

## さきがけ研究領域「物質と光作用」 追跡評価報告書

### 総合所見

「光の究極的及び局所的制御とその応用」を戦略目標とした本研究領域は、2006年から2011年度までの6年間、3期にわたり、25件の研究課題を実施した。当該分野は、積層型有機薄膜を用いた有機薄膜太陽電池および有機電界発光(EL)素子の発明から世界的に注目されてきた研究分野であり、「光機能有機材料」に関する研究では、日本が世界をリードしてきたと言える。本研究領域は、「新規物質」の探索と応用展開を目指した大胆なものであり、研究期間中に多くのポテンシャルの高い研究成果が生み出された。

研究終了後も、研究の継続、あるいは新しい研究への展開がなされている。他省庁を含む他のプロジェクトに発展したものが10件、民間企業からの高額(1千万円以上)の助成が3件など、各研究者は数多くの研究助成を獲得している。それぞれが本研究領域の研究をさらに展開させ、「物質の光による操作の概念と理論」、「超分子やナノ集合体の構造を制御した超分子集合体の創生」、「単一カーボンナノチューブによる電界発生」、「ナノ粒子における局所プラズモン共鳴による電荷挙動」などの研究から得られた研究成果は、795報の学術論文(内、12報が被引用数100以上、66報が被引用数50以上)、および155件の国内外への特許出願という形で纏められ、世界に発信されている。また、文部科学大臣表彰を含め、各種学協会・民間団体などから計33件の受賞、表彰という実績にも繋がっている。さらに、招待講演は198件、報道件数は156件に達し、研究成果に対する学会あるいは産業界からの興味の高さが窺える。

また、「光機能材料」の革新を目指す本研究領域に参加した研究者は、研究期間中、新進気鋭の若手研究者であったが、研究終了以降、ほぼ全員が助教または講師から、准教授または教授へと昇格し、それぞれが各分野で活躍している。

結論として、本研究領域は、研究終了後も学術的および応用面で大きな研究成果を挙げていると高く評価できる。

### 1. 研究成果の発展状況や活用状況

研究終了後、数多くの本研究領域の研究者が種々の競争的資金を獲得し、それぞれの専門分野を活かした研究を展開している。その中で主な助成金として、以下の10件を挙げることができる。

#### ○JST さきがけ

- ・プラズモニクスを利用した高効率・超薄膜太陽電池(岡本晃一)
- ・強誘電性配位高分子複合界面の創製と光電変換素子への応用(大久保貴志)

#### ○JST CREST

- ・革新的塗布型材料による有機薄膜太陽電池の構築(山田容子)

・軌道/電荷の揺らぎを用いた低熱伝導性-高電気伝導性素子の開発(勝藤拓郎)

○科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)

・複合アセンブリー- $\pi$ 造形システム(矢貝史樹)

・有機ナノ結晶・有機デバイス界面の3D活性サイト科学の構築(山田容子)

・アシンメトリック配位磁性化合物の創出(所裕子)

○NEDO

・塗布型メタルベース有機トランジスタの開発と無線回路応用(中山健一)

○内閣府 NEXT

・光と相転移の相関による新しい光変換機構の構築(所裕子)

○総務省 SCOPE

・カーボンナノチューブとフォトニック結晶共振器の光結合(加藤雄一郎)

特に、本研究領域内の5名の研究者(山田容子、生駒忠昭、中山健一、矢貝史樹、増尾貞弘)がチームを組み、山田を研究代表者としてCRESTの研究課題に採択され、「革新的塗布材料による有機薄膜太陽電池の構築」の研究へ発展させたことは、特筆すべき展開である。CREST終了後、5名のそれぞれが、これをまた足掛かりに、今度は個別の特徴を活かすよう、さらに様々な方向に研究を発展させていったことは、さきがけ-CRESTという制度が非常に有意義に働いたと言える。

発表論文数は795報(内、12報が被引用数100以上、66報が被引用数50以上)であり、著名な学術誌への掲載とともに、被引用数からも影響力のある質の高い研究成果が得られたことが分かる。一方、国内外への特許出願は155件であり、研究成果の将来の実用化が期待される。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### (1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

基礎基盤的・学術的に優れた研究成果としては、以下の例を挙げることができる。

岡本は、発光材料に適さないとされていたシリコン系材料にプラズモニック発光増強を応用して、シリコンナノ粒子の赤色発光の内部量子効率40%を達成した。これによって、赤色発光を70倍に増強することに成功し、低価格・高効率赤色発光シリコンLEDの作成基盤となる技術を見出した。また、紫外領域のプラズモニック発光増強において、タンタル微粒子が $\sim 200\text{nm}$ の深紫外プラズモニック材料として有望であること、青色発光増強にはアルミニウム、インジウムの微粒子を用いることが有効であることを示した。

加藤は、単層カーボンナノチューブに交流電界をかけることにより、フォトルミネッセンス強度の制御が可能になることを示し、カーボンナノチューブ中の励起子のダイナミクスによる説明を行った。また、架橋カーボンナノチューブを用いた室温での単一光子発生の可能性も検証した。著名な論文誌による高い評価を受けている一方、将来の量子通信、量子

暗号、量子コンピューティングの発展に寄与すると考えられ、応用面でも期待されている。

立間は、プラズモン誘起電荷分離の機構を解明し、プラズモン誘起電荷分離が金自体を酸化して、水酸化金を生成させるほどの高い酸化力を持つことを明らかにした。加えて、プラズモン共鳴による局在電場(近接場光)が強い場所で酸化反応が起こることを解明し、これがエネルギーの高い正孔(熱正孔)によるものであることを示した。

所は、光誘起相転移という新奇な相転移現象の研究を発展させ、強い磁気異方性を示す光磁性錯体、光スピン相転移強磁性錯体、超イオン伝導性を示すキラル磁性錯体、負の熱膨張係数を有する相転移薄膜など、様々な新奇の材料とそのメカニズムの研究を進め、科学技術の発展に貢献した。

この他にも、矢貝の「超分子ポリマー」、山田の「新規有機半導体の合成」、勝藤の「分子軌道/電荷揺らぎ」、後藤の「非破壊・非侵襲な半導体ヘテロ接合の分析」などを挙げる事ができる。

一方、科学技術への貢献および研究成果への評価を示す指標の一つとして、以下の受賞が挙げられる。

- ・文部科学大臣表彰・若手科学者賞：矢貝史樹、所裕子
- ・日本化学会学術賞：立間徹
- ・日本化学会進歩賞：矢貝史樹
- ・光化学協会賞：山田容子、立間徹
- ・光化学協会奨励賞：森本正和
- ・APA Prize for Young Scientists：伊都将司
- ・文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム「秀でた利用6大成果」：所裕子
- ・エルゼビア社 J. Mag. Res 誌「Most-downloaded Publication Award」：後藤敦

この他、各学会、所属機関、民間財団等からの受賞を含め、計 33 件の受賞が報告されている。また、招待講演も 198 件に達し、本研究成果に対する関心もたれている。

## (2) 研究成果の応用に向けての発展状況

応用面で優れた研究成果としては、以下の例を挙げる事ができる。

山田を研究代表者とする CREST の研究課題において、矢貝は、多重水素結合による超分子モジュールという戦略の 1 つとして、アルキル鎖置換オリゴチオフェンにバルビツール酸を結合させて水素結合部位をもたせた  $\pi$  共役オリゴマーを合成した。これとフラーレン誘導体とをスピコートすることによりバルク型有機薄膜太陽電池を作製し、変換効率 3.01%、内部量子効率 96.1% を達成した。さらに、条件の異なるサンプルで変換効率 3.12% を記録した。山田は、可溶性の低い低分子半導体を前駆体化することにより可溶化した独自の有機半導体で、光電変換が可能であることを確認した。

飯田は、光場によるナノ構造の力学制御の研究成果を核酸・タンパク質などの生体分子認識加速システムの開発へ展開し、その後 DNA の二重螺旋形成の光制御、微量 DNA の塩基配

列検出の基本原理解明に発展させた。

藤原は、ランダム構造内の欠陥領域を用いた光局在モード制御を進展させ、酸化亜鉛の微粒子集合体に点欠陥としてポリマー粒子を導入することでレーザー発振が制御できることを検証し、さらにはダイヤモンドナノ粒子を用いたUV光のレーザー発振も観測した。まだ実用化には課題が多いと考えるが、レーザーの応用領域は今後も加工、通信、医療、照明、センシング等大きく広がると考えられており、レーザーの低コスト化、製造工程の環境負荷低減に向けた更なる進化を期待する。

道信は、開発したクイックケミストリー反応を応用して、簡便な色素増感型太陽電池用の増感剤の合成法を確立した。また、クイックケミストリーで合成したポリマーを用いたデバイスが、ユニポーラー永久メモリとして振る舞い、デジタルメモリポリマーとして実用化できる可能性を示した。

この他にも、加藤の「単一光子光源」、大久保の「太陽電池およびトランジスタ」、所の「ゼロ膨張材料および負膨張材料」、池沢の「半導体中の不純物発光中心からの単一光子生成」などを挙げるができる。

一方、飯田は、JSTとNEDOが主催するイノベーション・ジャパン2017(大学見本市&ビジネスマッチング)に大阪府立大学の提案テーマ責任者として出展し、多くの企業の訪問を受けた。国内外の医療機器メーカー、電子部品メーカーが研究成果に関心を示し、実際に共同研究契約を締結している。

なお、本研究課題終了後の全体の研究成果に関して報道機関から報じられた件数は計156件にのぼり、基礎分野のみならず応用分野で産業界においても注目されていると判断できる。

### (3) その他の特記すべき波及効果

国際的な共同研究に関しては、以下のものを挙げるができる。これらの国際ネットワークを形成して、それぞれが研究を進めている。

- ・加藤雄一郎：ロスアラモス研究所(米)とのカーボンナノチューブを使った光エレクトロニクスに関する共同研究
- ・矢貝史樹：ヴェルツブルク大学(独)、マックスプランク/コロイド・界面科学研究所(独)、キール大学(独)、原子力代替エネルギー庁(仏)、インド科学・工業研究評議会-学際的科学技術国立研究所(印)との分子デザイン材料に関する共同研究
- ・所裕子：レンヌ大学(仏)、ボルドー大学(仏)、ベルサイユ大学(仏)、グルノーブル大学(仏)、バレンシア大学(西)、ヤゲロニア大学(波蘭)、フロリダ大学(米)とのサンプル作成あるいは物性測定に関する共同研究

多くの研究者が研究終了後から現在に至るまでに、助教から准教授、准教授から教授へとキャリアアップしている。

### 3. その他

本研究領域の研究成果の実用化に繋がる幅広い応用研究、社会への還元などに関する新たな仕組み作りに期待したい。例えば、各種応用プロジェクトのチーム創成、適切なプログラムへの申請アドバイスなどの支援体制も有効と考える。

企業との共同研究への参画は、本研究領域終了後の研究成果が産業化に結びつく部分であり、今後の発展が期待される。現時点で我が国の光機能と分子材料の基礎研究は世界において優位性が十分認められるが、産業応用に向けての将来展望を考えると、我が国の産業として本当に社会的・経済的な波及効果を見込める国際競争力の強化には、出口戦略が重要と考えられる。

一方で、産業界の技術開発のスピードも速く、5年経過すると産業界が望む技術領域も大きく変化してしまう。今後は、このような産業界の技術動向の変化も鑑みながらテーマが進展し、産業界に貢献する成果が現れることを期待する。