

戦略的創造研究推進事業
— 個人型研究（さきがけ） —

研究領域「光と制御」
(ポスドク参加型)

研究領域事後評価用資料

平成19年3月31日

1. 研究領域

「光と制御」(平成13年度発足)

領域の概要

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。

2. 研究総括

花村 榮一(千歳科学技術大学教授／東京大学名誉教授)

3. 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 上段: H19年3月現在 中段: 終了時 下段: 応募時	研究課題	研究費
平成 13年度	東 正樹	京都大学化学研究所・助教授 同上 ・助教授 同上 ・助手	強相関遷移金属酸化物における光機能の探索	82
	近江谷 克裕	北海道大学大学院医学研究科 ・教授 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 同上 人間系・細胞機能操作研究グループ・グループリーダー	光制御可能な細胞発光素子の創製	85
	孫 洪波	吉林大学(中国)電子科学と工程学院・教授、院長 大阪大学大学院工学研究科 ・助手 日本学術振興会・リサーチアソシエイト	2光子誘起高分子化に伴うフォトニック結晶の作成とその応用	90
	竹内 繁樹	北海道大学電子科学研究所・助教授 同上 ・助教授 同上 ・助教授	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	94
	田中 雅明	東京大学大学院工学系研究科・教授 同上 ・教授 同上 ・助教授	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	79

	鳥本 司	名古屋大学大学院工学研究科 ・教授 北海道大学触媒化学研究センター・助教授 同上 ・助教授	光化学的に構造制御したナノ複合機能材料の創製	88
	溝川 貴司	東京大学大学院新領域創成科学研究科・助教授 同上 ・助教授 同上 ・助教授	強相関物質表面での光励起状態の光電子分光	77
	守友 浩	筑波大学大学院数理物質科学研究科 ・教授 名古屋大学大学院工学研究科 ・助教授 名古屋大学理工科学総合研究センター・助教授	放射光X線粉末構造解析による光誘起相転移の研究	92
平成 14年度	伊関 峰生	総合研究大学院大学葉山高等研究センター ・上級研究者 科学技術振興機構・さきがけ研究者 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	光センサータンパク質による細胞機能の制御	77
	岡野 俊行	早稲田大学理工学術院 ・助教授 同上 ・助教授 東京大学大学院理学系研究科・講師	光転写調節メカニズムと新規光センサー	85
	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 同上 ・助教授 同上 ・助教授	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	86
	勝藤 拓郎	早稲田大学理工学術院・助教授 同上 ・助教授 同上 ・助教授	磁性誘電体における誘電関数の磁場制御	76

	香取 秀俊	東京大学大学院工学系研究科・助教授 同上・助教授 東京大学工学部附属総合試験所・助教授	シュタルク・アトムチップによるコヒーレント原子操作	82
	上妻 幹男	東京工業大学大学院理工学研究科・助教授 同上・助教授 同上・助教授	光と原子の間の量子情報ネットワークの実現	78
	杉山 和彦	京都大学大学院工学研究科・助教授 同上・助教授 同上・助教授	小型超高精度レーザー原子時計の実現	79
	高橋 雅英	京都大学化学研究所・助教授 同上・助教授 同上・助手	有機—無機ハイブリッド低融点ガラスを用いたフォトンクス材料の創製	82
	橋本 秀樹	大阪市立大学大学院理学研究科・教授 同上・教授 同上・教授	光合成系の人為操作及び光反応制御	94
平成 15年度	木塚 徳志	筑波大学大学院数理物質科学研究科・助教授 同上・助教授 筑波大学物質工学系・助教授	原子直視法によるナノコンタクトの光機能探索	87
	金原 数	東京大学大学院工学系研究科・助教授 同上・助教授 同上・講師	インテリジェント光駆動分子機械の構築	81

	周 豪慎	産業技術総合研究所 エネルギー技術部門 ・主任研究員 同上 ・主任研究員 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	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	77
	高坂 繁弘	古河電気工業(株)ファイテルフォニクス研究所・研究員 同上 ・研究員 同上 ・研究員	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	79
	Harold Y. Hwang	東京大学大学院新領域創製科学研究科・助教授 同上 ・助教授 同上 ・助教授	量子閉じ込めモット絶縁体における強相関系の光学構築	103
			総研究費	1,853

4. 研究総括のねらい

光科学・技術は、あまりにも横断的で広い分野にまたがり、さらに最近の進展ぶりには目を見張るものがある。それに加えて、第一次産業革命の中核であった溶鉱炉の中の光エネルギー分布の測定から、二十世紀最大の学問と言われる量子力学が誕生した。この様に光技術は現代科学の発展にも多大に貢献を行ってきたし、また将来にもその寄与が期待されている分野であった。第二次産業革命といわれる情報化時代では、光ファイバーの中を伝わる光パルスが主役を担い、更に量子情報処理と伝送でも光が最も有力な媒体としての役割を担っている。

これらの背景の下で、光の本質を見極めようとする基礎研究から、光の極限状態としての強力な、そしてサブヘムト秒光パルス光源を得る試み、さらには量子情報処理に必要なよく制御された単一光子状態の発生を目ざす光技術までをねらった。この光科学の基礎研究から光技術・産業の第一線で活躍する物理学と電子工学の研究者にアドバイザーとなって戴いて、公募と選考に臨んだ。第一期生8名の中に一人のバイオ関係の研究者が採択された影響か、第二期生の応募者にはバイオ関係の優れた研究提案が多数あり、最初は戸惑った。しかしアドバイザーの物理屋は、極めて広範な分野の理解力がある上に、公平であったので、第二期生の9名の採択者の半数がバイオに関わる研究者であった。従って、そのアドバイザーとして二年次からは北川禎三先生に加わって戴いた。

この事は“さきがけ研究”のねらいの一つである異分野の交流に、極めてプラスの効果が現れた。年2回の合宿による領域会議では、研究者間、研究者とアドバイザーの間では専門の壁を越えて活発な議論が進み、物理、化学、生物学と電子工学を専門とする研究者の間での相互理解が進み、更に多数の共同研究が進められたことは、我々のねらいは予想以上に満たされたと思われる。もう一つのねらいであった光技術の研究公募を企業サイドから期待したが、三期生にやっと企業からの提案が一件採用された。そこでも、成果としてのテラヘルツ繰り返しのヘムト秒光パルスを発生する光ファイバーレーザーの試作品を研究者やアドバイザーが研究に使わせてもらったり、購入するまでに至り、一件ではあったが、ほぼねらい通りであったかと胸をなでおろしている。

5. 選考方針

5-1 選考基準

さきがけの趣旨に鑑み、下記の基本的な選考基準に従った。

(1) 期待する成果が、世界の「光科学・技術」の最先端の研究に寄与しうると予測できるものであること。すなわち新規性と独創性を持つこと。

(2) 自ら独立して、ポスドク研究者を指導しつつ研究を実施できる研究者であること。すなわち主体性が十分保障できること。

(3) 研究課題と直接関連する分野は云うまでもなく、「光と制御」の枠の中での異分野の仕事にも興味を持てる積極性と、多少分野の異なるアドバイザーや研究者の意見に耳を傾けられる柔軟

性をも持つこと。

(4) 光科学・技術は既に述べた様に広い分野の基礎的な科学から、デバイスの作製などの産業に亘るどの分野でもよいが、その各々の分野の最前線の研究であること。

5-2 選考方法

第一期と第二期の研究者の採択にあたっては8名のアドバイザー、第三期ではバイオを専門とする北川禎三教授を含めた9名のアドバイザーに加えて、研究総括が選考にあたった。

(1) まず書類選考には、専門を考慮して、各論文に2名のアドバイザーが申請書を査読して、担当課題の中から優れた提案をA候補として10%程度を選び、面接にて質疑応答して深く理解したい興味ある提案を20%程度選びB候補とした。他はC、D、E候補とした。

(2) これらの採点結果をアドバイザーと研究総括による書類選考会に持ちより、面接に進める15~21件の選考を行った。書類選考で採点の分かれたもの、ボーダー付近の提案には全員で討論して、採択可能な数の2~3倍程度の提案を選び、面接に進めた。

(3) 面接で一人10分の口頭発表と、15分の質疑応答を行い、アドバイザー全員の採点を行なって、A、B、Cの採点を行い、採点の分かれた提案には規準に照らして全員で討議し、問題がなければ上位者より選び、同レベルで決着がつかない場合は研究総括が判断した。

アドバイザー全員の採点と、独立に行った研究総括の採点がほぼ一致していた点は、採択結果に自信と安心を与えた。また、他の公募に応募している採択予定者には、特に両方が採択されたときは、どちらを選ぶかを正した。

6. 領域アドバイザーについて

項目4でも述べた様に、光科学・技術は極めて広範囲に及ぶので、産業界または産業界経験として、小林功郎(日本電気、現東工大教授)、石田晶(住友電気工業、現日大客員教授)、覧具博義(元日本電気、現東京農工大教授)にお願いした。そして、主に光ファイバー関係を石田教授が、半導体レーザーの理論は覧具教授、実験は小林教授が担当した。フォトニック結晶関係を野田教授が、光誘起構造相転移関係を腰原教授が、また強相関電子系の光応答を内田教授が担当した。量子光情報伝送と処理を井元教授が、ポリマー関係の光学応答を阿部博士が担当した。しかし、これら8氏は広い分野にわたる高い見識の持ち主なので、光科学・技術を隈なく網羅したつもりであったが、化学とバイオからの申請が多数寄せられたので、2年目からは岡崎統合バイオセンター長の北川禎三教授にもアドバイザーとして参加願った。

9名のアドバイザーによって、活発な議論が誘発され、研究者達も含め年2回の合宿では深夜まで討論会を継続するのがこの領域会議の恒例となった。これによって理想的な形で異分野の交流と多数の共同研究が物理、化学、生物学と電子工学の研究者間で行われたのは、アドバイザーの人選的を射ていたためと思われる。

領域アドバイザー名	所属	現役職	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 大学院法学研究科	客員教授	平成 13 年 8 月 ～平成 19 年 3 月
井元 信之	大阪大学 大学院基礎工学研究科	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	財団法人 豊田理化学研究所	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 フロンティア創造共同研究 センター	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	副所長・ 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 大学院共生科学技術研究 院	教授	平成 13 年 8 月 ～平成 19 年 3 月

7. 研究領域の運営について

7-1 研究総括の方針や研究領域のマネジメント

本領域「光と制御」の応募と選考は3回行われ、広範囲な研究対象を配慮して、量子論的な光の本質を解明したり、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を含む方針で出発した。どの分野においても、世界の最前線の研究を切り拓く研究提案で、その実現に向けてのポテンシャルティーを持つことが大前提であった。期待通り、極めて優秀で、しかもこの分野で既に実績のある若手研究者が多数採用された。しかも、対象とするものは物理学、電子工学から化学、生物学に亘り、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。

年2回開催される合宿形式の領域会議では、異分野の交流が最も有効に行われたと自負している。これは、「さきがけ研究」の経験者が複数いて、しかも研究者同志の議論を盛り上げることに成功し、さらに深夜にまで及ぶミーティングも設定されてアドバイザーと研究者の忌憚のない意

見交換が大いに役立ったと思われる。

研究総括は 3 年間の研究開始にあたり、研究室の見学とその研究者、およびその上司にご挨拶に伺った。各研究者は1名～2名のポスドクを採用するので、研究室見学や領域会議の席上で言葉を交わす機会を作った。技術参事、事務参事も各研究施設にはおのおの少なくとも年2回の訪問の機会があり、研究の進展具合と設備の設定の様子の報告を受けた。

優秀な研究者達であったので、ほぼ全ての者が予想以上に立派な成果を挙げ、多数の受賞者、昇格、栄転者を出した。更に、ほぼ全てのポスドクが研究成果を挙げつつ次のステップに踏み出した。

7-2 研究テーマの導き方について

毎年2回開催の領域会議では研究員全員とほとんど全てのアドバイザーが出席し、冬は東京、夏は千歳で、合宿形式にて行った。合計11回の領域会議の内3回はさきがけのナノテクノロジー分野合同研究報告会の前後に開催した。

合同研究報告会時以外の領域会議は、研究者、アドバイザーと研究総括の合宿形式で行われた。その結果、昼間に行われた講演、討議に熱が入るのはもちろん、夕食後も話し合いができる場が設定され、三者の分け隔てなく、忌憚のない討論が深夜にまで及んだ。その成果として異分野の壁が消失し、相互理解、更には共同研究にまで進み、その成果も出始めていることは喜ばしい限りである。

「光と制御」のカバーする分野は広く、アドバイザーも広く領域をカバーしたつもりであったが、二期生からは多数のバイオ関係の応募と採択があったので、2年目からは北川禎三岡崎統合バイオサイエンスセンター長がアドバイザーとして参加した。各専門領域に適切な研究のアドバイザーがいて、しかもその分野の研究者の興味を惹起させた。「光と制御」領域では、物質開発から測定技術とそれに使うレーザーシステムの開発に携わるものが研究者とアドバイザーに参加して、相互の理解から共同研究にまで進んだのは、大成功であった。研究会を重ねる毎に、大部分の研究者は、他分野の研究者にも理解してもらえる工夫を凝らし、発表能力も3年間で大きな飛躍を示した。更に専門の近いアドバイザーが発散しがちの研究テーマを収束させる様な適切なアドバイスをよく目にした。

また、各領域会議では、その異分野間の交流を助けるためにアドバイザーの特別講演を素人向けにお願いしたことも相互理解の助けになった。この「さきがけ研究」のよき伝統を引き継いでもらうために、光関連の新しいさきがけ研究である「光の創成・操作と展開」から3名の研究者に参加と話題提供、また「物質と光作用」からは技術参事に参加戴いて、この雰囲気伝わすることを願った。ただ、研究報告会前後に行われる領域会議でも、研究報告会には出席したポスドクの参加が許されないのが残念であった。

研究終了報告会はナノテクノロジー分野合同研究報告会として、一期生は「組織化と機能」「秩序と物性」「ナノと物性」、二期生は「秩序と物性」「ナノと物性」、三期生は「ナノと物性」の各領域と合同で開催した。一期生は各領域毎の口頭発表であったが、二期生、三期生では領域の壁を取

り除いて専門分野毎にまとまって発表した。口頭発表後、各領域が一堂に会したポスターセッションを行ったので、他の研究領域の研究を知り、同時に他領域研究員と面識を持つことも有意義であった。いずれの研究報告会も、一般参加者も多数参加し盛会であった。

8. 研究を実施した結果と所見

8. 1 研究領域全体として特筆すべき研究成果

光科学・技術は、横断的学問であると同時に、量子力学の誕生に重要な寄与をした光量子の概念の導入から始まって、最も古典的波動に近いレーザー光の誕生、更には最も量子論的側面を示すパラメトリック過程で発生した光子対の“もつれ”など光自体の物理学的基礎研究が一方では位置し、他方、機械加工に用いられる様な強力な光源としてのレーザー光も技術分野から求められている。これらの光と物質系との相互作用も多彩な光学現象を引き起こす。幸い、さきがけ研究「光と制御」では、これらの広い研究分野から22名の極めて優秀な研究者が採用され、材料開発に携わる化学者とその光学物性を活かして量子光源を開拓する者との間の共同研究が進み、また超短パルス発生技術を追う者とそのレーザー光を光源として利用する研究者との協力など、物理、化学、電子工学や生物学の分野の壁を取り払って研究が進められた。それには、年2回の泊りがけでの領域会議では、最初はぎこちなかったものが、研究者もアドバイザーも「さきがけ精神」を発揮して初歩的な質問から始まって、核心を突く議論まで進められた。お互いに十分理解し合え、共同研究にまで進めた全参加者の熱意には感謝している。

22名の研究者を敢えて数個のグループに分類して、特筆すべき成果を紹介したい。

(a) 第一のグループは強相関電子系のグループである。この分野で強く求められているものは、天然には極めて稀な強磁性と強誘電性を同一相で示す結晶である。これは、磁気メモリーを電場や光で書き換えられて、現在の情報の記録と記憶の分野で重要な役割を果たすからである。東は理詰な探索の結果、 BiMnO_3 と $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$ の強磁性強誘電体を得意技の高圧下での結晶成長で、その作製に成功している。溝川は高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)と量子常誘電体にNbをドーピングした Nb:SrTiO_3 (STO)の界面を、光励起下での光電子分光測定を行い、STOで生成した正孔がYBCOに注入している様子を確認している。守友はスピנקロスオーバー錯体の光励起下で鉄イオンの低スピン状態から高スピン状態への転移を発見した。

(b) 第二のグループも多彩な光学材料の開発に寄与した。田中は光学素子Ⅲ-V族化合物と相性のよいMnAs磁性体を含む界面構造を用いた光相反素子としてのアイソレーターなどの開発に成功し、高橋は有機―無機ハイブリッド低融点ガラスを開発し、フォトニック結晶構造を作製して見せた。

(c) 第三のグループは、光そのものの研究に携わったグループである。竹内は、量子光としての単一光子パルスを高い効率で発生する事に成功し、上妻はこの単一光子や真空スクイーズド光の情報を原子に転写することを試みた。特に、香取はレーザー冷却した原子系をトラップしたり、

転送・演算させる舞台となるシュタルクトラップを開発し、また定在波中にシュタルクトラップした原子系の遷移周波数を 10^{-15} のオーダーの精度で決めることに成功し、全世界の時間標準に用いられようとしている。

(d) 第四のグループは、バイオ関係の研究者群である。一方では、近江谷、伊関、岡野は植物や動物の光反応を微視的に解明し、その DNA の決定まで進んだ。他方では、梶川は金属微粒子プラズモン共鳴による倍高調波の増強を用いて、タンパク質や DNA のセンサーを開発したり、橋本は、光合成膜蛋白質の光機能を発現する構造部位を積極的に改変したアロテノイド分子を構築し、より効率の高い光合成系の作製を目指す野心的な試みもある。

8-2 個別研究成果の科学技術等に対する効果等

(1) 東正樹「強相関遷移金属酸化物における光機能の探索」においては、強誘電性と磁気秩序を同時に示す Bi または Pb と 3d-遷移金属ペロブスカイト型酸化物を探索した。まず BiCoO_3 、 PbVO_3 において、 PbTiO_3 をしのぐ強誘電歪みと反強磁性秩序が共存することを見だし、更に理詰めた設計原理に従って、ダブルペロブスカイト構造の強磁性と強誘電性を同時に示す $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$ の作製に成功した。今、情報の記録と演算で強く求められている電場によって磁化の向きをコントロールすることによって、消費電力を劇的に低減したシステムの構築の可能性へ道をつけた点が評価できる。これによって光磁気ディスクの性能も格段に進展すると期待できる。強誘電性相転移温度は、 $\text{Bi}_2\text{NiMnO}_6$ で 495K と室温より十分高いが、強磁性への相転移温度は、140K と低い。

東氏の見出した強磁性・強誘電体の設計原理を駆使して、室温で強磁性と強誘電性を同時に示す結晶の作製に成功すれば、その実用化の意義は測り知れない。

(2) 近江谷克裕「光制御可能な細胞発光素子の創製」では、「光を受ける」「光が操る・光を操る」そして「光を出す」3つの機能を持つ発光性鞭毛藻の一種 L_p の物性を解明した。ルシフェリン合成系 L_p では、光の存在下ではクロロフィル a が光合成を行い、暗くなるとルシフェリンが生合成されて発光を伴う。これらの機構を、同位元素を用いたトレーサー実験と MMR 等を用いて解明した。更に、光 ON/OFF に連動して発現が変動するタンパク群の解析を、二次元電気泳動を用いて実行し、その機構を解明した。

ルシフェリン生合成コンポーネントを哺乳類細胞に導入し、哺乳類の遺伝子発現を調節するプロモータによって、導入したタンパク発現は調節され、発光活性を測定することに成功した。また L_p 発光酵素とホタル発光酵素を導入した哺乳類細胞では青色と赤色の発光を観測し、2つの遺伝子転写活性を同時に測定できる可能性を示した。

この様に近江谷氏は、生物学と物理学の垣根を取り払い、本領域会議の活性に大いに貢献した。

(3) 孫洪波「2 光子誘起高分子化に伴うフォトニック結晶の作製とその応用」

光硬化性モノマーにフェムト秒レーザーを集光照射して、2 光子吸収に伴う高分子化することによって、3 次元構造的な作製を試みた。強い非線形性により回折限界を超えた 100nm 以下の加工精度で、その 3 次元構造を作製することが可能であることを示した。この手法を用いて、フォトニック結晶を作ることができた。フェムト秒レーザーによるピンポイント描画形成と多光束干渉パターンニングによって、多様な結晶構造を持つフォトニック結晶の作製に成功している。

これからは、このフォトニック結晶の光学特性の測定と、更に意図した機能を持つフォトニック結晶の作製とその機能のデモンストレーションが残された問題点である。

(4) 竹内繁樹「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—」

量子情報の伝送と処理では光子数の決まった状態の生成と制御は不可欠である。竹内氏は、まずパラメトリック蛍光対を用いて、光子対の一方(アイドラー光子)を検出し、その検出信号で他方(シグナル光子)の出射をシャッターで制御することで、光子を 2 つ以上含むパルスの発生を排除した。その結果、一つの光パルスに単一光子が含まれる確率を、今迄の 10% 以下から 40% に向上させることに成功した。更に、単一 CdSe 量子ドットからの発光では、量子光としての特色の一つであるアンチバンチングを、室温において確認することにも成功した。この様に光の量子論的な特性をより高度に発揮し、量子コンピューターと量子暗号の実現に向けて、担体としての光子を用いて迫っている。実用化には平坦な道のりではないと思われるが、一層の研究努力が必要と思われる。

(5) 田中雅明「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」では、光学素子としての III-V 族化合物半導体と相性のよい半導体磁気光学結晶を含む界面構造を作製した。磁気光学結晶系は、半導体レーザーのアイソレーターとして、そのレーザー発振とその特性の向上に不可欠な素子である。田中氏はまず磁性体 MnAs を GaAs 中に埋め込み、室温でファラデー回転角 $0.4 \sim 0.8 \text{ deg} / \mu\text{m}$ を得ている。また、GaAs・MnAs ナノクラスターと GaAs/AlAs 多層 DBR 反射膜を組み合わせ、やはり室温で反射配置で 1.54 deg のカー回転角を得て、半導体ベースの材料として室温で得られた最高記録の磁気光学効果を観測している。さらに、InP 基板上にモノリシック集積化した半導体導波路型光アイソレーターや TE モード対応の導波路型アイソレーターなど、その実用化に向けた研究も着実に進めている。幸い継続研究に採用され、更なる研究が展開されている。

(6) 鳥本司「光化学的に構造制御したナノ複合機能材料の創製」

半導体微結晶は、大きな非線形分極率と光閉込め効果によるレーザー発振の容易さが魅力であった。しかし、そのサイズのばらつきが大きく、そのばらつきは制御不可能であった。そこで鳥本氏はサイズ選択的光エッチング法を、シリカ被覆金属カルコゲナイド粒子に適用し、新規ナノ複合機能材料を創製した。光エッチングにより、コアである半導体微粒子のサイズは選択的に減少し、

サイズがかなり一定な系を作製することに成功した。TEM観察から、514 および 458nmの光照射後のCdS微粒子の平均粒径(標準偏差)は、3.7nm(0.33nm)と 2.8nm(0.21nm)であった。また、被膜したSiO₂のサイズは不変であることも確かめている。更にこの系に細工を施し、開核構造を作ったり、半導体—金属ナノ接合形成も行われた。一期生の竹内等によりこれらのCdS微粒子を用いて光アンチバンチングの量子光発生にも応用されている。将来は、CdSやCdSeなど毒性のある物質から、無害な材料で同様な光機能性材料の開発が待たれる。

(7)溝川貴司「強相関物質表面での光励起状態の光電子分光」では、赤外・可視・紫外領域の光源を、真空紫外線・X線光電子分光装置に付設して、光励起下での強相関物質の状態変化を光電子分光測定によって研究した。レーザー光と真空紫外線の照射に工夫を施して微少領域での情報をも得ることが可能となった。

溝川氏は開発したこれらの測定装置を用いて、多様な物質系の光誘起変化を測定したが、高温超伝導体YBa₂Cu₃O_y(YBCO)とNb:SrTiO₃(STO)の界面にNd:YAGレーザーの 3 倍高調波を照射することによって誘起される興味ある効果を見つけた。この 355nmのレーザー光でSTO結晶を励起するとバンド間励起によって電子と正孔が生成される。これらの正孔はYBCOの価電子帯に流入するが、電子は界面に形成されたショットキーバリアーによってSTO側界面に溜まっている様子が、Cu2p、Y3d、Ba3dと 4dの内殻光電子分光スペクトルのレーザー照射効果より結論している。

多様な強相関電子系の電子構造解析とその光励起効果を、開発した測定装置で解明して行くことと期待している。

(8)守友浩「放射光 X 線粉末構造解析による光誘起相転移の研究」

一般的に鉄イオンの錯体では、鉄イオンの低スピンと高スピンの状態があり、低温の低スピン状態から高温の高スピン状態に相転移を示すものがある。守友氏は低スピン状態の錯体に光励起強度の関数として光励起を行い、光励起強度が閾値を超えると高スピン状態に相転移することを発見した。

この相転移は、光照射の下で放射線 X 線を用いて結晶構造を観測することによって、確認された。光強度の変化に対しては、高スピン濃度は履歴現象を示すが、入射光を切るともとの低スピン状態に戻るので、この現象に「動的相転移」との名称を与えた。

この光誘起相転移の研究分野は、腰原の ERATO や高田の CREST で高エネルギー研や Spring-8 の放射光 X 線を用いて活発に進められ始め、その更なる発展が期待される。

(9)伊関峰生「光センサータンパク質による細胞機能の制御」

伊関氏は、既に単細胞生物ミドリムシで、光センサーである光活性化アデニル酸シクラーゼ(PAC)が、光で活性化されて環状アデノシン 3',5'-リン酸(cAMP)を生成する酵素である事を見つけていた。本研究では、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、それを利用してさまざまな細胞機能の光制御を試みた。

PAC 類似タンパク質の探索とその系統解析の研究の成果としては、PAC よりも優れた特性を持つ光センサータンパク質は発見できなかったが、ミドリムシ類のアデニル酸シクラーゼの進化経路を明らかにし、ミドリムシの EST データベースを構築し、複数の新規タンパク質を同定し、進化系統学者の興味を喚起している。最終目標の細胞機能の光制御への応用では、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、PAC に活性を保持した状態を発現し、青光に応答して cAMP を生成している様子を、活動電位に及ぼす光の効果を測定して明らかにした。

目標は達せられたが、この純国産の光センサータンパク質 PAC のより一層の深い研究と、今回は果たせなかった PAC よりも優れた特性を持つ光センサータンパク質を見つけ出し、横方向への広がりを今後に期待したい。

(10) 岡野俊行「光転写調節メカニズムと新規光センサー」

本研究の目標の第一は、光による遺伝子の制御(光による転写調節)メカニズムの解明であり、第二は機能未知なる新規光センサーの探索であった。第一の成果として、鳥類松果体に光を照射し、時刻依存的に転写が誘導される遺伝子を調べた。そのうち朝方に機能する遺伝子 *Lcg* は、概日時計発振における中心体の関与を示唆した。また、夕方に関与する *E4BP4* は、時計遺伝子 *Per* の転写を抑制する転写抑制因子であることを解明し、タンパク質レベルでもその機能を明らかにした。第二に、ヒト皮膚細胞における光応答遺伝子の解析では、光刺激がヒトの皮膚に作用し、その際の遺伝子カスケードの一端を明らかにした。第三に、動物に存在する新規光センサー様分子の同定にも成功した。

特にヒト皮膚における遺伝子の光誘導では、青色にも近紫外光にも10倍以上の誘導を示す遺伝子3種を同定した。これにより、光刺激がどのような細胞内情報伝達経路を介して、これらの遺伝子間の転写を促進させるのかを解明する一歩を踏み出した。生物が、光のエネルギーを効率的に利用し、他方では紫外線等による傷害を避けるための、光受容光情報伝達システムの解明は意義ある研究と思われる。

(11) 梶川浩太郎「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」

金ナノ微粒子による局在表面プラズモン共鳴により、光倍高調波の発生が増強される。その金ナノ微粒子表面にタンパクの一種であるアビジンやDNAが付着することによって生じる倍高調波発生強度が変化することで、バイオ分子の存在を確認することに成功している。ドットサイズを、現在使われている30 μm 正方から、10 μm 正方ドットまで下げて高密度化は可能であるが、確認できるタンパク質の種類を増やし、更に分解能5 μm の倍高調波顕微鏡を目指して、冷却 CCD を用いて画像として読み込む努力を払っている。

光源にチタンサファイヤレーザーを用い、ディテクターには冷却 CCD を用いるため、コスト高になる問題点と、「どの様なタンパク質をどの程度識別できるのか」との問題の解決に向け努力が払われている。これらの難問を解決して、実用に耐える製品に結実することを願っている。

(12) 勝藤拓郎「磁性誘電体における誘電関数の磁場制御」

勝藤氏の研究のねらいは、金属の超巨大磁気抵抗効果に対して、誘電体においても「誘電関数が磁場で大きく変わる」現象を見つけることであった。これに対して、通常の波長スキャン法ではなく、ロックイン検出を用い「波長を止めて磁場スキャンする」測定を波長を変えて繰り返す測定法を開発して、光学伝導度の測定精度を飛躍的に高めたことは第一に評価できる。この装置を用いて、特に強磁性絶縁体バイロクロア型バナジウム酸化物の誘電関数の温度依存性と磁場依存性を観測した。その結果、強磁性相転移に伴って、1.5 eV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のを利用して、磁場によって光学伝導度を最大3%も変化させて見せた。この現象を、勝藤氏の提案時からのモデルである隣り合うスピンの対相関 $\langle S_i \cdot S_j \rangle$ を用いて解明した。これらは、磁場によって電気特性を制御する工学的にも意義ある研究の第一歩であり、今後の発展に期待したい。

(13) 香取秀俊「シュタルク・アトムチップによるコヒーレント原子操作」

エレクトロニクスとフォトリクスを超えて、“アトムロニクス”ともいうべき新しい高度情報処理系の実現を目ざした野心的な提案であった。これに対して、(1)シュタルク・アトムチップの原理提案とその実証に成功し、(2)光格子時計をトラップポテンシャル中で実現し、量子情報のみならず原子分光手法にも大きなインパクトを与えた。

(1)では、2対の電極を使って交流電場をかけることによって中性原子がトラップされることを、計算通りに実証し、イオントラップや磁気トラップより優れていることを示した。このトラップ系で中性原子の流れを作ったり、更に演算に向けた提案を行った。(2)では、2本以上のレーザービームによってシュタルクトラップされたストロンチウム原子系の禁制遷移を、スペクトル幅が30Hzで観察し、その中心周波数の分光精度はHzレベルに到達した。これは、世界の次世代の時間標準の第一候補となっている。

これらの貢献に対して国際的な2つの賞と国内の賞も2つ受賞し、内外で高い評価を得ている。この研究はCRESTに受け継がれているので、アトムデバイスまで進化し、“アトムロニクス”を創出し、発展されることを期待している。

(14) 上妻幹男「光と原子の間の量子情報ネットワークの実現」

情報の伝達に適した光と、情報の処理に適した原子の間で、量子情報を自由にやりとりする技術の構築を目ざした。それによって、相補的な二つの系がもつ短所を抹消し、長所のみを活用することをねらった。

上記の目的の実現に向けて、第一歩として光の真空スクイーズド状態を原子集団へ転写、保存、そして再生することを目指した。MgO:LiNbO₃導波路を用いて⁸⁷RbD / 線(795 nm)の真空スクイーズド光を生成し、それをコヒーレント状態のコントロール光照射下のRbガスを封入したガラスセルに入射し、真空スクイーズド光に対する電磁誘起透明化現象を確認した。MgO:LiNbO₃導波路を用いて得ることの出来るスクイージングレベルが-1dBと比較的小さいため、今のところRbガスに真空スクイーズド光の情報を書き込み、再生するには至っていない。しかし、氏は最近になってPPKTP

結晶を用いたOPOによって、-2dBのスケーリング(795nmにおける世界最高データ)を得ており、所期のねらいを示す実験の成功は近いと思われる。更に、レーザー冷却によって得られる冷却Rb原子集団を用いた単一光子状態の生成と、この原子集団と単一光子状態間における軌道角運動量のエンタングルメントにも成功している。

この様に、原子と光の長所を活かした情報処理と伝送に向けての要素技術を着実に積み重ねており、この分野への貢献は極めて大きい。

(15) 杉山和彦「小型超高精度レーザー原子時計の開発」

GPS による測地精度は、人工衛星に搭載されているセシウム時計により確保されている。マイクロ波領域を基準とするこの原子時計に代えて、より高性能化が見込める光領域を基準とし、さらに、必要となるレーザーを全て半導体レーザーとして、低消費電力で可搬なシステムを開発することを目標とした。そのための第一歩として、原子(イオン)の共鳴周波数にその発振周波数を安定化したレーザーを、光周波数コムを使って正確に分周してマイクロ波周波数標準とする新しい方式の原子時計を提案、開発した。

そのプロトタイプとして、モード同期チタニウムサファイヤレーザーの光パルスを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、光分周器を実現させた。次に市販の半導体レーザーを高速ロックして線幅を狭窄化した基準周波数レーザーを構築し、安定な単一イッテルビウムイオンを供給するトラップの動作を確認した。更に、DC 電流を流すだけでパルス光を発する自励発振半導体レーザーのモード同期を実現し、光周波数コムとして充分応用可能であることを示した。

これら3つの要素技術を開発したことは高く評価出来る。更にこれらを統合して、所期の新しい原理に基づく原子時計の実現が待たれる。

(16) 高橋雅英「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」

いくつかの有機材料は非常に大きな光機能性を示すものの、化学的耐久性に乏しく、光波処理材料と期待されながら実用に至っていなかった。高橋氏は有機物の分解温度より低温で作業が可能となる低融点ガラスを宿主材料とする機能性有機分子系の開発を目ざした。第一に、無溶媒プロセスによる有機—無機ハイブリッド材料の合成法を用いて、ローダミン 6G含有ケイリン酸材料を作製し、数十mWの低エネルギーのレーザー光源で、数十 μm からサブミクロンサイズの構造を書き込んで見せた。また光重合性有機物共存系における重合誘起相分離を用いて、二次元干渉露光によってTiO₂の2Dフォトニック構造を作って見せた。更に、この手法を発展させて、非コヒーレント光源を照射して、自己組織化により規則的なフォトニック構造を作ることにも成功している。

有機—無機ハイブリッド低融点ガラスの開発と光重合などを用いて機能性構造が作製可能であることを示した功績は大きい。更に、実用に耐える製品化が楽しみである。

(17) 橋本秀樹「光合成系の人為操作及び光反応制御」

光合成膜蛋白質の結晶化と構造解析に加え、光機能の発現に密接に関係する構造部位を積極的に改変したアナログカロテノイドの大量全合成を達成し、光反応中心複合体に再構築し、その結晶化と構造解析に成功した。更に、超高速レーザー分光計測系を作り上げ、集光作用の中心的役割を担っているカロテノイド分子の光励起後の緩和過程を、中間励起状態の存在まで含めて解明できた。この様に生命科学、化学、物理の各分野の最先端の科学・技術を融合して、光合成系の人為操作に一步踏み込んだことは評価に値する。

(18) 木塚徳志「原子直視法によるナノコンタクトの光機能探索」

木塚氏は、原子レベルの構造観察を可能とする電子顕微鏡により成果を挙げてきたが、今プロジェクトではこのシステムに更にレーザー励起と近接場顕微鏡による光学実験の装置を装着して、ナノシステムの光学特性の解明を試みた。その結果、金の最小断面をもつナノコンタクトにおいては、504nmの光照射下でスイッチング機能を持つことを見出した。更に酸化亜鉛微粒子の一個一個を選んでカソードルミネッセンスを測定することを可能にして、その個別分光にも成功した。

更にこの系を120Kの低温で光学特性を観測できるシステムを組み立て、今後は他のナノ結晶系の個別分光を展開して新たな現象の発見に結びつけてほしい。

(19) 金原 数「インテリジェント光駆動分子機械の構築」

金原氏は、光駆動分子とそれに連動する分子を組み合わせ、光照射に伴って高度な動作を示す分子機械の構築を目指した。

フェロセンを回転軸とする光駆動分子のハサミの先端に金属ポルフィリンを導入した分子ペンチを作成した。更に、光駆動分子オートロックを実現した。アゾベンゼンで修飾したシャペロンGroELは、可視光・紫外光照射でシス・トランス間の変換が施され、更にATP添加でシス構造では取り込んだ変性タンパク質を放出することを見つけている。

分子の機械的動作を光で制御できることを発見したことは、大きな発見であるが、更にこの特性が応用できる分野が開拓されることを望みたい。

(20) 周 豪慎「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」

環境汚染物質を感知する光導波路に接してナノ構造の細孔が三次元的に規則正しく配列しているナノポーラスSiO₂やTiO₂膜上に認識分子を塗布させる。この系に微小濃度の有害化学物質が流入すると、反応して導波路を伝播する光強度が大きく変わる。これによって環境汚染物質を測定でき、広い空間に分布し、時間的にも変動する様子を捕える“コンパクト環境診断素子”の作成を試みた。

認識分子の屈折率変化により、100ppbのアンモニアとホルムアルデヒドを検出可能な光導波路ガスセンサーの開発に成功した。更なる感度の向上と他の有害化学物質のセンサーの開発も期待される。

(21) 高坂繁弘「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」

表題の実現に二つの技術開発が必要であった。第一に、二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発生し、第二に外部信号光に同期した光信号を発生する技術を開発した。繰り返し周波数1THzのビート光をパルス圧縮するようファイバシステムを設計・作製し、パルス幅の97fsでパルス間隔1.0psのパルス列の発生に成功した。更にビート光の外部同期を試み、ビート光のタイミングジッタを27fsにまで抑え込むことに成功した。

このパルス光源は、将来のテラビット級超高速通信や周波数精度が高い単色テラヘルツ波の発生、コヒーレントフォノンの選択励起などの広い分野での応用が期待できる。

(22) Harold Y.Hwang 「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」

高速電子線回析で観測しながらレーザーアブレーションを実行し、強相関電子系のヘテロ構造を原子層単位で積み上げることに成功した。その結果として第一に、二つの絶縁体 SrTiO_3 と LaAlO_3 のヘテロ界面は、n型とp型の二種類が出来て、特にn型のヘテロ界面では二次元高移動度金属状態が形成することを発見した。第二として、モット絶縁体 LaVO_3 と LaAlO_3 の界面での電子構造が再構築される様子を光学測定で観測し、第三に、 $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$ と $\text{Nb}:\text{SrTiO}_3$ のショットキーバリアーにおける光励起で生成した電子・正孔対のダイナミクスとショットキーバリアー壁の高さの磁場による変動を明らかにした。

これらのヘテロ構造の作製法の飛躍的進歩とその電子構造の解明は、強相関電子系を用いた光デバイスの作製可能性を示唆し、更なる発展と同時に、強相関電子系を用いた光デバイスの開発が極めて楽しみである。

9. 総合所見

(現時点での研究領域としての成果)

強相関電子系の基礎研究とデバイスに向けての研究成果は多大であった。強磁性と強誘電性が同一相で共存する新しい結晶系の作製とその設計原理を得たこと、更には強相関電子系へのヘテロ構造を原子層単位の精度で積み上げることに成功し、更にその特異な電子構造を解明した。これは、基礎研究に与えるインパクトは多大で、これらのデバイス化の大きな可能性を示す。

ナノサイズの半導体微結晶をシリカ球の中に大きさをかなり揃えて作る技術の開発、有機分子を低融点ガラスの中に閉じ込め、しかもフォトニック結晶の構造などを作製する技術を開発して新しい光学材料を開発してきた。

これらの光学材料を用いて、単一光子を含む、光パルスを極めて有効に発生させ、量子情報処理に寄与するなど、8-1の「特筆すべき研究成果」に述べられているので割愛する。レーザー冷却した原子系の光学特性を用いた研究は3つのグループで行われてきたが、中でもシュタルク・アトムチップによる原子操作の開発は注目に値する。特に、Sr原子系の禁制遷移を、スペクトル

幅 30Hzの分光精度で観測し、次世代の時間標準の候補にまで進めた研究は大きな成果であった。

（本研究領域が存在したことによるメリット、基礎研究に対する功績、問題等）

さがけ研究のねらいである「異分野の交流」を活かして、物理、化学、生物学と工学の研究者が、年2回の合宿による領域会議で相互理解に努力したメリットは計り知れない。まず、発表能力は研究会の数を重ねるごとに上達し、異分野を意識させない程相互理解が進んだ。その結果として、いくつかの共同研究が進められ、かつ研究者の視野も大いに広まったと期待している。これは、一研究室内に閉じ込めがちな日本の大学院教育の弊害を軽減させる効果は大で、一流の研究者を視野の広い超一流に育む仕組みでもある。

既に述べた様に、基礎研究への功績も多大であるが、特に大きな研究に成長することが期待できるスケールの大きいものが見うけられた。

問題点としては、若い研究者が若いポストドクを指導する点が危惧されたが、実力のある研究者には余り問題とはならなかった。ただ、任期3年のポストドクには将来に対する不安がプレッシャーになった点は否めない。優秀なポストドクの人材払底が危惧されたが、やはり実力のある研究者が選ばれていたので、全員が優秀なポストドクを採用して成果を挙げていた。

（研究領域単位で研究を遂行することの意義）

上段に既に述べた様に、異分野間の有効な交流によって幾つかの共同研究と更に研究者の視野が広まった点は、若手研究者に与えたインパクトは測り知れない。