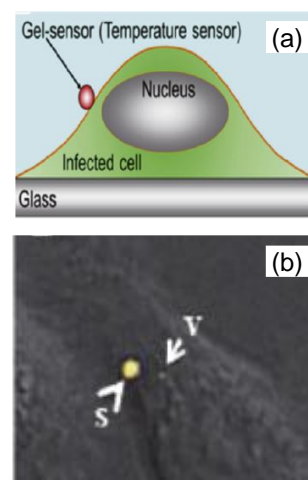


図 2. (a)細胞温度の計測システム。(b)S:センサービーズ、V:ラベル付きウイルス<sup>2</sup>

<sup>1</sup> K. Mogi, et al, Electronics and Communications in Japan 100, 56-63 (2017). <sup>2</sup> H. Maruyama, et al, Virus Research 257, 94-101 (2018). <sup>3</sup> Dey D, et al, Journal of Biosciences 44, 31 (2019).

### 3.2 2009 年度採択研究課題

- ・ 研究課題「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・光操作のがん研究・がん医療への応用」(今村健志)
- ・ 研究課題「電子線励起微小光源による光ナノイメージング」(川田善正)
- ・ 研究課題「光技術が先導する臨界的非平衡物質開拓」(腰原伸也)
- ・ 研究課題「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」(竹内繁樹)
- ・ 研究課題「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」(田中耕一郎)
- ・ 研究課題「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」(細貝知直)

**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・光操作  
のがん研究・がん医療への応用**

今村健志 (愛媛大学大学院医学系研究科/プロテオSセンター・教授)

研究期間 2009年10月~2016年3月

展開している事業:  
科研費基盤研究(B)、科研費新学術  
領域研究(2)、AMED(CREST)

**CREST の成果:**

新規長波長パルス光源および波面補正用光学素子を駆使した新規2光子励起顕微鏡システムを開発した。波長、パルス幅、ビーム径、波面収差などの光学パラメータを高解像 in vivo 観察に向けて最適化した。この研究により、がん細胞・脳神経の深部可視化に成功するなど、新たながん診断・治療法の開発に道を拓いた。



**■ 発展:**

1. 第二高調波発生(SHG)を駆使した新たな疾患診断法の開発および SHG・生体深部観察によるコンドロイチン硫酸の新規機能の発見<sup>1,2,3,4</sup>

愛媛大学附属病院との共同研究で、SHG を用いた非アルコール性脂肪肝炎(NASH)の新規な線維化診断法、変形性関節症の早期診断法、AI の導入による自動診断法を開発(図 1)。また愛知医科大学との共同研究で、コンドロイチン硫酸がコラーゲン分子の発現や同線維の正しい配列に関わり、細胞外マトリックスの構築に重要であることを明らかにした。

2. 長時間蛍光イメージングを可能にする近赤外蛍光標識剤の開発<sup>5</sup>

名大と共同で開発した化学的安定性・耐光性に優れた近赤外蛍光標識剤 PREX710 を用い、生体深部イメージング技術を駆使してマウス脳血管の深部イメージングに成功した(図 2)。

3. 国際共同研究による新規蛍光カルシウムセンサーの開発<sup>6</sup>

東大およびスタンフォード大学(米国)との国際共同研究で、2光子顕微鏡による長波長色素の蛍光吸収測定技術を駆使し、生きたマウスの神経・シナプス活動を超高感度・超高速で計測できる赤色蛍光カルシウムセンサーの開発に成功した。

**■ 科学的あるいは社会・経済的な波及効果**

生体分子と光の相互作用を駆使した本研究は、科研費新学術領域研究「Resonance Bio~共鳴誘導で革新するバイオイメージング~」(2015年度~2019年度)に継承され、分子設計者と超解像顕微システム技術者の共鳴による従来の限界を超える生体深部イメージングに挑戦しており、特に新規ながん診断・治療にもたらされる医学上の波及効果は極めて大きい。

**■ 特記事項**

- ◆産学連携: 免疫応答のメカニズムや超解像顕微鏡の解析技術等に関して、製薬企業と連携。またレーザー可視化の探索研究および2光子顕微鏡の応用開発に関して、エレクトロニクスメーカーおよび精密機器メーカーとも連携。
- ◆国際連携: 新規蛍光カルシウムセンサーの開発に関して東京大学・スタンフォード大学(米国)と共著論文発表<sup>6</sup>。
- ◆招待講演: 国際5件、国内23件。 ◆発表論文: 13報。 ◆報道: 8件。

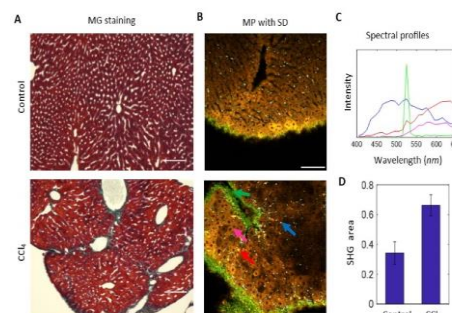


図 1. マウス肝炎組織の精細な多光子励起蛍光スペクトルイメージング

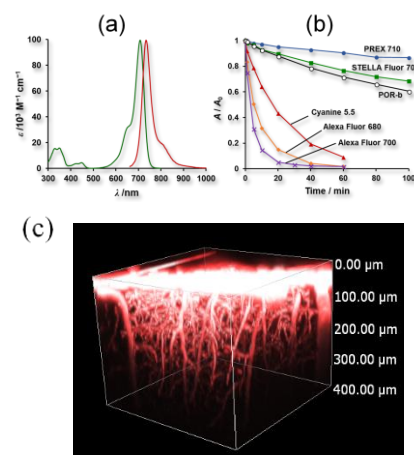


図 2. PREX710 の特性。(a)吸収・蛍光スペクトル。(b)非常に強い耐光性。(c)マウス脳血管の精細な深部イメージング<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Saitou T, et al, Frontiers in Medicine 5, Dec. 350 (2018). <sup>2</sup> Saitou T, et al, Sci Rep. 8(1), 2826 (2018). <sup>3</sup> Ida-Yonemochi H, et al, Sci Rep. 8(1), 17134 (2018). <sup>4</sup> Yamamoto S, et al, Biochem Biophys Rep 8, 277-283 (2016). <sup>5</sup> Grzybowski M, et al, Angew Chem Int Ed Engl, 57(32), 10137-10141 (2018). <sup>6</sup> Inoue M, et al, Cell. 177(5), 1346-1360 (2019).

### 3.2.2 研究課題「電子線励起微小光源による光ナノイメージング」(川田善正)

#### 電子線励起微小光源による光ナノイメージング

川田善正 (静岡大学電子工学研究所・教授)

研究期間 2009年10月～2015年3月

展開している事業:

科研費基盤研究(B)(2)、JST(A-STEP)、JST(CREST)

#### CREST の成果:

電子線励起微小光源により、光学顕微鏡の限界である分解能を大きく超える顕微分解能を実現するとともに、生きた生物細胞の動態の直接観察に成功。さらに細胞内顆粒が伝搬する様子・細胞の動きなどの可視化に成功した。

#### ■発展:

##### 1. 超高分解能イオン・イメージングシステムおよびこれを用いた細胞刺激法を開発<sup>1,2</sup>

電子線励起超解像イメージングシステム(D-EXA)の開発で、微小光源を励起するための蛍光膜をイオン感応膜に置換することで、電子線照射による高分解能システムを実現した<sup>1</sup>。更に同システムを用いた細胞のナノ領域における刺激法および活性化制御法を開発中。本法では直接励起型の超解像法を用いて、細胞のナノ領域に電気的な刺激を与え、細胞のダメージ、刺激のための電子線照射量の最適化などの各種手法を確立した(図1)<sup>2</sup>。

##### 2. D-EXA 用基板の表面処理による細胞培養法を確立<sup>3</sup>

主要基板(SiN)の疎水性表面に厚み～15nmの親水性膜(カルボキシル基)をコートして細胞を培養する手法を確立した。SiN膜(厚み50nm)に対する電子線の透過・散乱シミュレーションの結果、膜表面上～150nm以内が有効な細胞培養領域であること(図1)、および本表面処理によりHeLa細胞の鮮明なD-EXA像が得られること(図2)を確認した<sup>3</sup>。

##### 3. 電子線による発光励起のための生体内物質の探索<sup>4</sup>

電子線により発光する生体内物質について探索を行った。数種の物質で発光特性を明らかにし、生体適合性を有し且つ電子線で直接励起が可能な物質を蛍光マーカーとして利用することが可能となった。

#### ■科学的及び社会・経済的波及効果

本成果は、様々な基板の水に対する親和性を制御し、細胞培養に適した表面を実現する手段、およびイメージングシステム D-EXA の幅広い細胞・生体分子への適合性を提供するものであり、A-STEP「電子線検出によるイオン分布のナノイメージセンシングシステム」および CREST「革新光」の研究課題「光と電子の融合による超高分解能細胞機能イメージング・制御」(2020年度～2025年度)に継承されており、医学・生物学の発展への更なる貢献が期待される。

#### ■特記事項

- ◆産学および国際連携: システムの改良・高機能化に関し、国内企業および Academia Sinica(台湾)と実施中。
- ◆成果の企業利用および実用化: 開発したシステムによる試料観察・評価に関し、複数企業の利用を実施。また開発したシステムによる試料観察の評価技術およびシステムの販売について、共同研究先と実用化を交渉中。
- ◆招待講演: 国際会議 10 件。 ◆発表論文: 33 報。 ◆報道: 36 件。
- ◆受賞: 平成 31 年静岡大学研究フェロー(2019 年)。

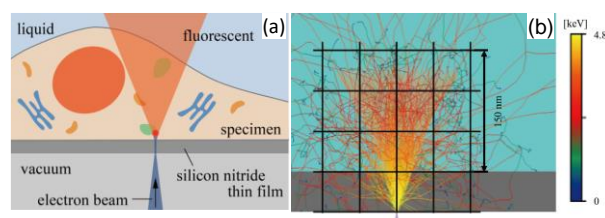


図 1. (a) D-EXA システムの概略図。(b) 電子軌跡のシミュレーション。電子線の有効領域は 150nm 以内。<sup>2</sup>

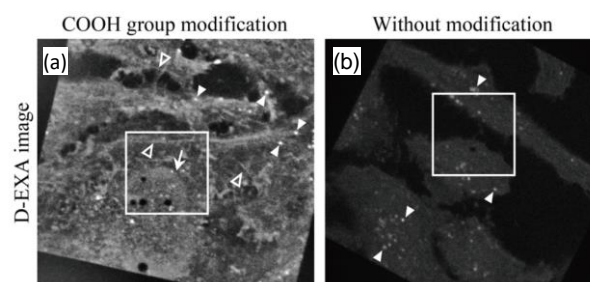


図 2. HeLa 細胞の D-EXA 像。(a)表面処理あり。(b)同処理なし<sup>3</sup>

<sup>1</sup> W. Inami, et al, The 4th Biomedical Imaging and Sensing (BISC2018), Yokohama, Japan, 2018. <sup>2</sup> W. Inami, et al, Ultramicroscopy 206, 112823 (2019). <sup>3</sup> Y. Masuda, et al, Biomedical Optics Express 6, 3128-3133 (2015). <sup>4</sup> 伊藤 他, 第 9 回情報フォトニクス研究会 (2015).



光技術が先導する臨界的非平衡物質開拓

腰原伸也 (東京工業大学大学院理学院・教授)

研究期間 2009年10月～2015年3月

展開している事業:

JST(ACCEL\_FS)、科研費基盤研究

(A)、科研費特別推進研究

CREST の成果:

光励起・非平衡状態の隠れた物質相をX線・電子線パルス融合超高速・動的構造解析技術で解明し、光スイッチ・発光・光エネルギー変換材料に応用した。nm、200fs 級の空間・時間分解能を有する表面電子計測用フェムト秒光電子顕微鏡(fs-PEEM)装置を開発し、光誘起電荷移動・相転移の空間ダイナミクスを世界で初めて確認した。



■ 発展:

1. 超短パルス電子線装置を用いて超高速光相スイッチ物質を開拓<sup>1</sup>  
超高速時間分解電子線回折法により、分子結晶(アゾベンゼン)が光照射で瞬時(10ps)に集団運動する新しい光相スイッチ現象を初めて観測した(図 1)。本研究は筑波大(羽田真毅グループ)の協力のもとで科研費特別推進研究「光と物質の一体的量子動力学が生み出す新しい光誘起協同現象物質開拓への挑戦」(2018 年度～2022 年度)に発展している。

2. 隠れた物質相の探索を有機結晶から無機材料へ拡大展開<sup>2</sup>

東工大(沖本洋一グループ)と共同で、遷移金属酸化物(BiCoO<sub>3</sub>)における強誘電相の THz 光誘起分極制御に成功。本知見により、電荷移動と極性-非極性転移の同時発生による新たな負の熱膨張材料(Ni・Fe・Bi 系固溶体)を共同で開発した。更に超高速分子構造解析により金属錯体中の光励起反応過程および人工光合成材料のマイクロ反応機構を解明。これらは九大(恩田健グループ)ほかによる科研費新学術領域「革新的光-物質変換・ソフトマテリアル」に発展している。

3. fs-PEEM とフェムト秒光電子分光機能の融合装置を開発<sup>3</sup>

KEK 福本恵紀を中心に広帯域(近赤外～真空紫外)波長可変光源を融合した fs-PEEM を開発した(図 2)。これによりパワー半導体表面電子移動度などの観測が大幅に容易になった(KEK・東工大と PCT 共同出願中)。更に文科省(Q-LEAP)に展開してアト秒 PEEM の開発に挑戦している。

■ 科学的あるいは社会・経済的波及効果

本研究の光誘起相転移は、2016 年日本物理学会「物理学 70 の不思議-17」に選出され高く評価されると共に、上述の事業に継承されて多大な科学的波及効果の創出に貢献している。とりわけ特別推進研究では、3つの自由度(電荷・電子軌道・スピン)の光量子操作により伝導性・誘電性・磁性相転移の超高速切り替えが可能な光マルチフェロイック物質を目指しており、その実現が大いに期待される。

■ 特記事項

◆産学連携: 半導体材料で三菱電機(他 1 社)および KEK(福本恵紀グループ)と、光触媒で豊田中研および九大(恩田健グループ)と、新型 fs-PEEM 装置の製品化で企業 3 社および KEK(福本恵紀グループ)と展開中。

◆国際連携: fs-PEEM 利用分子構造解析でマックス・プランク研究所(ドイツ)、トロント大学(カナダ)、CNRS(フランス)、Nigde 大(トルコ)と展開中。その研究成果は論文発表済み<sup>4</sup>。

◆招待講演: 国際会議 10 件。◆発表論文: 23 報。◆特許: 国内および海外出願、各 1 件。◆報道: 22 件。

◆受賞: 第 39 回島津賞(2019 年)。

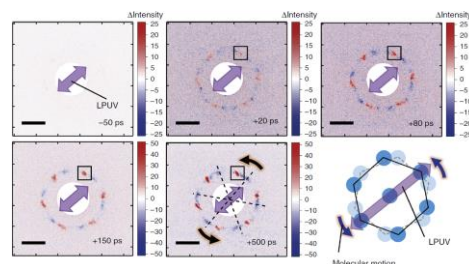


図 1 アゾベンゼン分子の超高速時間分解電子線回折像における集団運動の観測<sup>1</sup>

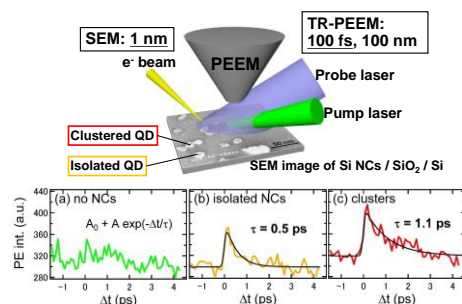


図 2 fs-PEEM での単独 Si 量子ドットの測定<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hada M, et al. Nature Communications 10, 4159 (2019). 他 3 報. <sup>2</sup> T. Umanodan T, et al, Journal of the Physical Society of Japan 88, 13705 (2019). 他 3 報. <sup>3</sup> K. Fukumoto, et al, Carbon 124, 49-56 (2017). 他 1 報. <sup>4</sup> Ishikawa T, et al, Science 350, 6267 (2015). 他 2 報.

### 3.2.4 研究課題「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」(竹内繁樹)

#### 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

竹内繁樹 (京都大学大学院工学研究科・教授)

研究期間 2009年10月～2015年3月

展開している事業:

科研費基盤研究(S)、JST(CREST)、

文科省(Q-LEAP)

#### CREST の成果:

モノサイクル量子もつれ光の実現と応用に取り組み、世界最大の超広帯域(820nm, 周波数換算 200THz)もつれ光発生に成功した。また超広帯域・近赤外もつれ光を世界で初めて実現した。さらに超高分解能(0.54 $\mu$ m)の量子光断層撮影(OCT)に相当する2光子量子干渉および群速度分散耐性の実証に成功した。



#### ■発展:

##### 1. 量子 OCT の高分解能化およびハイブリッド化を推進<sup>1</sup>

本研究は CREST「量子技術」の研究課題「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」(2016年度～2021年度)に継承され、量子 OCT の高分解能化・ハイブリッド化に取り組み、垂直・水平分解能 3 $\mu$ m の量子 OCT を実現した。またスラブおよびリッジ導波路による広帯域量子もつれ光源の大光量化を展開中である(図 1)。

##### 2. 量子赤外吸収分光装置を開発<sup>2</sup>

本研究は 2019 年より文科省(Q-LEAP)「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」(2018 年度～2027 年度)に継承され、周波数量子もつれを利用した可視域ポンプ光源と検出器のみによる赤外域吸収分光装置を開発中である。

##### 3. 世界最大の広帯域量子もつれ光源および光量子回路を実現<sup>3,4,5,6</sup>

シリコン半導体リング共振器でオンチップ周波数量子もつれ光源を実現した。帯域幅 23.6nm、周波数モード数 59 は世界最大である(図 2)<sup>3</sup>。さらに世界初の 3 量子ビット・ゲート操作、複数位置の重ね合わせ状態をとる”量子シャッター”などを実現した。

#### ■科学的あるいは社会・経済的な波及効果

発展 1 は CREST「量子技術」で古典・量子ハイブリッド型の量子 OCT 装置のプロトタイプを企業と共同で開発中である。発展 2 は国研・企業(京大、NICT、島津製作所)連携により、可視～中赤外域もつれ光源と量子吸収分光への応用を目指した新たなセンシング・テクノロジーを共同開発中であり、世界的な注目を集めている。発展 3 は新規な光量子回路としての通信・計測への応用を目指している。これらはいずれも実用化への開発が進展中で、社会・経済的な波及効果は大きい。

#### ■特記事項

◆産学連携: 周波数もつれ光源用擬似位相整合素子に関して企業と共同開発中。

◆国際連携: フンボルト大学ベルリン、ハノーバー大学(以上ドイツ)、南京大学(中国)、香港城市大学(香港)、シドニー工科大学(豪州)、The Israeli Institute for Advanced Research(イスラエル)と共著論文を発表。

◆招待講演: 国際 32 件、国内 22 件。 ◆発表論文: 29 報。 ◆報道: 29 件。

◆受賞: 第 33 回大阪科学賞(2015 年)。 第 17 回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)(2015 年)。

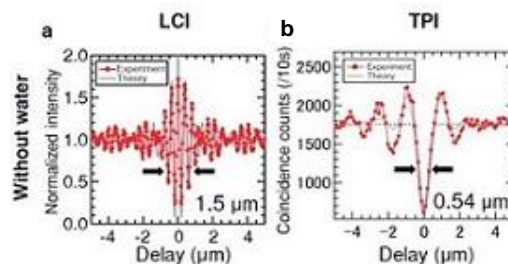


図 1. a 低コヒーレンス干渉縞。b 量子もつれ光子対の 2 光子量子干渉<sup>1</sup>

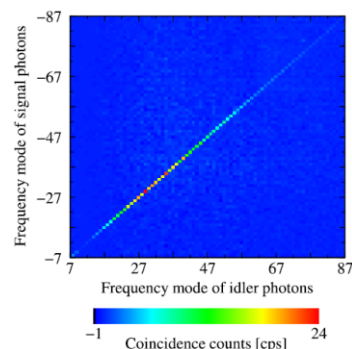


図 2. オンチップもつれ光源の周波数相関測定結果<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 川口蓉子他、第 66 回春季応用物理学会 2019 年 3 月、S. Takeuchi, et al, ISQT EU-USA-JAPAN 2019, Kyoto. 他 1 件。<sup>2</sup> Y. Mukai, et al, IFQMS 2019, Kyoto. <sup>3</sup> K. Sugiura, et al, Appl. Phys. Lett. 116, 224001 (2020). <sup>4</sup> R. Okamoto, et al, Sci. Rep. 6, 35161 (2016). <sup>5</sup> T. Ono, et al, Sci. Rep. 7, 45353 (2017). <sup>6</sup> T. Kiyohara, et al, Opt. Exp. 25, 32443-32450 (2017).

### 3.2.5 研究課題「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」(田中耕一郎)

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

展開している事業:

田中耕一郎 (京都大学大学院理学研究科・教授)

JST(ACCEL)(2)、科研費基盤

研究期間 2009年10月~2015年3月

研究(A)、科研費基盤研究(S)

#### CREST の成果:

世界最高強度テラヘルツ(THz)光源の開発は、極端非線形光学の先駆的研究に貢献した。一方、高解像度 THz 光近接場顕微鏡の開発は、世界初の生きた細胞の観察やメタマテリアルの電場分布の実測などにより材料設計・評価技術の飛躍的精度向上に貢献した。



#### ■ 発展:

##### 1. 高強度 THz 光によりグラフェンの高次高調波発生に成功<sup>1</sup>

固体の高次高調波発生は一般に密度の高さから困難だが、単純構造のグラフェンにより周波数 60THz で 9 次高調波の発生に世界で初めて成功(図 1)。THz 光の楕円偏光依存性がグラフェンの特異な電子バンド構造(ディラック・コーン)に起因する事を究明し、固体の高次高調波発生機構の機構解明および今後の広帯域(赤外~可視)光源の開発に明るい見通しを与えた。

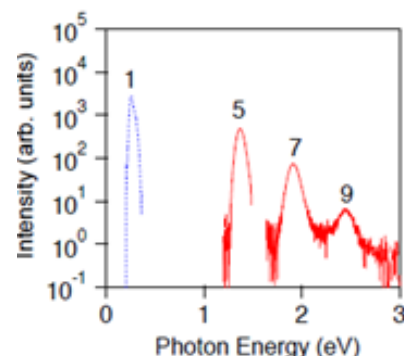


図 1 グラフェンの高次高調波スペクトル<sup>1</sup>

##### 2. 高強度THz光による散乱光の観測で固体の動的対称性を初めて実証<sup>2</sup>

高強度レーザー光で発生する光と固体の一体化された電子状態(フロケ状態)では新たな対称性(動的対称性)が出現する。本研究では高強度赤外域レーザー(MIR)と弱い近赤外レーザー(NIR)を偏光(直線・円)制御の下で単層MoS<sub>2</sub>に入射し、ラマン散乱光に現れる偏光選択性を観測して動的対称性を立証した(図2)。世界初の本成果は今後の量子情報技術の進展に大きく貢献する。

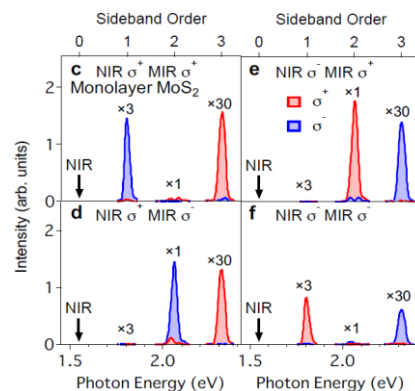
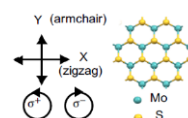


図 2 高強度レーザー光照射による散乱光の偏光選択性<sup>2</sup>

##### 3. 半導体 THz 光発生・検出素子の開発とセキュリティ技術への応用<sup>3</sup>

半導体により THz 光発生・検出の安価・小型化・取り扱いの簡易化を図る新たな取り組みが、ACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017 年度~2021 年度)に継承されている。ボディ・スキャナーなどのセキュリティ分野への THz 応用が期待される。

#### ■ 科学的あるいは社会・経済的波及効果

本研究は CREST「光展開」終了後も、限界光駆動半導体物理の創出、高次高調波発生機構の解明、固体の動的対称性の実証など学術分野での新規潮流を創出した。さらに超高速半導体・グラフェン素子、6G に向けた THz 半導体技術、新時代の赤外線技術など新産業技術領域の創出にも大きく貢献している。一方、THz 技術の普及による非破壊・非接触・高分解能・無被爆で安全・安心なセキュリティ装置/システムの実用化に向けた製品開発・社会実装への展開も期待される。

#### ■ 特記事項

- ◆産学連携・実用化: ACCEL での THz 半導体発生・検出素子の開発とボディ・スキャナーへの応用は 2021 年プロトタイプを計画。製品化は 2023 年度以降と予想される。
- ◆国際連携: モントリオール理工科大学(カナダ)ほか。
- ◆招待講演: 国際会議 19 件。
- ◆発表論文: 36 報。
- ◆特許: 国内出願および登録、各 1 件。
- ◆報道: 34 件。
- ◆受賞: 第 64 回仁科記念賞(2018 年)。第 20 回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)(2018 年)。

<sup>1</sup> N. Yoshikawa, et al, Science 356, 736-738 (2017). <sup>2</sup> K. Nagai, et al, Communications Physics 3, 137 (2020). <sup>3</sup> [https://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research\\_project/ongoing/h29\\_02.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research_project/ongoing/h29_02.html)



### 3.2.6 研究課題「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」(細貝知直)

#### 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

細貝知直 (大阪大学産業科学研究所・教授)

研究期間 2009年10月～2015年3月

展開している事業:

内閣府(ImPACT)、JST(未来社会創造事業)

#### CREST の成果:

磁場印加と CPA(チャープパルス増幅)レーザーのプリパルスの組み合わせでプリフォームド・プラズマを形成し、テラワット級の超高強度レーザーパルスに耐える集光・光導波用光学素子を実現した。



#### ■ 発展:

##### 1. GeV 級レーザー駆動プラズマ加速器、およびこれを用いた XFEL(X 線自由電子レーザー)を開発<sup>1,2,3,4,5,6</sup>

超高強度レーザーパルスに耐えるプラズマ利用集光素子・光導波素子をレーザー航跡場加速に用いてビームを安定化し、世界初の二段階レーザー加速を実証した<sup>1,2,3</sup>。また本研究領域 CREST「光展開」および ImPACT「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿命社会の実現」(2014 年度～2018 年度)で得た高安定電子ビーム発生技術を継承し、上記プラズマ加速器を用いた超小型 GeV 級の安定加速とこれを用いた XFEL のプロジェクト研究を展開した(電子加速チームとして JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」(2018 年度～2027 年度)に参画)(図 1)<sup>4,5,6</sup>。

##### 2. レーザー加速駆動電子の狭帯域エネルギースペクトルを実現、また高強度光・プラズマ相互作用を解明<sup>7,8,9,10</sup>

レーザー加速・電子ビームと同期したパルス駆動ソレノイドを用いて、電子ビームエネルギーのスペクトル広がり( $\Delta E/E$ )の狭帯域化( $\sim 1\%$ )に成功した<sup>7</sup>。またペタワット級高強度レーザーとプラズマの相互作用で発生する様々な相対論的な現象を解明した<sup>8,9,10</sup>。

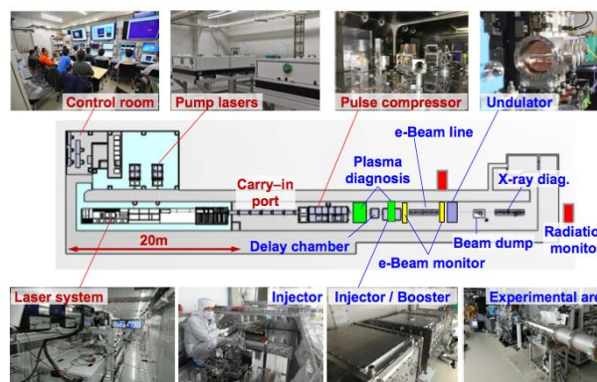


図 1. ImPACT レーザー加速プラットフォーム(理研 SPring-8 施設)<sup>1,2</sup>

#### ■ 科学的あるいは社会・経済的な波及効果

本研究は、CREST「光展開」の成果である低エネルギー領域( $< 10\text{MeV}$ )における電子ビームの安定生成技術をもとに、ImPACTにてレーザー加速電子ビームの多段加速技術を開発し、さらに現在は JST 未来社会創造事業のレーザー・プラズマ加速器による XFEL 開発へと繋がっており、超小型化高エネルギー加速器の研究は着実に進展している。また本研究で開発された超音速ガス標的の派生技術を含む要素技術は海外研究機関でも広く用いられている。

#### ■ 特記事項

- ◆産学連携: 高強度レーザー駆動の電子ビーム利用の検討および高速パルス電源の開発で、各々企業と実施中。
- ◆国際連携: レーザー駆動電子源開発で応用光学研究所(フランス)、EU PRAXIA(ドイツ放射光プロジェクト)、ELI-Beamlines(チェコの欧州超高強度レーザー施設)、上海交通大学(中国)と、各々共同開発を実施中。
- ◆成果の民間利用提供: 放電プラズマ標的(光導波路)を量研機構関西研(京都木津)など関連分野の研究グループ・機関などに提供。超音速ガス標的を欧州・米国・中国などの研究機関に提供。海外から販売の要請あり。
- ◆招待講演: 国際 18 件、国内 8 件。◆発表論文: 15 報。◆報道: 1 件。
- ◆特許: 国内出願、登録 4 件および 1 件、海外出願、登録各 1 件。

<sup>1</sup> N. Nakanii, et al, Phys. Rev. E 94, 063205\_1-6 (2016). <sup>2</sup> N. Pathak, et al, Phys. Plasmas 23, 113106 (2016). <sup>3</sup> N. Pathak, et al, Phys. Plasmas 25, 13119 (2018). 特許第 5611699 号. <sup>4</sup> Z. Jin, et al, Scientific Reports, 9, 20045 (2019). <sup>5</sup> N. Pathak, et al, Phys. Plasmas 27, 33106 (2020). <sup>6</sup> A. Zhidkov, et al, Phys. Rev. Research, 2, 13216 (2020). 特許第 6319920 号, US 10, 104, 753 B2 (米国特許). <sup>7</sup> Y. Sakai, et al, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 21, 101301 (2018). <sup>8</sup> M. Yano, et al, High Energy Density Physics, 30, 21-28 (2019). <sup>9</sup> M. Yano, et al, Physics of Plasmas 25, 103104 (2018). <sup>10</sup> M. Yano, et al, Physics of Plasmas 26, 93108 (2019).



### 3.3 2010 年度採択研究課題

- ・ 研究課題「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」(大森賢治)
- ・ 研究課題「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」(尾松孝茂)
- ・ 研究課題「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」(小林孝嘉)
- ・ 研究課題「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」(山内和人)

### 3.3.1 研究課題「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」(大森賢治)

#### アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御

大森賢治 (自然科学研究機構分子科学研究所・教授)

研究期間 2010年10月～2016年3月

展開している事業:

科研費基盤研究(A)、科研費特別推進研究、文科省(Q-LEAP)

#### CREST の成果:

量子多体系のコヒーレント制御技術(量子波を光で制御)として、従来の連続波レーザーではなく広帯域パルスレーザーを用いて、光格子にトラップされた極低温リュードベリ原子(Rb)集団をアト秒精度で制御する超高速量子シミュレーターを世界に先駆けて開発し、観測の対象である気相孤立分子を固体に拡張した。

#### ■発展:

##### 1. 原子レベルで動作する世界最速の量子シミュレーターを開発<sup>1,2,3,4,5</sup>

本超高速量子シミュレーターは、光格子にトラップされた強相関・極低温リュードベリ原子集団におけるフェムト秒オーダーの超高速・多体電子ダイナミクスをアト秒精度で制御・観測する世界唯一の量子シミュレーターである(図1)<sup>5</sup>。本研究は多くの研究機関で注目され、科研費特別推進研究「アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求」(2016年度～2021年度)、文科省(Q-LEAP)「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレーターの開発と量子計算への応用」(2018年度～2027年度)に継承されている。

##### 2. 超高速量子シミュレーターを用いて金属状の量子気体を創出<sup>6</sup>

極低温( $10^{-7}$ K)の Rb 原子気体( $3 \times 10^4$  個)を  $0.5 \mu\text{m}$  間隔の光格子にトラップし、パルス幅 $\sim 10\text{ps}$ の超短パルスレーザーを照射した。これにより個々の原子が巨大なリュードベリ軌道(直径 $\sim 0.5 \mu\text{m}$ 以上)に励起された電子の空間的重なり(リュードベリ電子)を生成し、更に電子の重なりを  $0.05 \mu\text{m}$ の極限的精度で調節できる金属状の量子気体を世界で初めて創出した(図2)<sup>6</sup>。この新物質”金属状の量子気体”は、国内外の主要研究機関で開発競争が激化する量子シミュレーターの画期的プラットフォームとして期待されている。

#### ■科学的あるいは社会・経済的な波及効果

本研究の超高速量子シミュレーターは、D-Wave2000<sup>7</sup>の  $10^3$ 倍以上の高効率量子アニーラー(組み合わせ最適化用・量子コンピューター)のハードウェアとして期待されており、量子多体系の未知の物理現象や物性の探索に極めて有用である。超高速コヒーレント制御と極低温物理が融合した新しい科学技術を創出し、さらに磁性・超伝導材料などの新機能物質の設計・計算手法の開発に向けて普遍的な貢献が期待される。

#### ■特記事項

◆産学連携: 超高速量子シミュレーターに関し、浜松ホトとの緊密な共同開発や電通大、東工大、奈良先端科技大との共同研究により実用化が進行中。

◆国際連携: ハイデルベルク大学(ドイツ)、オックスフォード大学(英国)、ストラスブルグ大学(フランス)、インスブルック大学(オーストリア)と進展中。

◆招待講演: 国際 27 件、国内 4 件。 ◆発表論文: 6 報。 ◆報道: 78 件。

◆受賞: 宅間宏記念学術賞(2017年)。 文部科学大臣表彰科学技術賞(2018年)。

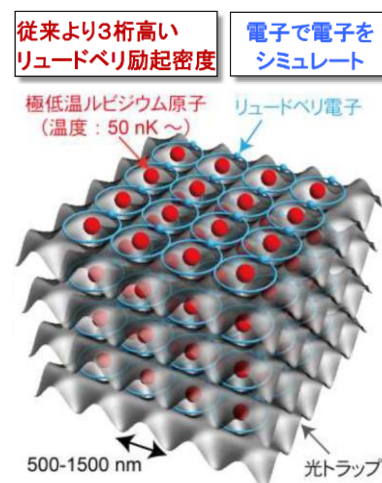


図1. 超高速量子シミュレーター<sup>5</sup>

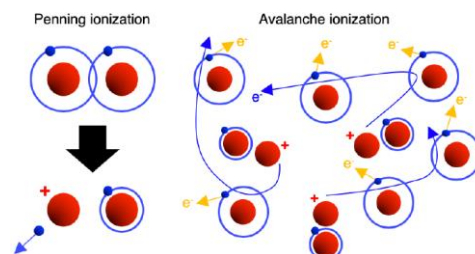


図2. リュードベリ軌道誘起プラズマの2段階ステップ形成<sup>6</sup>

<sup>1</sup> N. Takei, et al., Nat. Commun. 7, 13449 (2016). <sup>2</sup> C. Sommer et al., Phys. Rev. A 94, 053607 (2016). <sup>3</sup> H. Katsuki, et al. Acc. Chem. Res. 51, 1174–1184 (2018). <sup>4</sup> C. Liu, et al, Phys. Rev. Lett. 121, 173201 (2018). <sup>5</sup> 「経産省 2018 年度版ものづくり白書」より. <sup>6</sup> M. Mizoguchi, et al, Phys. Rev. Lett. 124, 253201 (2020). <sup>7</sup> カナダ量子コンピューター企業の製品.

### 3.3.2 研究課題「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」(尾松孝茂)

#### 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

尾松孝茂 (千葉大学大学院工学研究院・教授)

研究期間 2010年10月～2016年3月

展開している事業:

科研費基盤研究(B)、科研費新学術領域、科研費基盤研究(A)、JST(CREST)

#### CRESTの成果:

軌道角運動量を有する光渦を物質に照射すると、物質の表面あるいは内部がサブマイクロスケールのキラルな螺旋構造体に変形する事を世界で初めて発見。又螺旋構造体の螺旋度が軌道角運動量の大きさに強く依存する事を発見。



#### ■発展:

##### 1. 光渦を用いた光重合反応による螺旋ファイバーの創成<sup>1,2,3</sup>

光渦を光硬化樹脂に集光すると、光空間ソリトン効果によりファイバーが自己組織的に線引きされ、光渦の軌道角運動量の作用で螺旋ファイバーができることを発見。光渦照射による空間多重光通信用光ファイバーに道を拓いた(図1)。

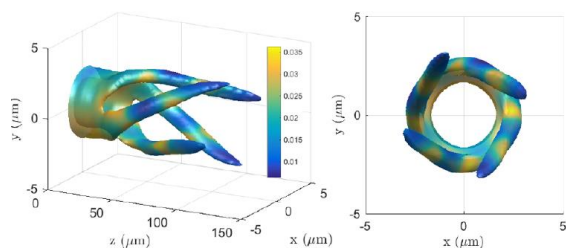


図1. 光重合反応で得られた螺旋ファイバーの形成を示す屈折率変化の空間分布<sup>1</sup>

##### 2. 超解像スピンジェット現象の発見<sup>4</sup>

蜂蜜状高粘度液膜に光渦を照射すると、液膜は自転しながら光渦の中心に集まり、極細・超解像スピンジェットに秩序化する事を発見。従来インクジェット法では不可能であった高粘度材料(金属ペーストなど)の高精細パターンニングが可能となる(図2)。

##### 3. 光渦トラッピング法による結晶成長法<sup>5,6</sup>

飽和 NaClO<sub>3</sub> 溶液中の金(Au)の3量体ナノ構造に光渦を照射し、キラル結晶化と共に CEE(鏡像体過剰率:キラルバイアス)が顕著に増大(~50%)する事、結晶化は円偏光状態(左・右)に依存して光渦照射後の短時間(5~6秒)に起こる事などを発見した。また、アミノ酸結晶では結晶成長速度が飛躍的に加速される事を発見した。

CEE 形成のメカニズムは有限要素法を用いた Au ナノ構造近傍の電磁界解析で説明された。

#### ■科学的あるいは社会・経済的な波及効果

上述の発展1は下記の国際連携を介した空間多重光通信用光渦伝送ファイバーの開発に進展。発展2は下記の産学連携を介したフレキシブル・エレクトロニクスへの応用に進展した。更にペロブスカイト発光素子等の機能性デバイスを目指したCREST「革新光」の研究課題「光渦が拓く超解像スピンジェット技術」(2019年度~2024年度)の研究が展開中。発展3は下記の国内外連携を介したキラル結晶化技術のタンパク質結晶や創薬への応用開発が展開中である。

#### ■特記事項

- ◆産学連携: 電子デバイスの融着を目指した光渦レーザー加工、超解像スピンジェット等で複数の国内企業と実施中。
- ◆国際連携: 光渦伝送ファイバー、キラル結晶化技術の開発等でセント・アンドルーズ大学(英国)、デューク大学(米国)、マッコーリー大学(豪州)、国立交通大学(台湾)、北大、阪大、大阪府立大学と実施中。
- ◆特許: 国内および海外出願5件および2件、国内登録2件。◆招待講演: 国際48件、国内18件。
- ◆発表論文: 39報。◆報道: 13件。◆受賞: OSA Fellow(2016年)。文部科学大臣表彰科学技術賞(2016年)。衛藤細谷記念財団賞(2016年)。SPIE Fellow(2019年)。

<sup>1</sup> Lee J, et al, ACS Photonics, 5, 4156-4163 (2018). <sup>2</sup> Omatsu T, et al, Advanced Optical Materials, 7, 1801672 (2019). <sup>3</sup> Omatsu T, et al, Journal of Nanophotonics 14, 010901 (2020). <sup>4</sup> Nakamura R, et al, Optics Express 27, 38019-38027 (2019). <sup>5</sup> Cheng A, et al, Journal of Physical Chemistry Letters 11, 4422-4426 (2020). <sup>6</sup> 特許第 6498804 号。

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

展開している事業:  
JST(先端計測)

小林孝嘉 (東京大学・名誉教授、電気通信大学・客員教授)

研究期間 2010年10月~2016年3月

CRESTの成果:

神経細胞の複雑な生命現象解明に向け、細胞の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)顕微イメージング、④誘導放出誘起光増幅減衰時間イメージング、の4つの手法を順次開発した。



■発展:

測定分子の蛍光標識が不要であることから実用化に有利な光熱(PT)顕微イメージング(上記 CREST の成果③)において集中的な発展が見られた。

1. 超解像 PT 顕微鏡の高解像度化を実現<sup>1,2</sup>

PT 顕微鏡の超解像はポンプ・プローブ光の点像分布関数の積に起因することを利用して高解像度の実現に成功した。さらに対物レンズに輪帯開口(Annular)あるいは逆輪帯開口(Inverse-annular)を用いることで3次元解像度の向上(~25%)を達成した(図1)<sup>1</sup>。

2. 高性能超解像 PT 顕微鏡観察の高速化を実現<sup>3</sup>

ガルバノ鏡掃引による超解像 PT 顕微鏡の高速化のために2Dイメージングを行い、回折限界(FWHM:410nm)が34%向上した高速(4.5s/frame)・超解像イメージングを可能にした。

3. PT 顕微鏡によりメラノーマ細胞の正常・悪性判定に成功

マウス皮膚の正常組織とメラノーマの病理組織で得た PT イメージングのグレーレベル同時生起行列解析を行い、正常細胞とガン化した悪性細胞の判定に成功した。

■科学的あるいは社会・経済的な波及効果<sup>4,5</sup>

細胞の光イメージング技術は、発展1~3によりPT顕微鏡が医療現場での観察実験に貢献するまでに性能改善が図られ、大きな科学技術的進展が見られた。一方、細胞・分子状態の光制御に関し、2017年理科大(徳永英司グループ)との共同研究において、光誘起力による吸収スペクトル変化の追跡で、水溶液分子の単量体からJ会合体への生成過程を世界で初めて観測した(図2)<sup>4</sup>。この結果は溶媒中の未知の分子やイオンの集合状態を観測しつつ分子会合体や結晶を創成する実用性を秘めることから、科学的のみならず社会・経済的な波及効果は大きいと言える。

■特記事項

- ◆国内共同研究: 理科大(徳永英司グループ)と実施中<sup>4,5</sup>。
- ◆国際連携: 台湾交通大学との共著論文が多数発表されている。
- ◆発表論文: 25報。◆特許: 国内出願および登録、各1件。
- ◆報道: 7件。

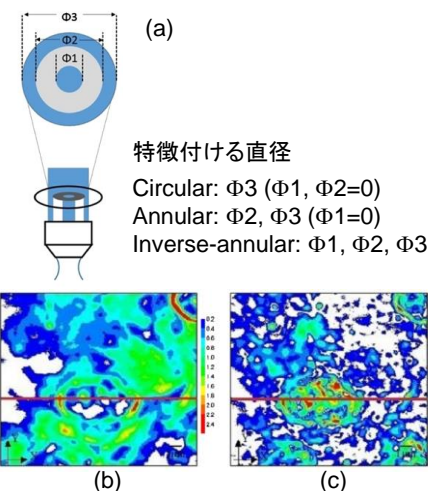


図1. (a)逆輪帯開口フィルター。(b)(c)ウサギの細胞におけるフィルター無し及び有りの場合のPT顕微像<sup>1</sup>

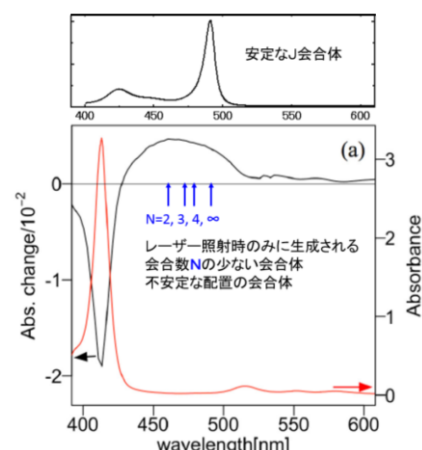


図2. (上)J会合体の吸収スペクトル。(下)単量体の吸収スペクトル(赤)とレーザー照射後の同変化(黒)<sup>4</sup>

<sup>1</sup> T. Kobayashi, et al, AIP Advances 6, 125308 (2016). <sup>2</sup> T. Kobayashi, et al, Opt. Rev. 25, 271 (2018). <sup>3</sup> K. Nakata, et al, J. Appl. Phys. 120, 214901 (2016). <sup>4</sup> M. Shirakawa, et al, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 044703 (2017). <sup>5</sup> 東京理科大学プレスリリース. 2017年4月。



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

展開している事業:  
科研費基盤研究(S)

山内和人 (大阪大学大学院工学研究科・教授)

研究期間 2010 年 10 月~2016 年 3 月

CREST の成果:

放射光 X 線源を対象に、回折限界性能をもつアダプティブな集光光学系を世界に先駆けて開発した。これを用いた走査・透過 X 線顕微鏡システムによって、電子密度分布のナノスケール分析と、元素・化学結合状態の分析機能を併せ持つイメージングを実現した。



■ 発展:

1. 形状可変ミラーによる新しい集光光学系を提案<sup>1,2,3</sup>

従来の凹凹面構成に代わる新たな凹凸面光学系を提案し、小型・高制御のアダプティブ集光系を実現した(図 1)<sup>1</sup>。また XFEL(X 線自由電子レーザー)や次世代リング型放射光施設で有効な長尺形状可変ミラーを実現した(図 2)<sup>2,3</sup>。形状可変用圧電素子駆動時の形状精度・時間安定性の向上を目指した機械的な複合曲げ機構を実現し、所期の性能を確認した。現在実用化が進行中である。

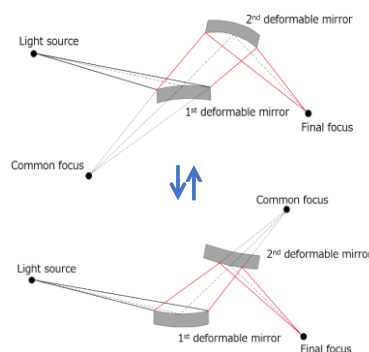


図 1. 新型凹凸面集光光学系<sup>1</sup>

2. 極小 X 線集光ビーム形状の新たな診断法を確立<sup>4,5</sup>

従来困難とされた極小 XFEL の形状をワンショットで計測できる新技術を開発した。多層膜ミラー<sup>4</sup>で集光した XFEL を白金ナノ微粒子に照射し、コヒーレント X 線散乱で生じた干渉模様(スペックル)の形状を計測・解析することで最小 6nm までの集光を実証し、X 線ビームの形状を決定する手法を確立した(図 3)<sup>5</sup>。

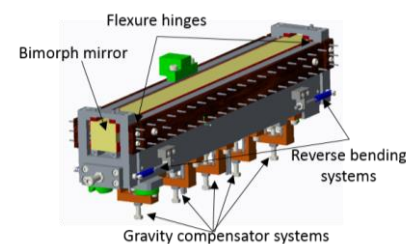


図 2. 長尺形状可変ミラーシステム<sup>2,3</sup>

■ 科学的あるいは社会・経済的な波及効果

発展 1 で得られた集光光学系は、アメリカで注目されて APS への導入が決定し、現在、阪大・企業連合による導入計画が進行中である。発展 2 の X 線ビーム診断技術は、物理領域における X 線非線形光学現象の開拓のみならず、蛋白質構造の高解像観察にも貢献することから、疾病の原因究明や新薬の開発などを通じた医学・薬学・生物学への波及効果も大きい。

■ 特記事項

◆産学連携および実用化: 形状可変ミラーにおける piezoelectric substrate-mirror bonding technology regarding practical application. In addition, conventional long-scale adaptive mirror regarding practical application with two companies (SPring-8 is provided, APS is planned).

◆国内海外共同研究: 形状可変ミラーに関し、国内では理研(SPring-8II)および JASRI と、海外では APS(米国)と実施中。2020 年に SPIE および共著論文発表済<sup>6</sup>。

◆招待講演: 国際 10 件、国内 1 件。◆発表論文: 31 報。◆報道: 34 件。

◆受賞: 文部科学大臣表彰科学技術賞(2016 年)。泰山賞レーザー進歩賞(2019 年)。

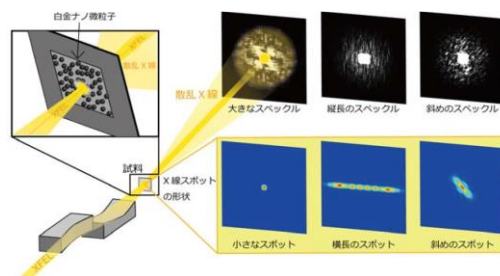


図 3. スペックルを利用した集光ビーム診断法<sup>5</sup>

<sup>1</sup> H. Yamaguchi, et al, SPIE Optics + Photonics 2019, 11108-4, San Diego. <sup>2</sup> T. Goto, et al, Proceedings of SPIE 9965, 996502 (2016). <sup>3</sup> T. Goto, et al, Optics Express 26, 17477 (2018). <sup>4</sup> S. Matsuyama, et al, Sci. Rep. 8, 17440 (2018). <sup>5</sup> T. Inoue, et al, J. Sync. Rad. 27, 883-889 (2020). <sup>6</sup> Xianbo Shi, et al, Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 11491, 1149110 (2020).