

(独) 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
個人型研究 (さきがけ)

追跡調査報告書

「光と制御」
(2001-2006 年度)

研究総括 花村 榮一

2012 年 3 月 31 日

目 次

要旨.....	1
第1章 追跡調査について.....	2
1.1 調査の目的.....	2
1.2 調査の対象.....	2
1.3 研究領域の概要.....	2
第2章 研究領域終了から現在に至る状況.....	7
2.1 参加研究者全体の動向.....	7
2.1.1 研究者の職位の推移.....	7
2.1.2 原著論文の発表件数.....	7
2.1.3 特許件数.....	9
2.1.4 研究者の受賞.....	15
2.1.5 研究者の研究助成金獲得状況.....	22
2.2 参加研究者の研究成果の発展状況.....	27
2.2.1 第1期生（8名）.....	27
2.2.2 第2期生（9名）.....	39
2.2.3 第3期生（5名）.....	51
2.3 第2章のまとめ.....	58
第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果.....	60
3.1 研究課題1 強相関遷移金属酸化物における光機能の探索.....	60
3.1.1 研究成果の発展状況.....	60
3.1.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	60
3.1.3 研究成果の応用に向けての発展状況.....	63
3.2 研究課題2 半導体をベースとした磁気光学結晶の開発とデバイス応用.....	63
3.2.1 研究成果の発展状況.....	63
3.2.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	64
3.2.3 研究成果の応用に向けての発展状況.....	66
3.3 研究課題3 シュタルク・アトムチップによるコヒーレント原子操作.....	69
3.3.1 研究成果の発展状況.....	69
3.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	69
3.3.3 研究成果の応用に向けての発展状況.....	72

3.4 研究課題 4 量子閉じこめモット絶縁体における強相関係の光学構築	73
3.4.1 研究成果の発展状況	73
3.4.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.	73
3.4.3 研究成果の応用に向けての発展状況.	73

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業の個人型研究(さきがけタイプ)(以下、さきがけ)の研究領域「光と制御」(2001・2007年)において、研究終了後5年を経過した後、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、独立行政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追跡評価のために調査した結果をまとめたものである。「光と制御」研究領域は、受光と発光、光の伝達制御、スイッチング等に用いられる光デバイスの実現に向けて、光と物質の相互作用や光機能性材料創製に関する研究を対象とする領域として設定された。従って当初、光の本質の解明から、光の極限状態の生成、高分子や強相関電子系の巨大非線形光学材料の開発から光デバイスの作製までが想定されていたが、多くのバイオ関連の課題の応募があり、結果的に研究領域の網羅する範囲は物理学、電子工学から化学、生物学まで、しかも基礎研究から光デバイスの開発までの多岐に亘った。

その第3期の研究者が研究を終了したときから4年を経過した時点で、参加研究者全員22名を対象として調査を行った。まず、参加研究者全員について、さきがけ研究期間とその後の職位の推移、発表した原著論文数、成立した国内外特許件数、獲得した研究助成金、受賞を含む研究実績データの調査を行った。

さきがけ期間中とさきがけ終了後から調査時点までの、職位、原著論文数、成立した特許数、研究助成金獲得額の比較から、さきがけ研究採択時に期待された通りの発展を示していることが確認された。職位については、さきがけ開始時には准教授を中心にする構成で教授は1名であったのが、調査時点では准教授が4名、教授は国研の研究者が兼務の教授になったのを含め17名となった。即ち、本さきがけ研究の出身者22名中の内、企業研究者を除く全員21名が准教授以上になっている。研究助成金の獲得については、半数の研究者が1億円以上の研究費を獲得し、JSTのCRESTやERATOなど重要プログラムに4名が研究代表者として採択された。また、最先端研究開発支援プログラムにも4名が採択された。発表論文数については、さきがけ終了後とさきがけ開始時からの数の比から、終了後も活発な発表を行っていることが窺えた。主要論文に挙げた論文の被引用件数が多い事実からも、本さきがけ研究者の成果は高い評価を受けていると言える。これらの事実から、さきがけ出身者は順調に研究を発展させ、社会からの期待も大きいことが確認された。

その成果の内容は、基礎研究としての高い評価の他に、着実に応用・実用化に向けた展開をしているもの、さらに現在は極めて基礎的な研究であるが、成功すれば文字通り社会のパラダイムの変化をも起こすような大きな波及効果が期待されるものなど、バラエティに富んでいる。

第1章 追跡調査について

1.1 調査の目的

戦略的創造研究推進事業の個人型研究さきがけにおいて、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を明らかにし、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行う。

1.2 調査の対象

本追跡調査は、さきがけ研究領域「光と制御(2001-2006 年度)」の 23 研究課題全てを対象とする。表 1-1 に調査対象課題数と調査対象期間を示す。なお、さきがけは個人型研究であるため、各研究者がそれぞれに 1 研究課題を設定し、研究を展開しているため、参加研究者全員を調査した。

表 1-1 調査対象と調査対象期間

	さきがけ期間	さきがけ終了後調査対象期間	研究課題数
第 1 期	2001 年 12 月－2005 年 3 月	2005 年 4 月－2011 年 9 月	8
第 2 期	2002 年 11 月－2006 年 3 月	2006 年 4 月－2011 年 9 月	9
第 3 期	2003 年 10 月－2007 年 3 月	2007 年 4 月－2011 年 9 月	5

1.3 研究領域の概要

「光と制御」の総括責任者は花村 栄一（当時：千歳科学技術大学教授、現在：東京大学名誉教授）であり、研究領域の概要は以下の通りである。

この研究領域は、受光と発光、光の伝達制御、スイッチング等に用いられる光デバイス等の実現に向けて、光と物質の相互作用や光機能性材料創製に関する研究を対象とするものです。具体的には、非線形光学材料、発光および光記録材料を始めとした光機能性材料実現のため、半導体、酸化物結晶、分子複合体を用い、薄膜、超微粒子とナノクラスター、フォトニクス結晶、それらのハイブリッド化と微細加工など、さまざまな形態制御を受けた新規物質創製に関する研究等が含まれます。

この領域の概要に沿って研究を行うため、9 人の領域アドバイザーを定め、研究者の指導にあたった。表 1-2 に領域アドバイザーを示す。

表 1-2 領域アドバイザー

領域 アドバイザー	所属	役職	任期
阿部 修治	産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門	副研究部門長	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
石田 晶	日本大学大学院	客員教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
井元 信之	大阪大学大学院 基礎工学科	教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
内田 慎一	東京大学大学院 理学系研究科	教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
北川 禎三	豊田理化学研究所	豊田フェロー	平成 14 年 12 月～平成 19 年 3 月
腰原 伸也	東京工業大学大学院 理工学研究科	教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
小林 功郎	東京工業大学 精密工学研究所	教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
野田 進	京都大学大学院 工学研究科	教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月
覧具 博義	東京農工大学 工学部	教授	平成 13 年 8 月～平成 19 年 3 月

表 1-3 研究課題と研究者（第 1 期、第 2 期、第 3 期）（2011 年 10 月調査）

期 (採択年 度)	研究課題	研究者	所属		
			さががけ採択時	さががけ終了時	調査時
1 期 (2001 年 度) (8 名)	強相関遷移金属酸化物における光機能の探索	東正樹	京都大学化学研究所 助手	京都大学化学研究所 助手	東京工業大学応用セラミックス研究所 教授
	光制御可能な細胞発光素子の創製	近江谷 克裕	産業技術総合研究所人間系・細胞機能操作研究グループ グループリーダー	産業技術総合研究所セルダイナミクス研究グループ グループリーダー	産業技術総合研究所生物プロセス研究部門生体機能可視化研究特別チーム チーム長
	2 光子誘起高分子化に伴うフォトニ	孫洪波	日本学術振興会リサーチアソシエ	大阪大学大学院工学研究科 助	Jilin University, Center for

	ック結晶の作製とその応用		イト	手	Ultrafast Optoelectronic Technologies Professor
	光子数状態の生成と制御ー光子数マニピュレーションの実現ー	竹内繁樹	北海道大学電子科学研究所 助教授	北海道大学電子科学研究所 助教授	北海道大学電子科学研究所量子情報フォトンクス研究分野 教授
	半導体をベースとした磁気光学結晶の開発とデバイス応用	田中雅明	東京大学大学院工学系研究科 助教授	東京大学大学院工学系研究科 助教授	東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻 教授
	光化学的に構造制御したナノ複合機能材料の創製	鳥本司	北海道大学触媒化学研究センター 助教授	北海道大学触媒化学研究センター 助教授	名古屋大学大学院工学研究科 教授
	強相関物質表面での光励起状態の光電子分光	溝川貴司	東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教授	東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教授	東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻 准教授
	放射光 X 線粉末構造による光誘起相転移の研究	守友浩	名古屋大学理工科学総合研究センター 助教授	名古屋大学大学院工学研究科 助教授	筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻 教授

2 期 (2002 年 度) (9 名)	光センサータンパク質による細胞機能の制御	伊 関 峰 生	岡崎国立共同研究機構基礎生物学研究所 特別協力研究員	科学技術振興機構 さきがけ研究者	東邦大学薬学部薬品物理分析学 准教授
	光転写調節メカニズムと新規光センサー	岡 野 俊 行	東京大学大学院理学系研究科 講師	早稲田大学理工学術院 助教授	早稲田大学先進理工学部 教授
	局在プラズモン増強を使った光倍高調波によるバイオチップの高密度化	梶 川 浩 太郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教授	東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教授	東京工業大学大学院総合理工学研究科物理電子システム創造専攻 教授
	磁性誘導体における誘導関数の磁場抑制	勝 藤 拓 郎	早稲田大学理工学術院 助教授	早稲田大学理工学術院 助教授	早稲田大学理工学術院先進理工学部物理学科 教授
	シュタルク・アトム	香 取 秀	東京大学工学部附	東京大学大学院工	東京大学工学部物

	チップによるコヒーレント原子操作	俊	属総合試験所 助教授	学系研究科 助教授	理工学科 教授
	光と原子の間の量子情報ネットワークの実現	上妻 幹男	東京工業大学大学院理工学研究科 助教授	東京工業大学大学院理工学研究科 助教授	東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学 准教授
	小型超高精度レーザー原子時計の実現	杉山 和彦	京都大学大学院工学研究科 助教授	京都大学大学院工学研究科 助教授	京都大学工学部工学研究科電気工学専攻電子工学 准教授
	有機－無機ハイブリッド低融点ガラスを用いたフォトニクス材料の創製	高橋 雅英	京都大学化学研究所 助手	京都大学化学研究所 助教授	大阪府立大学大学院工学研究科物質化学系マテリアル工学分野 教授
	光合成系の人為操作及び光反応制御	橋本 秀樹	大阪市立大学大学院理学研究科 教授	大阪市立大学大学院理学研究科 教授	大阪市立大学大学院理学研究科数物系専攻物理学教室(兼)複合先端研究機構 教授

3 期 (2003 年 度) (5 名)	原子直視法によるナノコンタクトの光機能探索	木塚 徳志	筑波大学物質工学系 助教授	筑波大学大学院数理物質科学研究科 助教授	筑波大学大学院数理物質科学研究科物性分子工学専攻 教授
	インテリジェント光駆動分子機械の構築	金原 数	東京大学大学院工学系研究科 講師	東京大学大学院工学系研究科 助教授	東北大学多元物質科学研究所 教授
	光技術・ナノ構造・認識分子の融合による環境診断素子の開発	周豪慎	産業技術総合研究所電力エネルギー研究部門 主任研究員	産業技術総合研究所エネルギー技術部門 主任研究員	産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門 研究グループ長 (兼)東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専

					攻 特任教授
	テラヘルツ繰り返し 高安定外部同期型パ ルス光源の開発	高坂繁 弘	古河電気工業(株) ファイテルフォト ニクス研究所 研 究員	古河電気工業(株) ファイテルフォト ニクス研究所 研 究員	古河電気工業株式 会社研究開発本部 ファイテルフォト ニクス研究所光線 路開発部 主査
	量子閉じ込めモット 絶縁体における強相 関係の光学構築	ファン ハロル ド	東京大学大学院新 領域創製科学研究 科 助教授	東京大学大学院新 領域創製科学研究 科 助教授	東京大学新領域創 成科学研究科 教授→スタンフォ ード大学

第2章 研究領域終了から現在に至る状況

2.1 参加研究者全体の動向

2.1.1 研究者の職位の推移

研究者全員のさきがけ採択時、終了時及び追跡調査時の職位の推移を図2-1に示した。さきがけ採択時には准教授(助教授)と教授がそれぞれ12名、1名だったが、終了時には昇任により増加して15名、2名となった。調査時には国研研究者が教授職兼任になった2名を含め、昇任が顕著で17名になり、その分准教授が減少している。准教授以上の人数では採択時に比べ、調査時では8名増加した。さきがけ出身者は、大学の研究者については順調に昇任しているといえる。

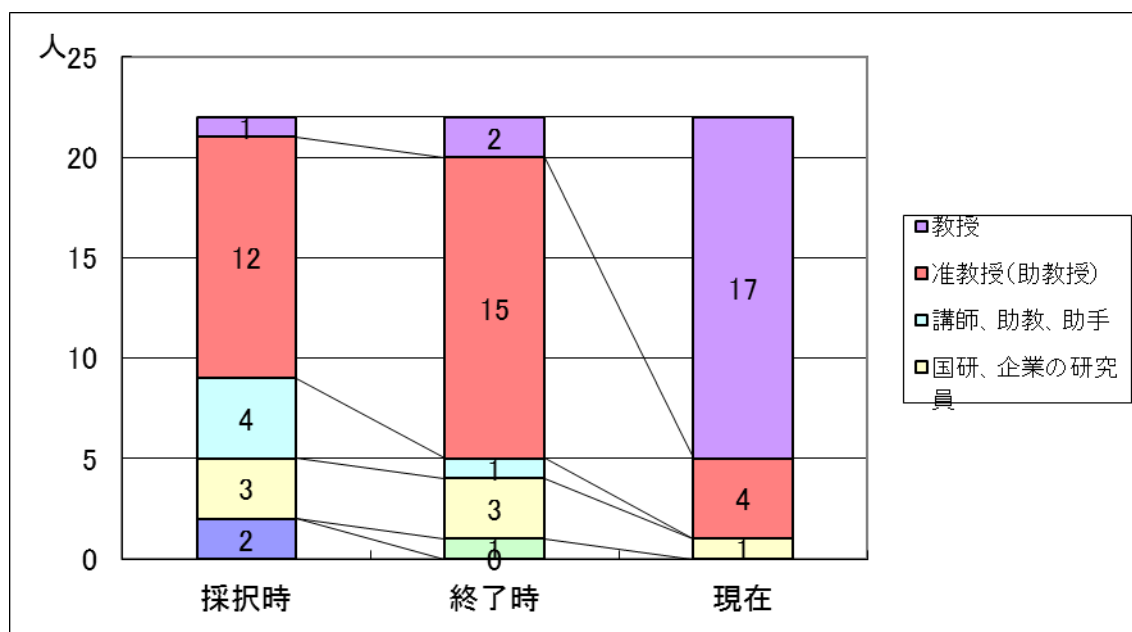


図2-1 研究者のさきがけ採択時、終了時および調査時の職位の推移

2.1.2 原著論文の発表件数

論文発表件数は研究者の研究活動を示す一つの指標であると考えられるため、さきがけ期間中と終了後の原著論文の数を比較した。各研究者の論文は、論文データベースScopusを用いて検索し、①プロジェクト開始年から調査時点まで(1期生については2002年以降、2期生については2003年以降、3期生については2004年以降)に発表された原著論文(Article)数、ならびに、②プロジェクト終了時から調査時点まで(1期生については2005年以降、2期生については2006年以降、3

期生については2007年以降)に発表された原著論文(Article)数を求め、②/①の比率を求めた。
結果を表2-1に示した。

さきがけ終了後の論文数とさきがけ開始時からの論文数の比を、さきがけ終了後のアクティビティを示す指標と考えると、多くの研究者が70%を超えていて、終了後も活発な発表を行っていることが窺える。論文数は分野による違いが大きいが、一期の東、近江谷、島本、2期の橋本、3期の周などが数で際だっている。

表 2-1 研究者の論文（原著論文）数 （2011 年 8 月末検索 DB:SCOPUS）

期 (採択年度)	研究課題	研究者	①PJ 開始時からの論文数	②PJ 終了後の論文数	% (②/①)
1 期生 (2001 年度)	強相関遷移金属酸化物における光機能の探索	東正樹	92	72	78.3%
	光制御可能な細胞発光素子	近江谷克裕	76	55	72.4%
	2 光子有機高分子化に伴う フォトニック結晶の作製とその応用	孫洪波	60	57	95.0%
	光子数状態の生成と制御 ―光子数マニピュレーション実現に向けて―	竹内繁樹	44	31	70.5%
	半導体をベースとした磁気光学結晶の開発とデバイス応用	田中雅明	41	30	73.2%
	光化学的に構造制御したナノ複合機能材料の創製	島本司	70	57	81.4%
	強相関物質表面での光励起状態の光電子分光	溝川貴司	79	51	64.6%
	放射光 X 線粉末構造解析による光誘起相転移の研究	守友浩	116	59	50.9%
2 期生 (2002 年度)	光センサータンパク質による細胞機能の制御	伊関峰生	15	10	66.7%
	光転写調節メカニズムと新規光センサー	岡野俊行	12	10	83.3%
	局在プラズモン増強を使った光倍高調波によるバイオチップの高密度化	梶川浩太郎	30	20	66.7%
	磁性誘電体における誘電関数の磁場制御	勝藤拓郎	48	32	66.7%
	シュタルク・アトムチップによるコヒーレント原子操作	香取秀俊	24	15	62.5%
	光と原子の間の量子情報ネットワークの実現	上妻幹男	17	15	88.2%
	小型超高精度レーザー原子時計の実現	杉山和彦	8	8	100.0%

3 期生 (2003 年度)	有機－無機ハイブリッド低融点ガラスを用いたフォトニクス材料の創製	高橋雅英	67	46	68.7%
	光合成系の人為操作及び光反応制御	橋本秀樹	80	65	81.3%
	原子直視法によるナノコンタクトの光機能探索	木塚徳志	41	29	70.7%

	インテリジェント光駆動分子機械の構築	金原数	26	19	73.1%
	光技術・ナノ構造・認識分子の融合による環境診断素子の開発	周豪慎	137	66	48.2%
	テラヘルツ繰り返し高安定外部同期型パルス光源の開発	高坂繁弘	6	1	16.7%
	量子閉じこめモット絶縁体における強相関系の光学構築	ファン ハロルド	59	46	78.0%
全体			1152	796	69.1%

2.1.3 特許件数

表 2-2 は、さきがけ研究開始から調査時までの間に出願して登録された特許を、それぞれ国内と外国について示したものである。

個人差が多いが、さきがけ期間の出願数で（従って登録数で）顕著に多いのは 2 期生の高橋で、群を抜いている。3 期生の周、1 期生の鳥本、守友および近江谷が続く。終了後の出願では 1 期の田中、鳥本などが引き続き特許化に意欲を示している。一部の特許（発明者：一期の近江谷、鳥本、二期の高橋、3 期の高坂）で、企業が共同出願人に入っていることは、その成果に対する企業の関心の高さを示すものとして注目される。

表 2-2 登録特許リスト (2011 年 8 月末検索 DB:ATMS)

(a) 2001 年 (平成 13 年)度採択研究者の特許

研究者	特許番号	出願人	発明の名称	国際出願番号
東正樹	特許 004034139 号(2007.11.02)	独立行政法人 科学技術振興機構	B i M n O 3 結晶の合成方法及び B i M n O 3 結晶合成用の組成物	_____
東正樹	特許 004095006 号(2008.03.14)	独立行政法人 科学技術振興機構	正方晶 B i C o O 3 及びその製造方法	_____
近江谷克裕	特許 004484429 号(2010.04.02)	アトー株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所	高分泌型ウミボタル類縁発光酵素のタンパク質	_____
近江谷克裕	特許 004052389 号(2007.12.14)	アトー株式会社	複数の発光成分の発光量測定法およびその発光測定装置	_____

近江谷克裕	特許 004362580号(2009.08.28)	独立行政法人産業技術総合研究所	発光性渦鞭毛藻（虫）類から発光基質の精製法	_____
-------	---------------------------	-----------------	-----------------------	-------

近江谷克裕	特許 004682310号(2011.02.18)	独立行政法人産業技術総合研究所，国立大学法人電気通信大学，東洋ビーネット株式会社	天然型L-システインまたはその誘導体を用いたホタル発光基質の生合成システム及び本システムを含んだ発光基質溶液	WO2006070775
近江谷克裕	特許 004427671号(2009.12.25)	独立行政法人産業技術総合研究所，独立行政法人科学技術振興機構	蛋白質のプロセッシングを測定するためのモニター蛋白質	WO2004052934 CN1726228,EP1580 196 JP4427671
近江谷克裕	特許 004385135号(2009.10.09)	独立行政法人産業技術総合研究所	マルチ遺伝子転写活性測定システム	WO2004099421 CN1784496,EP1621 634 JP4385135,US75726 29
近江谷克裕	特許 004604187号(2010.10.15)	独立行政法人産業技術総合研究所	糖鎖を介したルシフェラーゼと有機蛍光色素間のエネルギー移動を利用した可視-近赤外光プローブ	_____
竹内繁樹	特許 004098530号(2008.03.21)	独立行政法人科学技術振興機構	もつれ合い光子対発生装置	WO03065117 03-08-07 (EP1477843, US7211812)
竹内繁樹	特許 003965624号(2007.06.08)	独立行政法人科学技術振興機構	位相シフト光スイッチ	_____
竹内繁樹	特許 004701385号(2011.03.18)	国立大学法人北海道大学	光学特性測定装置、光学特性測定方法、並びに、それに用いるプログラムおよび記録媒体	_____
田中雅明	特許 004477305号(2010.03.19)	独立行政法人科学技術振興機構	スピントランジスタ及びそれを用いた不揮発性メモリ	WO2004012272 04-02-05 (CN100470844,KR10 0977829 US7423327, US7671433 US7825485, US8026563)
田中雅明	特許 004415146号(2009.12.04)	国立大学法人東京大学	強磁性半導体を用いた電界効果トランジスタと及びこれを用いた不揮発性メモリ	_____

田中雅明	特許 004143644号(2008.06.20)	独立行政法人 科学技術振興 機構	スピン依存伝達特性を有する トランジスタを用いた再構成 可能な論理回路	WO2004086625 04-10-07 (CN1333528, JP4143644, KR100789044, US7545013)
------	---------------------------	------------------------	---	---

田中雅明	特許 004500257号(2010.04.23)	独立行政法人 科学技術振興 機構	スピン依存伝達特性を有する トンネルトランジスタ及びそ れを用いた不揮発性メモリ	WO2004088753, 04-10-14 (CN100589247,CN10 1159287 ,JP4500257, KR100737030,US77 14400,US7397071)
田中雅明	特許 004574674号(2010.08.27)	独立行政法人 科学技術振興 機構	論理回路および単電子スピ ントランジスタ	WO2006100835, 06-09-28 (JP4574674,US7851 877)
鳥本司	特許 004096330号(2008.03.21)	独立行政法人 科学技術振興 機構	内部に制御された空隙を有す るコア・シェル構造体及びそ れを構成要素とする構造体並 びにこれらの調製方法	WO03072488, 03-09-04 (US7381465)
鳥本司	特許 003681365号(2005.05.27)	エア・ウォーター 株式会社	光触媒反応による水浄化方 法および装置	—————
鳥本司	特許 003951181号(2007.05.11)	独立行政法人 科学技術振興 機構	コア・シェル構造体の調製方 法	—————
鳥本司	特許 004445716号(2010.01.22)	日立ソフトウ ェアエンジニア リング株式 会社	ナノ粒子製造方法	EP1491502, 11-03-23 (US7326654)
鳥本司	特許 004058720号(2007.12.28)	独立行政法人 科学技術振興 機構	コア・シェル構造体からなる 光記録媒体及びその調製方 法	—————
鳥本司	特許 004484195号(2010.04.02)	テイカ株式 会社, 大谷文 章	酸化チタンの製造方法	—————
鳥本司	特許 004478959号(2010.03.26)	独立行政法人 科学技術振興 機構	内部に制御された空隙を有す るコア・シェル構造体の調整 方法と、該コア・シェル構造 体を構成要素とする構造体の 調製方法	—————
鳥本司	特許 004581100号(2010.09.10)	財団法人大阪 産業振興機構, 国立大学法人 大阪大学	電子顕微鏡用の標体の作製 方法およびそれを用いた試料 観察方法、ならびに試料観 察装置	WO2007083756 (JP4581100,US7880 144)

島本司	特許 004584334 号(2010.09.10)	国立大学法人 大阪大学, 国立 大学法人名 古屋大学, 財 団法人大阪産 業振興機構	多孔質炭素層に内包された触媒及びその製造方法	WO2007142148, 07-12-13 (JP4584334)
守友浩	特許 003632086 号(2005.01.07)	国立大学法人 名古屋大学	磁気抵抗膜の作製方法及び磁気抵抗膜	US6887513 05-05-03
守友浩	特許 003963010 号(2007.06.01)	独立行政法人 科学技術振興 機構	光透過率制御方法及びその方法を用いた装置	_____
守友浩	特許 004182402 号(2008.09.12)	独立行政法人 科学技術振興 機構	トンネル障壁型磁気抵抗素子の製造方法	_____
守友浩	特許 003837721 号(2006.08.11)	独立行政法人 科学技術振興 機構	分子磁性材料及びその製造方法	_____
守友浩	特許 004058716 号(2007.12.28)	独立行政法人 科学技術振興 機構	光記録媒体及びその記録方法	_____
守友浩	特許 004065948 号(2008.01.18)	独立行政法人 科学技術振興 機構	光スイッチ素子用材料及びそれを有する装置並びに光による光スイッチング方法	_____

(b) 2002 年(平成 14 年)度採択研究者の特許

研究者	特許番号	出願人	発明の名称	国際出願番号
梶川浩太郎	特許 003998064 号(2007.08.17)	財団法人理工 学振興会	フォトニック結晶	_____
梶川浩太郎	特許 004224641 号(2008.12.05)	国立大学法人 東京工業大学	局在化表面プラズモンセンサ、センシング装置およびセンシング方法	_____
梶川浩太郎	特許 004247398 号(2009.01.23)	独立行政法人 科学技術振興 機構	局在化表面プラズモンセンサ	_____
勝藤拓郎	特許 004009604 号(2007.09.07)	独立行政法人 科学技術振興 機構	光学素子	_____
香取秀俊	特許 004374444 号(2009.09.18)	独立行政法人 科学技術振興 機構	原子デバイス	WO2004082027 04- 09-23 (CN100452425 , US7459673)
杉山和彦	特許 004408246 号(2009.11.20)	独立行政法人 科学技術振興 機構	モード同期半導体レーザ	_____

高橋雅英	特許 004375982 号(2009.09.18)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質及びその製造方法	WO2004081086 04-09-23 (CN100532433, KR100768577 US7802450)
高橋雅英	特許 004512936 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質	WO2004081086, 04-09-23 (CN100532433 ,KR1 00768577) US7802450
高橋雅英	特許 004609831 号(2010.10.22)	オーセラ株式 会社	排ガス浄化触媒用ハニカム担 体及びその製造方法	WO2005009918 05-02-03 (CN100400464,CN10 1091925)

高橋雅英	特許 004516727 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	—————
高橋雅英	特許 004516728 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質及びその製造方法	—————
高橋雅英	特許 004263051 号(2009.02.20)	横尾俊信、高 橋雅英、星和 電機株式会社	発光ダイオード	US7265486 07-09-04
高橋雅英	特許 004516736 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	膜状有機無機ハイブリッドガ ラス状物質及びその製造方法	—————
高橋雅英	特許 004516737 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	—————
高橋雅英	特許 004516766 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	WO2005000943、 2005-01-06、 (US7451619, KR100740804,CN10033 8117)
高橋雅英	特許 004516767 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	—————
高橋雅英	特許 004079896 号(2008.02.15)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	—————
高橋雅英	特許 004079897 号(2008.02.15)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	WO2004081086 04-09-23(US7802450 KR100768577 ,CN1005 32433)
高橋雅英	特許 004079898 号(2008.02.15)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質	WO2004081086 04-09-23 (US7802450 ,KR100768 577,CN100532433)
高橋雅英	特許 004079904 号(2008.02.15)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質を含有するディスプレ イパネル用低誘電体材料	—————

高橋雅英	特許 004516776 号(2010.05.21)	セントラル硝 子株式会社	有機無機ハイブリッドガラス 状物質とその製造方法	WO2005000943, 05-01-06(US7451619 ,K R100740804 ,CN100338 117)
高橋雅英	特許 004612330 号(2010.10.22)	オーセラ株式 会社	ロータリーキルン	_____
高橋雅英	特許 004612331 号(2010.10.22)	オーセラ株式 会社	フロートバス用耐火材及びフ ロートバス	_____
高橋雅英	特許 003987515 号(2007.07.20)	横尾俊信, 高 橋雅英, 星和 電機株式会社	蛍光体、蛍光体の製造方法、及 び発光ダイオード	_____
高橋雅英	特許 004324799 号(2009.06.19)	オーセラ株式 会社	チタン酸アルミニウムマグネ シウム焼結体の製造方法	WO2004039747 04-05-13(US7166552 ,T WI268916,JP4324799,C N100427432)

橋本秀樹	特許 004452045 号(2010.02.05)	財団法人光科 学技術研究振 興財団	テラヘルツ波発生装置	_____
橋本秀樹	特許 004296070 号(2009.04.17)	浜松ホトニク ス株式会社	位相特性測定装置	_____

(c) 2003 年（平成 15 年）度採択研究者の特許

研究者	特許番号	出願人	発明の名称	国際出願番号
周豪慎	特許 004048243 号(2007.12.07)	独立行政法人 産業技術総合 研究所	二次電池及びその製造方法	_____
周豪慎	特許 004625926 号(2010.11.19)	独立行政法人 産業技術総合 研究所	リチウムイオン二次電池用電 極材料及びその製造方法並び に二次電池	_____
周豪慎	特許 004406702 号(2009.11.20)	独立行政法人 産業技術総合 研究所	ホルムアルデヒド検出方法及 び検出装置	_____
周豪慎	特許 004714844 号(2011.04.08)	独立行政法人 産業技術総合 研究所	ポーラス酸化亜鉛膜形成用前 駆体の製造方法、ポーラス酸化 亜鉛膜の製造方法	_____
周豪慎	特許 004517080 号(2010.05.28)	独立行政法人 産業技術総合 研究所	単結晶アナターゼ型TiO ₂ 及びその製造方法	_____
周豪慎	特許 004229394 号(2008.12.12)	日本電信電話 株式会社, 独 立行政法人産 業技術総合研 究所	多孔質材料を用いた分子の検 出方法ならびに該多孔質材料 及び該多孔質材料の製造方法	WO2005015198 05-02-17(JP4229394)

周豪慎	特許 004528975 号(2010.06.18)	独立行政法人 産業技術総合 研究所	ナノサイズ微結晶酸化物ーガ ラス複合メソポーラス粉末又 は薄膜、これらの製造方法、リ チウム電池又はリチウムイン タカレーション電気デバイス、 光触媒デバイス、太陽電池、エ ネルギー貯蔵デバイス及び二 次電池	WO2005047199 05-05-26(US7771871 ,JP4528975,EP1690 838)
高坂繁弘	特許 004205644 号(2008.10.24)	古河電気工業 株式会社	パルス発生器、パルス増幅器、 パルス圧縮器およびそれらを 備えたパルス発生装置	_____
高坂繁弘	特許 004162648 号(2008.08.01)	独立行政法人 科学技術振興 機構、古河電 気工業株式会 社	ロック検出装置及び光フェー ズロックループシステム	WO2006041103 06-04-20 (US7715725)
高坂繁弘	特許 004246182 号(2009.01.16)	独立行政法人 科学技術振興 機構、古河電 気工業株式会 社	信号発生装置及び信号発生方 法	_____
高坂繁弘	特許 004436305 号(2010.01.08)	独立行政法人 科学技術振興 機構、古河電 気工業株式会 社	光パルス測定装置及び光パル ス測定方法	_____
ファン ハロ ルド	特許 004374299 号(2009.09.11)	独立行政法人 科学技術振興 機構	酸化物結晶の処理方法	_____
ファン ハロ ルド	特許 004446021 号(2010.01.29)	独立行政法人 科学技術振興 機構	ヘテロ接合素子の制御方法	_____

2.1.4 研究者の受賞

表 2-3(a)及び(b)は、研究者の受賞をさがし期間中の受賞とさがし終了後の受賞に分けて示したものである。期間中、終了後を合わせて複数の受賞をした研究者が多い。

表 2-3 (a) さがし期間中の受賞 (2011 年 8 月末検索)

採択年度	受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
平成 13 年度(1 期生)	東 正樹	第 26 回粉体粉末冶金協会研究進歩 賞	粉体粉末冶金協会	2002/5
平成 13 年度(1 期生)	孫 洪波	平成 13 年度光科学技術研究振興財 団研究賞	光科学技術研究振 興財団	2002/3
平成 13 年度(1 期生)	竹内 繁樹	第 1 回文部科学大臣表彰、若手科学 者賞	文部科学省	2005/4
平成 13 年度(1 期生)	田中 雅明	第 17 回日本 IBM 科学賞 (エレクト ロニクス分野)	日本 IBM	2003/11

平成 13 年度 (1 期生)	田中 雅明	平成 13 年度丸文研究奨励賞	丸文研究交流財団	2002/3
平成 14 年度 (2 期生)	岡野 俊行	第 1 回文部科学大臣表彰、若手科学者賞	文部科学省	2005/4/20
平成 14 年度 (2 期生)	梶川 浩太郎	平成 16 年度丸文研究奨励賞	丸文研究交流財団	2005/3
平成 14 年度 (2 期生)	梶川 浩太郎	手島記念研究賞発明賞	手島工業教育資金団	2006/2
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	Julius Springer Prize for Applied Physics	Springer 社	2005/10
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	第 1 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2005/3
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	European Time and Frequency Award	French Society of Chronometry and Piezo Electricity	2005/3
平成 14 年度 (2 期生)	上妻 幹男	東工大挑戦の研究賞	東京工大	2005/1
平成 14 年度 (2 期生)	杉山 和彦	平成 15 年度文部科学大臣賞、第 29 回研究功績者賞	文部科学省	2003/4
平成 14 年度 (2 期生)	高橋 雅英	2002 年度 Japan and Australian Ceramics Society, Joint Ceramics Award	日本セラミックス協会	2003/5

平成 14 年度 (2 期生)	高橋 雅英	日本化学会 B C S J 賞	日本化学会	2003/5
平成 14 年度 (2 期生)	橋本 秀樹	第 20 回中谷電子計測技術振興財団研究助成賞	中谷電子計測技術振興財団	2005/11
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	第 65 回日本金属学会功績賞	日本金属学会	2007/3
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	日本金属学会組織写真賞 (1 位)	日本金属学会	2007/3
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	日本金属学会ポスター賞	日本金属学会	2006/9
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	第 46 回科学技術映像祭、内閣総理大臣賞	文部科学省	2005/4
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	Int. Metallographic Contest, 2-nd (2004) in Class in Electron-Microscopy-Transmission and Analytical	The Int. Metallographic Society and ASM Int.	2004/9
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	2004 年ナノ学会 第 2 回講演会若手優秀発表賞	ナノ学会	2004/5
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	日本顕微鏡学会関東支部第 28 回講演会、最優秀ポスター発表賞	日本顕微鏡学会	2004/3
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	2004 年日本金属学会 組織写真賞 (学術部門 1 位)	日本金属学会	2004/3
平成 15 年度 (3 期生)	金原 数	American Chemical Society Arthur K.Doolittle Award	American Chemical Society	2005/3
平成 15 年度 (3 期生)	ファン ハロルド	2005 Materials Research Society Outstanding Young Investigator Award	Materials Research Society	2005/3

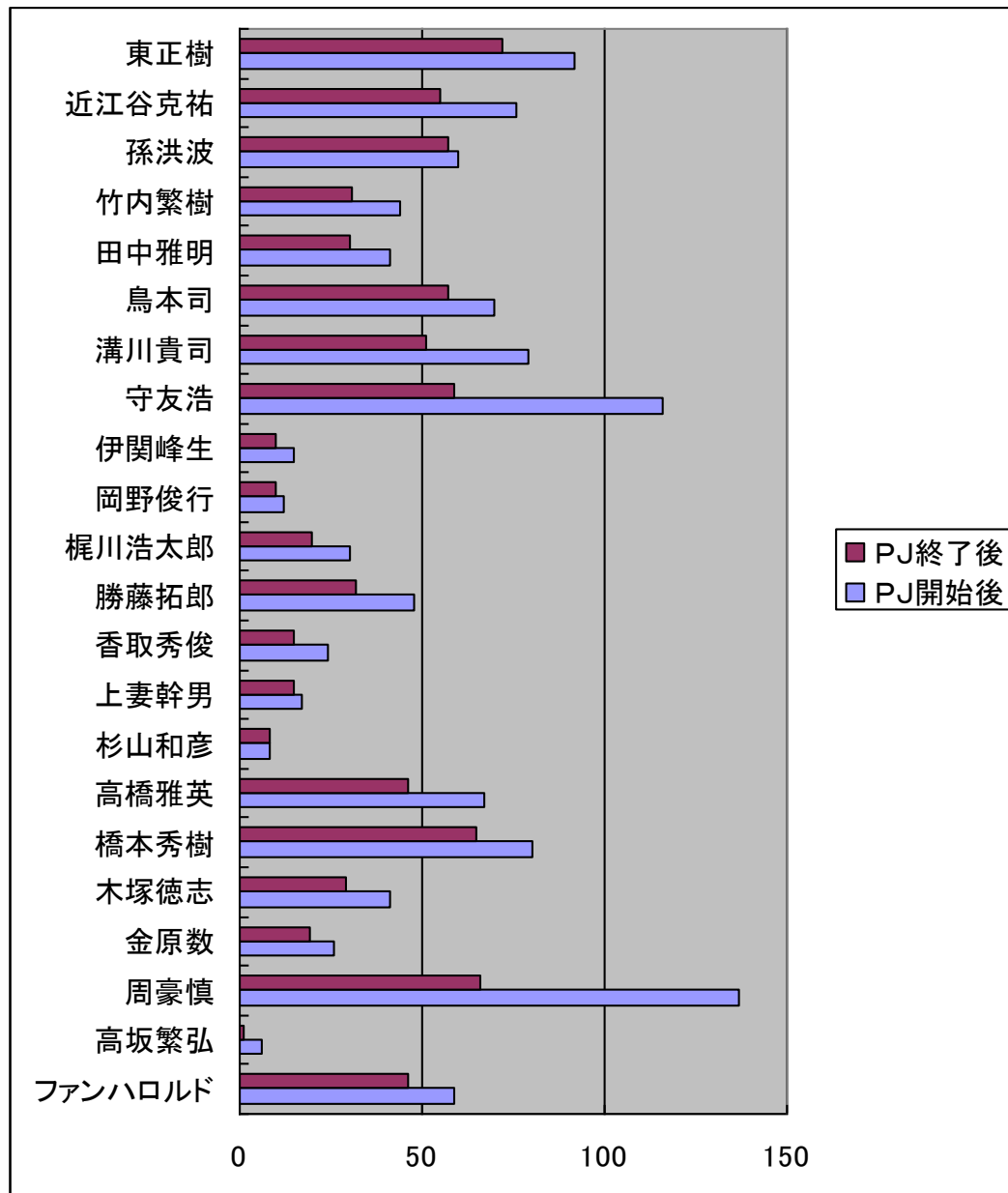
表 2-3 (b) さきがけ終了後の受賞

採択年度	受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
平成 13 年度 (1 期生)	東 正樹	Thomson Scientific Research Front Award 2007	トムソンサイエンティフィック社	2007
平成 13 年度 (1 期生)	東 正樹	第 1 回文部科学大臣表彰、若手科学者賞	文部科学省	2005/4
平成 13 年度 (1 期生)	孫 洪波	第 2 回文部科学大臣表彰、若手科学者賞	文部科学省	2006/4
平成 13 年度 (1 期生)	竹内 繁樹	大和エイドリアン賞	英国王立協会	2010/12/2
平成 13 年度 (1 期生)	竹内 繁樹	第 6 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2010/2/25
平成 13 年度 (1 期生)	竹内 繁樹	第 3 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2007/3
平成 13 年度 (1 期生)	竹内 繁樹	光学論文賞	日本光学会	2006/3
平成 13 年度 (1 期生)	田中 雅明	第 3 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2007/3
平成 13 年度 (1 期生)	田中 雅明	文部科学大臣表彰 科学技術賞 (研究部門)	文部科学省	2012/4/14
平成 13 年度 (1 期生)	溝川 貴司	久保亮五記念賞	井上科学振興財団	2009
平成 13 年度 (1 期生)	守友 浩	井 上 フェロー	井上科学振興財団	2007
平成 13 年度 (1 期生)	守友 浩	第 38 回市村学術賞貢献賞	新技術開発事業団	2006/4
平成 14 年度 (2 期生)	梶 川 浩 太 郎	APEX/JJAP 編集貢献賞	応用物理学会	2010
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	第 20 回日本 I B M 科学賞 (物理分野)	日本 I B M	2006/11
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	日本物理学会注目論文集	日本物理学会	2006/10
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	平成 18 年度丸文学術特別賞	丸文研究交流財団	2006/9
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	フィリップ・フランツ・フォン・ジーボルト賞	アレクサンダー・フォン・フンボルト財団	2011/6/28
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	平成 23 年度レーザー学会賞業績賞 (論文賞) 解説部門	レーザー学会	2011/5/11
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	ラビ賞	The I. I. Rabi Award	2008/4/9
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	第 42 回市村学術賞 特別賞	(財)新技術財団	2009
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	第 12 回光・量子エレクトロニクス業績賞 (宅間宏賞)	応用物理学会	2010

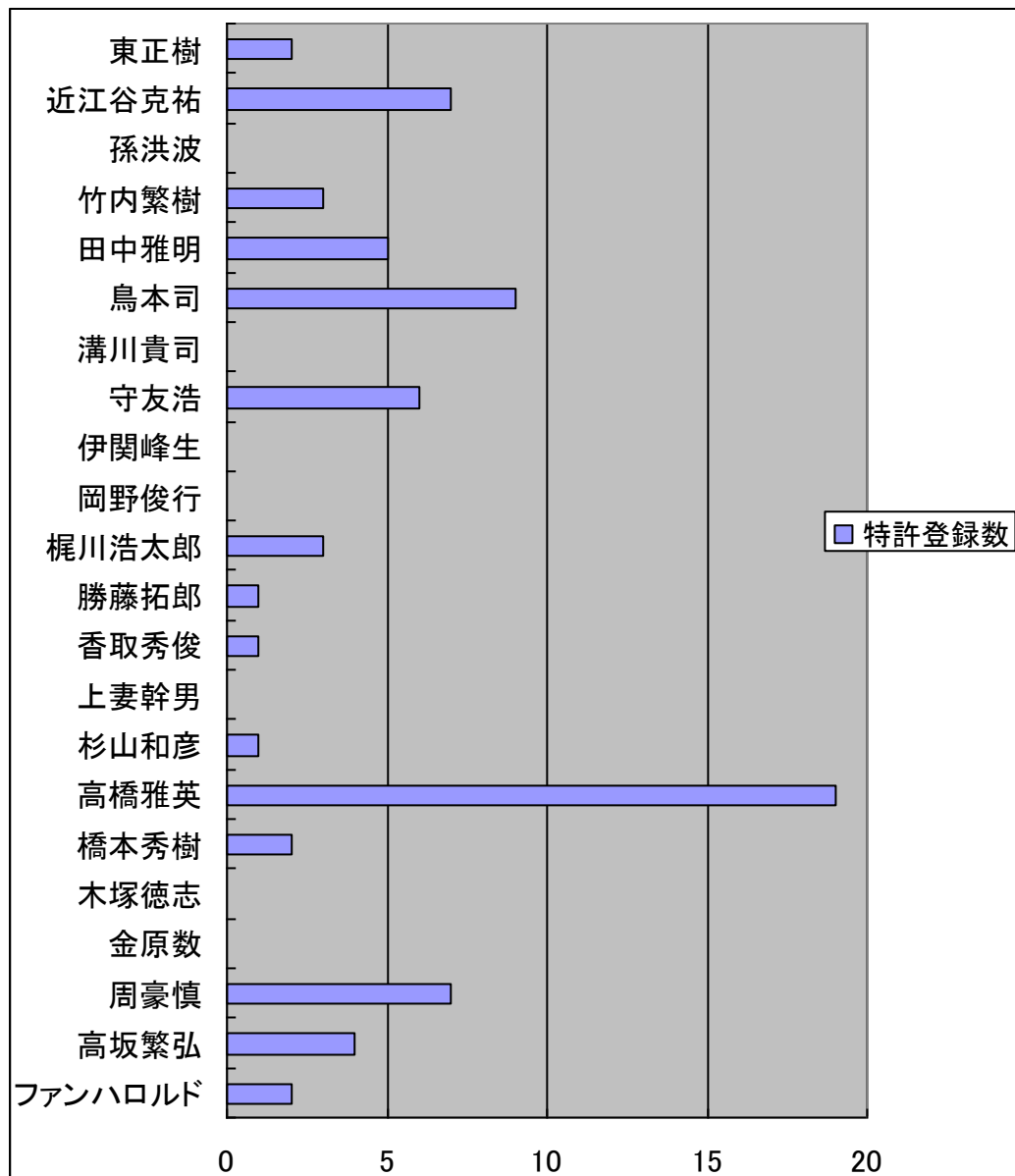
平成 14 年度 (2 期生)	香取 秀俊	朝日賞	朝日新聞文化財団	2012/1/1
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	Excellent Poster Award	3rd International Symposium on Atomic Technology, Quantum and Molecular Engineering for Advanced Technologies	2009
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	平成 20 年度日本機械学会部門表彰 (優秀講演論文部門)	日本機械学会	2008
平成 15 年度 (3 期生)	木塚 徳志	Int. Metallographic Contest, 3-rd	Class in Electron Microscopy-Transmission and Analytical	2007
平成 15 年度 (3 期生)	金原 数	文部科学大臣表彰 科学技術賞 (若手科学者賞)	文部科学省	2007
平成 15 年度 (3 期生)	金原 数	生化学・有機化学	長瀬科学技術振興財団	2008
平成 15 年度 (3 期生)	ファン ハ ロルド	第 22 回日本 IBM 科学賞	日本 I B M	2008

以下に、原著論文の発表件数、特許件数および受賞件数のグラフを示す。

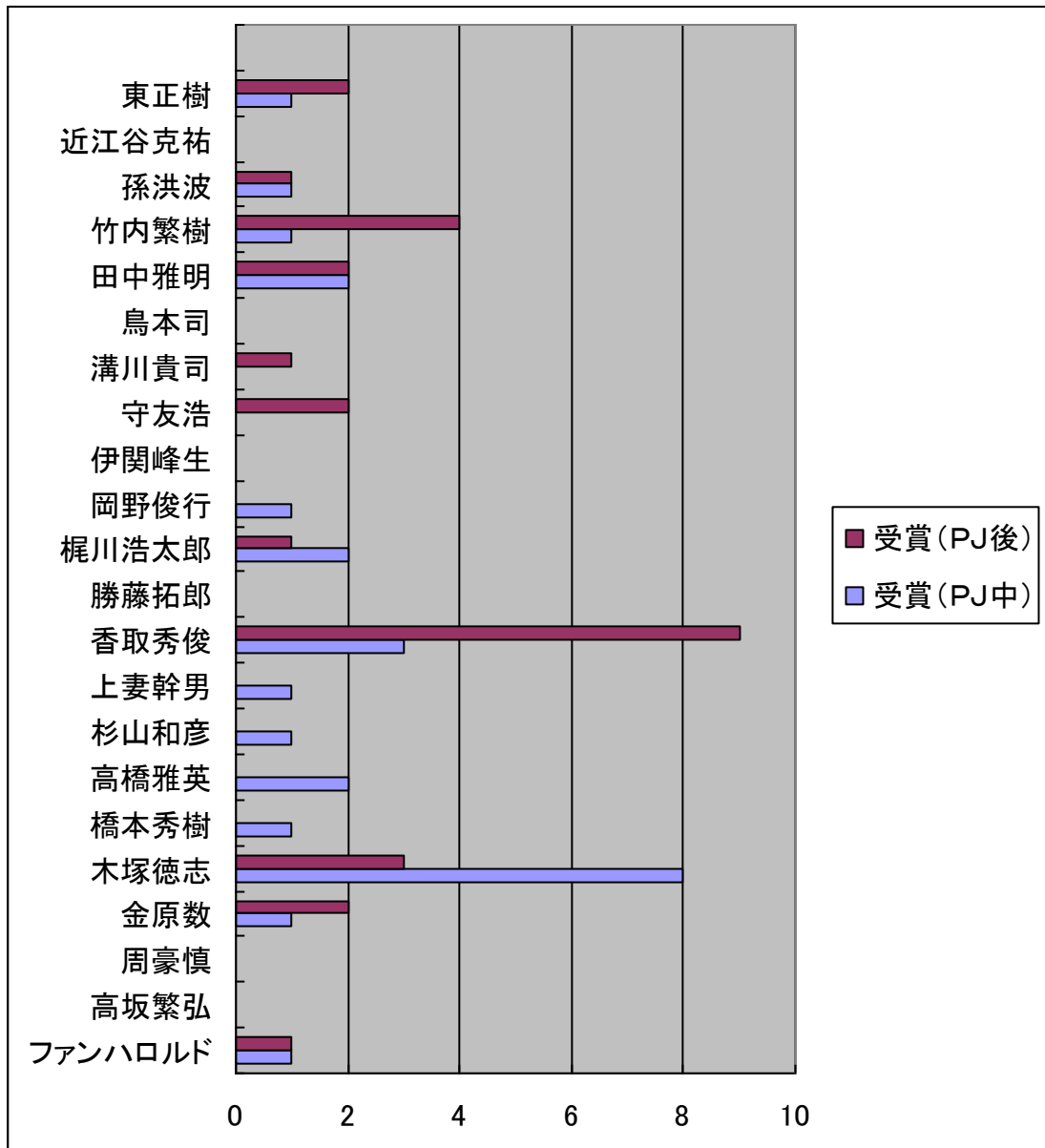
論文（件数）



特 許 （登録件数）



受賞（件数）



2.1.5 研究者の研究助成金獲得状況

さきがけ研究期間から現在までに研究者が獲得した研究助成金（500 万円をこえるもの）の状況を添付資料 D にまとめた。500 万円未満のものについては割愛した。

科研費を中心として研究助成金獲得総額が 5000 万円を超える研究者は 22 名中 14 名と半数を超える。その中で、1 億円を超える研究者は 11 名（以下一部推定を含む）、2 億円を超える研究者は 7 名（一期の東、竹内、田中、鳥本、守友、二期の上妻、高橋）に達することは特筆される。分野により、必要な研究費は異なる。総じて、バイオ系の研究者は比較的金額は小さく、材料やデバイス、量子情報処理などの研究者は大きな研究費を獲得している。研究費の額は社会からの期待度の大きさの直接的な表現であるとするれば、助成金獲得状況からも、本領域の研究者の研究がその後も順調に研究を進展させているといえる。

2010 年度に始まった JSPS の最先端・次世代研究開発支援プログラムには、東、鳥本、上妻が選ばれた。同じく最先端研究開発支援プログラムには、強相関量子科学プロジェクト（中心研究者：十倉好紀）のチームリーダーに三期のファンが、また量子情報処理プロジェクト（中心研究者：山本善久）のチームメンバーに竹内が選ばれた。これらのプログラムは科学技術立国としての日本を維持する意志として設定されたものであることから本プロジェクト出身者が選ばれたことの意義は大きい。JST 関係のプログラムでは、CREST を竹内、香取、橋本が獲得した。香取はさらに ERATO も獲得した。本さきがけの後、二期の岡野、勝藤、三期のファンは二番目のさきがけを獲得した。また、一期の近江谷、田中および三期の周は NEDO の開発を担当した。研究者が企業研究者と組んで基礎研究から応用・実用への橋渡しを担う意義は大きい。

表 2-4 研究者の研究助成金獲得状況 (2011 年 8 月末検索 DB:科研費 DB 等)

【1 期生】

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
東正樹			1期生				さがけ期間後						
	内閣府 最先端・次世代研究開発支援プログラム (グリーン・イノベーション)	ビスマスの特性を活かした環境調和機能性酸化物の開発											
	科研費 基盤研究(A)	ビスマスの特性を活かした機能性材料の開発											
	科研費 特定領域研究	電荷秩序・電荷不均化系における異常磁気伝導											
	科研費 基盤研究(B)	s電子を利用した特異な磁性・電気伝導・誘電現象の探索											
	科研費 基盤研究(B)	オキシクロライド高温超伝導体の高圧下单結晶育成と電子物性											
	JSPS 最先端 次世代研究開発支援プログラム	ビスマスの特性を活かした環境調和機能性酸化物の開発											
	旭硝子財団研究助成 特定研究助成B	元素配列を制御したビスマス、鉛-3d遷移金属ダブルペロブスカイトにおける強磁性・強誘電材料の開発											
近江谷克裕			1期生				さがけ期間後						
	科研費 基盤研究(B)	新規発光・蛍光技術ソースの探索を目指した発光生物調査											
	科研費 基盤研究(B)	新規発光プローブの探索を目指した発光生物調査											
	科研費 基盤研究(B)	ホタルのルーツを求めた中国雲南省の発光甲虫生態調査											
	科研費 特定領域研究(A)	発光甲虫における短寿命励起基質分子・酵素相関に基づく発光色決定分子機構の解明											
	JST 平成18年度シーズ発掘試験(大阪)	発光分子プローブの量子収率測定装置の開発											
	JST 平成20年度シーズ発掘試験(北海道)	発光測定の信頼度確立を目指した標準発光ビーズの開発											
孫洪波			1期生				さがけ期間後						
	科研費 基盤研究(B)	ポリマーナノデバイスの作製・機能解明と開拓											
竹内繁樹			1期生				さがけ期間後						
	科研費 基盤研究(A)	ダイヤモンド結晶欠陥を λ 型原子として利用した、単一光子の高効率量子メモリの実現											
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	光子量子回路による量子サイバネティクスの実現											
	科研費 基盤研究(A)	群速度エンジニアリングによる、時空間単一モード光子源の実現と応用											
	科研費 若手研究(A)	中空フォトニック結晶ファイバを用いた、光子の量子位相ゲートに関する研究											
	科研費 基盤研究(B)	量子情報通信用の単一光子源の開発											
	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生「先端技術を酷使した光科学・光技術の融合展開」											
田中雅明			1期生				さがけ期間後						
	科研費 特別推進研究	不揮発性および再構成可能な機能をもつ半導体材料とデバイスの研究開発											
	科研費 基盤研究(A)	磁性体/半導体ハイブリッドナノ構造におけるスピン関連現象とデバイス応用											
	科研費 特別領域研究	スピン偏極電流制御デバイス											
	科研費 特別領域研究	スピン流と機能・制御調整班											
	科研費 基盤研究(S)	リコンフィギャラブル・ナノスピndeバイス											
	科研費 特別領域研究	電子スピントロニクスデバイス研究調整班											
	科研費 特別領域研究	半導体スピントロニクス・ヘテロ構造電子デバイスの研究											
	科研費 基盤研究(A)	半導体をベースとした磁気光学結晶とその応用											
	科研費 基盤研究(A)	II-V族ベース強磁性半導体によるバンドエンジニアリングと磁気光学デバイスへの応用											
	科研費 基盤研究(B)	磁性体/半導体ハイブリッド系材料のエピタキシャル成長とその応用											
	JST SORST	半導体をベースとしたスピン機能材料の開発とスピンエレクトロニクスへの展開											
	NEDO ナノテクノロジープログラム・革新的部材産業創出プログラム ／ナノテク・先端部材実用化研究開発	高スピン偏極率材料を用いたスピンMOSFETの研究開発											

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
島本司			1期生			さきがけ期間後							
	内閣府 最先端・次世代研究開発支援プログラム (グリーン・イノベーション)	光による半導体ナノ粒子の異方性形状制御とエネルギー変換材料への応用											
	科研費 基盤研究(A)	光による半導体粒子の形状異方性制御とエネルギー変換材料への応用											
	科研費 特定領域研究	ジングルベル型微粒子のナノ構造制御による新奇光反応場の創成											
	科研費 特定領域研究	光化学反応を利用する単分散半導体ナノ粒子の合成とその集積化											
	科研費 基盤研究(B)	発光波長を自在に制御できる半導体ナノ粒子集積体の開発											
	JST シーズ発掘試験(愛知)	低毒性半導体ナノ粒子を用いる増感太陽電池の開発											
	JST シーズ発掘試験(愛知)	生体分子マーカーへの利用を目指した新規低毒性量子ドットの開発											
	JSPS 最先端 次世代研究開発支援プログラム	光による半導体ナノ粒子の異方性形状制御とエネルギー変換材料への応用											
満川貴司			1期生			さきがけ期間後							
	科研費 基盤研究(B)	強相関物質表面での光誘起相転移の光電子分光											
	科研費 若手研究(A)	紫外線・真空紫外線を用いた光電子・逆光電子分光法による強相関物質の電子状態											
	科研費 特定領域研究	X線吸収分光・光電子分光による遷移金属酸化物の軌道状態の研究											
	科研費 基盤研究(B)	高エネルギー分解能逆光電子分光装置の開発											
守友浩			1期生			さきがけ期間後							
	科研費 特定領域研究	光励起によるナノポーラスシアノ錯体の物質移動と物性制御											
	科研費 基盤研究(A)	シアノ架橋金属錯体界面を通じた物質移動と電圧誘起機能											
	科研費 特定領域研究	ホスト・ゲスト相互作用を利用したCo-Fe系シアノ錯体膜の物性制御											
	科研費 基礎研究(S)	放射光粉末構造解析による光励起状態の構造決定											
	科研費 特定領域研究	マンガニ酸化物の電荷整列相に及ぼすBサイト置換効果											
	JST 研究振興支援業務室	フェムト秒時間分解顕微鏡の構築とMEM電子分布解析の高度化(X線自由電子レーザー利用推進研究課題)											
	JST A-STEP「FSステージ探索タイプ」(装置・デバイス分野)	カラー電池素子の開発											

科研費	特別推進		
	特定領域		
	新学術領域		
	基盤(S)	基盤(A)	基盤(B)
	若手(S)	若手(A)	若手(B)
JST			
その他	NEDO、厚労省など国の競争的資金制度に採択されたもの		

	科研費
	JST
	NEDO
	その他

【2期生】

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
岡野俊行				2期生				さががけ期間後					
	科研費 特定領域研究	時刻情報の生成・制御を支える転写因子群の発現プログラム											
	科研費 若手研究(A)	遺伝子導入動物から迫る概日時計の新規構成分子											
	科研費 特定領域研究	時刻情報の生成・制御を支える転写因子群の発現プログラム											
	科研費 特定領域研究	時刻情報の生成・制御を支える転写因子群の発現プログラム											
	奨励研究(A)→若手研究(B)	鳥類および哺乳類における概日時計の自己発振と光同調の分子メカニズム											
梶川浩太郎				2期生				さががけ期間後					
	科研費 基盤研究(B)	単一金属ナノ微粒子の非線形プラズモニクス											
	科研費 基盤研究(C)	表面プラズモンを使った全光型スイッチング素子・双安定素子の作製											
	科研費 基盤研究(C)	表面プラズモン増強ポッケルス効果を利用した近接場光学顕微鏡の作製と分極構造の観察											
	科研費 特定領域研究	ナノ領域に局在するローカルプラズモンを利用した高密度バイオチップの作製											
	JST 平成19年度シーズ発掘試験(神奈川県)	高輝度LEDを使った局在プラズモンバイオセンシングチップ											
	JST A-STEP「FSステージ探索タイプ」 (装置・デバイス分野)	表面プラズモンを使った光双安定型液晶空間光変調素子											
勝藤拓郎				2期生				さががけ期間後					
	科研費 特定領域研究	軌道自由度付フラストレーション系における三量体の物理											
	科研費 基盤研究(B)	強相関電子系における多自由度の競合とマルチクリティカルティ											
	科研費 特定領域研究	TiV酸化物における軌道自由度付フラストレーション系の物質開発と物性											
	科研費 基盤研究(B)	遷移金属酸化物の新奇な軌道状態とドメイン構造およびその外場制御											
	科研費 若手研究(A)	酸化物におけるパルス電場誘起の不揮発かつ可逆的な物性変化											
香取秀俊				2期生				さががけ期間後					
	科研費 若手研究(A)	光格子時計を用いる超高精度ストロンチウム原子光周波数標準の研究											
	科研費 基盤研究(B)	極低温高輝度原子線の開発と原子波干渉計への応用											
	JST CREST	量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出 「極限温原子を用いる量子計測法の開拓」											
	JST ERATO	香取創造時空間プロジェクト											
上妻幹男				2期生				さががけ期間後					
	内閣府 最先端・次世代研究開発支援プログラム (グリーン・イノベーション)	ホログラフィックに制御された光ポテンシャルによる大規模2次元量子計算機の実現											
	科研費 基盤研究(B)	単一原子分解能をもつ位相差顕微鏡で探る冷却原子マクロ量子系のダイナミクス											
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現											
	科研費 基盤研究(B)	ボース凝縮体の衝突相互作用を利用した猫状態の生成と量子情報的手法による状態評価											
	科研費 基盤研究(B)	光-冷却原子集団間における多次元エンタングルメントの制御											
	科研費 若手研究(A)	スーパー磁気光学トラップの生成とそれを利用した量子情報処理に関する研究											
	JSPS 最先端 次世代研究開発支援プログラム	ホログラフィックに制御された光ポテンシャルによる大規模2次元量子計算機の実現											
杉山和彦				2期生				さががけ期間後					
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	単一イオン光時計による基礎物理定数の時間変化の探索											
高橋雅英				2期生				さががけ期間後					
	科研費 基盤研究(B)	有機修飾された酸化物交互共重合体を用いた増幅光応答の実現											
	科研費 特定領域研究	光機能的中心高含有ハイブリッド材料における増強光機能的性											
	科研費 若手研究(A)	NMRを用いたガラス化と最安定局所構造解析											
	科研費 基盤研究(B)	フォトリフラクティブ特性を有する有機分子含有低融点ガラス材料の開発											

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
橋本秀樹				2期生				さがけ期間後					
	科研費 基盤研究(A)	人工光合成色素蛋白複合体超分子配列の機能統御											
	科研費 基盤研究(B)	人工光合成色素蛋白超分子複合体の動作機構の解明											
	JST A-STEP「FSステージ シーズ顕在化」 (アグリ・バイオ分野)	オキナワモズクFCP (Fucoxanthin-Chlorophyll a/c Protein) の解明とフコキサンチン生産技術への応用											
	JST CREST	新機能創成に向けた光・光量子科学技術 「光合成初期反応のナノ空間光機能制御(新機能創生に向けた光・光量子科学技術)」											

科研費	特別推進		
	特定領域		
	新学術領域		
	基盤(S)	基盤(A)	基盤(B)
	若手(S)	若手(A)	若手(B)
JST			
その他	NEDO、厚労省など国の競争的資金制度に採択されたもの		

	科研費
	JST
	NEDO
	その他

【3 期生】

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
木塚徳志				3期生			さががけ期間後						
	科研費 基盤研究(B)	原子直視法による単一分子デバイスの開発											
	科研費 基盤研究(B)	原子ダイナミクス直接観察と対応させた単一ナノ結晶の個別分光											
	科研費 基盤研究(B)	表面構造ダイナミクスその場原子直視観察のための複合機能型電子顕微鏡法											
	科研費 特定領域研究	常温接合による銅ナノメートル配線の形成と電気伝導特性の原子直視その場解析											
金原数				3期生			さががけ期間後						
	科研費 基盤研究(B)	物質変換機能を制御する分子ツールの開発											
	科研費 若手研究(S)	化学機能を制御する超分子ツールの創製											
	科研費 特定領域研究	フォトクロミック錯体の創製と機能化											
	科研費 基盤研究(B)	超分子機械の創製と機能化											
	科研費 基盤研究(C)	分子シャペロンを利用したダイナミック機能材料の創製											
	科研費 基盤研究(C)	分子シャペロンを利用した次世代ナノデバイスの創製											
周豪慎				3期生			さががけ期間後						
	NEDO 次世代自動車用高性能蓄電 システム技術開発 次世代技術開発	ナノ界面制御による高容量電極の研究開発											
ファン ハロルド				3期生			さががけ期間後						
	科研費 特定領域研究	酸化物超構造形成による非自明なスピン構造の創製と異常磁気伝導											
	科研費 基盤研究(B)	酸化物ヘテロ界面におけるラシュバ効果の解明											
	科研費 基盤研究(B)	チタン酸ストロンチウムにおける高移動度二次元電子ガスの創成と新奇な量子相の探索											

科研費	特別推進		
	特定領域		
	新学術領域		
	基盤(S)	基盤(A)	基盤(B)
	若手(S)	若手(A)	若手(B)
JST			
その他	NEDO、厚労省など国の競争的資金制度に採択されたもの		

科研費

JST

NEDO

その他

2.2 参加研究者の研究成果の発展状況

2.2.1 第1期生（8名）

(1) 東 正樹（課題名：強相関遷移金属酸化物における光機能の探索）

(a) さきがけ期間中の主な成果

さまざまな機能性の宝庫である遷移金属酸化物において、二つの機能の相関によって生まれる新規機能に注目が集まっている。本研究では、高圧合成法やマイクロエマルジョン法による微粒子合成など化学的手法を駆使して、磁性と光機能を併せ持つ遷移金属酸化物機能材料の開発を目指した。

① Bi/Pb-3d 遷移金属ペロブスカイト結晶 (BiMO_3 , PbMO_3 , M : 遷移金属元素) では、強誘電性や 2 次の非線形光学効果と 3d 遷移金属の持つ磁性が共存すると期待されるが、数 GPa の高圧合成が壁となってこれまで研究の進展がなかった。そこで、高圧合成の可能なこの系のすべての化合物の試料を作製し、結晶構造と磁性・誘電性の関連を明らかにした。その中で、 BiCrO_3 は単斜晶構造をもち、反強磁性強誘電体であることを見出した。 BiCoO_3 、 PbVO_3 は共に正方晶の PbTiO_3 型構造で、大きな自発分極が期待できる。また、 BiNiO_3 は $\text{Bi}^{3+}_{0.5}\text{Bi}^{5+}_{0.5}\text{Ni}^{2+}\text{O}_3$ という特異な価数状態を持つ反強磁性絶縁体・常誘電体であった。

② 3d- e_g 電子を持つ磁性イオンとこれを持たない磁性イオンとを、酸素を介して配置すると、両者の間には強磁性的な相関が働くことを設計指針として、 $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$ の合成を行った。その狙い通り、 BiMnO_3 などと同じ単斜晶の単位格子の中で $\text{Ni}^{2+} (t_{2g}^3 e_g^2)$ と $\text{Mn}^{4+} (t_{2g}^3)$ が岩塩型に配列する、強磁性（転移温度 140K）強誘電性（転移温度 490K）化合物を得た。粉末焼結体の他、単結晶薄膜の育成にも成功した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究開始時は京都大学化学研究所の助手、終了時には同所の助教授、さらに 2010 年には東京工業大学応用セラミックス研究所の教授に昇任した。さきがけ研究の終了後、科研費基盤研究(A),(B)および特定領域研究、そして元素戦略プロジェクトの助成を受け研究を進展させた。また、2011 年から 4 年間の JSPS の最先端・次世代研究開発支援プログラムの研究も始めた。 Bi/Pb-3d 遷移金属ダブルペロブスカイト強磁性・強誘電材料については旭硝子財団からの助成を受けた。また、企業との共同研究も行った。

科研費による研究の中で、ペロブスカイト BiFeO_3 とさきがけ研究で発見した BiCoO_3 の固溶体を作製し、圧電特性の増大など特異な現象を見出した。また、同じくさきがけ研究で発見した BiNiO_3 の Bi を一部 La イオンで置換した $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ において、昇温によって Bi^{5+} と Ni^{2+} の間で電荷移動を生じ、体積が収縮する「負の熱膨張」が起こることを発見した。

現在、高圧合成法、単結晶基板上の薄膜形成や水熱合成法などを駆使して、強磁性と強誘電性が共存する材料をはじめ新規機能性酸化物を開拓している。特に、最先端・次世代研究開発支援プログラムの中では、 $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ に換わる非鉛圧電材料として $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ をベースにした高性能化と、既存材料の 3 倍の負の熱膨張係数を持つ $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ を用いたゼロ熱膨張材料の開発に取り組んでいる。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 92 報、プロジェクト終了後では 72 報であった。下記に主要論文（被引用件数の多い上位 3 報）を示す。①と②の被引用数は 350 以上である。特許は 2 件成立した。受賞は、期間中の一件の他、終了後には Thomson Scientific Research Front Award を含む 2 件がある。

(c) 主要論文¹

- ① Kimura T., Kawamoto S., Yamada I., Azuma M., Takano M., Tokura Y.,
Magnetocapacitance effect in multiferroic BiMnO_3 , *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 67 (18), 1804011-1804014, (2003)
- ② Hanaguri T., Lupien C., Kohsaka Y., Lee D.-H., Azuma M., Takano M., Takagi H.,
Davis J.C., A 'checkerboard' electronic crystal state in lightly hole-doped
 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$, *Nature*, 430 (7003), 1001-1005, 2004
- ③ Kohsaka Y., Taylor C., Fujita K., Schmidt A., Lupien C., Hanaguri T., Azuma M.,
Takano M., Eisaki H., Takagi H., Uchida S., Davis J.C., An intrinsic bond-centered
electronic glass with unidirectional domains in underdoped cuprates, *Science*, 315
(5817), 1380-1385, 2007

(2) 近江谷 克裕（課題名：光制御可能な細胞発光素子）

(a) さきがけ期間中の主な成果

発光性渦鞭毛藻は光の存在下では光合成を行い、光の非存在下では生物発光を行う。そのシステムの切り替えの鍵となる、光の On/Off によって細胞機能を調節する「生体光スイッチングシステム」の機構を解明し、生体光スイッチのコンポーネント化と、光制御可能な細胞発光素子を構成する基盤技術の構築を目指した。

- ① 発光性渦鞭毛藻の一種 *Lingulodinium polyedra*(Lp)について、ルシフェリンの生合成の初期に現れるクロロフィル、ルシフェリンと発光能の相関を調べ、ルシフェリンは夜間に急激に増加し、それに伴って発光量が増加することを見出した。さらにアミノ酸を ^{15}N でラベル化する手法によって、ルシフェリンがクロロフィル代謝物であることを見出した。
- ② Lp の光 On/Off に連動して発現が変動するタンパク群の解析を行った。その結果、24

¹ 基本的にはさきがけ採択以降～現在までの論文を SCOPUS を用い、名寄せ、所属等で検索を行い作成した論文リストの中から、基本的には被引用件数の多い方から、さきがけとの関連性を確認し、抽出した。

時間周期で変動するタンパク群を 35 種単離するとともに、その変動パターンが 3 種に分類できることを明らかにした。生物の最も基本的な代謝系の一つである TCA 回路が 2 つの異なるリズムで制御され、その制御には光 On/Off が関わる可能性が高いことを指摘した。

③ Lp のルシフェリン生合成系に関与する遺伝子群を求めて、光 Off 後に発現した mRNA だけを解析する方法、EST(Expressed Sequence Tag)解析を行った。全発現遺伝子のおおよそ 40%に相当する 2111 個の独立クローンの存在をライブラリとして国立遺伝学研究所 DDBJ データベースに登録した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は産業技術総合研究所のグループリーダーであった。現在は同所生物プロセス研究部門生体機能可視化研究特別チームのチーム長として、「生物学・化学・物理学を融合させた生物発光の基盤研究」のための世界的な研究拠点をめざす。2006 年より北海道大学医学研究科連携センターの教授も務め、医学分野における分子イメージングの研究を行っている。

さきがけ研究終了後は、3 つの科研費基盤研究(B)をつないで研究を進展させた。また、2006 年と 2008 年の JST のシーズ発掘試験に採択され、「発光分子プローブの量子収率測定装置」と「発光測定の信頼度確立を目指した標準発光ビーズ」の開発を行った。

2002~2007 年の NEDO プロジェクト「細胞内ネットワークのダイナミズム解析技術開発」において、自ら発見した発光色の異なる 3 種のホタル・ルシフェラーゼを応用して、細胞内の複数の遺伝子発現を同時に定量的に評価するツールとして、マルチ遺伝子発現検出キットを開発・製品化した。2 社の商品となって、化学物質の毒性評価や薬効評価に使われている。さらに、2006~2010 年の NEDO プロジェクト「高機能簡易型有害性評価手法の開発」において、毒性評価マルチカラーレポーター細胞を構築し技術の普及を目指した。

北海道大学と共同で医療応用研究を行った。ウミホタルのルシフェラーゼに発光色素を導入し癌抗体を組み合わせ、生体内の化学反応によって近赤外線を発光するプローブとした。これを用いて癌の位置が正確に検出できることを確認した(2009 年)。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 76 報、プロジェクト終了後では 55 報であった。また、特許は 7 件が成立した。

(c) 主要論文

① Viviani V.R., Uchida A., Viviani W., Ohmiya Y., The influence of Ala243 (Gly247), Arg215 and Thr226 (Asn230) on the bioluminescence spectra and pH-sensitivity of railroad worm, click beetle and firefly luciferases, *Photochemistry and Photobiology*, 76 (5), 538-544, 2002

② Nakajima, Y., Ikeda, M., Kimura, T., Honma, S., Ohmiya, Y., Honma, K.-I. Bidirectional role of orphan nuclear receptor ROR α in clock gene transcriptions

demonstrated by a novel reporter assay system, *FEBS Letters*, 565 (1-3), 122-126. 2004

③ Ando Y., Niwa K., Yamada N., Enomoto T., Irie T., Kubota H., Ohmiya Y., Akiyama H., Firefly bioluminescence quantum yield and colour change by pH-sensitive green emission, *Nature Photonics*, 2 (1), 44-47, 2008

(3) 孫 洪波 (課題名：2光子有機高分子化に伴うフォトニック結晶の作製とその応用)

(a) さきがけ期間中の主な成果

2光子吸収光重合加工法は、光硬化性樹脂中にフェムト秒レーザー光を回折限界で収束させた集光スポットを3次元的に走査した後、未反応の液体樹脂を洗い落として固体3次元構造を得る方法である。本研究では、2光子吸収光重合法の基本的特性を明らかにし、新規機能性を備えた光硬化性樹脂を開発するとともに、フォトニック結晶への応用を目指した。

① 加工分解能の限界を追求した結果、約50nmの分解能を達成した。

② 光硬化性樹脂に金属イオンを添加することによって、金属ナノ粒子を内包する3次元構造の作製が可能になった。また、有機チタン化合物を添加すると、3次元構造作製後の熱処理によって、ポリマー内部に酸化チタンのナノ粒子を均一分散させることができ、ポリマーフォトニック結晶の屈折率向上という最大の課題に解決の糸口が付いた。

③ フォトニックバンドギャップ特性には、ダイヤモンド型結晶構造が理想的とされるが、作製が難しく成功例がなかった。2光子吸収光重合加工法を用いて初めてその加工に成功し光学特性の評価を行った。

④ 集光スポットを3次元走査するかわりに、多光束のコヒーレントなレーザー光によって光硬化性樹脂中に干渉パターンを形成し、その光強度分布に従って瞬時に3次元の周期構造を作製する多光束干渉パターンニング法を提案した。4光束の干渉パターンによってログパイル格子およびヤブロンノバイト格子の作製に成功した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究に採択時は大阪大学のリサーチアソシエート、期間中に同大学の助手になった。2006年に中国・吉林大学の Center for Ultrafast Optoelectronic Technologies の教授に就任した。

さきがけ研究終了後、2005年からの科研費基盤研究(B)を獲得した。この中で、数100nm径のマイクロバネを作製し物性のサイズ依存性を調べた。バルク材に比べ弾性は100倍以上大きくなり、相転移温度もサイズに依存して低下することを見出した。また、アゾベンゼンを含むモノマーを用いるとポリマーの屈折率と体積が光照射で変化することを見出し、フォトニックバンドギャップの光制御に応用できることを示した。

吉林大学では、2光子吸収光重合加工法による光集積デバイスやMEMS用のマイクロ光学・機械部品製作の研究を発展させる一方、ナノ物質科学研究の分野を広げている。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで60報、プロジェクト終了後では

57 報であった。受賞は第 2 回文部科学大臣表彰、若手科学者賞を含む 2 件である。

(c) 主要論文

- ① Tanaka, T., Sun, H.-B., Kawata, S., Rapid sub-diffraction-limit laser micro/ nano-processing in a threshold material system, *Applied Physics Letters*, 80 (2), 312-314, 2002
- ② Sun, H.-B., Tanaka, T., Kawata, S. Three-dimensional focal spots related to two-photon excitation, *Applied Physics Letters*, 80 (20), 3673-3675, 2002
- ③ Wu, D., Chen, Q.-D., Niu, L.-G., Wang, J.-N., Wang, J., Wang, R., Xia, H., Sun, H.-B., Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices, *Lab on a Chip - Miniaturisation for Chemistry and Biology*, 9 (16), 2391-2394, 2009

(4) 竹内 繁樹（課題名：光子数状態の生成と制御－光子数マニピュレーション実現に向けて－）

(a) さきがけ期間中の主な成果

量子情報処理には、「量子状態」を運び保持し、自在に制御できる担体が必要である。光子は、制御性がよく単一光子の検出と長距離伝送が可能という有利な特徴をもつが、パルス内に光子が一つだけ存在する「単一光子状態」を高い確率で生成する必要がある。本研究では、単一光子源の開発と光子数状態の量子制御に関する理論に取り組んだ。

- ① 単一光子状態生成のための第一の方法として、非線形光学結晶が生成するパラメトリック蛍光光子対の一方の光子を検出し、その信号に基づいてもう一方の光子の射出を制御することで、光子を 2 つ以上含むパルスの発生を排除した。この結果、パルス内部に光子が 1 個存在する確率 $P(1)$ が $55 \pm 5\%$ となった。繰り返し 50kHz では $P(1)$ は 39% であった。従来の $P(1)$ の最高値は 8% 程度であり、上記の結果は 4 倍以上高い。
- ② コアシェル型 CdSe/ZnS 量子ドットに着目し、室温で動作する単一光子源の実現を目指した。その結果、単一 CdSe ドットからの発光による光子のアンチバンチングを反映し、同一時刻に 2 個の光子を観測する確率を 0.16 まで縮小した結果を得た。
- ③ 光子が数個レベルの微弱な光入力に対しても、その光強度に応じて位相をシフトまたは反転できる「片側キャビティと、共鳴条件を用いた自己位相変調素子」を提案し、その半古典的ならびに全量子力学的な解析に成功した。また、偏光基底の組の間の相関を見る方法により「2 光子状態間もつれ合い状態」と「2 つの独立なもつれあい光子対」を見分ける方法を提案し、「2 光子状態間もつれ合い状態」の生成を初めて検証した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究中は北海道大学電子科学研究所の助教授であったが、2007 年に同研究所の

教授に昇任した。現在は大阪大学産業科学研究所の教授を兼務している。

さきがけ研究終了後、3つの科研費基盤研究(A)と新学術領域研究(研究領域提案型)によって光子に関わる多様な研究を行った。2009年度のJST-CREST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」において、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生」が採択され、実施中である。また、2009年度より始まった最先端研究開発支援プロジェクトの量子情報処理プロジェクト(中心研究者:山本善久)の量子計測サブグループのメンバーとしても活躍している。

CREST 研究では、「部分偏光ビームスプリッター」を開発し、従来よりもコンパクトかつ安定な制御ノット量子ゲートを線形光学素子のみで構成することに成功した。光子が4個互いにもつれ合う状態の作製に成功し、独自の光干渉装置と併せて古典理論の限界を超える感度での光位相測定を実現した。また、2個以上の光子が同時に発生する確率を 10^{-4} 以下に抑えた単一光子源と、これを組み込んだ量子暗号発生器を開発し、世界最長の80km量子暗号通信の原理実証実験に成功した(三菱電機との共同研究)。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで44報、プロジェクト終了後では31報であった。下記主要論文で被引用件数の多いことが特筆される。特許は3件が成立した。受賞は第1回文部科学大臣表彰、および英国王立協会から大和エイドリアン賞を含む5件である。

(c) 主要論文

- ① Hofmann, H.F., Takeuchi, S., Quantum phase gate for photonic qubits using only beam splitters and postselection, *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 66 (2), 024308/1-024308/3, 2002
- ② Hofmann, H.F., Takeuchi, S., Violation of local uncertainty relations as a signature of entanglement, *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 68 (3), 032103/1-032103/6, 2003
- ③ Nagata, T., Okamoto, R., O'Brien, J.L., Sasaki, K., Takeuchi, S., Beating the standard quantum limit with four-entangled photons, *Science*, 316 (5825), 726-729, 2007

(5)田中 雅明（課題名：半導体をベースとした磁気光学結晶の開発とデバイス応用）

(a) さきがけ期間中の主な成果

Ⅲ-V族化合物半導体をベースとする半導体磁気光学結晶の作製技術を確立し、従来の非磁性半導体では不可能なスピン依存物性を実現するとともに、これらの材料を応用する新機能デバイスを試作することを目的とした。

① GaAs 中に MnAs ナノ微粒子を埋め込んだ複合材料、GaAs:MnAs グラニューラー薄膜を MBE 法で成長し、MnAs 微粒子のサイズ、密度、均一性などの制御性を明らかにした。AlAs 上に整合性の極めて良いヘテロ構造を形成でき、MnAs 微粒子サイズが 10nm を境に超常磁性から強磁性に変化する。室温での大きなファラデー効果と、光照射によりカー楕円率 (MCD) と異常ホール効果が大きく変化することを見出した。

② GaAs:MnAs グラニューラー層を GaAs/AlAs 多層膜分布ブラッグ反射鏡 (DBR) で挟む多層膜を形成した。上下の DBR の層数を等しくすると所望の波長の光が GaAs:MnAs 磁性層に閉じこめられる結果、透過での磁気光学効果が大きくなり、室温のファラデー回転角は単位膜厚換算で $4\text{deg}/\mu\text{m}$ に達した。一方、上下の DBR の層数を変えると、反射配置でも室温で大きなカー効果が得られ、最大 1540mdg のカー回転角を得た。これらの結果は、室温の半導体ベースの材料による磁気光学効果の値としては最高記録（当時）である。

③ GaAs 中に磁性元素 Mn を 0.4 原子層のデルタドーピングした構造を形成し、きれいな結晶構造が保たれる条件を見出した。さらに、Mn- δ doped GaAs / Be-doped AlGaAs からなる p 型選択ドーブヘテロ構造を形成し、Ⅲ-V 属強磁性半導体としては最高の 192K の強磁性転移温度を観測した。このヘテロ構造の表面にゲート電極をつけて電界効果トランジスタを作製し、一定温度 (115K) で磁場を用いることなく、ゲート電圧のみによって強磁性・常磁性の相転移を制御することに成功した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究開始時は東京大学大学院工学系研究科の助教授であったが、研究期間中の 2004 年同研究科の教授に昇任した。さきがけ研究終了後、本研究の継続発展のためのプログラム JST-SORST に採択され、さきがけの研究を深化させた。科研費は 2006 年度の基盤研究(S)、2007 年度の 2 つの特定領域研究、また 2011 年度には基盤研究(A)および特別推進研究を獲得した。2006 年下期から 3 年間の NEDO ナノテクノロジープログラム「高スピン偏極率材料を用いたスピン MOS-FET の研究開発」において東芝、東工大、NIMS とともに開発を行った。獲得した研究助成金が大いことは特筆される。本研究者が代表を務めた基盤研究(S)では中間評価および最終評価ともに最高位の評価 (A+) を得ている。計画研究代表者および班長を務めた特定領域研究「スピン流の創成と制御」でも領域として最高位の評価 (A+) を得た。また、応用物理学会スピントロニクス研究会委員長(2009-2010

年)、「半導体におけるスピン関連現象の物理と応用」国際会議 (PASPS-VI) 組織委員長 (2010 年)をはじめ、様々な国際会議の委員、AIP Advances, Executive Editor(2011 年～)、応用物理学会理事(2012 年～)を務めるなど、国内外の学会等でも貢献している。

現在の半導体技術の上にスピン自由度を導入して、Si-LSI の技術の壁を乗り越えようとするスピン MOSFET の提案・解析・試作や、強磁性半導体や半導体/強磁性体ナノ構造におけるスピン依存伝導現象とその応用、磁気光学効果デバイスの研究など、材料科学、物性物理からデバイスの試作・評価に至る幅広いスピントロニクス研究を進めている。

NEDO の研究では、Si の埋め込み酸化膜層をもつ SOI 基板上に強磁性 MnAs 単結晶膜を積層し、ショットキー電極とゲート電極を持つスピン FET の構築を目的として、その最重要課題である半導体/磁性体界面制御技術(ショットキー障壁)の開発を行った。その結果、良好なトランジスタ特性が実現され、スピン依存出力特性の発現に一步近づいた。

現在、東京大学グローバル COE「セキュアライフ・エレクトロニクス」拠点のリーダー補佐および事業推進担当者を務め、「機能デバイス・マテリアル研究 CORE」にも参加して、世界に通用する若手研究者の育成に力を入れている。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始(2001 年 12 月)から現在までで 98 報、プロジェクト終了(2005 年 3 月)後では 62 報であった。下記主要論文(☆)で被引用件数の多いことが特筆される。特許は 5 件が成立した。本研究者の受賞は期間中の 2003 年に受けた日本 IBM 科学賞を含む 4 件、指導した学生・若手研究者の受賞は 7 件である。

(c) 主要論文

- ① Tanaka M., Ferromagnet (MnAs)/III-V semiconductor hybrid structures, *Semicond. Sci. Technol.*, 17 (4), 327-341, 2002
- ② Nazmul A.M., Sugahara S., Tanaka M., Ferromagnetism and high Curie temperature in semiconductor heterostructures with Mn δ -doped GaAs and *p*-type selective doping, *Phys. Rev. B* 67 (24), 2413081-2413084, 2003
- ③ Sugahara S., Tanaka M., A spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor using half-metallic-ferromagnet contacts for the source and drain, *Appl. Phys. Lett.* 84 (13), 2307-2309, 2004

(☆)

基本的にはさがけ採択以降～現在までの論文を SCOPUS を用い、名寄せ、所属等で検索を行い作成した論文リストの中から、基本的には被引用件数の多い方から、さがけとの関連性を確認し、抽出した。

(6)鳥本 司（課題名：光化学的に構造制御したナノ複合機能材料の創製）

(a) さきがけ期間中の主な成果

- ① コア・シェル構造のシリカ被覆硫化カドミウムナノ粒子 (SiO_2/CdS) に、サイズ選択的光エッチングを適用した。量子サイズ効果によりコアである CdS 半導体粒子は照射光波長で決まるサイズまで縮小するが、シェルのサイズは変わらず、 SiO_2 シェルと CdS コアとの間に空隙が形成された。この新規ナノ構造を“ジングルベル型構造”と名付けた。CdSe についても同様の構造を作製できた。
- ② CdS ナノ粒子の光触媒機能によって、ジングルベル型 SiO_2/CdS 粒子の空隙内に Au ナノ粒子を光析出させたところ、CdS コアの光化学特性が変化した。Au ナノ粒子サイズは空隙の大きさに依存して変化する。これは、空隙が光化学的機能を持つナノ粒子生成のナノフラスコとして利用できることを意味する。
- ③ ジングルベル型 SiO_2/CdS 粒子を光触媒としてメタノール脱水素反応を行った。光照射時間とともに水素発生量が直線的に増大した。反応の進行とともに凝集して失活する従来の半導体ナノ粒子とは全く異なり、 SiO_2/CdS 粒子は失活することがなかった。
- ④ コア・シェル構造体 SiO_2/CdS 粒子を光-電気エネルギー変換素子などの固体デバイスに応用するために、ガラス基板への固定化を試みた。自己組織化による配列と同時に、水酸基どうしの脱水縮合により基板とコア・シェル構造体粒子を架橋させ固定した。この操作を繰り返して粒子を積層し、得られた複合体薄膜にサイズ選択的エッチングを施してジングルベル型構造体薄膜を基板の上に形成できることを示した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は北海道大学触媒化学研究センターの助教授であったが、2005 年名古屋大学大学院工学研究科の教授に昇任した。さきがけ研究後は、科研費では 2004 年度の基盤研究(B)と 2008 年度の基盤研究(A)、2005 年度と 2007 年度の特定領域研究を獲得した。この間、JST のシーズ発掘試験に 2 度採択され、「生体分子マーカーへの利用を目指した新規低毒性量子ドット」と「低毒性半導体ナノ粒子を用いる増感太陽電池」を開発した。さらに、2011 年度の JSPS の最先端・次世代研究開発支援プログラムにおいて課題「光による半導体ナノ粒子の異方性形状制御とエネルギー変換材料への応用」が採択された。

最先端・次世代研究開発支援プログラムでは、Cd など毒性が問題となる元素を含まない半導体である AgInS_2 などカルコパイライト型半導体、In などの希少元素を含まない $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ や $\text{Ag}_2\text{ZnSnS}_4$ などのスタンナイト型半導体を対象として、そのナノ粒子の液相化学合成と特性評価を行っている。また、太陽光発電の高効率化に向けて、可視光域に吸収を持つ半導体ナノ粒子を太陽電池の光吸収材料とする新たな光エネルギー変換システムを開発している。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 70 報、プロジェクト終了後では

57 報であった。特許は 9 件が成立した。

(c) 主要論文

- ① Torimoto T., Reyes J.P., Iwasaki K., Pal P., Shibayama T., Sugawara K., Takahashi H., Ohtani B., Preparation of novel silica-cadmium sulfide composite nanoparticles having adjustable void space by size-selective photoetching, , *Journal of the American Chemical Society* 125 (2), pp 316–317, 2003
- ② Tachibana, Y., Akiyama, H.Y., Ohtsuka, Y., Torimoto, T., Kuwabata, S., CdS quantum dots sensitized TiO₂ sandwich type photoelectrochemical solar cells *Chemistry Letters*, 36 (1), 88-89, 2007
- ③ Torimoto, T., Adachi, T., Okazaki, K.-I., Sakuraoka, M., Shibayama, T., Ohtani, B., Kudo, A., Kuwabata, S., Facile synthesis of ZnS-AgInS₂ solid solution nanoparticles for a color-adjustable luminophore, *Journal of the American Chemical Society*, 129 (41), 12388-12389, 2007

(7)溝川 貴司（課題名：強相関物質表面での光励起状態の光電子分光）

(a) さきがけ期間中の主な成果

X 線光電子分光を用いて、赤外・可視・紫外領域のレーザー光の照射が、強相関物質や希薄磁性半導体の表面に誘起する電子状態変化を時間の関数として観測し、その評価をもとに新しい光機能をもつ物質を探索することを目的とした。

- ① YBa₂Cu₃O_y/SrTiO₃:Nb ヘテロ接合において、紫外線照射によって SrTiO₃:Nb 側に光励起されたホールが YBa₂Cu₃O_y 側に注入される現象が知られている。波長 355nm のパルス光励起下での X 線光電子分光測定によって、接合部に生じる光起電力に応じて光電子スペクトルがシフトすることから、光起電力を非接触で評価できることを示した。また、シフトの励起光周波数への依存性から、注入されたキャリアーの寿命を評価が可能になった。
- ② 電荷・軌道秩序を持つ種々の遷移金属化合物を系統的に光電子分光測定した。La_{2-x}Sr_{1+x}Mn₂O₇、Cs₂Au₂X₆ (X=Cl,Br,I) など、8 面体が頂点共有で繋がるペロブスカイト構造では、光励起によって電荷・軌道秩序状態が大きな影響を受けることを見出した。特に、Cs₂Au₂X₆において、Au の 4f 内殻準位が電荷不均化によって Au⁺と Au³⁺へと分裂する様子を観測することに成功した。一方、CuIr₂S₄、Ca₃Co₄O₉などの 8 面体が稜共有で繋がる遷移金属化合物では光励起の影響は小さいことが分かった。
- ③ 希薄磁性半導体 Ga_{1-x}Mn_xAs、Ga_{1-x}Mn_xN、Zn_{1-x}Mn_xO、Ti_{1-x}Co_xO₂において、光励起による内殻準位シフトの系統性を調べた。その結果、酸化物をベースにした希薄磁性半導体では、III-V 族ベースの希薄磁性半導体とは異なり、光励起後でも内殻準位シフトが長時間生き残ることが確認された。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究は東京大学大学院新領域創成科学研究科の助教授として実施し、現在は同研究科の准教授である。さきがけ研究終了後は、2004 年度の科研費の若手研究(A)、および 2007 年度の基盤研究(B)を獲得して研究を継続した。

研究室では現在、3d 電子系、および 4f 電子系化合物の電子状態を調べる幅広いテーマが光電子分光法と逆光電子分光法を使って実施されている。基盤研究(B)では、光励起に伴って永続的な応答をする系と高速に応答する 2 つの異なった物質系の探索に、時間積分型電子分光と時間分解型電子分光（新規開発により時間分解能は 10nsec）を使い分けた。その中で、ペロブスカイト型 Mn 酸化物において、可視光照射によって絶縁体から金属への転移、および金属から絶縁体への転移の両方を観測することに成功した。一方、SrTiO₃ 表面に紫外線を照射して誘起されるキャリアーを時間分解観測した結果、誘電体を光スイッチに適用する可能性が示された。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 79 報、プロジェクト終了後では 51 報であった。下記主要論文で被引用件数の多いことが特筆される。井上科学振興財団から久保亮五記念賞が 2009 年に授与されている。

(c) 主要論文

① Mizokawa, T., Nambu, T., Fujimori, A., Fukumura, T., Kawasaki, M.

Electronic structure of the oxide-diluted magnetic semiconductor Zn_{1-x}Mn_xO, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 65 (8), 852091-852095, 2002

② Yoshida T., Zhou X.J., Sasagawa T., Yang W.L., Bogdanov P.V., Lanzara A., Hussain Z., Mizokawa T., Fujimori A., Eisaki H., Shen Z.-X., Kakeshita T., Uchida S., Metallic behavior of lightly doped La_{2-x}Sr_xCuO₄ with a Fermi surface forming an arc, *Physical Review Letters*, 91 (2), 027001/1-027001/4, 2003

③ Khomskii D.I., Mizokawa T., Orbitally induced Peierls state in spinels, *Phys. Rev. Lett.* 94, 156402, 2005

(8)守友 浩（課題名：放射光 X 線粉末構造解析による光誘起相転移の研究）

(a) さきがけ期間中の主な成果

光誘起磁性を示すシアノ錯体化合物と、光励起により低スピン-高スピン転移を示すスピノクロスオーバー錯体を対象に選び、高輝度の第三世代放射光 X 線による粉末回折法により、光が誘起する格子構造変化や相転移のメカニズムを解明することを目指した。

① K_xCo_y[Fe(CN)₆]・zH₂O は 15K 以下の低温で、光励起により強磁性を発現する。光励起後の放射光 X 線粉末回折による構造解析の結果、光励起により、高温相に似た格子構造を有する準安定相へ相変移していた。一方、RbMn[Fe(CN)₆]は光励起を行うと強磁性が消失するが、光誘起された準安定相の空間群は高温相のものとは異なることを見出した。

② スピントクロスオーバー錯体 $[\text{Fe}(\text{ptz})_6](\text{BF}_4)_2$ を構成する 2 価の鉄について、連続光による光励起中および、励起後の高スピン状態の鉄濃度(n_{HS})の時間変化を測定し、光励起に伴う相転移挙動を明らかにした。同じ試料に対する放射光 X 線粉末回折の解析によって原子座標を含めた格子構造を決定した。その結果、励起光強度が閾値を超えると秩序変数 $n_{\text{HS}}=1$ に対応する第二相が誘起されることが明らかになった。また、光励起下のスピントクロスオーバー錯体 $[\text{Fe}(\text{phen})_2](\text{NCS})_2$ の放射光 X 線粉末回折を高い統計精度で測定し、光励起相の電子レベルでの構造を決定して、この物質の低温相、高温相との違いを明らかにした。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究は名古屋大学の助教授として実施したが、2005 年に筑波大学大学院数理物質科学研究科の教授に昇任した。2003~2007 年度の科研費基盤研究(S) (課題：放射光粉末構造解析による光励起状態の構造決定)、2008 年度と、2010 年度の特定領域研究、および 2009 年度の基盤研究(A)を獲得し研究を進展させている。

2004 年度からの JST-CREST の研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」における研究課題「反応現象の X 線ピンポイント構造計測」(研究代表者：高田昌樹)にもチームリーダーとして参加した。これは、Spring-8 を拠点に理研グループとの共同で行ったもので、高輝度放射光 X 線の強みを生かすピコ秒時間分解回折装置を開発した。この手法を実際に適用して、光誘起相転移の構造ダイナミクスを明らかにし、また巨大光応答が起きる瞬間の構造を解析できるようになった。

JST 研究支援業務室の 2006 年度公募「X 線自由電子レーザー利用推進研究課題」において「フェムト秒時間分解顕微鏡の構築と MEM 電子分布解析の高度化」が採択された。上記のピコ秒時間分解回折手法と併せて光励起による電荷移動とマクロな格子変形との関連を明らかにすることを目指している。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 116 報、プロジェクト終了後では 59 報であった。特許は 6 件が成立した。受賞は 2006 年の市村学術賞貢献賞を含む 2 件である。

(c) 主要論文

① Moritomo, Y., Kato, K., Kuriki, A., Takata, M., Sakata, M., Tokoro, H., Ohkoshi, S.-I., Hashimoto, K., Structural Transition Induced by Charge-Transfer in $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ - Investigation by Synchrotron-Radiation X-ray Powder Analysis, *Journal of the Physical Society of Japan*, 71 (9), 2078-2081, 2002

③ Moritomo Y., Hanawa M., Ohishi Y., Kato K., Takata M., Kuriki A., Nishibori E., Sakata M., Ohkoshi S., Tokoro H., Hashimoto K., Pressure- and photoinduced transformation into a metastable phase in $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 68 (14), 1441061-1441067, 2003

- ③ Hanawa M., Moritomo Y., Kuriki A., Tateishi J., Kato K., Takata M., Sakata M., Coherent domain growth under photo-excitation in a Prussian blue analogue, *Journal of the Physical Society of Japan*, 72 (5), 987-990, 2003

2.2.2 第2期生(9名)

(1) 伊関 峰生(課題名: 光センサータンパク質による細胞機能の制御)

(a) さきがけ期間中の主な成果

単細胞生物ミドリムシにおいて、本研究者が発見した光活性化アデニル酸シクラーゼ(PAC)は、光を受けて活性化されると環状アデノシンリン酸(cAMP)を生成する酵素(アデニル酸シクラーゼ)として働く。cAMPは、高次の中枢機能を含め、細胞内信号伝達物質として多くの生命現象に関与することから、PACは細胞機能を光で制御するためのツールになる可能性がある。本研究はこの光センサータンパク質の全体像を明らかにすると共に、様々な細胞機能の光制御に応用することを目指した。

① PACの進化的起源に関する知見を得て、さらに優れた特性を持つ光センサーを探索する狙いから、ミドリムシ近縁の生物から順次PAC類似タンパク質の探索を行った。その結果、ミドリムシ類には、PAC類似配列の他に、トリパノソーム(アフリカ眠り病の病原微生物)に見られるアデニル酸シクラーゼ類似の配列TACを併せもつもの、あるいはTACのみをもつものがあることを見出した。これらを総合して進化的起源に関する仮説を提示した。

② PACは光回避反応のセンサーであるが、光集合反応のセンサーは未知である。その探索を網羅的解析で行うために、世界に先駆けてESTデータベースの構築に着手した。光集合反応を顕著に起こす条件下で培養したミドリムシからcDNAライブラリを作成し、2,570の重複を含まないESTを得た。このうち新規アデニル酸シクラーゼを含む複数のcAMP関連タンパク質の配列について全長を決定し、光集合反応への影響を調べた。しかし、効果は認められず、光集合反応センサーの問題は今後に残された。

③ 軟体動物アメフラシの感覚ニューロンにPAC溶液を導入し、脱分極通電して活動電位を発生させた。青色光照射に反応して徐々にスパイクの高さが低下し、幅が広がった。アメフラシ用発現ベクターを構築し、PACを感覚ニューロンで発現させた場合も同様の結果が得られた。これらの結果から、感覚ニューロンにおいて、PACは活性を保持した状態で発現し、光に応答してcAMPを生成することが明らかになった。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究開始時は岡崎国立共同研究機構基礎生物学研究所の特別協力研究員であった。総合研究大学院大学葉山高等研究センターの上級研究員を経て、現在は東邦大学薬学部の准教授を務めている。

さきがけ研究終了後は、2007年度と2010年度の基盤研究(C)を獲得した。結晶構造解析や分光学的解析によって光受容過程を解明するためにはPACの十分量を手に入れることが

必須である。2007 年度の科研費の研究では、PAC をミドリムシ自身に過剰発現させ、活性を保持した PAC の十分量を得ることを目的として、形質転換系の確立と、PAC 大量発現系の確立を目指した。PAC 遺伝子のほぼ全長の塩基配列を決定することに成功したが、形質転換ベクターの確立には至らなかった。

上記とは別に、大量の試料を必要としない PAC の構造・機能解析の手法開発にも取り組んでいる。東京工業大学と共同で低温下の単一分子蛍光測定に成功したほか、大阪大学と共同で電子顕微鏡の単粒子解析により、PAC の 4 量体構造の可視化に成功した。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 15 報、プロジェクト終了後では 10 報であった。

(c) 主要論文

- ① Suzuki T., Yamasaki K., Fujita S., Oda K., Iseki M., Yoshida K., Watanabe M., Daiyasu H., Toh H., Asamizu E., Tabata S., Miura K., Fukuzawa H., Nakamura S., Takahashi T., Archaeal-type rhodopsins in *Chlamydomonas*: Model structure and intracellular localization, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 301 (3), 711-717, 2003
- ② Ntefidou, M., Iseki, M., Watanabe, M., Lebert, M., Häder, D.-P., Photoactivated Adenylyl Cyclase Controls Phototaxis in the Flagellate *Euglena gracilis*, *Plant Physiology*, 133 (4), 1517-1521, 2003
- ③ Murakami A., Miyashita H., Iseki M., Adachi K., Mimuro M., Chlorophyll d in an Epiphytic Cyanobacterium of Red Algae, *Science*, 303 (5664), 1633, 2004

(2) 岡野 俊行（課題名：光転写調節メカニズムと新規光センサー）

(a) さきがけ期間中の主な成果

鳥類と哺乳類の網膜・松果体・皮膚の光受容システムを対象として、光による遺伝子の制御メカニズムの解明と機能未知の新規光センサーの探索を目指した。

- ① 鳥類において松果体は光感受性の脳内器官であり、同時にサーカディアンリズムの中核である。そこで、松果体に光を照射し、時刻に依存して転写が誘導される遺伝子を探索した。朝方に光依存的に転写される遺伝子 *Lcg* は、中心体に発現する因子であり、中心体の概日時計発振への関与が示唆された。また、夕方に光誘導される *E4BP4* は転写抑制因子であり、時計遺伝子 *Per* の転写を抑制することが分かった。
- ② ヒト皮膚細胞が紫外線に応答することは知られているが、可視光の作用は未知である。培養したヒト皮膚細胞に青色と近紫外光を照射し、光応答遺伝子を網羅的に解析した。一群の遺伝子が共通して光誘導されることが分かり、そのうち最も顕著なもの 3 種について詳細に解析した結果、光刺激が引き起こす遺伝子カスケードの一端が明らかになった。
- ③ ニワトリに存在する機能不明の新しいクリプトクロム分子 (*cCRY4* と命名) に関して、

全 cDNA 配列、mRNA 発現部位やタンパク質の組織局在などの詳細な解析を行ったところ、cCRY4 は光感受性組織である網膜、視床下部および松果体に大量発現していて、その mRNA やタンパク質の量は光刺激に対して増加することが分かった。アミノ酸配列から cCRY4 は青色光受容光センサーであると類推されることから、これらの組織に未知の光情報伝達経路が存在することが示唆された。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究は東京大学大学院理学系研究科の講師として開始し、終了時は早稲田大学理工学術院の助教授、2005 年より早稲田大学先進理工学部の准教授である。

2006 年に新たなさきがけ研究領域「生命現象と計測分析（研究総括：森島 績）」において、課題「光受容タンパク質を用いた生体解析法の開発と網膜における光応答機構の解明」を実施した。2010 年には科研費挑戦的萌芽研究も獲得した。

第 2 のさきがけ研究では、脊椎動物のクリプトクロム(CRY)に注目し、分子の性状解析および、CRY が関与すると推定される磁気受容能について動物固体の行動を解析した。ゼブラフィッシュとアフリカツメガエルという遺伝子操作の可能な生物において CRY を同定し、タンパク質レベルでの発現を明らかにした。両方に共通して神経系のみならず、卵巣や腎臓にも高い発現が見られることから、その機能は多岐にわたることが示唆された。哺乳類では CRY と時計遺伝子の相互作用を調べた。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 12 報、プロジェクト終了後では 10 報であった。2005 年の第 1 回文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。

(c) 主要論文

- ① Kassai, H., Aiba, A., Nakao, K., Nakamura, K., Katsuki, M., Xiong, W.-H., Yau, K.-W., Imai, H., Shichida, Y., Satomi, Y., Takao, T., Okano, T., Fukada, Y.
Farnesylation of retinal transducin underlies its translocation during light adaptation, *Neuron*, 47 (4), 529-539, 2005
- ② Nakao, N., Yasuo, S., Nishimura, A., Yamamura, T., Watanabe, T., Anraku, T., Okano, T., Fukada, Y., Sharp, P.J., Ebihara, S., Yoshimura, T. Circadian clock gene regulation of steroidogenic acute regulatory protein gene expression in preovulatory ovarian follicles, *Endocrinology*, 148 (7), 3031-3038. 2007
- ③ Yoshitane, H., Takao, T., Satomi, Y., Du, N.-H., Okano, T., Fukada, Y.
Roles of CLOCK phosphorylation in suppression of E-box-dependent transcription, *Molecular and Cellular Biology*, 29 (13), pp. 3675-3686, (2009)

(3) 梶川 浩太郎（課題名：局在ブラズモン増強を使った光倍高調波によるバイオチップの高密度化）

(a) さきがけ期間中の主な成果

局在表面プラズモン共鳴 (LSP) で増強される光倍高調波光を用いて、非標識でタンパク質を高感度・空間分解能で検出できるマルチチャンネルセンシングプラットフォームとその解析装置を開発した。この手法は、SERS (表面増強ラマン散乱) や IR-SFG (赤外和周波発生) などに展開して多様な情報を得ることができる。

① 光学的に均一な系で LSP の高い増強効果が得られる構造を探索した。金薄膜上 1~2nm 程度の高さに固定した金ナノ微粒子構造 (SIGN と命名) が、容易に再現性良く作製できる点で最適であり、その作製には、UV フォトリソグラフィを用いてドット状にパターンニングした金薄膜上にメロシアンチオール自己組織化膜 (SAM) を形成して直径 80~100nm の金ナノ微粒子を固定する方法を選択した。

② ドットサイズが $20\mu\text{m}$ のバイオセンシングチップ作製を視野に入れて、分解能 $5\mu\text{m}$ の SH 顕微鏡を開発した。冷却 CCD を用いて画像を取り入れることでスループットを上げ、ブロードバンド TiSa レーザーを用いて波長を 720~900nm の範囲で可変とした。その結果、分解能 $5\mu\text{m}$ で画素当たり 0.01cps の SH 信号を読み取れる装置が完成した。

③ 高感度バイオセンシングを求めて、SIGN 構造における SH 光増強効果の電磁場解析を行った。SIGN を支持する材料の非線形感受率の大きさに依存して、SH 光強度の支配的な部位が微粒子の上半分、あるいはナノギャップ部が変わることを明らかにした。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間は東京工業大学大学院総合理工学研究科の助教授であった。現在は同研究科の教授を務める。さきがけ研究後は、2007 年度の科研費基盤研究(B)、2010 年度の挑戦的萌芽研究を獲得した。また、2007 年度 JST シーズ発掘試験の課題「高輝度 LED を使った局在プラズモンバイオセンシングチップ」と 2010 年度 JST A-STEP FS ステージ探索タイプの課題「表面プラズモンを使った光双安定型液晶空間光変調素子」が採択された。

現在、局在表面プラズモン増強に有利な金属ナノ構造の光物性の研究や、それを応用する光デバイスの開発を続けている。その中で、光ファイバーを用いるバイオセンサーが注目されている。直径 $50\mu\text{m}$ の石英ファイバーの端面に直径 20~40nm の多数の金微粒子をシランカップリング剤で固定し、その表面に目的の分子 (タンパク質や DNA など) と特異的に結合する物質を付けておくと、分子の吸着や脱離を光の反射量の変化として捉えられる。 50nl 程度の極微量の倦怠の量で従来の装置に比べて遜色ない感度で測定できるのが特徴で、装置の小型化と低価格化が可能になった。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 30 報、プロジェクト終了後では 20 報であった。特許は 3 件が成立した。受賞は、2005 年の丸文研究奨励賞を含め 3 件である。

(c) 主要論文

- ① Watanabe, M., Kajikawa, K. An optical fiber biosensor based on anomalous reflection of gold, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 89 (1-2), 126-130, 2003
- ② Mitsui, K., Handa, Y., Kajikawa, K., Optical fiber affinity biosensor based on localized surface plasmon resonance, *Applied Physics Letters*, 85 (18), 4231-4233, 2004
- ③ Naraoka, R., Kajikawa, K., Phase detection of surface plasmon resonance using rotating analyzer method, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 107 (2), 952-956, 2005

(4) 勝藤 拓郎（課題名：磁性誘電体における誘電関数の磁場制御）

(a) さきがけ期間中の主な成果

金属における磁気抵抗効果と同じように、絶縁体（誘電体）においても磁場の印加で光学領域の誘電率が変化すれば、屈折率を磁場で制御することが可能になり、光フィルターやスイッチなどへの応用が期待できる。本研究では、そのための物質探索を行った。

① 光学領域での誘電関数の磁場依存性を精密に測定するために、無冷媒型の超電導磁石と冷凍機を用いた光学反射率磁場依存性測定システムを開発した。この装置の特徴は、通常の波長スキャン法ではなく、波長一定の光照射下で磁場スキャンする測定を、波長を変えて繰り返すことにより、精度を飛躍的に高めたことで、光学伝導度の変化にして $\Delta \sigma / \sigma \sim 10^{-4}$ と dc の場合と同様の精度での測定が可能になった。

② この装置を用いて、巨大磁気抵抗効果（CMR）を示すペロブスカイト型マンガン酸化物 $\text{Pr}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の伝導度の磁化（M）依存性を測定した。その結果、dc 伝導度は温度によらず M^2 依存性を示すのに対し、光学領域の ac 伝導度は T_c に近い温度で M の指数（ $\Delta \sigma \propto M^\alpha$ の α ）が 1 に近づくことが分かった。

③ 典型的な強磁性絶縁体として、単純な立方晶構造をもちスピン 1/2 の系であるパイロクロア型 $\text{R}_2\text{V}_2\text{O}_7$ （R：希土類）を選び、誘電関数の温度依存性と磁場依存性を測定した。強磁性相転移に伴って、1.5eV 付近のモット励起エネルギーが低エネルギー側にシフトすることに着想を得て、磁場によって V のスピンを揃えた場合でもモット励起エネルギーが減少し、光学伝導度が最大 3% も変化することを見出した。解析の結果、この系の励起エネルギーは隣り合うスピンの対相関 $\langle \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \rangle$ に依存するというモデルで説明できることを示した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は早稲田大学理工学術院の助教授であったが、2008 年に早稲田大学理工学術院先進理工学部の教授に昇任した。この間一貫して、遷移金属酸化物の軌道自由度と光の相互作用に関して、基礎的な観点から物質開発と光学測定に取り組んでいる。

2005~6 年の若手研究(A)では、ペロブスカイト型マンガン酸化物において見出された、パルス電場印加によって電気抵抗が不揮発かつ可逆的に変化する現象について、新たに開発した光学反射率の絶対値イメージング装置によって、パルス印加によって起きる光学反射率の空間分布の変化とその波長依存性を調べ、電場によって過剰酸素が集团的に動くことによっ

て電気抵抗変化が起きることを指摘した。

2007~8年度の基盤研究(B)では、スピネル構造をとる様々な遷移金属酸化物において、新規な軌道秩序を発見した。その軌道秩序状態のドメインを磁場によって制御し、巨大な磁歪、磁気誘電性を得た。また、強誘電性と強磁性が共存する物質において第二次高調波発生(SHG)を初めて観測し、新開発のSHG顕微鏡によって3次元断層写真の撮影に成功した。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで48報、プロジェクト終了後では32報であった。特許は1件が成立している。

(c) 主要論文

① Sato T.J., Lee S.-H., Katsufuji T., Masaki M., Park S., Copley J.R.D., Takagi H., Unconventional spin fluctuations in the hexagonal antiferromagnet YMnO₃, *Phys. Rev. B*, 68 (1), 014432, 2003

② Mori S., Shoji R., Yamamoto N., Asaka T., Matsui Y., Machida A., Moritomo Y., Katsufuji T., Microscopic phase separation and ferromagnetic microdomains in Cr-doped Nd_{0.5}Ca_{0.5}MnO₃, *Phys. Rev. B*, 67 (1), 012403, 2003

③ Hamaguchi M., Aoyama K., Asanuma S., Uesu Y., Katsufuji T., Electric-field-induced resistance switching universally observed in transition-metal-oxide thin films, *Appl. Phys. Lett.* 88 (14), 142508, 2006

(5) 香取 秀俊（課題名：シュタルクアトムチップによるコヒーレント原子操作）

(a) さきがけ期間中の主な成果

原子は、電子や光子と比べてはるかに多様な自由度をもつゆえに、そのコヒーレント技術は、将来の量子情報処理や極限計測への大きな波及効果が期待されている。本研究は、良く制御された中性原子を操作する基本技術として、2種の原子トラップ「シュタルクアトムチップ」および「光格子」を提案し、これを実証することを目指した。

① 「シュタルクアトムチップ」は、X軸、Y軸上に配置した対向電極が作る振動する鞍型電場によって、中性原子の3次元動的安定化を行う装置である。XY平面の安定領域の大きさとZ軸方向の束縛の強さを最適化した上で、電極厚100μm、電極間隔50μmのチップを作成した。6.4kHzの電圧±200Vを印加した対向電極の中に、レーザー冷却でμK以下としたSr原子を導入して、約100個のSr原子を100ms程度捕獲することに成功した。

② トラップ自体の摂動を受けて、原子の基底状態と励起状態のエネルギーの変調量が空間的に異なると位相情報が失われる。光定在波の原子トラップにおいて、トラップレーザー光の波長を特定の“魔法波長”にすることで、基底状態と励起状態で同一のエネルギーシフトとなって摂動を相殺できる原子トラップを提案した。また、光格子によって、原子を遷移波長よりも微少な領域に閉じこめることにより、熱運動に伴うドップラーシフトを排除する新

しい分光手法「光格子時計」を提案した。一次元の光格子に閉じこめた Sr 原子の可視の禁制遷移（遷移周波数 429THz）を使う、スペクトル幅およそ 30Hz の分光に成功し、光格子時計の優位性を初めて実証した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は東京大学工学部の助教授であったが、2010 年に同大学大学院の教授に昇任した。また、2011 年より理化学研究所の主任研究員を兼務している。

さきがけ研究終了後、2005 年度 JST・CREST の研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出（研究総括：山本喜久）」において、課題「極低温原子を用いる量子計測法の開拓」の研究代表者となった。当初上記「シュタルクアトムチップ」と「光格子時計」の双方を目標にしたが、開始直後から光格子時計は世界的な激しい競争の対象となり、さらに 2006 年の国際度量衡委員会において「秒の二次表現」に採択され注目を集めた。そこで光格子時計の研究に集中して、世界最高の 18 桁の精度をもつ原子時計を可能にする基幹技術の確立を目指した。プロジェクト終了時点で、2 台の光格子時計の比較の安定度は平均時間 10 分で 1.6×10^{-17} に達し、従来の「単一イオン時計」の安定度に比べておよそ 1 桁の優位性を実証した。

2009 年度に始まった最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プログラム（中心研究者：山本喜久）」では、量子標準サブグループのリーダーになった。このプロジェクトでは産総研・NICT・東大の 3 拠点を結ぶ光時計ネットワークの構築を目指している。

さらに、2010 年には、JST・ERATO の「香取創造時空間プロジェクト」の研究総括となり、CREST の成果を出発点として究極の精度の時計実現の一番乗りを目指している。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 24 報、プロジェクト終了後では 15 報であった。下記主要論文で被引用件数(☆)の多いことが特筆される。受賞は 2005 年の European Time and Frequency Award、また 2006 年の日本 IBM 科学賞、2011 年のフィリップ・フランツ・フォン・ジーボルト賞、2012 年の朝日賞を含む 12 件と多いことは特筆される。

(c) 主要論文

- ① Katori, H., Takamoto, M., Pal'chikov, V.G., Ovsiannikov, V.D., Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap, *Physical Review Letters*, 91 (17), 1730051-1730054, 2003
- ② Takamoto, M., Katori, H., Spectroscopy of the 1S0-3P0 clock transition of ^{87}Sr in an optical lattice, *Physical Review Letters*, 91 (22), 223001/1-223001/4, 2003
- ③ Takamoto, M., Hong, F.-L., Higashi, R., Katori, H., An optical lattice clock, *Nature*, 435 (7040), 321-324, 2005

(6) 上妻 幹男（課題名：光と原子の間の量子情報ネットワークの実現）

(a) さきがけ期間中の主な成果

Λ 型 3 準位をもつ極低温原子集団に、第 1 の遷移に共鳴する強い光（コントロール光）を照射するとき、第 2 の遷移に共鳴する弱い光（プローブ光）は吸収されず透明になる（電磁誘起透明化現象：EIT）。EIT がもたらす急峻な正常分散によってプローブ光パルスの群速度は著しく抑制され、コントロール光の遮断により光は凍結され、再照射によって再射出が起きる。本研究は、この現象を利用して、非古典光の量子情報を原子の量子スピン系に転写して保存し、再生する技術とすることを目指した。

① 原子と共鳴する光の量子状態として、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 導波路（PPLN）を用いて $^{87}\text{RbD}_1$ 線（795nm）の真空スクイズド状態を作り出した。この光をコントロール光照射下の Rb ガスが封入されたガラスセルに入射し、コントロール光を制御して、真空スクイズド光の EIT および、凍結と復活ができることを世界で初めて示した。

② パラメトリック下方変換を利用して条件付き単一光子を生成し、非古典光の保存・再生を試みた。Ti:S レーザー光を音響光学素子に通して Rb の共鳴波長を取り出し、さらに PPLN 導波路を用いてパラメトリック蛍光対を発生させプローブ光とした。この蛍光は約 10THz の広いスペクトル幅をもつが、周波数フィルタリングによって 1.7GHz まで狭窄化して、パラメトリック蛍光の低速度伝搬を初めて検証した。さらに、自作のアクティブ制御のファブリペロー共振器によって 1MHz までの極限的な狭窄化に成功し、初めて量子状態の保存・再生を確認した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は東京工業大学大学院理工学研究科の助教授であり、現在は同大学院の准教授を務める。

さきがけ研究終了後、科研費の 3 つの基盤研究(B)と新学術領域研究（研究領域提案型）を獲得した。このうち、2006 年度の基盤研究(B)では、極低温の原子集団に光を照射して、生成したアンチストークス光子とストークス光子の間の軌道角運動量相関を検出することで、原子系とアンチストークス光子との間の多次元エンタングルメントを検出することに成功した。続いて 2008 年度の基盤研究(B)では、中性原子気体のボース凝縮体を利用してシュレーディンガーの猫状態を生成し、量子状態を厳密に評価することに取り組んだ。

さらに 2011 年度に開始した最先端・次世代研究開発支援プログラムにおいて「課題：ホログラフィックに制御された光ポテンシャルによる大規模 2 次元量子計算機の実現」が採択されて実施中である。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 17 報、プロジェクト終了後では 15 報であった。2005 年に東工大挑戦的研究賞を受賞した。

(c) 主要論文

- ① Akamatsu, D., Akiba, K., Kozuma, M., Electromagnetically induced transparency with squeezed vacuum, *Physical Review Letters*, 92 (20), 203602, 2004
- ② Akamatsu, D., Yokoi, Y., Arikawa, M., Nagatsuka, S., Tanimura, T., Furusawa, A., Kozuma, M., Ultraslow propagation of squeezed vacuum pulses with electromagnetically induced transparency, *Physical Review Letters*, 99 (15), 153602, (2007)
- ③ Honda, K., Akamatsu, D., Arikawa, M., Yokoi, Y., Akiba, K., Nagatsuka, S., Tanimura, T., Furusawa, A., Kozuma, M., Storage and retrieval of a squeezed vacuum, *Physical Review Letters*, 100 (9), 093601, 2008

(7) 杉山 和彦（課題名：小型超高精度レーザー原子時計の実現）

(a) さきがけ期間中の主な成果

マイクロ波領域を基準とする現在の Cs 原子時計に代えて、光領域を基準とする新しい方式の原子時計によって高精度化することを目指した。原子の共鳴周波数に対し安定化したレーザーの周波数を、光周波数コムを使って正確に分周して新たなマイクロ波周波数標準とする。基準光周波数はトラップした単一イオンの共鳴で与え、必要となるレーザーを全て市販の半導体レーザーとすることによって、低消費電力で可搬、かつ安価なシステムを構築する。そのための基盤技術として、1 オクターブ光周波数コムを用いた光分周器、基準光周波数、および半導体レーザーによる光周波数コムを開発した。

- ① モード同期チタニウムサファイア (TiS) レーザーの光パルスを用いたフォトニック結晶ファイバーに導入して、1 オクターブ光周波数コムを発生させ、自己参照法によって **Carrier-envelope** オフセット周波数(f_{ceo})を検出した。さらにコムのモード 1 本と基準となる周波数安定化レーザーとのビートをとることによって光分周器を実現した。
- ② 市販の半導体レーザーを 3 段階の線幅狭窄化を施すことによって、チップ単体では 10MHz の発振線幅を 10kHz まで狭窄した基準周波数レーザーを構築した。基準周波数を与える単一イオンは、イッテルビウム奇数同位体の一価イオン ($^{171}\text{Yb}^+$) を採用した。全ての光源を半導体レーザーで構成したトラップの動作を確認した。
- ③ モード同期半導体レーザーとしては光通信用に開発された $1.5\ \mu\text{m}$ 帯のものがあるが極めて高価である。本研究では安価な自励発振半導体レーザーの利用を追求してモード同期を実現し、光周波数コムとして十分応用可能であることを示した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は京都大学大学院工学研究科の助教授であった。現在は同大学工学研究科の准教授を務めている。

2009 年度から 3 年間の科研費・新学術領域研究（研究領域提案型）を獲得した。本研究の成果を基に大阪大学、東京理科大学と共同して、 $^{171}\text{Yb}^+$ 、 $^{135,137}\text{Ba}^+$ を用いる光時計を構築

して、これらの間の周波数比計測を行い微細構造定数 α の時間変化を検出する課題に取り組んでいる。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 8 報、プロジェクト終了後では 8 報であった。特許は 1 件が成立した。受賞は、2003 年に文部科学大臣賞、および第 29 回研究功績者賞を受けた。

(c) 主要論文

- ① Hong F.-L., Ishikawa J., Sugiyama K., Onae A., Matsumoto H., Ye J., Hall J.L., Comparison of independent optical frequency measurements using a portable iodine-stabilized Nd:YAG laser, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52 (2), 240-244, 2003
- ② Nakanishi T., Sugiyama K., Kitano M., Generation of photon pairs using polarization-dependent two-photon absorption, *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 67 (4), 438091-438094, 2003
- ③ Sugiyama K., Hong F.-L., Ishikawa J., Onae A., Ikegami T., Slyusarev S.N., Minoshima K., Matsumoto H., Inaba H., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.S.J., Optical frequency measurement using chirped-mirror-dispersion-controlled mode-locked Ti:Al₂O₃ laser, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1*, 45 (6A), 5051-5062, 2006

(8) 高橋 雅英（課題名：有機-無機ハイブリッド低融点ガラスを用いたフォトニクス材料の創製）

(a) さきがけ期間中の主な成果

光情報処理デバイスの材料として、機能性有機分子を低融点ガラスに分散させた材料、有機-無機ハイブリッド材料が期待されているが、通常のゾルゲル法での製造には成形の精度やプロセス制御に難がある。本研究は合成方法や後処理に工夫を凝らし、機能性に優れるハイブリッド材料群の創出と、微細構造の形成や素子化技術の構築を目指した。

- ① 亜リン酸とオルガノクロシランを直接混合し無水酸塩基反応によって、ケイリン酸材料を合成した。この材料はケイ酸とリン酸構造が交互共重合構造を形成していて、希土類金属イオンなどの溶解性が高く、軟化温度も 100℃程度と低く機能性有機分子の含有率を高くできる。また、系の酸性度の調節によって含有する遷移金属・希土類金属イオンの価数を制御することや、金ナノ微粒子を析出させて新機能を得ることにも成功した。
- ② シラノールとシランアルコキシドの脱アルコールによる縮合反応により得られるシロキサンは残存 OH 基をほとんど含まず、光通信波長域での伝搬損失は 0.3dB/cm とハロゲン化処理を行わない材料系では最も低損失である。また、300℃以上での熱安定性を示す。
- ③ 簡便にフォトリソグラフィ構造を形成する方法として、重合誘起相分離（PIPS）を用いたマ

マイクロ構造形成技術を提案した。 TiO_2 のコーティング液に光重合性モノマーを添加し、成膜後に重合を行うことによりポリマー相/チタニア相への分相を誘起できる。その際、干渉露光やマスク露光により光を構造鋳型としたマイクロ構造が形成できることを示した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究は京都大学化学研究所の助手として開始し、期間中に同研究所の助教授に昇任した。2009 年に大阪府立大学大学院工学研究科の教授に昇任した。さきがけ研究期間中から 2006 年度までの若手研究(A)、終了後は 2009 年度の科研費特定領域研究、2010 年度の基盤研究(B)および挑戦的萌芽研究を獲得した。

ゾルーゲル法を基盤とする無溶媒合成法を中心とする新規材料の開発を続けている。その中で、有機修飾ケイリン酸材料は 10cm 以上の大きなバルク体、数 $10\mu\text{m}$ 厚さの膜、ファイバー形状にも加工可能であり、光による微細加工、ドーピングによる高非線形性材料の作製も可能になった。また、数 10mW 程度のレーザーにより、非線形光学媒質中に再書き込み可能なホログラフィック構造を形成することにも成功した。一方、ハイブリッド材料の有機高分子の特性を生かした酸化物微細構造の形成にも注力している。その中で、酸化物フォトリソニック構造を光誘起で自己組織的に形成する技法は、既存のリソグラフィ技術ともうまく融合できることから、現在、メゾ構造とマイクロ構造の高次構造を光誘起により形成することに取り組んでいる。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 67 報、プロジェクト終了後では 46 報であった。特許は 19 件が成立した。受賞は、2003 年に Japan Australian Ceramic society, Joint Ceramics Award を含む 2 件である。

(c) 主要論文

- ① Yoshida Y., Muroi K., Otsuka A., Saito G., Takahashi M., Yoko T.,
1-Ethyl-3-methylimidazolium Based Ionic Liquids Containing Cyano Groups:
Synthesis, Characterization, and Crystal Structure, *Inorganic Chemistry*, 43 (4),
1458-1462, 2004
- ② Yoshida Y., Otsuka A., Saito G., Natsume S., Nishibori E., Takata M., Sakata M.,
Takahashi M., Yoko T., Conducting and magnetic properties of
1-ethyl-3-methylimidazolium (EMI) salts containing paramagnetic irons: Liquids
[EMI][MIIICl₄] (M = Fe and Fe_{0.5}Ga_{0.5}) and solid [EMI] 2[FeIICl₄], *Bulletin of the
Chemical Society of Japan*, 78 (11), 1921-1928, 2005
- ③ Masai H., Takahashi M., Tokuda Y., Yoko T., Gel-melting method for preparation of
organically modified siloxane low-melting glasses, *Journal of Materials Research*, 20 (5),
1234-1241, 2005

(9) 橋本 秀樹（課題名：光合成系の人為操作及び光反応制御）

(a) さきがけ期間中の主な成果

光合成反応を技術として利用するための第一歩として、光合成系を構成する機能性色素・タンパク質を人為的に改変し再構成すること、および極超短パルス光の位相制御（チャープ制御）を行うことにより植物のエネルギー変換機構を詳細に調べた。

① 光合成色素カロテノイドの二重結合数と光機能との関係を系統的に調べる狙いで、天然カロテノイドと同一の炭素骨格を持つが共役二重結合数が異なる一連のアナログ体を合成し、光合成細菌のカロテノイド欠損突然変異株から調整した光反応中心複合体（RC）に再構成した。その単結晶化と構造解析に成功した。RCに結合した天然のカロテノイドは過剰な光照射によるバクテリオクロフィルの三重項励起状態を除去し、光合成系を破壊から保護する。そこで、ナノ秒時間分解吸収分光測定を駆使して、三重項励起状態由来の過渡吸収信号を検出し、アナログカロテノイドが有する光保護機能およびその共役二重結合数との関係についての新しい知見を得た。

② 紅色光合成細菌から、共役二重結合鎖 $n=13$ のカロテノイドを単離生成し、カロテノイドを除去した B880 色素蛋白複合体の単量体サブユニットと再会合させて、LH1 アンテナ複合体を人為的に再構成した。再構成体と天然の LH1 複合体について分光学的手法で比較した結果、励起エネルギー効率は再構成 LH1 の方が有意に高く、2 種のカロテノイド分子周辺の静電場環境が明らかに異なっていることを示した。

③ 光合成初期過程において、集光作用の中心を担っているカロテノイド分子の光励起後の緩和過程において、従来の時間分解能では観測不能であった中間励起状態の存在を、パルス幅 20 フェムト秒を切るパルスレーザー光源を開発し分光測定に応用することで、実時間で検出することに成功した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究開始時に大阪市立大学大学院理学研究科の教授であった。現在、大学院理学研究科および複合先端研究機構の教授を兼務している。国際カロテノイド学会の理事、また日本カロテノイド研究会のジャーナル“Carotenoid Science”の編集者である。

さきがけ研究終了後、2005 年度の科研費基盤研究(A)を獲得した。その研究で、色素構造を改変した人工の光合成色素蛋白複合体の創製と、異種の光合成細菌から調整したアンテナ系色素蛋白複合体を脂質 2 分子膜にした人工合成膜の作製に成功した。さらに、光合成色素および色素蛋白複合体の超高速コヒーレント分光計測によって光励起後の超高速緩和過程およびエネルギー伝達過程に関する知見を得た。

また、2007 年度 JST・CREST の研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術（研究総括：伊澤達夫）」において、課題「光合成初期反応のナノ空間光機能制御」が採択された。この課題では、構造を改変した光合成色素蛋白超分子複合体を、ナノ空間において自在

に配列させた人工光合成膜試料を作製し、超高速時間分解コヒーレント分光および時間分解顕微分光を用いた励起エネルギー移動の実時間計測と広い周波数領域でのフォノン物性の測定を行うことによって、励起エネルギー移動メカニズムを解明すること、およびデバイスとしての利用を目指している。

2009 年度 JST・A-STEP「FS ステージシーズ顕在化」では「オキナワモズク FCP (Fucoxanthin- Chlorophyll a/c Protein) の解明とフコキサンチン生産技術への応用」が採択された。オキナワモズク盤状体の培養に成功した企業との共同研究の中で、フコキサンチンと光合成アンテナである FCP について、構造解析と分光特性を実施すると共に、FCP の大量生産技術を確立した。太陽電池材料としての展開を目指している。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 80 報、プロジェクト終了後では 65 報であった。特許は 2 件が成立した。2005 年に第 20 回中谷電子計測技術振興財団研究助成賞を受賞した。

(c) 主要論文

- ① Yoshizawa M., Aoki H., Ue M., Hashimoto H., Ultrafast relaxation kinetics of excited states in a series of mini- and macro- β -carotenes, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 67 (17), 174302, 1743021-1743028, 2003
- ② Wohlleben W., Buckup T., Hashimoto H., Cogdell R.J., Herek J.L., Motzkus M., Pump-Deplete-Probe Spectroscopy and the Puzzle of Carotenoid Dark States, *Journal of Physical Chemistry B*, 108 (10), 3320-3325, 2004
- ③ Polli D., Cerullo G., Lanzani G., De Silvestri S., Yanagi K., Hashimoto H., Cogdell R.J., Conjugation length dependence of internal conversion in carotenoids: Role of the intermediate state, *Physical Review Letters*, 93 (16), 163002-1-163002-4, 2004

2.2.3 第 3 期生 (5 名)

(1) 木塚 徳志 (課題名：原子直視法によるナノコンタクトの光機能探索)

(a) さきがけ期間中の主な成果

これまで、高分解電子顕微鏡の試料室に微細な試料制御装置と電気測定系を組み込み、原子鎖の変形、電氣的測定および観察が同時にできる独自の装置を開発してきた。本研究では、ナノ構造をその場で合成し、個別のナノ構造を選んで分光や光反応を研究できる新規な手法を開発することを目指した。

- ① 上記装置に新たにナノ構造の合成装置および、励起用レーザーと近接場顕微鏡を装着して、原子ダイナミクスを高分解能観察とともに、光学特性・力学・電気伝導特性を連続的に解析できる、ナノ構造の総合的研究手法を構築した。導入した機器全てに対し、振動を抑制し、温度、気圧および磁場の変動を極力抑える配慮をした結果、空間分解能は同構成の電子

顕微鏡を超える性能が得られた。この装置を使って以下のような成果が得られた。

- ② 光研究の素材としてのナノコンタクトのその場合成が可能になった。その中には、シリコンナノワイヤー、カーボンナノチューブ、フラーレンナノウィスカーの他、これまで合成例のないイリジウム、ロジウム、パラジウムの原子ワイヤーを含む。
- ③ フラーレン分子が繊維状に結晶配列するフラーレンナノウィスカーを加熱すると非晶質ウィスカーとなり、さらにその一本に通電すると数原子層の隔壁からなるカーボンナノカプセルに変化し、1.8eV を中心に発光することを見出した。
- ④ 透過型電子顕微鏡では電子線を直径 0.2nm まで収束できる。個別の酸化亜鉛微粒子に収束電子線をあて、近接場顕微鏡プローブを粒子に接近させ、粒子個別のカソードルミネッセンス分光を行うことに成功した。近接場顕微鏡プローブを用いたフォトルミネッセンスの個別分光についても、紫外光領域まで照射と分光ができるようになった。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は筑波大学物質工学系の助教授から同大学大学院数理物質科学研究科の助教授となり、2007 年に同研究科の教授に昇任した。

2006 年度の科研費基盤研究(B)および 2007 年度の挑戦的萌芽研究を獲得した。

本さきがけ研究で開発した、「原子を観て、操り、測る」複合機能型電子顕微鏡を用いて、新たなナノ構造の合成・観察・物性評価を続けている。その中で、ナノカーボンの機能性を利用しシリコン系回路に変わる全炭素構成回路への応用を見据えて、グラフェン、C60、カーボンカプセルやカーボンナノチューブなどの炭素分子を合成し、その分子一つとナノチップ電極だけで構成される素子を作製して、それぞれの炭素分子の構造と電気特性、光学特性、機械特性などの直接計測に力を入れている。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 41 報、プロジェクト終了後では 29 報であった。電子顕微鏡の観察像について 2004 年の Int. Metallographic Contest, Electron Microscopy- Transmission and Analytical 部門の 2 位、2007 年の同部門の 3 位など 11 件の多くの受賞がある。

(c) 主要論文

- ① Kizuka T., Takatani Y., Asaka K., Yoshizaki R., Measurements of the atomistic mechanics of single crystalline silicon wires of nanometer width, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 72 (3), 035333, 1-6, 2005
- ② Ni L., Kuroda K., Zhou L.-P., Kizuka T., Ohta K., Matsuishi K., Nakamura J., Kinetic study of carbon nanotube synthesis over Mo/Co/MgO catalysts, *Carbon*, 44 (11), 2265-2272, 2006
- ③ Kizuka T., Atomic configuration and mechanical and electrical properties of stable gold wires of single-atom width, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials*

(2) 金原 数（課題名：インテリジェント光駆動分子機械の構築）

(a) さきがけ期間中の主な成果

生体分子機械の動作に倣う複雑な動きが可能な合成分子機械を構築するために、光を動力源として複数の可動部品を連動させて制御する光駆動分子機械を創製し、さらには人工分子機械と生体分子機械を融合したハイブリッド分子機械を創製することを目指した。

① フェロセンを回転軸とする光駆動分子ペンチを作製した。ペンチの把手の間を繋ぐアゾベンゼン分子は、紫外光（350nm）／可視光（>420nm）の照射により可逆的な異性化反応を起こし、これに駆動されて刃先に導入した2枚の亜鉛ポルフィリン間の間隔が変化する。この動きによる、両ポルフィリン分子間に配位結合によって挟まれたビスコキノリン軸状分子のコンフォメーションの変化を検出することに成功した。

② 生体内の酵素活性の制御機構に倣い、フェロセンの回転運動を可逆的に制御できる「光駆動オートロックシステム」を合成した。ピリジン鍵分子と2枚の亜鉛ポルフィリンからなるホスト分子との間で配位結合するロック状態、および鍵分子が外れて亜鉛ポルフィリン対とアニリン分子対同士が配位結合するロック解除状態を、紫外光／可視光の照射によって、可逆的に制御することができた。

③ 大腸菌由来のシャペロニン GroEL は、内部に円筒形の空孔を有するタンパク質からなり、変性タンパク質を取り込んでリフォールディングを助ける機能がある。その機能の機械的な動きを、ATP に代えて光で制御するために、GroEL の空孔付近に光応答性の複数のアゾベンゼン部位を導入した。アゾベンゼンは紫外光／可視光の照射により可逆的にシス・トランス異性体変換を起こすが、ATP の存在下で、且つシス体の場合にのみ変成タンパク質の放出が起こることを見出した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は東京大学大学院工学系研究科講師であった。その後同研究科の助教授を経て、2008 年に東北大学多元物質科学研究所の教授に昇任した。さきがけ研究終了後は、2007 年度および 2009 年度の科研費基盤研究(B)、特定領域研究および 2009 年度の若手研究(S)を獲得した。

2007 年度の基盤研究(B)では、医療やバイオテクノロジーなどで注目される、生体分子と様々な物質を結びつける「分子糊」を開発した。生体分子中に多く存在するオキシアニオン性官能基に注目し、超分子的に相互作用するグアジニウムイオンを複数個含むデンドリマーを設計・合成し、2 種の生体分子を結びつける分子糊としての機能を検証した。がん細胞にピンポイントで薬剤伝達する DDS への応用が見込める。

2009 年度の特定領域研究では、触媒機能を持つ遷移金属錯体の配位子にフォトクロミック部位を導入し、触媒部位に機械的な動きを与えることで反応選択性を制御し、通常の触媒

反応では得られない特異な物質を得ることを目指している。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 26 報、プロジェクト終了後では 19 報であった。2005 年 American Chemical Society Arthur K. Doolittle Award、2007 年の文部科学大臣表彰 科学技術賞（若手科学者賞）など 3 件を受賞した。

(c) 主要論文

- ① Kinbara K., Design of resolving agents based on crystal engineering, *Synlett*, (5), 732-743, 2005
- ② Muraoka T., Kinbara K., Aida T., Mechanical twisting of a guest by a photoresponsive host, *Nature*, 440 (7083), 512-515, 2006
- ③ Muramatsu S., Kinbara K., Taguchi H., Ishii N., Aida T., Semibiological molecular machine with an implemented "AND" logic gate for regulation of protein folding, *Journal of the American Chemical Society*, 128 (11), 3764-3769, 2006

(3) 周 豪慎（課題名：光技術・ナノ構造・認識分子の融合による環境診断素子の開発）

(a) さきがけ期間中の主な成果

環境汚染物質の検出のために、どこでも手軽に、実時間的に使える技術が求められている。本研究は、光導波路の上にナノポーラス構造材料と分子認識技術を組み合わせて分子センサーを構成し、光によって極低濃度の有害化学物質を選択的かつ高感度に検出できる小型環境診断素子を作り出すことを目的とした。

- ① 検出感度を高めるために、センサー表面に SiO_2 または TiO_2 のナノ構造膜を形成して比表面積を高めた。界面活性剤やブロックコポリマーなどの自己組織的なミセル集合体を分子テンプレートとして用いて、光導波路基板上面に無機・有機ナノ複合薄膜を作製した。分子テンプレートを除去すると、約 10nm 径の細孔が 3 次元的に規則正しく配列する比表面積約 $100\text{m}^2/\text{g}$ のナノ構造膜（厚さ 10~100nm）が形成された。
- ② 光導波路はガラス基板の表面にスズを浅く拡散させ屈折率を高めて導波層としている。この上に TiO_2 のスパッターによってナノメートル高さのステップを追加すると、導波路中の光は電波（TE）と磁波（TM）が空間的に分離し、相互の干渉の効果で感度の向上が図れる。このステップの表面にさらに、上記のナノ構造膜をコーティングして比表面積を高めたところ、90ppb のアンモニアを検出できる感度を得られた。
- ③ 特定の化学物質に対する認識分子をナノ細孔に導入した。導波層表面近傍に存在するエバネッセント光がナノ細孔中の認識分子と相互作用すると、導波層の伝搬光強度が変化する。この方式のホルムアルデヒドセンサーを試作し 100ppb の高感度を示した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間は産業技術総合研究所エネルギー研究部門の主任研究員であった。現在、

産総研・エネルギー技術研究部門の研究グループ長として Li イオン二次電池開発の中心者として活躍するとともに、東京大学と三菱自動車工業との共同研究のために設置された「先進電池材料技術社会連携講座」の特任教授を兼務している。

本研究の基礎となったナノポーラス構造を Li イオン電池の負極に適用して、スーパーキャパシタ特性を付与しエネルギー密度を 2 桁上げることに成功した。その後も Li イオン電池の高性能化に向けた開発を展開している。2007 年より始まった NEDO の「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」プロジェクトでは、課題「ナノ界面制御による高容量電極の研究開発」を実施している。このなかで、Li イオン電池エネルギー密度のさらなる向上を目指し、正極活物質をナノワイヤなどのナノ構造体として大きな表面疑似容量を発現させるために、様々な材料と合成法について探索を行っている。最近、電解液中に隔壁を置く新型の Li-空気電池および Li-Cu 電池を開発して世界的に注目されている。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 137 報、プロジェクト終了後では 66 報であった。下記主要論文で被引用件数の多いことが特筆される。特許は 7 件が成立した。

(c) 主要論文

- ① Li D., Zhou H., Honma I., Design and synthesis of self-ordered mesoporous nanocomposite through controlled in-situ crystallization, *Nature Materials*, 3 (1), 65-71, 2004
- ② Hosono E., Fujihara S., Honma I., Zhou H., Superhydrophobic perpendicular nanopin film by the bottom-up process, *Journal of the American Chemical Society*, 127 (39), 13458-13459, 2005
- ③ Hosono E., Fujihara S., Honma I., Zhou H., The fabrication of an upright-standing zinc oxide nanosheet for use in dye-sensitized solar cells, *Advanced Materials*, 17 (17), 2091-2094, 2005

(4) 高坂 繁弘（課題名：テラヘルツ繰り返し光安定外部同期型パルス光源の開発）

(a) さきがけ期間中の主な成果

従来の超短パルス光源は、繰り返し周波数がキロヘルツからメガヘルツ程度に限られていたため、用途は主に単一の光パルスを用いる応用に限られていた。本研究では、テラヘルツ繰り返しのパルス光源を開発し、周期的な励起の新規物性応用や将来の高速光通信用基本光源など新しい応用の基盤とすることを目指した。光パルス圧縮ファイバーと外部同期ビート光源を組み合わせる構成を採り、この二つの要素技術を開発した。

- ① パルス圧縮ファイバーの方式として、CPF (comb-like profiled fiber) を選んだ。CPF は高非線形ファイバーとシングルモードファイバーを交互に接続して構成され、製造が容易で高繰り返しパルス発生に有利などの特徴がある。しかし、実績は、繰り返し周波数 160GHz、

パルス幅 730fs のパルス列発生までで、理論限界やテラヘルツ域の繰り返し周波数のための設計方法は未知であった。そこで、高品質パルス列の発生を可能とする CPF の長手方向の分散特性を理論解析によって求め、理論的には >60dB の S/N 比が可能であることを明らかにした。この分散特性を実現するための CPF の構成を決定し、試作し、1THz の繰り返し、パルス幅 97fs、S/N 比 >10dB の高品質パルス列の発生に成功した。

② 2 台の半導体レーザーを用いてテラヘルツ繰り返しビート光を作り、外部参照信号に同期した光信号を発生する技術を開発した。タイミングジッタは 27fs と小さく優れた同期性能を示した。試作したパルス圧縮ファイバーと同期技術を組み合わせることによって、160GHz 繰り返し外部同期型パルスの発生を確認した。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究期間中は古河電気工業（株）ファイナルフォトニクス研究所の研究員であった。現在は、同研究所の主査を務める。

近未来の 100Gbit/s を超える超大容量・超高速光通信に向けた全光信号処理技術の開発の最前線で活躍している。成果は、国内外のコンファレンスに発表している。開発の対象の例は、光時分割多重・多重分離分割(OTDM-DEMUX)の光信号処理やテラヘルツ分光に必要となる、動作が安定で、参照クロックに同期したサブピコ秒程度のパルス幅を持つ光パルス光源である。本研究で採用した CPF パルス圧縮器と光フィードバックによる位相同期技術を組み合わせて、C/L バンドで波長変換でき、かつ外部参照クロックに同期したピコ秒光パルス発生法を提案し、動作を確認した。また、ゼロ分散・分散フラット偏波保持の高非線形ファイバーを試作し、C バンド全域における偏波無依存・任意波長の波長変換を可能にした。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 6 報、プロジェクト終了後では 1 報であった。特許は 3 件が成立している。

(c) 主要論文

- ① Ozeki Y., Takasaka S., Hiroishi J., Sugizaki R., Yagi T., Sakano M., Namiki S., Generation of 1 THz repetition rate, 97 fs optical pulse train based on comb-like profiled fibre, *Electronics Letters*, 41 (19), 1048-1050, (2005)
- ② Ozeki Y., Takasaka S., Inoue T., Igarashi K., Hiroishi J., Sugizaki R., Sakano M., Namiki S., Nearly exact optical beat-to-soliton train conversion based on comb-like profiled fiber emulating a polynomial dispersion decreasing profile, *IEEE Photonics Technology Letters*, 17 (8), 1698-1700, 2005
- ③ Takasaka S., Ozeki Y., Namiki S., Sakano M., External synchronization of 160-GHz optical beat signal by optical phase-locked loop technique, *IEEE Photonics Technology Letters*, 18 (23), 2457-2459, 2006

(5) Hwang Harold Y. (課題名：量子閉じこめモット絶縁体における強相関系の光学構築)

(a) さきがけ期間中の主な成果

異種ペロブスカイト型酸化物の間で急峻なヘテロエピ界面を形成すると、従来の材料にな
い物性上、応用上の可能性が生まれる。本研究は、ペロブスカイト酸化物ヘテロ構造材料、
および接合特異的な現象を利用する光学的手法を開発することを目的とした。

① SrTiO_3 の物性は酸素の化学量論からのずれに極めて敏感であり、酸素空孔濃度に依存
して、誘電体、ドーパされた半導体、金属および超伝導体へと変化する。パルスレーザー堆
積法 (PLD) によって $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ のホモエピタキシャル成長を行い、成長機構と電気的性質
を調べた。永続する 2 次元の逐次積層の条件を見出し、成長時の酸素分圧の制御によって酸
素欠損を安定化させ絶縁体金属転移を系統的に引き起こすこと、および 1nm 以下の急峻さ
で酸素濃度分布が変化する $\text{SrTiO}_3/\text{SrTiO}_{3-\delta}$ 超格子を形成することができた。

② 電荷中性の SrTiO_3 と (001) 方位に極性を持つ LaAlO_3 との絶縁体界面に生じる極性の
不連続は極性の方向に依存して劇的に変化する。n 型の界面では電子の再分布によって、2
つの絶縁体に挟まれた高移動度金属状態を創り出した。一方、p 型の界面では原子の再配列
を引き起こす。(110) 方位では界面準位がないので、ヘテロエピタキシャル接合は絶縁体の
接合になる。アニールプロセスによって (110) 面を原子層的に平坦化して、2 次元逐次積
層によるホモ・ヘテロエピタキシャル成長を実現した。

③ Nb:SrTiO_3 の上に $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{O}_3$ 強磁性層を積層するとショットキー障壁が形成される。Tc
の高い上記強磁性電極では障壁高さに磁場依存性は生じないが、電極を $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{O}_{3-\delta}$ として
金属-絶縁体転移組成に近づけると、接合の空乏層厚みが磁場に依存して変化し、大きな誘
電率磁場依存性を示すのを発見した。この現象はモット絶縁体/バンド絶縁体界面の探針と
なるだけでなく、磁場に敏感な新しい電子デバイスの可能性を示唆するものである。

(b) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究は東京大学大学院新領域創製科学研究科の助教授として実施した。2010 年
に同研究科の教授となり、現在はスタンフォード大学の教授、理化学研究所のチームリーダ
ーおよび東京大学の特任教授を兼任している。

科研費は 2004 年から 5 年間の特定領域研究、2009 年度から 3 年間の基盤研究(B)、2 つの
特別研究員奨励費を獲得した。

2006 年度から再び、さきがけ研究領域「界面の構造と制御 (研究総括：川合眞紀)」にお
いて課題「静電エネルギーの発散を利用した人工界面相の創成と制御」を実施し、「光と制
御」における研究を発展させた。その中で、高移動度の 2 次元超伝導を示す δ ドープ層を
含むヘテロ構造の形成、遷移金属酸化物系で初めての正孔のモジュレーションドーピングや 2
種のペロブスカイトヘテロ構造による back-to-back ホットエレクトロントランジスターの
実現など、新規なデバイスに繋がる成果を挙げた。

2009 年度から開始された、最先端研究開発支援プログラムの「強相関量子科学 (中心研

究者：十倉好紀)」において、強相関量子伝導研究チームのチームリーダーになっている。酸化物ヘテロ構造界面において十分高い移動度が得られるようになったことから、リソグラフィで作製する良く定義された微細構造を用いて d 電子のメゾスコピック効果を調べることを目的としている。

欧文誌への論文発表はプロジェクト開始から現在までで 59 報、プロジェクト終了後は 46 報であった。下記主要論文で被引用件数の極めて多いことが特筆される。特許は 2 件が成立した。受賞は 2005 年 Material Research Society Outstanding Young Investigator Award と 2008 年日本 IBM 賞を受けた。

(c) 主要論文

- ① Ohtomo A., Hwang H.Y., A high-mobility electron gas at the LaAlO₃/SrTiO₃ heterointerface, *Nature*, 427 (6973), 423-426, 2004
- ② Nakagawa N., Hwang H.Y., Muller D.A., Why some interfaces cannot be sharp, *Nature Materials*, 5 (3), 204-209, 2006
- ③ Muller D.A., Nakagawa N., Ohtomo A., Grazul J.L., Hwang H.Y., Atomic-scale imaging of nanoengineered oxygen vacancy profiles in SrTiO₃, *Nature*, 430 (7000), 657-661, 2004

2.3 第 2 章のまとめ

さきがけ期間中、及び終了後から追跡調査時点までの、職位、研究助成金、論文発表件数、特許出願件数などを比較して、さきがけ研究採択時に期待された通りの発展を示していることが確認された。

職位については、さきがけ開始時には助教～講師、准教授、教授の構成が 4,12,1 であったのが、調査時点では准教授が 4 名、教授は国研の研究者が兼務の教授になったのを含め 17 名となった。本さきがけ研究の出身者 22 名中の企業研究者の 1 名を除く全員の 21 名が准教授以上になっている。

研究助成金の獲得については、半数が 1 億円以上の研究費を獲得し、その中の 7 名が 2 億円を超えている。JST の CREST の研究代表者に 3 名、ERATO の研究総括に 1 名になった。また、最先端研究開発支援プログラムにも 3 名（東 正樹、上妻 幹男、鳥本 司）が採択された。これから分かるように、さきがけ出身者は順調に研究を発展させ社会からの期待も大きいと言える。

発表論文数は分野により事情が異なるので一括りに比較するのは無理があるが、論文数をさきがけ終了後とさきがけ開始時からの比をとると、多くの研究者が 70%を超えていて、終了後も活発な発表を行っていることが窺える。主要論文に挙げた論文の被引用件数が 3

報の内一報でも 50 件以上引用された研究者は 16 名、100 件以上では 9 名、200 件以上では 4 名である。三期のファン (Hwang Harold Y.) の一報 (A high-mobility electron gas at the LaAlO₃/SrTiO₃ heterointerface, *Nature*, 427 (6973), 423-426, 2004) は 600 を超える引用がなされた。総じて、本さきがけ研究者の成果は高い評価を受けていると言える。

その成果は、基礎研究としての高い評価の他に、着実に応用・実用化に向けた展開をしているもの、さらに現在は極めて基礎的な研究であるが、成功すれば文字通り社会のパラダイムの変化をも起こすような大きな波及効果が期待されるものなど、バラエティに富んでいる。なお、数字データでは地味な研究者も、採択の際の独創性ある提案を踏まえて着実に研究を進めていることが確認でき、今後の発展が期待された。

第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果について、詳しく知るために、データベース調査等で得られた、原著論文、特許、および受賞等のデータを基に、研究総括と討議して、本領域の代表事例として、研究課題4件を選定した。選定した代表事例について、インタビュー調査や論文調査等により、その内容をまとめた。

3.1 研究課題1 (強相関遷移金属酸化物における光機能の探索)

研究者 東 正樹

3.1.1 研究成果の発展状況

既に第二章でも記述したように、プロジェクト期間中は、高圧下でのみ成長可能な3d 遷移金属酸化物をシステムティックに作製し、その新たな物質群の物性を解明した。中でも、 $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$ は強磁性と強誘電性が共存する特異な物質である事を発見し、その物性を解明した。

また、2011年から4年間のJSPSの最先端・次世代研究開発支援プログラムの研究も始めた。 Bi/Pb-3d 遷移金属ダブルペロブスカイト強磁性・強誘電材料については旭硝子財団からの助成を受けた。また、企業との共同研究も行った。

科研費による研究の中で、ペロブスカイト BiFeO_3 と BiCoO_3 の固溶体を作製し、圧電特性の増大など特異な現象を見出した。また、 BiNiO_3 の Bi を一部 La イオンで置換した $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ において、昇温によって Bi^{5+} と Ni^{2+} の間で電荷移動が起こり、体積が収縮する「負の熱膨張」が起こることを発見したことは大きな発展的な成果である。

3.1.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

この分野の科学技術の進歩へ貢献した重要な論文は以下のように2件あげられる。それぞれに対して要約を付けた。

(1) Designed ferromagnetic, ferroelectric $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$

Journal of the American Chemical Society Vol 127, 24, PP8889-8892 Jun22, 2005

被引用数 135 (Scopus 2012 /2/15)

Azuma, M.a b , Takata, K.a , Saito, T.a , Ishiwata, S.a c , Shimakawa, Y.a , Takano, M.a

- a Institute for Chemical Research, Kyoto University, Uji, Kyoto-fu 611-0011, Japan
- b PRESTO, Japan Science and Technology Agency (JST), Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan
- c Department of Chemistry, Princeton University, Princeton, NJ 08544, United States

新しく材料設計した強磁性・強誘電体化合物である $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$ を高圧合成方法 (6 GPa) で作製した。放射光 X 線粉末回折技術を用いた結果、結晶構造は Ni^{2+} と Mn^{4+} イオンが岩塩型に並んだ、大きく歪んだダブルペロブスカイト構造であった。 Bi^{3+} イオンの $6s^2$ 孤立電子対の存在と Bi-O 共有結合により、強誘電特性 (臨界温度は 485K) が現れる。一方、 $-\text{Ni}^{2+}\text{-O-Mn}^{4+}\text{-O-Ni}^{2+}$ 磁気結合により、強磁性特性 (臨界温度は 140K) を発現する。この単純な材料設計方法、即ち、 e_g 電子がある磁性元素 (Ni^{2+}) と e_g 電子がない磁性元素 (Mn^{4+}) を規則配列する方法は、他の材料系 ($\text{Bi}_2\text{M}^{2+}\text{M}'^{4+}\text{O}_6$ と $\text{Pb}_2\text{M}^{3+}\text{M}'^{5+}\text{O}_6$) に適用して、新規の強磁性体・強誘電体の研究に繋がる。

(2) Neutron powder diffraction study on the crystal and magnetic structures of BiCoO_3

Chemistry of Materials, Vol.18, 3, pp798-803, 2006

Belik, A.A.^a, Iikubo, S.^b, Kodama, K.^b, Igawa, N.^b, Shamoto, S.-I.^b, Niitaka, S.^c, Azuma, M.^{c d}, Shimakawa, Y.^c, Takano, M.^c, Izumi, F.^e, Takayama-Muromachi, E.^e

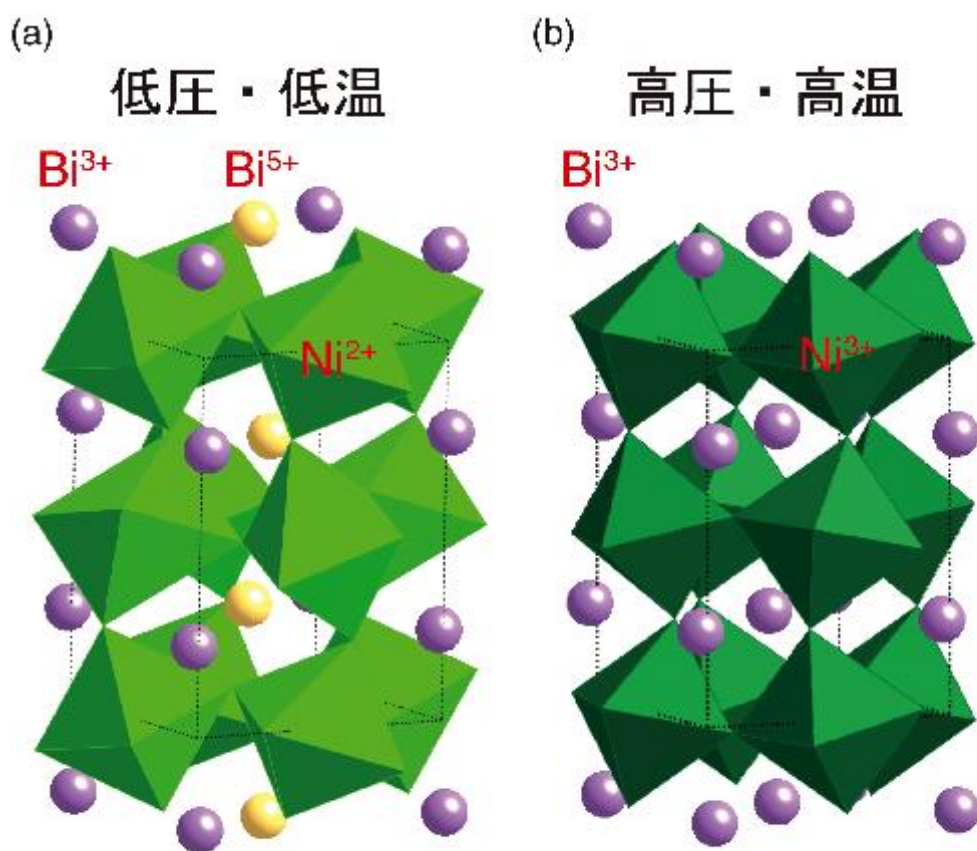
被引用数 87 (Scopus 2012 /2/15)

新しいペロブスカイト化合物 BiCoO_3 の結晶構造および磁性構造を、中性子回折データに基づく Rietveld 法で決定した。その結果、 BiCoO_3 (空間群 $P4mm$; 室温で $a = 3.72937(7) \text{ \AA}$, $c = 4.72382(15) \text{ \AA}$; $c/a = 1.267$) は全温度領域で BaTiO_3 , PbTiO_3 と同形の極性構造であった。 BiCoO_3 はまた、470K のネール温度を持つ反強磁性絶縁体である。 Co^{3+} イオンの磁気モーメントが c 軸方向には強磁性的に、 ab 面内では反強磁性的に配列する、C 型反強磁性構造を持つ。5K, 300K における磁気モーメントは、それぞれ、 $3.24(2)\mu\text{B}$ と $2.93(2)\mu\text{B}$ であった。

さらに、最近の特筆すべき重要な研究成果は、『巨大な負の熱膨張を示すペロブスカイト酸化物 $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ 』である。この負の熱膨張のメカニズムを要約すると以下のものである。(図 3-1 および工業材料 (2012 年 1 月号 p 2 参照))

母物質である BiNiO_3 は、さきがけ研究で発見したペロブスカイト化合物である。この物質はビスマスの半数が 3 価、残りの半数が 5 価に電荷不均化し、ニッケルが 2 価の特徴的な酸化状態を持つ。一方、ランタンでビスマスを一部置換した $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ では、電荷不均化が抑制され、 Bi^{5+} と Ni^{2+} の間で電荷移動が起こる。

たとえば、 $x=0.05$ では、室温では BiNiO_3 と同じくビスマスが電荷不均化していてニッケルは 2 価だが、温度を上げるとビスマスとニッケルの間で電荷移動が起こり、ニッケルが 3 価になる。このため、ペロブスカイト構造の骨格を作る Ni-O 結合は収縮する。すなわち、高温相の方が体積が小さい。また、低温相と高温相が互いに分率を変化させながら共存するので、昇温に伴ってなだらかに体積が減少する、負の熱膨張が起こる。



(図 3-1) 出典 261 SPring-8 Information/Vol.16 No.4 NOVEMBER 2011

BiNiO_3 の低圧・低温相 (a) と高圧・高温相 (b) の結晶構造。

3.1.3 研究成果の応用に向けての発展状況

『巨大な負の熱膨張を示すペロブスカイト酸化物 $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ 』の応用分野としては以下のようなものが期待されている。

高い位置精度が要求される光学機器や半導体露光装置では、構造材の熱膨張が問題になっている。広範囲に使われている金属やプラスチックは正の熱膨張率を持つので、負の熱膨張物質と組み合わせることで、熱に対して見かけ上ゼロの熱膨張率を有する材料が得られる。こうした材料は、上記の光学機器や半導体露光装置などへの応用が考えられる。

その他、最近の大きな潮流として、新規巨大圧電材料の創生が望まれている。その中で、本研究者（東教授）は文科省の元素戦略プロジェクト『圧電フロンティア開拓のためのバリウム系新規巨大圧電材料の創生』（プロジェクト代表：和田智志 山梨大学医学工学総合研究部 教授）に参加している。本プロジェクトでは、現在幅広く用いられている鉛系圧電材料を凌駕する圧電特性を有し、かつ環境に有害な元素やシリコンプロセスに不適応な元素を含まない、バリウム系新規圧電材料の創生を目標にしている。圧電体は電気エネルギーを機械的な力に変換する重要な材料で、多くの電子機器や医療機器に搭載され、今後も MEMS 等幅広い分野での応用が期待されているが、現在は環境に有害な鉛を主成分としたものが主流であり、バリウム系新規圧電材料への期待は大きい。

このプロジェクトでは、従来トレードオフの関係にあった圧電定数とキュリー温度の両方を上昇させ、これまでいかなる材料も到達できなかった“圧電フロンティア領域”を開拓するものであり、材料科学に革命を起こすとともに環境問題の解決に大きく貢献することを目指している。

3.1.4 その他

東教授からは、「研究総括であった花村榮一総括の指導および領域アドバイザーの先生方のコメントは大変に有益であった。」とのコメントをいただいた。

3.2 研究課題 2 （半導体をベースとした磁気光学結晶の開発とデバイス応用）

研究者名 田中 雅明

3.2.1 研究成果の発展状況

プロジェクト期間中は主に半導体をベースにした磁気光学分野で成果を上げた。例えば、I I I - V 族化合物半導体 GaAs 結晶中に、サイズを制御しながら強磁性 MnAs 微結晶を埋め込んだ系や、GaAs: MnAs グラニューラー層を GaAs/AlAs 多層膜ブラッグ反射鏡で挟む多層膜を作製し、室温で大きなファラデー効果や強大なカー回転などの磁気光学効果を発現さ

せる事に成功した。

その後は、本研究者は半導体と磁性体の融合構造やナノ構造を用いた電子伝導現象とデバイスの研究に重点を移してしているが、一方で当時の協力研究者（博士課程大学院生）であった清水大雅氏（現在 東京農工大学 准教授）は磁気光学効果を用いたデバイスの研究で成果を挙げている。研究内容の例は光と磁石の力を組み合わせ、光の強弱信号のメモリの実現や、信号の干渉による符号誤りのない低消費電力光情報信号処理と光ファイバ通信への応用を目指している。例えば半導体アクティブ導波路と隣接する部分に強磁性材料（Fe または MnAs）を導入することで、半導体レーザと一体集積化が可能な「半導体導波路型光アイソレータ」を世界で初めて実現した。将来、光通信の大容量化、高機能化、部品点数の低減、光信号処理とそれらの低消費電力化等に大きく貢献するキーテクノロジーとして期待されると共に、様々な分野への応用も期待されている。

現在、本研究者は、スピンエレクトロニクスの分野で、以下に示すように基礎研究（科学技術）および応用研究の両面で顕著な成果を上げている。

3.2.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

強磁性半導体のバンド構造の研究で顕著な成果を上げたものとしては、下記の論文がある。

◇ S. Ohya, K. Takata, and M. Tanaka:

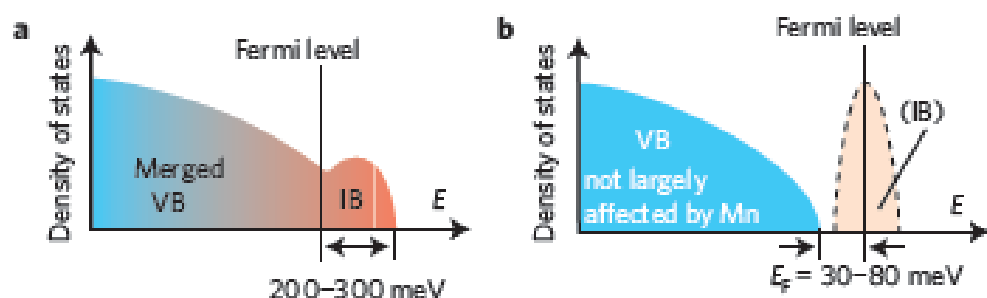
Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs:
Nature Physics Vol 7, pp342-347, April 2011

被引用件数 16 件（SCOPUS を用いた調査）

◇ S. Ohya, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka:

Valence-Band Structure of the Ferromagnetic Semiconductor GaMnAs
Studied by Spin-Dependent Resonant Tunneling spectroscopy :
Physical Review Letters, 23 April, 2010

被引用件数 11 件



(図 3-2) モデルAとモデルBの説明

これらの論文が発行されるまでは、半導体強磁性物質 **GaMnAs** の強磁性の起源に関しては(図 3-2)に示すように2つの仮説があった。

①(モデルA): VB(価電子帯)にMnのIB(不純物エネルギー帯)がマージして連続して繋がっており、フェルミ準位はその中間領域(VB内)に存在している。したがって、VBは大きくスピン分裂する。

②(モデルB): Mn ドーピング(6~15%)によってVBは大きく影響を受けることはなく、スピン分裂も小さい。IBは禁制帯中に存在し、フェルミ準位はIB中にある。

精密エッチング技術と、共鳴トンネルスペクトロスコピー測定の結果、②(モデルB)が正しいとの結論を得た。

さらに、この分野の科学技術の進歩で重要な論文は下記の3件である。

◇ S. Yada, R. Okazaki, S. Ohya and M. Tanaka:

Single-Crystalline Ferromagnetic Alloy Semiconductor $\text{Ge}(1-x)\text{Mn}(x)$ Grown on Ge(111)

Applied Physics Express 3, 123002 (2010).

被引用件数 2件

(要約) Ge(111)基板上に均一な混晶の強磁性半導体 $\text{Ge}(1-x)\text{Mn}(x)$ 層を成長させることに成功した。これまで **Ge-Mn** 系は相分離が起りやすく、Mn 分布が均一の混晶を成長させることは不可能であったが、(111)基板を用いて成長条件を最適化することにより、初めて均一な混晶の強磁性半導体 $\text{Ge}(1-x)\text{Mn}(x)$ を成長させることに成功した。この強磁性半導体材料系はIV族のGeを基本構成要素として含むので、現在集積回路で主流のIV族半導体Siを用いたCMOSデバイス技術とも整合性が良い。さらに、GeはSi-CMOSの高速化にも関連するので、将来的には $\text{Ge}(1-x)\text{Mn}(x)$ はスピントロニクス分野における新規デバイスの創出に繋がる可能性が高い。

この論文は、JJAP/APEX Editors' Choice（注目論文）に選ばれ、さらに 2011 年応用物理学会論文賞「応用物理学会論文奨励賞」を受賞した。

◇P. N. Hai, S. Yada, and M. Tanaka

Phase decomposition diagram of magnetic alloy semiconductor
Journal of Applied Physics 109, 073919 (2011).

（要約）熱力学的モデルに基づいて解析し作成した(GaMn)As 系の相図を用い、さらに相分離技術（spinodal decomposition）を利用することにより、MnAs ナノ粒子を GaMnAs 層から分離し格子形状に配列することに成功した。この技術によって、将来的には例えばナノサイズの受動的なスピンドバイスのみならず、単電子スピントランジスターなどの能動デバイスも実現可能となることが期待される。

◇P. N. Hai, S. Ohya, and M. Tanaka

Long spin-relaxation time in a single metal nanoparticle:
Nature Nanotechnology , pp.593-596, 4 July (2010)

（要約）GaAs 領域中に強磁性体金属である MnAs のナノ粒子を形成し、スピン緩和時間（測定温度：2 K）を測定した。その結果、金属的ナノ粒子として世界最長の $10 \mu\text{s}$ を得ることができた。このように長いスピン緩和時間が得られた理由としては、急峻な界面を形成できるエピタキシャル成長技術を用い、かつナノ粒子の表面汚染を抑制したこと、およびナノスケール微粒子による量子サイズ効果が挙げられる。長いスピン緩和時間は、将来的にナノスケールのスピントロニクス素子に極めて有用である。

3.2.3 研究成果の応用に向けての発展状況

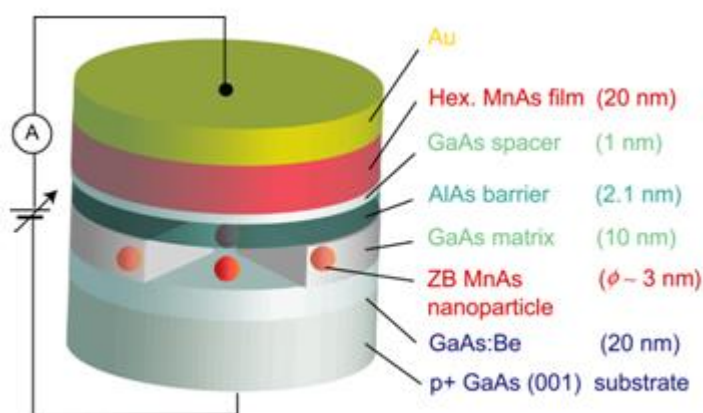
将来の応用に結びつく研究成果を記述した論文は下記のようなものである。

◇P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka, S. E. Barnes, and S. Maekawa:

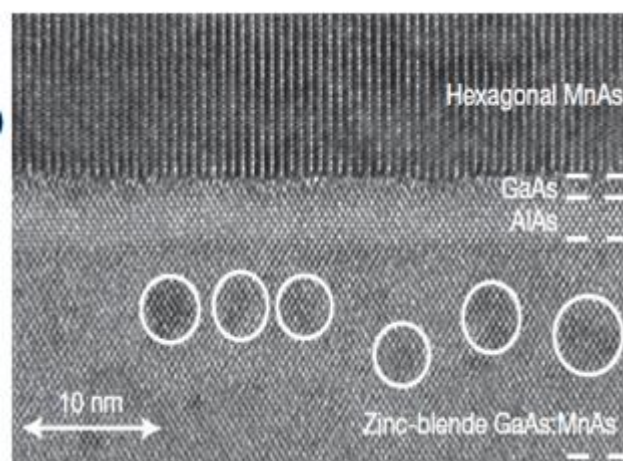
Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions,
Nature Vol 458, pp. 489-492, 26 March 2009

被引用件数 33 件

(図 3 - 3) と (図 3 - 4) に上記論文に関連する基本構造を示す。



(図 3 - 3) (出典 田中雅明先生のホームページから)



(図 3 - 4) (出典 田中雅明先生のホームページから)

強磁性体に静磁場を印可して磁壁を動かすと、系のゼーマンエネルギーが電氣的エネルギーに転化され起電力が生じるという理論予測があったが、上記の論文で実験的に確認された。すなわち、ZB-MnAs 微粒子を含むトンネル接合で静磁場による起電力効果が、100,000%以上の巨大な磁気抵抗効果とともに観測されている。

(参考情報: 田中雅明、応用物理学会誌 総合報告 半導体におけるスピン生成 第78巻、第3号、2009年、p 213)

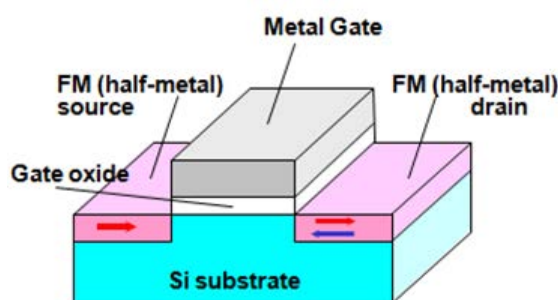
測定条件が3 Kであることを考えると、この巨大磁気抵抗効果が直ちには実用デバイスには繋がらないが、今後の研究の進展が期待される。

新デバイスの提案に関しては下記の論文が重要である。

◇M. Tanaka and S. Sugahara:

MOS-Based Spin Devices for Reconfigurable Logic (invited paper)
IEEE Trans on Electron Devices, Vol.54, No.5, pp. 961-976, May 2007.

この論文はコンセプト提案(図3-5)を中心にした論文であるが、その後も2007年に開始されたCREST(渡辺領域:次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究:研究代表:菅原聡「ハーフメタル強磁性体を用いたスピン機能MOSFETの開発」東大グループ長 田中雅明)で研究が進行している。



(図3-5) Spin-MOSFETの構造概念図

(出典 田中雅明先生のホームページ)

具体的な特徴としては、下記のようなものである。(参考文献:表面科学 Vol 32, No.3, pp120-127, 特集「スピントロニクスと表面科学」)

少ない素子数で、不揮発性ロジックが実現できる特徴がある。基本構造は通常のSi-MOSFETと同様であるが、ソースおよびドレインには導電性の強磁性体を用い、ソース・ドレインとSiチャンネルとのコンタクトはショットキー接合とする。動作原理は、TMRと同様のスピン依存伝導による。すなわちスピン偏極されたキャリアが、ソースからチャンネルに注入され、スピンを保持したままドレインに到達すると、磁化が平行の場合にはソース・ドレイン間の抵抗が小さく、反平行の場合には抵抗が大きくなる。

このデバイスの特徴の一つに、ソース・ドレインの磁化状態(平行磁化か反平行磁化か)によってドレイン電流を大きく変えることができる。これは既存のシリコン集積回路に整合性の良い出力可変トランジスタという概念を実現できる特性を備えるものである。

3.2.4 その他

スピンを用いたエレクトロニクスデバイスには、① 不揮発性、② 低消費電力、③ 書き換え可能な柔軟性、④光の非相反性、⑤ スピンの量子性など多様な特徴がある。したがって、今後も新しい物質や現象が発見され、意外性に富む研究が出現する可能性が高い。しかしその一方で、関連する領域も幅広く基礎研究と応用とが密接に関係するので社会に貢献する技術に育てあげるには、様々な分野との協力が必要である。(参考文献「(総合報告) 半導体におけるスピン生成—半導体スピントロニクス of 最近の進展—」応用物理 78 巻第 3 号, pp.205-216 (2009))

3.3 研究課題 3 (シュタルク・アトムチップによるコヒーレント原子操作)

研究者名 香取 秀俊

3.3.1 研究成果の発展状況

第 2 章で記述したように、さきがけ研究終了後、2005 年度 JST・CREST の研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出 (研究総括：山本喜久)」において、課題「極低温原子を用いる量子計測法の開拓」の研究代表者となった。当初上記「シュタルクアトムチップ」と「光格子時計」の双方を目標にしたが、開始直後から光格子時計は世界的な激しい競争の対象となり、さらに 2006 年の国際度量衡委員会において「秒の二次表現」に採択され注目を集めた。そこで光格子時計の研究に集中して、世界最高の 18 桁の精度をもつ原子時計を可能にする基幹技術の確立を目指した。プロジェクト終了時点で、2 台の光格子時計の比較の安定度は平均時間 10 分で 1.6×10^{-17} に達し、従来の「単一イオン時計」に比べて、安定度において一桁の優位性を実証した。

2009 年度に始まった最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プログラム (中心研究者：山本喜久)」では、量子標準サブグループのリーダーになった。このプロジェクトでは産総研・NICT・東大の 3 拠点を結ぶ光時計ネットワークの構築を目指している。

さらに、2010 年には、JST・ERATO の「香取創造時空間プロジェクト」の研究総括となり、CREST の成果を出発点として究極の精度の時計実現の一番乗りを目指している。

3.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

この科学技術分野で独創的な発明を成し遂げ、世界的に確固たる地位をもたらした文献は、以下のように 2003 年 PRL(Physical Review Letter) で光格子時計の提案と実験結果を発表したこと、さらに 2005 年の Nature でタイトル (An optical lattice clock) を発表したことである。

Katori, H., Takamoto, M., Pal'chikov, V.G., Ovsiannikov, V.D.,

Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap,

Physical Review Letters, 91 (17), 1730051-1730054, 2003

1996年から205回の引用 (Scopus 2012/2/15)

Takamoto, M., Hong, F.-L., Higashi, R., Katori, H.,

An optical lattice clock,

Nature, 435 (7040), 321-324, 2005

1996年から274回の引用 (Scopus 2012/2/15)

このように、大きな研究成果をあげている研究の潮流を作った研究の立ち上げの動機付けとなったコンセプトは、香取教授によれば『ポールトラップ中の単一イオンをシミュレートするような系を中性原子を使って構成することであった』とのことである。

『さきがけ』やCRESTでの研究成果はERATO（香取創造時空間プロジェクト：研究期間 2010～2015）への展開に繋がった。このプロジェクトは、東京大学および理化学研究所との協働実施プロジェクトとして、運営されている。（参考情報「ERATO 香取創造時空間プロジェクト」JSTホームページ）

この中で、極低温原子操作、量子制御技術、最先端のレーザー制御技術の高度化を行うことで、セシウム原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」を実現させることを目的としている。

20世紀の科学技術の潮流の中で、アインシュタインが相対性理論を発表すると、ニュートンの「絶対時間」や「絶対空間」の概念は崩壊し、相対論的な「時空間」が誕生して、時間の概念の変革は、人類の自然認識にも大きな影響を与えた。

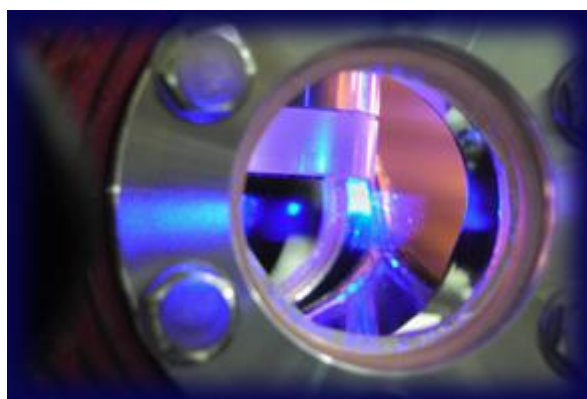
さらに、原子分光學は原子から放射される光（や電波）の振動数を精密に計測し、そこから原子の内部構造を探ることで、量子の規則性を見出し、量子力学の実験的基礎に貢献しながら原子時計の研究加速に繋がっていくことになった。この中で1980年代に、（1989年のノーベルを受取る）デーメルトが「単一イオン光時計」を提案すると、これこそが究極の原子時計と目され、世界中で研究開発が始まった。

ところが、今世紀に入る頃から、単一原子の量子揺らぎに起因する時間計測の限界が現実的な困難となってきた。たとえば、1個の「原子の振子」の振動数を18桁の精度で読み取るには、量子揺らぎの効果を平均化するためにざっと10日間（100万秒）にわたって計測を続ける必要がある。

このような状況で以下に述べる香取教授の発想転換が大きな発明に繋がった。もし、空間に静止して互いに相互作用をしない100万個の原子を用意することができれば100万秒の時間平均をする代わりに、わずか1秒間の測定で18桁の精度に到達可能になる。そして、空間と時間は量子化されていないので、静止する原子の数が増加するほど、光格子時計の精度は改善されるという根本的な利点がある。ここでさらに重要なことは、光格子の存在を「原子の振子」に見えないように工夫する。「魔法波長」と名付けた特別なレーザー波長で光

格子を構成すると、「原子の振子」は、光格子の存在に気付くことなく、原子固有の振動数で時を刻む（図 3－6 および図 3－7 参照）。このアイデアを香取教授が発表したのは 2001 年のことである。

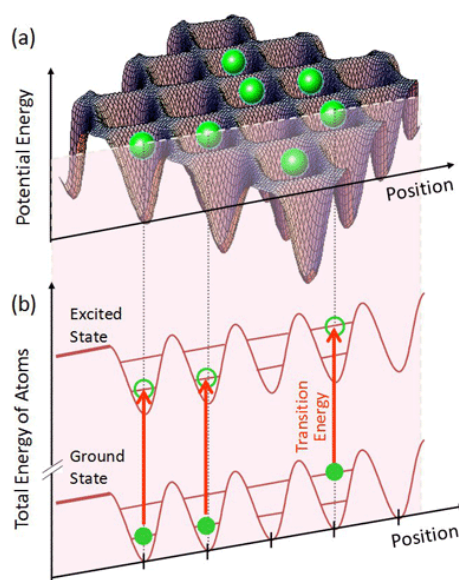
「魔法波長」光格子に束縛された 100 万個の「原子の振子」を観測することで、理論上 1 秒の観測時間で 18 桁の時間を読むことが可能になった。この精度は、ビッグバンに始まる宇宙の年齢（137 億年）経っても誤差が 1 秒以下の、まさに人類が手にする究極の時計である。



（図 3－6）：磁気光学トラップによって冷却・捕獲されたストロンチウム原子集団。

画面の中心部に数 mK まで冷却された数千万個の原子からの蛍光が見える。

（出典 香取研究室の HP）



（図 3－7）

3 次元的な光の干渉縞を作り、それぞれの電場の腹に原子を 1 個ずつ捕獲する。

魔法波長のレーザー光で光格子を構成するときは、光電場の摂動は遷移周波数を変化させない。

(出典：J S Tホームページ ERATO 香取創造時空間プロジェクト)

3.3.3 研究成果の応用に向けての発展状況

天体の運行から作った暦は人類に大きな貢献をしたが、その後、半世紀前にエッセンが発明したセシウム原子時計は、1967年から「1秒」の定義となり、現在では数千万年に1秒の不確かさを実現している。この日常生活と無縁と思えるほどに進化を遂げた時計は、今や地球規模での高速・大容量通信技術や、GPSによる全地球の正確な測位技術に応用され(カーナビはこの一例です)、グローバル化した現代社会を支える基幹技術になり、文明社会の進展の大きな牽引役になっている。

さらに、このような「光格子時計」は、今まで我々が日常的には意識することのなかった相対論的な「時空」の歪みを計測可能である。

「光格子時計」の精度では、地上でわずか1cm時計を置く高さを変えるだけで、一般相対性理論の予測どおりに重力によって時計の進み方が変わることが観測可能となる。

重力シフトを高精度に検出することは、地底に眠る資源の探索や地殻変動を観測する、いわば相対論的測地学ともいべき新たな分野を切り拓くツールとなり、新しい応用展開が可能である。

3.1.4 その他

香取教授からは以下のようなコメントをいただいた。

・ERATO、「さきがけ」、CREST、はそれぞれに特徴があり、すばらしいJ S Tの研究推進事業である。「さきがけ」の研究予算も研究者の年齢を約35歳と考えると最適である。

・研究装置は自作で創意工夫をする理念である。それは、購入できる装置そのままでは、世界をリードする研究はできないからである。

3.4 研究課題4 (量子閉じこめモット絶縁体における強相関係の光学構築)

研究者名 ファン ハロルド

3.4.1 研究成果の発展状況

さがけ期間中の大きな研究成果は、ペロブスカイト型絶縁体 LaAlO_3 と SrTiO_3 から構成されるエピタキシャル界面の示す金属的伝導が、界面における局所的な電荷の再構成が起源にあることを発見したことである。

また、多元素より構成される複合酸化物を原子層レベルで制御して人工構造を作製できる技術確立し、磁場によって特性が変化するマンガン酸化物と SrTiO_3 からなるダイオードの開発にも成功した。この磁場によって変化するダイオード構造を発展させ、磁場によって増幅率を自在に変化できる熱電子トランジスタの作製と動作に成功した。このトランジスタの作製の過程で、金属-半導体界面のエネルギー障壁高さをバルク物性に影響を与えずに変調できる技術を開発し、酸化物のみならず幅広い電子デバイス分野で注目を集めている。

3.4.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

$\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面伝導性の研究はその後大きな展開があった。 SrTiO_3 単結晶基板上に堆積する LaAlO_3 薄膜の厚さによって伝導性を制御できること、 LaAlO_3 表面に極性分子を吸着させることで埋もれた界面の伝導率を制御できること、極低温にて界面電子相にバイアス電圧を印加することで超伝導相の発現を確認した他、数多くの進展があった。

3.4.3 研究成果の応用に向けての発展状況

今までに得られた複合酸化物の二次元電子系を用いて、電子の波動性が顕になるメゾスコピック物理学分野への発展を目標としている。原子間力顕微鏡やフォトリソグラフィを駆使してサブミクロンスケールで構造を作製し、その低温輸送特性を評価する。同時に、複合酸化物の特徴でもある強い電子間相互作用に起因する様々な電子相同士からなる界面を作製し、バルクには存在しえない基底状態や新たな機能性を追求して、新しい電子デバイスへの展開を目指している。

以上