

戦略的創造研究推進事業
個人型研究(さきがけ)
研究領域事後評価用資料

研究領域「ナノシステムと機能創発」

研究総括:長田 義仁

2016年3月

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1. 研究領域の概要 | 1 |
| (1) 戦略目標 | 1 |
| (2) 研究領域 | 2 |
| (3) 研究総括 | 3 |
| (4) 採択課題・研究費 | 4 |
| 2. 研究領域および研究総括の選定について (JST 記載) | 8 |
| 3. 研究総括のねらい | 9 |
| 4. 研究課題の選考について | 10 |
| 5. 領域アドバイザーについて | 13 |
| 6. 研究領域の運営の状況について | 15 |
| 7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況 | 23 |
| 8. 総合所見 | 40 |

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」

＜戦略目標からの抜粋＞

「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」の戦略目標は、「ナノテクノロジーを活用したプロセスの高度化と統合化を進めることによって、バイオとエレクトロニクスが融合したナノシステム、ナノ構造による化学反応場を利用したシステム、自律的に機能する分子システムなど、MEMS (NEMS) 等を含む次世代ナノシステムの創製を目指す」である。

これまで、様々なデバイスやシステムに見られる高速化・集積化・小型化等は、主としてトップダウンプロセス技術の発展に支えられてきた。それはシリコン CMOS の高集積化がフォトリソグラフィ技術の微細化によりなされてきたことに顕著に表れている。フォトリソグラフィ等の加工精度は 2007 年現在で 45 nm レベルに達しているが、上記の革新的な機能をもつナノシステムの創製には、数 nm レベルまで加工精度を高めることが必要である。

一方、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスでは、1 nm をきる分子サイズレベルでの形成精度も実現可能であるが、現状では分子等を配列させるだけの技術レベルに止まっている。自己組織化の技術を、分子配置、分子構造等を時間的・空間的にダイナミックに制御して自在にナノ構造体を構築することのできるレベルまで高めるとともに、それらナノ構造体を組み合わせることによって自律的に機能を創発するような自己機能化のレベルに発展させていくことが必要である。

本戦略では、「従来からの技術的蓄積のあるトップダウンプロセスと、今後の発展が大いに期待されるボトムアッププロセスについて、それぞれの高度化を一層推進するとともに、それらプロセス技術の様々な融合を試みることで、上記次世代ナノシステムの創製をはかることを目的」としている。

以上の戦略目標を受けて、若手研究者を中心とするさきがけにおいては以下のように目標を具体化した。

創発とは、局所的な相互作用を持つ個々の要素が多数集まることでその総和とは質的に異なる高度で複雑な秩序または自律的機能やシステムが生じる現象を指し、生物を含め広く自然界を捉えようとする基本的な考え方の 1 つである。創発現象が発現するためには階層構造の存在が必要であるがその発現機構についてはいまだよくわかっていない。本研究領域はこのような自律的機能創発のしくみを解析・解明するとともに機能創発を取り込んだ次世代ナノシステム的设计・創製を目指す研究を対象としている。

現在の最先端デバイスや電子機械システムは数多くの極小電子部品がアセンブリーした系であるが、環境変化に応じて自律分散的に判断し、行動するレベルには達していない。それは現在のシステムが多段階かつ相互作用を持つ階層構造を有していないからと言われ

ている。それゆえ、戦略目標にあるような「機能創発を備えたナノシステム」を将来的に実現するためには、従来のトップダウンプロセス技術を中心とするナノテクノロジーに加え、自然界を普遍的に律していると考えられる「創発」という新しいコンセプトを取り入れることが重要な解決策と考えられ、その一つの有力なアプローチは、生体に見られるような分子レベルからスタートしたボトムアップ手法によって自己組織構造体を構築し、その階層性によって発揮される高度な創発機能との概念的、技術的融合-統合が重要なものとなる。しかしながら、このような取り組みはこれまでなされたこともなく、かつ創発発現の仕組みがよくわかっていない現段階でその実現を目指すことは容易なことではない。しかし、これこそが我が国のイノベーションをもたらすコンセプトと基本技術になるものであり、これによって次代の世界をリードする環境と社会調和型科学技術になりうると考えられる。だからこそ、極めてチャレンジに富むこのような研究戦略を将来性ゆたかな若手に託すことは、さきがけ研究の重要なミッションであるといえよう。さきがけとしての具体的な目標は、ナノテクノロジーを活用したプロセスの高度化と統合化を一層進めるとともに、上述の機能創発という新しい概念を取り入れることによって、革新的戦略的次世代ナノシステムの設計と創製を目指すことである。

本研究領域では半導体工学や、デバイス設計工学、固体物理、レーザー科学などトップダウンプロセス技術を中心とするナノテクノロジー研究者と、分子生物学、有機化学、無機化学、高分子科学、医科学など分子レベルのボトムアップ研究を得意とする研究者、という研究手法の全く異なる極めて多彩な研究者から成り立っていることが大きな特徴である。それゆえ、これら異分野研究者間の活発な討論と議論を通じ、異分野間融合研究を推進して次世代ナノシステムの実現と人材育成をはかると共に、学問融合を積極的に推進して新たな分野を開拓する契機をつくることも本領域の目標である。

(2) 研究領域

「ナノシステムと機能創発」(2008年度発足)

本研究領域は、ナノテクノロジーにおけるトップダウン手法の高度化と精密なボトムアップ手法の駆使、場合によってはそれらの手法の融合によって、要素技術の単なる総和や重ね合わせではない自律的、非線形的に機能を生み出す「“創発する”」研究を推進し、次世代ナノシステムの構築を目指している。バイオとエレクトロニクスが融合したシステム、ナノ構造による反応場を利用したシステム、自律的に機能する分子システム等が具体的な次世代ナノシステム創製の例であるが、この実現のためにはフォトリソグラフィ、イオンビーム加工に代表されるトップダウンプロセス、自己組織し階層性を有する構造体を構築するボトムアッププロセス、さらには創発現象の発現とその仕組みに関する取り組みが重要となる。

このためには、1)精密工学・電子工学・物理工学・知能情報工学などトップダウンを中心的手法とする分野、2)多種多様な生体物質や高分子物質・無機材料・ナノ粒子・様々な

構造をもつ有機分子等のナノ構造体を時間的・空間的にダイナミックに制御する分野、3) 生体分子の示す自己構造化・自己複製・自己修復等の挙動から得られる定量的な情報の抽出や解析を行い、機能化するための設計指針やプロセスを確立する分野、更には、4) 生命科学・物質科学など自律的機能創発のしくみの解析・解明を目指す分野等々が対象となろう。

本研究領域のキーワードである”創発”は、次世代ナノシステムに期待される重要な属性としての意味と同時に、本研究領域の研究者の間の刺激的な相互作用が、個々の研究活動を越えた飛躍的なテーマ展開に結びつくことへの期待と確信を表現したものである。本研究領域を、この意味でバーチャルなナノ融合ラボと捉え、参加研究者の間のコラボレーションを奨励し、ナノシステムの実体化に向けたジョイントプロジェクトの自発的展開を積極的に推進していく。

(3) 研究総括

長田 義仁 (国立研究開発法人理化学研究所 客員主管研究員)

(4) 採択課題・研究費

(百万円)

| 採択 年度 | 研究者 | 所属・役職 上段：研究終了時 下段：応募時 | 研究課題 | 研究費 |
|------------|-----------------|--|--|-----|
| 2008 年度 | 岩堀 健治 | 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学 学研究科 研究員 (同 上) | 温度制御自己組織化シス テムの設計とナノ粒子高 次構造による機能発現 | 37 |
| | 梅津 光央 | 東北大学大学院工学研究科 教授 東北大学大学院工学研究科 准教授 | ナノ界面特異的バイオ接 合分子を用いた多元ナノ 結晶集合 | 40 |
| | 角五 彰 | 北海道大学大学院理学研究院物質化学研 究室 准教授 北海道大学理学研究院生命理学部門生命 融合科学分野 助教 | 階層構造を有する ATP 駆 動型ソフトバイオマシ ンの創製 | 42 |
| | 佐々木 善浩 | 京都大学工学研究科高分子化学専攻 准 教授 東京医科歯科大学学生体材料工学研究所 准教授 | 三次元人工細胞アレイか らなる化学チップの創成 | 40 |
| | 田川 美穂 | 名古屋大学大学院工学研究科 准教授 東京大学大学院総合文化研究科 特任研 究員 | DNA セルフアセンブリに よるナノシステムの創製 | 38 |
| | 松村 幸子 | がん研究会がん研究所蛋白創製研究部 特任研究員 がん研究会がん研究所蛋白創製研究部 研究員 | 適応進化的に機能創発す るナノキャリアの開発 | 43 |
| | 藪 浩 | 東北大学多元物質科学研究所 准教授 東北大学多元物質科学研究所 助教 | メタマテリアルの自己組 織的作製とナノリソグラ フィーへの応用 | 66 |
| | 山内 悠輔 (5 年型) | 物質・材料研究機構国際ナノアーキテク トニクス研究拠点 独立研究者 物質・材料研究機構国際ナノアーキテク トニクス研究拠点 若手独立研究者 | 次世代磁気記録媒体に向 けたナノ構造制御システ ムの構築 | 101 |

| | | | | |
|------------|-------------------------|---|--|-----|
| 2008 年度 | 山越 葉子 | スイス連邦工科大学(チューリッヒ)有機 化学研究室 教授 ペンシルバニア大学医学部・Department of Radiology Assistant Professor | 超分子型フラーレンを用 いた in vivo イメージ ング試薬の開発 | 39 |
| | 横川 隆司 (5 年型) | 京都大学大学院工学研究科 准教授 立命館大学理工学部 専任講師 | 分子による分子の操作を 可能にする Molecular Total Analysis Systems (MTAS) | 100 |
| 2009 年度 | 一木 正聡 | 産業技術総合研究所集積マイクロシステ ム研究センター 研究チーム長 東京大学大学院工学系研究科精密機械工 学専攻 准教授 | ナノ格子制御による薄膜 キャパシタ構造の作製と 剥離・転写・接合による ナノ電子部品用実装技術 の確立 | 38 |
| | 木戸 秋悟 | 九州大学先端物質化学研究所 教授 (同 上) | 細胞運動・機能を操作す るナノ・マイクロメカニ カルシステムの構築 | 41 |
| | 木村 建次郎 | 神戸大学大学院理学研究科 准教授 神戸大学大学院理学研究科 講師 | ナノシステムの大規模集 積化に向けた高速電子線 露光法の開発 | 46 |
| | 齊藤 健二 | 新潟大学企画戦略本部若手研究者育成推 進室テニユアトラック 助教 東京理科大学理学部第一部応用化学科 助教 | ナノ細線状半導体光触媒 システムの開発 | 39 |
| | 白幡 直人 (3 年型 挑戦延長) | 物質・材料研究機構国際ナノアーキテク トニクス研究拠点 独立研究者 物質・材料研究機構ナノセラミックスセ ンター 主任研究員 | 制御された単分子/環境 半導体ナノ構造を素材と した発光素子創製 | 80 |
| | 高澤 淳 | 首都大学東京大学院理工学研究科 特任 助教 (同 上) | ナノ構造を利用した高感 度質量分析総合システム の開発 | 39 |
| | 田中 秀明 | 大阪大学蛋白質研究所 助教 (同 上) | 生体粒子 vault の立体構 造情報を基盤とした新規 DDS の戦略的開発 | 39 |
| | 豊田 太郎 (5 年型) | 東京大学大学院総合文化研究科 准教授 千葉大学大学院工学研究科 助教 | 分子デザインによるリビ ッド・ワールドの創発 | 82 |

| | | | | |
|------------|--------------------------|--|--|-----|
| 2009 年度 | 内藤 昌信 | 物質・材料研究機構環境・エネルギー材料部門環境再生材料ユニット 主幹研究員 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 助教 | NANO から MICRO への精密自己組織化で拓く円偏光有機レーザーの創製 | 53 |
| | 永野 修作 | 名古屋大学大学院工学研究科 准教授 名古屋大学大学院工学研究科 助教 | 高分子ナノマテリアルの光アクティブ制御と機能探索 | 39 |
| | 平野 愛弓 | 東北大学大学院医工学研究科 准教授 (同 上) | ナノ形状設計に基づく人工神経細胞膜センサーの創製と機能発現 | 48 |
| | 廣畑 貴文 (5 年型) | York 大学電気学科 教授 York 大学電気学科 講師 | ナノ・スピンモーターの開発 | 112 |
| | 山西 陽子 | 芝浦工業大学機械工学科 准教授 東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻 助教 | ナノ電気メスによる高精度細胞センシング・加工システム | 40 |
| | 横山 英明 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授 (同 上) | ブロックコポリマーテンプレートによる 3 次元ナノパーツの創成 | 39 |
| | 和田 章 | 理化学研究所 専任研究員 理化学研究所伊藤ナノ医工学研究室 研究員 | 創発的機能制御性ペプチドアダプターの創成 | 39 |
| 2010 年度 | 池内 真志 (5 年型) (大挑戦) | 東京大学先端科学技術研究センター 講師 名古屋大学大学院工学研究科 COE 特任助教 | 膜マイクロマシニング技術を基盤とする共創的再生医療プラットフォームの構築 | 111 |
| | 上野 貢生 | 北海道大学電子科学研究所 准教授 (同 上) | ナノギャップ金属構造を利用した赤外・テラヘルツ光検出システム | 40 |
| | 小寺 哲夫 | 東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター 准教授 (同 上) | ナノ半導体配列構造を用いた情報処理機能創製 | 42 |
| | 角南 寛 | 琉球大学医学部細胞処理センター 特命教授 北海道大学大学院先端生命科学研究院 研究員 | 三次元パターンを利用した新規細胞走性の開発 | 40 |

| | | | | |
|------------|----------------------|--|---|---------|
| 2010 年度 | 千葉 大地 | 東京大学工学系研究科物理工学専攻 准教授 京都大学化学研究所 助教 | 電界による磁化スイッチングの実現とナノスケールの磁気メモリの書込み手法への応用 | 54 |
| | 松永 行子 | 東京大学生産技術研究所 特任講師 東京大学生産技術研究所 特任助教 | ボトムアップ組織形成術による生体組織システムの構築 | 43 |
| | 藤内 謙光 | 大阪大学大学院工学研究科 准教授 (同 上) | 有機ナノクリスタルの発光プロセス変換による新規バイオイメージングシステムの開発 | 43 |
| | 堂野 主税 | 大阪大学産業科学研究所 准教授 大阪大学産業科学研究所 助教 | 疎水領域を有する核酸を用いた機能創出 | 39 |
| | 長尾 祐樹 ^(*) | 北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科 准教授 東北大学大学院工学研究科 助教 | ナノプロトニクス現象を利用した化学素子化燃料電池の開発 | (途中で終了) |
| | 生津 資大 | 兵庫県立大学大学院工学研究科 准教授 (同 上) | 発熱ナノカプセル粒子の鑄込成型体を用いた瞬間接着技術の創成 | 47 |
| | 早水 裕平 | 東京工業大学大学院理工学研究科 准教授 University of Washington materials Science and Engineering Research Associate | 機能性ペプチドを用いたナノシステムの創製 | 47 |
| | 古海 誓一 | 物質・材料研究機構先端フォトニクス材料ユニット 主幹研究員 物質・材料研究機構光材料センター 主任研究員 | 3次元メゾスコピック・エンジニアリングによる有機アクティブレーザー光源の創出 | 46 |
| | 宮内 雄平 | 京都大学エネルギー理工学研究科 特任准教授 京都大学化学研究所 特別研究員 | 量子ナノ構造近接相互作用により創発する先端光機能 | 47 |
| | 山田 智明 (5年型) | 名古屋大学大学院工学研究科 准教授 東京工業大学大学院総合理工学研究科 特任助教 | スマートセンシングのためのナノオブリック圧電体の創製 | 101 |

| | | | | |
|------------|-------|--------------------------|---|------|
| 2010 年度 | 吉田 浩之 | 大阪大学大学院工学研究科 助教 (同 上) | 液晶自己組織化にドライ ブされたスイッチャブ ル・メタマテリアルの創 製 | 40 |
| | | | 総研究費 | 2060 |

* : 3 期生の長尾祐樹は「最先端次世代プログラム」に採択されたため研究を途中で終了しており、評価には加えない。

2. 研究領域および研究総括の選定について (JST 記載)

本研究領域は、従来からの技術的蓄積のあるトップダウンプロセスと、今後の発展が大いに期待されるボトムアッププロセスについて、それぞれの高度化を一層推進するとともに、それらプロセス技術の様々な組み合わせを試みることで、次世代ナノシステムの創製を目指す研究を対象とした。

さきがけでは、特に、個人の独創的な発想を活かし、次世代ナノシステムの創製に向けた高次機能を創発するモノづくりを目指し、広範な分野の中から次世代ナノシステムへのトリガーとなるべき機能創発を目指す独創的研究を取り上げる領域が選定された。

同じ戦略目標の下に推進する CREST 研究領域「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」では、トップダウンプロセスとボトムアッププロセスとの融合による革新的な機能を発現する次世代ナノシステムの構築を目指し、CREST 研究領域「プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出」では、制御性と拡張性に課題を抱えるボトムアッププロセスに生体模倣等の新たな手法を取り込むことで、システムのキー要素となる自立した機能材料を創出する研究を推進した。これらの研究領域は、総合的かつ相補的に対象分野を満たすように考慮されており、より複雑な構造や高い機能を有する次世代デバイス・システムの創製を目指す戦略目標の達成に向けて選定された。

上記の実現には、幅広い分野に造詣が深く、関連分野の研究者からの信頼が厚い上、マネジメント能力を兼ね備えた人物を総括に選定する必要があった。長田義仁氏は、高分子ゲルを用いた人工筋肉の研究で世界的に高い評価を得ており、「創発」をキーとした分野横断的な研究を展開され、高分子学会賞、日本化学会学術賞、高分子化学功績賞を受賞するなど優れた研究実績を有し、高分子学会副会長や日本 MRS 常任理事を歴任するなどの実績をお持ちである。

また、北海道大学では理事・副学長兼知的財産本部長を経験されており、理化学研究所では当時、副所長をされ、九州大学、北海道大学、大阪大学と連携した「分子情報生命科学」研究の中心的役割を果たしており、我が国の世界トップレベル研究拠点(WPI)プログラムのプログラムオフィサーもされている。

さらに、2005 年度からのさきがけ研究領域「構造制御と機能」の領域アドバイザーとなるなど若手研究者の人材育成にも大いに貢献され、本研究領域のように多くの若手研究者

の応募が見込まれるさきがけ研究領域の研究総括として適任と考えた。

なお、本研究領域の研究総括は当初は、(独)産業技術総合研究所主幹研究員の横山浩氏に引き受けていただいたが、事情により初年度の募集中に辞退されたために長田義仁氏に研究総括をお願いした。

3. 研究総括のねらい

本研究領域の目標は、機能創発する次世代ナノシステムの構築を目指す独創的・挑戦的研究を展開することである。ここでいう創発(emergence)とは、下位の階層レベルにおける要素的、局所的相互作用が環境との関係のもとで、マクロな秩序状態が新たに自律的に、しかも単なる総和や重ね合わせではなく、非線形的に形成され、その結果、集積的(integrated)協同的(cooperative)同調的(synchronized)機能が上位の階層レベルで発現することである。“創発”は、生物を含め広く自然界を捉えようとする基本的な考え方の1つであり、とりわけ「階層性」についての意識が大切になる。たとえば、ナノテクノロジーの象徴的成果の一つである、感覚器官(センサー)や運動器官(モーター)を備えた最先端ロボットは、究極の電子機械分子システムとすることができるが、それは数多くの極小電子部品が要素として集合したシステムであり、いまだ、自律分散的に環境に反応し自律的に行動するシステムのレベルには達していない。その理由の一つとして階層性がないことによる創発性の欠如が指摘されており、これを実現するにはトップダウンプロセス技術を中心とするナノテクノロジーに加え、生体に見られるような分子レベルからスタートしたボトムアップな自己組織化による階層構造の構築と、それゆえに発揮される高度な創発機能との概念的、技術的融合-統合が重要なアプローチとなる。

本研究領域はこのような自律的機能創発のしくみを考察するとともに機能創発を発現しうる次世代ナノシステムの設計・創製等をめざすことを研究対象としている。本研究領域では、MEMS(NEMS)やナノデバイスに代表されるナノテクノロジーを活用したプロセスのさらなる微小化や機能拡張、新規分野への応用を目指した独自のアプローチを進めるとともに、時間軸・空間軸の両面でダイナミックにプログラム可能なボトムアップ手法による自己組織化とその応用を考えることによって、たとえばバイオとエレクトロニクスが融合したような次世代ナノシステムの構築を目指す。

本研究領域の特徴は半導体工学や固体物理、レーザー工学などトップダウンプロセス技術を中心とするナノテクノロジー研究者と、生物科学、物質科学、高分子科学など分子レベルのボトムアップ研究を得意とする研究者という極めて多彩な研究者から成り立っていることである。これら異分野研究者間の討論と議論を通じ、異分野間コラボレーションと融合を推進し、次世代ナノシステムの設計・創出を積極的に進めていく。これら次世代ナノシステムは、将来的には低品位分散エネルギー集約システム、外部の指令によって組み替え可能な分子構造体、ナノ空間での物理化学現象に基づく効率的なナノ運動システム、人工筋肉やアクチュエーターデバイス、これらを統合した医用ナノシステムなどの開発と

実現につながり、現代社会が抱える、環境、資源、エネルギー、福祉など喫緊の諸課題を解決する環境調和型イノベーションを創出し、世界をリードする日本固有の次世代科学技術となる可能性を持つ。

真の創発機能を持つナノシステムを構築するためには、ナノスケールにおける微細加工、原子分子の挙動の観測、精密な生体分子操作といったハード技術の向上だけでなく、創発現象を解析し、理解を一層深めるための数理科学的解析、シミュレーションといった理論やソフト技術の発展も将来重要となろう。本さきがけ研究が既存の諸科学領域を統合し、新規融合科学領域の創成の契機になることも狙いのひとつである。幸い、領域アドバイザー陣は、別表にあるようにトップダウンプロセス、ボトムアッププロセス、ならびにデバイス・システムに関し深い知見と経験を有するきわめて多領域の専門家たちから成り立っている。研究総括並びに領域アドバイザー陣は領域全体を俯瞰しつつ強力なイニシアチブを発揮して、互いのグループ間の連携を密にし、共通インフラも使いながら、異分野間融合、理論と実験の統合、人材の交流等を活発に推進して成果につなげたい。

4. 研究課題の選考について

本研究領域は、独創的な発想の下に、微細加工、電子工学、知能情報工学などのトップダウン手法の高度化とバイオ・分子科学、生命科学、医用工学などボトムアップ手法の高次構造化と階層化、さらに両手法の融合・統合を図ることにより、次世代高次機能を創発するナノシステム、たとえば、高細密三次元加工プロセスによる高機能ナノシステム、自己組織化分子機能システム、創発機能センシング・運動ナノデバイスなどの構築と実現を目指す挑戦的な研究を対象としている。

単にトップダウン手法とボトムアップ手法の融合を図るだけでなく、また既存の学問領域や手法を組み合わせたものでもなく、それらを超えて融合した独自の発想と独創的設計とその技術の集積にもとづいた挑戦的提案を求めた。「創発」については分野や個人によって様々な捉え方がある。そこで本研究領域では「創発」に関しては研究者に広く自由に捉えてもらって様々な考え方、手法、物質系でできるだけ自由にアプローチし、独自の考え方に基づく次世代ナノシステムの提案を評価して選考した。

またこれまでの3年型の研究に加え5年型の研究と大挑戦型を公募したのも特徴である。

①2008(平成20)年度

公募に際してバイオ素子、細胞アレイチップ、ナノキャリア、ナノリソグラフィー、ナノ記録媒体など、105件(3年型90件、5年型15件)の応募があった。これらの研究提案を12名の領域アドバイザーのご協力を得て書類選考を行なった。「さきがけ」プログラムの趣旨にあるような、若手研究者らしい独自の、そして挑戦的発想であることを重視した。このような観点から研究提案22件(うち3年型17件、5年型5件)を面接対象とした。面接選考に際しては提案者自身の着想であるかどうかという前記の趣旨確認に加え、研究内容の

発展性、提案者の問題意識、研究環境など多面的に公平かつ厳正な審査を行った。

選考の結果、初年度は、10件(うち3年型8件、5年型2件)を採択することにした。自己組織化ナノ粒子、DNAナノシステム、 μ TASなど、いずれも新しい着想と意欲に満ちた課題を選ぶことが出来たものと考えている。不採択課題の中にも、挑戦的、意欲的な課題も数多く見受けられたが、計画性に問題があったり、本研究領域の対象の枠外であったりして採択までには至らなかった。これらの提案者には今回の問題点を踏まえた上で、提案を練り直して、再挑戦するよう助言した。

②2009(平成21)年度

2009年度も3年型と5年型の研究を公募した。さらに、希望する応募者については2009年度から始まった「大挑戦型」研究についても審査を行い、より一層多様な分野と深化した発想の下、挑戦的で夢多い提案がなされることを期待した。

2009年度は、さまざまな分野の研究者から合計177件(3年型146件、5年型31件)もの応募があった。これは前年のほぼ2倍であり、本研究領域が科学の進むべき方向を的確に捉えているだけでなく、数多くの若手研究者の要望に応え、広く注目されていることの表れであると確信した。

選考に当たっては、応募課題の利害関係者の関与を避け、他制度の助成金などにも留意し、公平、厳正に行った。提案数が多かったため、12名の領域アドバイザーの他にあらたに7名の外部評価委員の方々のご協力を得て書類選考を行った。「さきがけ」プログラムの趣旨にあるように、若手研究者らしい独自のそして挑戦的発想に基づく研究提案であるかどうかを重視した。このような観点から審査した結果、研究提案44件(3年型36件、5年型8件)を面接対象とした。

面接選考に際しては、提案者自身の着想による独自の挑戦的な内容であるかどうかに加えて、研究内容の科学性・発展性、提案者の問題意識と研究環境など、多面的な要素を公平かつ厳正に検討して審査した。その結果、14件(3年型12件、5年型2件)の提案を「通常型」研究として採択するに至った。これらはいずれも上記の観点を満たし、新しい着想と意欲にみちた課題であると考えられる。さらに、14件を除いた30件の中から、極めて創造性豊かで研究目標が達成された際の波及効果が大きいもの2件を「大挑戦型」研究に推薦したところ、1件が採択となった。

不採択課題の中にも挑戦的・意欲的で優れた提案もあったが、採択数に限りがあるため残念ながら採択できなかった。また、オリジナリティが明確でない、研究実施計画が十分に練られていない、他の手段との比較が不十分である、アイデアは良いが科学的な検討が不足している、等々の理由で採択には至らなかった提案もあり、これらの提案者には今回の問題点を踏まえて提案を練り直し、再度さきがけに挑戦するよう助言した。

③2010(平成 22)年度

2010 年度も 3 年型と 5 年型の研究提案を公募した。また、希望する応募者については前年度から始まった「大挑戦型」研究としての審査も行った。

2010 年度は本研究領域の公募最終年度であったが、様々な分野の研究者から合計 254 件(3 年型 205 件、5 年型 49 件)もの応募があった。この数は初年度の約 2.5 倍、昨年の約 1.4 倍で 2 年連続の大幅な増加であった。応募数の増加は、本研究領域が今後の科学が進むべき方向を的確に捉えているとともに、数多くの若手研究者の要望に応え、広く注目されていることの現われであろう。

254 件の提案を正確に評価するため、15 名の領域アドバイザーの他にあらたに 8 名の外部評価者のご協力を得て書類選考を行った。提案書の審査に際しては、さきがけプログラムの趣旨にあるように、若手研究者らしい独自のそして挑戦的発想に基づく研究提案であるかどうかを重視した。このような観点から厳正に審査した結果、254 件の研究提案のうち 38 件(3 年型 30 件、5 年型 8 件)を面接対象とした。

面接選考では、提案者自身のアイデアによる独自の挑戦的内容であるかどうかに加えて、研究内容の科学性・発展性、提案者の問題意識と研究環境など、多面的な要素を公平かつ厳正に検討して審査した。38 件の面接選考の結果、3 年型 13 件、5 年型 2 件の合計 15 件(大挑戦型 1 件を含む)の提案が採択されるに至った。なお、大挑戦型の審査を希望した提案のうち、極めて創造性豊かで研究目標が達成された場合の波及効果が大きいと期待される 3 件を推薦した。その結果、5 年型として採択した 1 件が大挑戦型としても採択されることになった。

これら 15 件の研究提案は、いずれも上記の審査基準を十二分に満たし、新しい着想と意欲にみちた課題であると考えられる。

なお、不採択提案の中にも挑戦的・意欲的で優れたものが多数あったが、採択数に限りがあるためこれらを採択できなかったのは残念であった。一方、研究のオリジナリティが明確でない、研究実施計画に問題がある、最終目標へ至る過程が十分検討されていない、他の手段との比較が不十分である、アイデアは良いが科学的検討が不足している、さらには、本研究領域の趣旨に合致しない、等々の理由で採択に至らなかった提案もあったので、これらの提案者には今回の問題点を踏まえて研究内容を練り直し、今後の研究をさらに発展させるよう助言した。

今年度採択された 3 期生が、既にさきがけ研究を進めている本研究領域の 1 期生・2 期生とともに、独創的で画期的な研究を推進し、将来の科学技術の興隆に資するよう領域アドバイザーの方々とともに助言、指導した。

5. 領域アドバイザーについて

(1) 領域アドバイザー

(2014年2月時点)

| 領域アドバイザー名 | 所属 | 現役職 | 任期 |
|-----------|---------------|-------|-----------------|
| 新井 史人 | 名古屋大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 生田 幸士 | 東京大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 居城 邦治 | 北海道大学 | 教授 | 2010年3月～2016年3月 |
| 今堀 博 | 京都大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 宇佐美 光雄 | (株)R&V | 代表取締役 | 2008年7月～2016年3月 |
| 江刺 正喜 | 東北大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 須賀 唯知 | 東京大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 染谷 隆夫 | 東京大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 田口 善弘 | 中央大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 中西 八郎 | 東北大学 | 監事 | 2008年7月～2016年3月 |
| 原 正彦 | 東京工業大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 原田 慶恵 | 京都大学 | 教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 三谷 忠興 | 北陸先端科学技術大学院大学 | 名誉教授 | 2010年3月～2016年3月 |
| 山下 一郎 | 奈良先端科学技術大学院大学 | 客員教授 | 2008年7月～2016年3月 |
| 渡辺 順次 | 東京工業大学 | 教授 | 2010年3月～2016年3月 |

領域アドバイザーの推挙に当たっては、本研究領域の内容と趣旨に対して深い理解があることに加え、研究の発展性、提案者の問題意識、研究環境に対する配慮など多面的かつ公平に判断できる科学・技術者を考慮するようにした。次に本研究領域の特徴である半導体工学や固体物理などトップダウンプロセス技術を中心とするナノテクノロジー研究者および生物科学、物質科学、高分子科学など分子レベルの研究を得意とするボトムアップ研究者の中から他分野に関してもできるだけ広い知識と経験を有する専門家を推薦対象とした。さらに異分野研究者間の討論と議論の重要性を理解し、異分野間コラボレーションと融合をアドバイスでき、次世代ナノシステムの実現に向けたジョイントプロジェクトの展開を積極的にバックアップしていけるような我が国を代表する第一線の専門家15名を幅広く網羅した。

領域アドバイザーの人選にあたっては、上記の点に加え、特に以下の点を考慮した。

- ・若手研究者に対し積極的、直接的、かつ愛情と熱情をもってアドバイスできる方
- ・研究方向や研究方針を具体的に提案して指導できる方

- ・幅広い研究哲学を持っている方
- ・高度の技術を持っている方
- ・さきがけ研究でロールモデルになり得る方
- ・女性研究者、企業所属の研究者、数理科学研究者

物質科学の応募者および採択者が多いため、2010年度より、高分子、液晶、固体物性を専門とする物質科学の領域アドバイザーを3名増員して(合計15名)、一層の活発化と、より丁寧な対応を図った。

外部評価委員は各年の応募状況により、多い専門分野に応じて該当する分野の専門家に書類選考への参加依頼をした。

技術参事が事務参事とともに常に早めに日程調整したので、別表にあるように毎回多くの領域アドバイザーの出席を得、極めて活発な研究指導がなされた。

(2) 外部評価委員

| 依頼年度 | 氏名 | 所属(当時) | 役職 |
|--------|-------|-----------------------------------|-------------|
| 2009年度 | 明石 満 | 大阪大学大学院工学研究科 | 教授 |
| | 居城 邦治 | 北海道大学電子科学研究所 | 教授 |
| | 伊藤 嘉浩 | (独)理化学研究所 基幹研究所 | 主任研究員 |
| | 魚崎 浩平 | 北海道大学大学院理学研究院 | 教授 |
| | 菊池 裕嗣 | 九州大学先端物質化学研究所 | 教授 |
| | 竹田 美和 | 名古屋大学大学院工学研究科 小型シンクロトロン光研究センター | 教授 センター長 |
| | 吉川 研一 | 京都大学大学院理学研究科 | 教授 |
| 2010年度 | 明石 満 | 大阪大学大学院工学研究科 | 教授 |
| | 魚崎 浩平 | (独)物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 | 主任研究員 |
| | 菊池 裕嗣 | 九州大学先端物質化学研究所 | 教授 |
| | 小松 紘一 | 福井工業大学工学部 | 教授 |
| | 竹田 美和 | 名古屋大学大学院工学研究科 | 教授 |
| | 出村 誠 | 北海道大学大学院先端生命科学研究院 | 教授 |
| | 野地 博行 | 大阪大学産業科学研究所 | 教授 |
| | 前田 瑞夫 | (独)理化学研究所基幹研究所 | 主任研究員 |

6. 研究領域の運営の状況について

さきがけ研究の趣旨・目的は「戦略目標に基づいて未来のイノベーションの芽を育む個人型研究」であり、「ユニークなイノベーション、ヒューマンネットワーク形成」である。

さきがけ期間中はもちろん、その後も長きにわたって各研究者が広い視野と高い志を持って独自の新しい研究を切り拓き、世界をリードできるような研究者を育成するため、総括は以下の基本運営方針を定めた。

- ① 成果主義を求めず、研究の背景に通底する意味と価値を深く議論して研究の独創性と質を高める。
- ② 異分野を積極的にとり入れ、新分野、未開拓領域を切り拓く能力を育てる。
- ③ 国際最高レベルに達する表現力と幅広い伝達力を涵養する。

本戦略目標は、単なる技術的・プロセス的研究ではなく、あくまでも創発機能を有する次世代ナノシステムの概念を構築し、その創製を目指す研究を対象とするものであり、この点を明確に意識した領域運営を目指した。

そこで、基本方針のもと、トップダウン、ボトムアップ、システム構築の各分野について幅広く、深い知見を持ち、かつ領域全体を広く俯瞰できる15名の領域アドバイザーのもと、個人個人の研究の独自性を最大限尊重すると同時にその研究の長所・短所、将来方向と展望、同分野での世界的位置づけ、他分野との関係などに関して深く議論を促し、指導した。また研究領域内の連携を密にしつつ、異分野間の交流と議論、理論と実験の融合、他の研究拠点との連携をはかるなどの人材の交流等をして成果につなげるための具体的な運営につとめた。

また、重要な基盤技術になると考えられる研究に対しては集中的な議論や提言をし、関連研究者の紹介や関係機関との連携協力体制の助言なども積極的に行った。

(1) 「領域会議」等

「領域会議」は最重要活動であるため、上記の基本方針、運営方針に基づいて以下のような特徴ある領域会議を実施した。「領域会議」では、半年間の研究成果の進捗と今後の方向性の検討を行うとともに、研究者が自分の研究を本質的に捉え直し、研究能力の向上と外部発信力も付けるように努めた。

- 研究者は原則、全員出席を義務とした。事前に会議日程の十分な予告をして最大数の研究者・領域アドバイザーが参加できるようにした。アドバイザーは領域会議で講演、座長、講評などに主体的に関与した。
- 多分野の研究者・領域アドバイザーがいるという特徴をいかし直截的、多面的な討論と具体的な助言、親切的な激励を通して研究の飛躍的進展に尽くした。また、英語での発表と討論、さきがけ他領域との合同領域会議、同じ戦略目標を持つCRESTの2研究領域との研究交流会及び合同公開シンポジウムの実施など、多彩な領域会議の形態を工夫した。

- ▶ 世界レベルの研究者としての能力と力量をつけるため、様々な発表テーマを与え発表内容の工夫をした。具体的なテーマを挙げると、
 - ・世界の関連研究の中でそして過去の関連研究の中で自分の研究がどのような位置にあるかをプレゼンする(研究の時空間的相対化)
 - ・社会(たとえばメディア、会社経営者、政治家、一般市民)に対し研究内容を簡潔明瞭に説明する(社会的アピール力向上)
 - ・将来(10年～20年後)の自分の研究の展望・展開について大きな視野でプレゼンする(自分の研究の時間的相対化)
 これらはさきがけ研究者が日常的に意識しない場合が多く、大きな視点から今後の方向性と自分自身の研究姿勢を客観的に見つめなおす貴重な機会になった。
- ▶ 要旨集(研究者の発表要旨が中心)を開催1週間前には送付して、会議での議論の活発化を促した。さらに、口頭発表に加え、ポスター発表も実施して、専門的でより深い議論が十分時間を取って徹底的にできるようにした。
- ▶ 領域メンバー全員が、より親睦を醸成し、深く議論できるように様々な交流会を通じ、領域アドバイザー—研究者間、研究者—研究者間、研究者—卒業生間で親交が深まるような工夫をした。

| 会 議 名 | 開 催 日 | 開 催 場 所 |
|--|----------|--------------------|
| 第1回領域会議 | 2009年2月 | 静岡県熱海市 |
| 第2回領域会議 | 2009年10月 | 宮城県宮城郡松島町 |
| 第3回領域会議 | 2010年3月 | 大阪府大阪市 |
| 第4回領域会議 さきがけ研究領域「構造制御と機能」 (岡本佳男研究総括)との合同領域会議 | 2010年9月 | 北海道札幌市 |
| 第5回領域会議 | 2011年3月 | 愛知県名古屋市 |
| 第6回領域会議 | 2011年9月 | 茨城県つくば市 |
| 第7回領域会議 | 2012年3月 | 京都府京都市 |
| 第8回領域会議 | 2012年10月 | 東京都千代田区(JST) |
| 第9回領域会議 | 2013年3月 | 福岡県福岡市 |
| 第10回領域会議 | 2013年9月 | 兵庫県姫路市 |
| 第1回CREST2領域との3研究領域合同シンポジウム | 2013年10月 | コクヨホール 東京ショールーム |
| 第11回領域会議 | 2014年2月 | 静岡県足柄下郡箱根町 |
| JST—MANA 合同国際シンポジウム | 2014年7月 | つくば市 MANA 講堂 |
| 第12回領域会議 | 2014年7月 | つくば市 MANA 講堂 |

| | | |
|------------------------------|----------|-----------------------------|
| 第2回CREST2領域との3研究領域合同シンポジウム | 2014年10月 | コクヨホール 東京ショールーム |
| H26年度課題成果発表会 | 2015年2月 | 東京都千代田区(JST) |
| 第13回領域会議 (ナノシステムと機能創発研究会) | 2015年7月 | 名古屋大学東山キャンパス ベンチャーラボラトリー |
| 成果フォローアップ会議 | 2015年9月 | 東京都千代田区(JST) |
| 第3回CREST2領域との3研究領域合同シンポジウム | 2015年9月 | コクヨホール 東京ショールーム |
| 修了生成果検討会議 | 2015年11月 | 東京都千代田区(JST) |
| H27年度課題成果発表会 | 2015年12月 | 東京都千代田区(JST) |



領域会議の様子

(2)「研究室見学会」の実施

研究室見学を行い、研究内容の紹介と研究者同士の研究交流を図った。実際に機器や施設などを見学したり、多様な研究情報を得ることによって、他分野の具体的研究に触れて新しい刺激や触発が受けられたとの声が多く大変好評であった。また、具体的な情報をもとに交流する機会となったため、領域内で多くの共同研究や情報交換、相互援助などが実現し有効であった。さらに、研究者の自発的研究会も実施された。即ち、1期生と2期生有志が他領域のさきがけ研究者(卒業生)と一緒にナノサイエンスに関する年始の小シンポジウムを、また、3期生全員が各自の研究発表を聞きながら自由な雰囲気徹底的に議論する若手研究会を行った。これらも、上記の他領域との合同会議の実施、さらには、領域会議での親密な議論の推進などがその背景にある。

| 実施時期 | 研究機関 | 見学した研究室 |
|----------|-----------|------------------|
| 2009年10月 | 東北大学 | 研究室(4カ所) |
| 2010年9月 | 北海道大学 | 研究室(2カ所) |
| 2011年3月 | 名古屋大学 | 研究室(3カ所) |
| 2011年9月 | 物質・材料研究機構 | 機構のご厚意により施設全体を見学 |
| 2012年3月 | 京都大学 | 研究室(2カ所) |
| 2012年10月 | 東京大学 | 研究室(3カ所) |
| 2013年3月 | 九州大学 | 研究室(4カ所) |
| 2013年9月 | 兵庫県立大学 | 研究室(2カ所) |



研究室見学会の様子

(3) サイトビジットの実施

採用年度に研究総括と技術参事(及び事務参事、領域担当者)が勤務先に行き、上司に挨拶してさきがけ研究者へのバックアップを依頼した。さらに、研究室を見学して研究環境も確認し、さきがけ研究者の意気込みや悩みなどを良く聞いて必要な対処を行った。

また、これとは別に技術参事単独で研究者を訪問して、研究内容について説明を受けるとともに、JST に対する要望などを聞き、その解決のために尽力した。(なお、研究とは直接関係ない個人的な悩みなどについてサポートすることもあった)

さらに、特許に関する基本的な情報を研究者に説明し積極的に出願することを促した。

| 訪問日 | 研究者 | 訪問先 | 目的 |
|------------|---------|----------------|----------------------|
| 2008/10/09 | 角五彰 | 北海道大学 | さきがけ研究への協力依頼、研究環境の確認 |
| 10/24 | 田川美穂 | 東京大学 | 同上 |
| 12/18 | 山内悠輔 | 物質・材料研究機構 | 同上 |
| 12/22 | 岩堀健治 | 奈良先端科学技術大学院大学 | さきがけ研究への協力依頼、研究環境の確認 |
| 12/22 | 横川隆司 | 立命館大学 | 同上 |
| 12/26 | 梅津光央、藪浩 | 東北大学 | 同上 |
| 2009/1/5 | 田川美穂 | 東京大学 | 米国異動に関する打合 |
| 1/19 | 佐々木善浩 | 東京医科歯科大学 | さきがけ研究への協力依頼、研究環境の確認 |
| 1/19 | 松村幸子 | がん研究会 がん研究所 | 同上 |
| 2/5 | 横川隆司 | 立命館大学 | 研究状況の確認 |
| 2/6 | 岩堀健治 | 奈良先端科学技術大学院大学 | 特許の打合せ |
| 3/10 | 梅津光央、藪浩 | 東北大学 | 研究状況の確認 |
| 3/18 | 佐々木善浩 | 東京医科歯科大学 | 研究状況の確認 |
| 3/19 | 横川隆司 | 立命館大学 | 移転の打合せ |
| 3/23 | 松村幸子 | がん研究会 がん研究所 | 研究状況の確認 |
| 3/24 | 山内悠輔 | 物質・材料研究機構 | 研究状況の確認 |
| 3/25 | 角五彰 | 北海道大学 | 研究状況の確認 |
| 6/12 | 横川隆司 | 京都大学 | 研究状況の確認 |
| 8/24 | 梅津光央、藪浩 | 東北大学 | 特許の打合せ |
| 10/26 | 永野修作 | 名古屋大学 | さきがけ研究への協力依頼、研究環境の確認 |
| 11/05 | 和田彰 | 理化学研究所 | 同上 |
| 11/17 | 一木正聡 | 東京大学 | 同上 |
| 12/04 | 木戸秋悟 | 九州大学 | 同上 |
| 12/08 | 高見沢淳 | 首都大学東京 | 同上 |
| 12/10 | 白旗直人 | 物質・材料研究機構 | 同上 |
| 〃 | 横山英明 | 東京大学 | 同上 |
| 12/24 | 永野修作 | 名古屋大学 | 同上 |
| 〃 | 内藤昌信 | 奈良先端科学技術大学院大学 | 同上 |
| 12/25 | 田中秀明 | 大阪大学 | 同上 |
| 〃 | 木村建次郎 | 神戸大学 | 同上 |
| 2010/01/19 | 斎藤健二 | 東京理科大学 | 同上 |
| 1/14 | 横川隆司 | 京都大学 | 設備の確認 |
| 2/03 | 山西陽子 | 東北大学 | さきがけ研究への協力依頼、研究環境の確認 |
| 〃 | 平野愛弓 | 東北大学 | 同上 |
| 2/25 | 豊田太郎 | 東京大学 | 同上 |
| 3/26 | 平野愛弓 | 東北大学 | 研究状況の確認 |

| | | | |
|-----------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| 〃 | 廣畑貴文 | 東北大学 (所属はヨーク大学) | 同上 |
| 4/19 | 木村建次郎 | 神戸大学 | 特許の打合せ |
| 4/20 | 和田彰 | 理化学研究所 | さきがけ研究への協力依頼、 研究環境の確認 |
| 5/18 | 内藤昌信 | 奈良先端科学技術大学 院大学 | 同上 |
| 〃 | 木村建次郎 | 神戸大学 | 同上 |
| 〃 | 田中秀明 | 大阪大学 | 同上 |
| 10/22 | 廣畑貴文 | ヨーク大学(英国) | 同上 |
| 10/25 | 山越葉子 | ETH (スイス) | 研究契約の協議 |
| 11/5 | 斎藤健二 | 東京理科大学 | 研究設備の借用の相談 |
| 12/10 | 上野貢生 | 北海道大学 | さきがけ研究への協力依頼、 研究環境の確認 |
| 2011/2/15 | 小寺哲夫 | 東京工業大学 | 同上 |
| 3/11 | 山田智明 | 名古屋大学 | 同上 |
| 4/15 | 松永行子 | 東京大学 | 同上 |
| 4/19 | 古海誓一 白幡直人 | 物質・材料研究機構 | 地震被害状況の確認 |
| 5/12 | 堂野主税、 藤内謙光 | 大阪大学 | さきがけ研究への協力依頼、 研究環境の確認 |
| 5/13 | 宮内雄平 | 京都大学 | 同上 |
| 5/20 | 角南寛 | 北海道大学 | 同上 |
| 6/1 | 梅津光央、藪浩 平野愛弓 | 東北大学 | 地震被害状況の確認 |
| 7/4 | 千葉大地 | 京都大学 | さきがけ研究への協力依頼、 研究環境の確認 |
| 7/5 | 吉田浩之 | 大阪大学 | 同上 |
| 8/25 | 池内真志 | 東京大学 | 同上 |
| 9/21~25 | 田川美穂 | ブルックヘブン国立研 究所(米国) | 研究契約の協議 |
| 11/17 | 一木正聡 | 東京大学 | 日本科学未来館研究室での 安全確保の確認 |
| 11/25 | 一木正聡 | 東京大学 | 日本科学未来館での研究 実施に関する打合せ |
| 12/26 | 生津資大 | 兵庫県立大学 | さきがけ研究への協力依頼、 研究環境の確認 |
| 2012/1/11 | 一木正聡 | 東京大学 | さきがけ研究と未来館での 安全性確保の確認 |
| 2/25 | 一木正聡 | 東京大学 | 未来館でのドラフトチャン バー設置の確認 |
| 5/21 | 一木正聡 | 東京大学 | 未来館での安全確保とラボ ツアーの打合せ |
| 6/7 | 早水裕平 | 東京工業大学 | さきがけ研究への協力依頼、 研究環境の確認 |
| 6/13 | 斎藤健二 | 新潟大学 | 研究状況の確認 |
| 11/29 | 早水裕平 | 東京工業大学 | 異動後の研究環境と 研究進捗の確認 |
| 11/29 | 松永行子 | 東京大学 | さきがけ研究進捗と 研究環境の確認 |
| 2013/1/29 | 白幡直人、 内藤昌信 | 物質・材料研究機構 | さきがけ研究と 特許に関する打合せ |

| | | | |
|----------|-------------|-----------|---------|
| 3/29 | 角南寛 上野貢生 | 北海道大学 | 研究状況の確認 |
| 7/26 | 千葉大地 | 東京大学 | 異動後の確認 |
| 8/21 | 廣畑貴文 | ヨーク大学 | 研究状況の確認 |
| 8/27 | 白幡直人 | 物質・材料研究機構 | 研究状況の確認 |
| 2014/6/4 | 白幡直人 | 物質・材料研究機構 | 研究状況の確認 |
| 12/19 | 白幡直人 | 物質・材料研究機構 | 研究状況の確認 |
| 2015/6/8 | 池内真志 | 東京大学 | 研究状況の確認 |

(4) アウトリーチ活動

① ホームページ

応募者への便宜を図るとともに研究成果を広く国民に発表するために、領域のホームページを作成した。領域の紹介(概要と方針)、研究総括と領域アドバイザーの紹介、各研究者の紹介と課題などを掲載し、その後研究の進捗に伴い、研究トピックスや研究成果(各研究者の外部発表など)を追加・充実した。また、領域の主要な活動である「領域会議」についても毎回報告を開催し、会議の概要を写真添付で内外に紹介した(各研究者には領域会議参加に関する感想文を寄稿してもらいどのような気持ちでさきがけ研究を始めたかなどを披露してもらった)。

さらに、公開シンポジウム開催の際には、内容の告知・宣伝を行うとともに参加登録をホームページで実施した。

<http://www.jst.go.jp/presto/emergence/>



② プレス発表

研究の成果が得られた時はプレス発表を行った。12件のプレス発表を行った。

| 研究者 | プレス発表 |
|--------------|--|
| 山内悠輔 | 2009年6月23日 物質・材料研究機構、科学技術振興機構 「白金ナノ金平糖：微細構造を持つ白金ナノ粒子の開発に成功」 http://www.JST.go.jp/pr/announce/20090623/index.html |
| 岩堀健治 内藤昌信 | 2010年8月30日、奈良先端科学技術大学院大学・科学技術振興機構 「次世代のナノテクの基本材料をかご状タンパク質内部で作製に成功」 http://www.nAIST.jp/pressrelease/detail_j/topics/965/ |
| 上野貢生 | 2011年8月 北海道大学 「数ナノメートルの加工分解能を有する光リソグラフィ技術の開発に成功」 http://www.hokudai.ac.jp/bureau/topics/press_release/110816_pr_es.pdf |

| | |
|------|--|
| 千葉大地 | 2011年11月 京都大学、科学技術振興機構 「室温で電圧による磁力のスイッチに成功」 http://www.JST.go.jp/pr/announce/20111003-2/ |
| 山田智明 | 2011年12月13日 高輝度光科学研究センター、東京工業大学 「ナノドメイン構造を有する圧電体薄膜の超高速応答を実証」 http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2011/111213_1.htm |
| 山内 悠 | 2011年12月19日 物質・材料研究機構、科学技術振興機構 「新たな高機能性材料メソポーラス・プルシアンブルーの合成に成功」 http://www.JST.go.jp/pr/announce/20111219/index.html |
| 内藤昌信 | 2011年12月19日 物質・材料研究機構、奈良先端科学技術大学院大学 「ポリマーがカーボンナノチューブを可溶化する過程のリアルタイム観測に初めて成功」 http://www.nAIST.jp/pressrelease/detail_j/topics/1469/ |
| 千葉大地 | 2012年6月 京都大学、科学技術振興機構 「電圧で局所的な磁極反転スピードが20倍に向上」 http://www.JST.go.jp/pr/announce/20120607/ |
| 宮内雄平 | 2012年7月8日 京都大学 「カーボンナノチューブを効率良く光らせる新たなメカニズムを発見ー希少元素を使わず常温で動作するナノサイズの量子光素子の実現に期待ー」 http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2013/130708_1.htm |
| 宮内雄平 | 2012年10月16日 九州大学 「カーボンナノチューブの電子準位を決定できる「経験式」を確立」 http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2013/2013_10_16.pdf |
| 横川隆司 | 2014年6月13日 京都大学「分子綱引き」をおこなうナノシステムを開発ー細胞分裂や細胞内物質輸送の仕組みを知るカギにー」 http://www.JST.go.jp/kisoken/presto/press/index.html |
| 山田智明 | 2014年7月 東京工業大学、物質・材料研究機構、名古屋大学 「広く使用されている圧電体の圧電基礎特性の測定に成功」 http://www.titech.ac.jp/news/pdf/tokyotechpr20140716_funakubo.pdf |

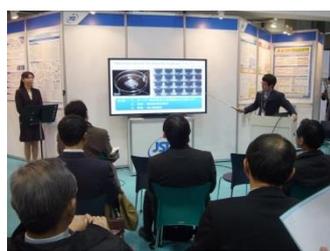
③JST ニュース (JST の広報誌) への掲載

JST ニュースでは3名の研究者の成果を取り上げてもらった。
(山内悠輔、千葉大地、池内真志)

④展示会活動

国際ナノテクノロジー総合展が毎年1月頃に開催されるので成果が発表できる段階に達した研究を推薦し、4名の研究者が発表した。

(木村建次郎：2010年度、山西陽子：2012年度、池内真志：2013年度、白幡直人：2014年度)



(5) 賞の推薦

さきがけ本部やアドバイザーなどからの連絡をもとに様々な賞の募集を研究者に伝え応募を勧めた。また、研究総括が適当と思われる研究者に応募を勧めたり研究者が自ら推薦を求めたりした場合は、すべて研究総括が推薦状を書き、受賞のためのバックアップを行った。

(6) 特許出願

JST の知財担当者に領域会議で特許について講演してもらい、研究者の関心を高め特許出願の必要性と手続きの具体的流れを伝え、特許出願のマインドを養成した。さらに、研究者のサイトビジットの際、および技術参事単独の研究者訪問の際に特許の説明を行い、各研究に基づく出願可能性について研究者と討論した。領域会議やさきがけの会合では知財担当者が、特許出願の可能性のある研究者と打合せを実施した。これらの取り組みの結果、特許出願数を増加させることができた。

(7) 東日本大震災(2011年3月)被害に対する対応

東日本大震災発生直後から当領域の全メンバーの安否と被害を調べた結果、身体的には全員無事だったが、東北大学と NIMS の研究者の研究設備に被害があったため、総括と技術参事が現地を訪問して被害実態を把握した。東北大学 3 名の研究者、NIMS の 2 名の研究者については、彼等の研究設備への被害が甚大だったので被害回復のための予算措置と研究期間の延長などを本部に要請し認められた結果、さきがけ研究を全うすることができた。

(8) 領域会議のベビーシッターについて

本研究領域 2 名の女性研究者が領域会議に参加するには、前年に生まれた幼児(約 1 歳)を会場近くの保育所で一時保育することが必須であった。そこで、両研究者の費用負担軽減を本部に要望し、領域会議参加中に要する保育費用の一部を補助してもらうことになった。これはさきがけでは初めての例であったが、保育にも問題がなく上記研究者が領域会議で発表・討論・交流ができ、大変有意義であった。

7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況

(1) 政策上の位置付け

本戦略目標は、「ナノシステムと機能創発」という課題を通じて未来型・環境調和型の社会・産業の在り方を科学技術の側面から挑戦的に提言できるような真に革新的ナノプロセスの創製と開発を目指している。その可能性のひとつとして「創発」という自然界、とりわけ生物界における自律分散機能に着目し、その理解を深めるとともに、そのメカニズムをプロセスに取り込むという先導的だが困難な目標を掲げている。創発という概念を先導

的にナノシステムに取り込むことは、我が国における国際競争の優位性を確保すると同時に、環境・資源・エネルギーなど現代社会が抱える喫緊の問題を解決する未来型の産業構造を構築する上で有力なアプローチになるもので、そのために本領域での活動を通じ、戦略的・体系的に推し進める必要があると考えられるのである。本領域の成果は以下の未来型科学技術創出の可能性を有している。

- ・イノベーションを生むための中核となるような革新的材料・プロセス技術の創出
- ・環境、資源、エネルギーなど現代社会が抱える喫緊の問題解決への新コンセプトと新システムの提案
- ・国民の健康と生活の安全・安心を支える革新的ナノテクノロジー・材料技術の創生
- ・生命システムの動作原理の解明と活用のための基盤技術の創出

具体的な目標としては、トップダウン手法を中心とするナノシステムの一層の高度化・高精細化とともに、これまでこういったナノシステムと融合や統合の試みがなされたことのないボトムアッププロセスを概念的ないしは技術的に取り込むことにより、革新的次世代ナノシステムを創製する研究を対象としている。具体的には、トップダウンプロセスを主な手法とする研究者は、それらを一層高度に発展させると同時に、機能創発をする素過程にまで立ち戻って帰納的ないしは演繹的に創発機構を取り入れる努力が期待されている。一方で、ボトムアッププロセスを中心的な手法とする研究者は、自ら創発機能を発現する構造体を構築する革新的なボトムアッププロセスを開発し、その知見に基づいてプログラムされたナノシステムを開発するという挑戦的で困難な目標に立ち向かうことを求めている。

本研究領域では、慎重な選考を経た結果、極めて幅広い学問分野から次世代ナノシステム構築を目指す多彩な研究課題を採択した。それらを研究手法や物質系によって整理すると、以下の5グループに大別できる。

- I ナノレベルの高度化・高細性化による機能創発
- II トップダウンプロセスとバイオが融合した次世代ナノシステムの構築
- III 高次構造形成によって階層化した有機・無機・高分子系材料による機能化ナノシステム
- IV タンパク質やDNA等生体材料の自己組織化を利用した創発機能を有するシステム
- V 自己組織化によって創発する光機能性システム

Iはトップダウン手法を中心として無機系物質を、IIは生物系物質のボトムアップ的考え方や手法を取り入れてトップダウン的な無機系物質のシステム化を、IIIはボトムアップ手法を中心として異種物質系によるヘテロ高度化とシステム化を、IVは生物系物質のボトムアップ的手法で、高度階層化とシステム化を、Vはボトムアップ手法をさらに高度化しつつトップダウン手法を凌駕する創発機能のデザインと創製をそれぞれ目指そうとしたものである。いずれもこれまでに試みのない挑戦的課題に取り組んでおり、数々の世界トップレベルの独創的成果を挙げたものと評価したい。

これらの成果は下記の表にまとめてある。さきがけの研究成果はいずれも世界のトップレベルの学術雑誌や国内外の会議で数多く発表されていて、課題継続期間内の各自の成果としては国際論文の発表は 496 編(国内発表は 15 編)、特許は国内出願 67 件(国際出願 16 件)に達した。プレス発表は 12 件行い、文部科学大臣表彰(3 件)、サー・マーティンウッド賞(1 件)、イギリス王立化学会賞(1 件)、英国物理学会(1 件)はじめ極めて多数の受賞をしている。なお、昇進(助教から准教授、講師・准教授から教授など)した者は 22 名を数える。

課題継続期間内の成果リスト

| 課題継続中の成果 リスト | 2009 年度 | 2010 年度 | 2011 年度 | 2012 年度 | 2013 年度 | 2014 年度 | 2015 年度 | 累積 件数 |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 研究者の人数 | 10 名 | 25 名 | 40 名 | 32 名 | 18 名 | 5 名 | 2 名 | — |
| 国内論文 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 15 |
| 国際論文 | 19 | 52 | 166 | 162 | 69 | 11 | 17 | 496 |
| 特許出願(国内) | 3 | 12 | 18(1) | 21(2) | 9 | 4(4) | 0(2) | 67(9) |
| 特許出願(国際) | 3 | 3 | 1 | 7 | 0 | 2 | 0 | 16 |
| プレス発表 | 1 | 1 | 5 | 3 | 2 | 0 | 0 | 12 |
| 文科大臣表彰 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| サー・マーティンウッド賞 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 英国王立化学賞 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 英国物理学会 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

(()内の数字は登録特許件数。)

領域全期間内の国際論文数(課題終了後テーマの成果を含む)

| 領域期間内 | 2009 年度 | 2010 年度 | 2011 年度 | 2012 年度 | 2013 年度 | 2014 年度 | 2015 年度 | 累積 件数 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 国際論文 | 19 | 52 | 166 | 165 | 134 | 90 | 121 | 747 |

3 年型課題終了後の国際論文総数(33 名)

| 3 年型 | 2009 年度 | 2010 年度 | 2011 年度 | 2012 年度 | 2013 年度 | 2014 年度 | 2015 年度 | 累積 件数 |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 国際論文 | 0 | 0 | 0 | 3 | 9 | 32 | 57 | 101 |

5 年型課題終了後の国際論文総数(5 名)

| 5 年型 | 2009 年度 | 2010 年度 | 2011 年度 | 2012 年度 | 2013 年度 | 2014 年度 | 2015 年度 | 累積 件数 |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 国際論文 | 0 | 0 | 0 | 0 | 56 | 47 | 47 | 150 |

「ナノシステムと機能創発」という異質な概念と手法が組み合わせられた目標設定に対し、各研究者は、どのように包括的・統合的な捉え方をして研究対象を構想し、研究方針と戦略を構築し、それをどのように発展させ、成果につなげるかという極めて困難な作業が求められる。にもかかわらず、上記のように各課題で数多くの世界をリードする独創的研究成果の数々が生れたのは、異分野融合を重視した適切な課題設定が大きな役割を果たしたものと考えられる。その困難な目標に対し果敢に挑戦して成果を創出した研究者の努力は高く評価されなければならない。加えて、本研究領域は、前述のように多彩な分野の研究者と領域アドバイザー陣から成り立っているが、領域会議を中心に研究者同士あるいは領域アドバイザーとの間の極めて活発な議論やアドバイスがあってはじめて達成されたものでもあって、本領域の成果は今後の目標設定の上でも大いに参考になろう。

上記の研究活動に加え、本研究領域では世界レベルで活躍できるような研究者として必要な素養と姿勢を涵養することもつとめた。毎回趣向を凝らした領域会議でのプレゼンテーション(英語の発表や社会やメディアに対する説明、自分の研究の時間的・地理的客観化等々)を通じ、発表の仕方、議論の進め方など、研究室の外で初めて可能になる企画を積極的に進めたが、研究者たちはその意図するところをよく理解し、熱心に応えてくれた。研究者たちが自主的にシンポジウムを企画したり、報告会を定期的で開催したのはその表れであろう。これらの活動を通じて若手研究者が自らと自らの研究に対し、一層の自信と確固たる信念のようなものを獲得したと多くの研究者は第11回領域会議で感想を述べているし、領域アドバイザーもまた、それを強く感じ取っている。

このトップダウンプロセスとボトムアッププロセスの融合・統合は、製造技術分野における日本の優位性をさらに高めるものであり、今後も引き続いて体系的に取り組むべき課題であると言える。

(2) 研究成果の例

以下に、本領域の顕著な成果の例として、第1期生研究者3名、第2期生研究者3名、第3期生研究者4名が行った研究の狙いと成果を個別に紹介する。

①角五 彰 研究者(第1期生)

生体分子モーターを能動的に集積することで自律的に機能創発する ATP 駆動型ソフトバイオマシンを創製することを目的とした。研究者はアクチン-ミオシン系、および微小管-キネシン系について、それぞれ自己組織化するための条件探索と形成される構造について詳細に検討した。その結果、自己組織化される際にアクチンや微小管集合体の構造を決定する因子が存在することを明らかにした。また、自己組織化と非対称環境を組み合わせることで生体分子モーター集合体にセンチメートルオーダーの構造秩序を付与することに成功し、未だ実現されていない高効率・高機能の創発型 ATP 駆動型ソフトバイオマシンの創製が近い将来実現できることを示した。さらに、それら集合体全体の運動が規則的なパ

ターンを自律的に形成することを見出し、人工的に自律分散性を発現することにも成功した。これらの成果は、生物運動における創発機能発現という、現代生物科学が抱える最も重要な課題のモデルになるので極めて重要な成果であり、今後その機構解明のための有力な武器になろう。(※「(4)研究終了後に得られた特筆すべき成果」も併せて参照。)

②山内 悠輔 研究者(第1期生)

ボトムアップ手法で形成したナノ構造体の鋳型とトップダウン方式で微細加工された基板を用いてナノ空間内で自律的に高次機能を創発する自己組織化集合体システムを構築した。トップダウン方式では、50nm以下のサイズの精密加工は難しく、本方法のようなボトムアップ手法によって自己組織化された構造体は、原子・分子サイズより一回り大きいサイズを自発的に規則的に配列制御して微細加工できるという特徴があり、トップダウン方式の細孔壁の結晶転移を活用することによって垂直配向膜の合成に成功したことは特筆に値する。これは、トップダウン方式単独ならびにボトムアップ手法単独では従来なし得なかった巧みな融合技術であり、その先鞭をつけたものである。本方法によって得られた高配向性の薄膜は、メソ細孔中に有機分子、共役高分子、磁性金属などを導入することによって、極めてオリジナリティの高い応用展開も示すことができた。山内研究者は、これらの成果をトップクラスの学術雑誌に数多く発表し、特許出願を積極的に行ったのみならず、メディアなどを通じて広く社会に訴えるなどして、その研究姿勢もまた高く評価されるべきである。(※「(3)5年型研究の成果」も併せて参照。)

③藪 浩 研究者(第1期生)

波長よりも小さい金属-誘電体の周期構造は、負の屈折率を持ち、回折限界以下の光を投影できるメタマテリアルとなることが報告されている。藪研究者は相分離構造を持つブロック共重合体ナノ微粒子を金属化してメタマテリアルを作製し、金属-誘電体周期構造の屈折率を制御する可能性を示した。本研究では、自己組織化により内部にナノサイズの相分離構造を持つブロック共重合体微粒子を作製し、ナノメッキ技術により金属化することで、紫外・可視光領域におけるメタマテリアルを作製する事を目的とした。同時に、これをレンズに用いることで、回折限界を超えるナノリソグラフィ技術の確立を目指した。研究成果として、マイクロ波による相分離構造の迅速形成手法および無機-有機ハイブリッド粒子の作製手法、集積化手法を確立し、ボトムアップ型メタマテリアル作製の可能性を示した。これらの成果は論文、特許として発表されている。メタマテリアルとしての負の屈折率はまだ実現していないものの、化学的に制御することによって、屈折率を低下させることができることを示し、創発性ナノシステムへの展開の可能性を示したことは高く評価できる。今後ナノリソグラフィへの展開や新規光学素子への応用も期待される。

④木戸秋 悟 研究者(第2期生)

マイクロパターニング技術を応用して、細胞接着性ゲルの表面弾性率分布を自在に設計できる手法を独自に開発し、これによって新規の細胞機能操作材料の開発を行った。細胞運動は生体組織における様々な生理学的・病理学的過程に重要な役割をなしており、そのメカニズムの理解と制御技術の確立は、細胞分子生物学における学術的基礎からも、また医用工学分野への応用展開の視点からも重要課題である。本研究では、力学場から受け取るメカノシグナルをプログラマ的に入力制御する材料を設計し、この硬軟領域パターンニングしたゲル上では間葉系幹細胞が自発的運動する過程で硬い領域と軟らかい領域のいずれにも定住できなくなる現象が生じることを発見した。この現象を利用すると、幹細胞は培養基材の硬さ軟らかさを強制的に短い周期で振動的に経験させられることとなり、結果として基材硬度依存的な分化系統決定の抑制を示し、未分化状態を維持することがわかった(分化フラストレーション、幹細胞の分化フラストレーション現象=未分化を保持する現象)。この成果は、幹細胞を若く元気に保ち、安定した品質で供給するための培養原理を明らかにしたものであり、病理学的にも医工学的にも極めて重要な発見と考えられる。(※「(4)研究終了後に得られた特筆すべき成果」も併せて参照。)

⑤木村 建次郎 研究者(第2期生)

独自アイデアにより、全く新しい高速電子線露光法の開発を目指した。コンピュータを高速化するためには、半導体素子を一層微細化する必要があるが、それにはさらに短い波長で加工する必要があるが、これを使えないのは、電子線をレンズで絞るときに大きな“収差”が発生するからである。この収差の影響で、本来の電子の波長に比べると遥かに大きなパターンしか描けないし、電子線を並列に均一に出射する方法も確立されていない。木村研究者はマイクロチャネルプレート(MCP)が、光束を増幅・変換可能な電子線束発生方法として利用できること、さらに収差に関しては、静電場の基礎方程式の基本的な性質とコンピュータの高速演算処理を利用することで低減可能であることに着目し、MCPを電子線束発生に使う世界初の電子線露光装置を試作し、かつパターンの縮小投影に成功し(6件の特許出願)、同時に収差低減に関する計算機実験にも成功した。本研究で見出した方法では、従来の電子顕微鏡のレンズを1/20に縮小でき小型電子顕微鏡や電子波散乱トモグラフィなどの実現が可能となる極めて重要な研究成果である。本研究の成功は、原子数十個単位の半導体素子が製造されるようになること、極めて微細な短針をもつ電子顕微鏡が将来、開発される可能性があることを示しており、今後、これらの早期実用化をめざし、研究開発の体制を早急に整えることが我が国の科学技術のイノベーションのために緊急に要請される。(※「(4)研究終了後に得られた特筆すべき成果」も併せて参照。)

⑥内藤 昌信 研究者(第2期生)

μm の垂直配向膜を媒質とする面発光型の円偏光有機レーザーシステム開発を目指した。円偏光レーザーは量子暗号通信に必要な円偏光光源、3次元ディスプレイなど、次世代の光情報プロセッシングの主力として注目されている。本研究では、有機分子としては最大級の円偏光度と発光量子収率を持つ有機色素ピレンと γ -シクロデキストリン(CDx)の包接錯体を材料とし、この円偏光発光性分子素子をキャビティ中に垂直配向かつ膜厚を発光波長と精密に一致させるボトムアップ手法により、低消費エネルギー高効率型の円偏光有機レーザーの創出をめざした。その結果、 γ -CDピレン誘導体の包接錯体をクリック反応で高分子化する手法を創出し、トップダウン技術で作製したキャビティの高さに併せて高分子長を制御しながら垂直配向化する自己組織化重合手法を確立した。本研究で、分子長を所望の長さに制御し円偏光発光性超分子を垂直に配向させる技術を確認したのは画期的成果として高く評価できる。また、リソグラフィのマスクパターン中で超分子クリック重合を行うとパターンの高さで重合が停止することを利用して円偏光発光性有機薄膜の膜厚を制御するという興味深い知見も得た。ボトムアップとトップダウンを活用して円偏光発光材料の分子設計・構造・機能相関を明らかにしたことは新しい合成化学手法としての価値も高い。本研究で得られた知見は、円偏光有機レーザーの実現のみならず、有機ELやセキュリティペイントなどへの応用も期待できよう。

⑦小寺 哲夫 研究者(第3期生)

ナノシリコン配列構造中に電子を一個一個閉じ込め、そのスピンの向きを操作することで、量子コンピュータ創出のための基礎技術を確認することを目指した。そのため、(A)ナノシリコン中に電子スピンを制御して閉じ込める技術の開発、(B)電流が流れなくなるスピン閉塞現象の実現とスピン緩和要因の解明、を課題とした。その結果、電子スピンを20ナノメートル程度の領域に1つ1つ閉じ込める技術を開発し、電子数ただ1つの変化を電荷計により検出することに成功し、電子スピンの性質により電流が流れなくなるスピンプロセドを実現した。さらに、(C)閉じ込め電子の状態を量子ドット電荷検出計による読み出し、(D)電子スピンの回転を電圧パルスや高周波により制御して、量子情報処理に必要な操作を実現するなどして量子情報素子やフラストレート系の実現に向けた基盤技術を開発した。これらの成果は、電子スピンを利用した量子コンピュータの実現に一步近づく要素技術を開発したものと言えよう。同研究者が開拓したこれらの成果はトップクラスの雑誌に報告され、学会などで高い評価を受け、数々の賞を受賞していることを総括としても喜びたい。(※「(4)研究終了後に得られた特筆すべき成果」も併せて参照。)

⑧千葉 大地 研究者(第3期生)

研究のねらいは、磁石の磁極方向を磁界ではなく電界で可逆的にスイッチさせ、それをナノスケールの磁気メモリの新しい書き込み手法へ応用しようということであり、こうい

った試みはこれまでにない。この手法が実現すれば、素子に電流を故意に流さずに済むので動作時の飛躍的な消費電力の削減が期待でき、さらに安価な磁石を所望の特性にでき、磁石の用途が拡大する。精力的な研究推進の結果、コバルトのような強磁性半導体に電圧を加えることによって磁性を消したり元に戻したりできること、即ち磁界を使わずに電界のみで磁化スイッチングを引き起こすことに見事成功し、*Nature Materials*、*Nature Communications* その他の雑誌に報告した。これらに加え、磁壁の伝搬スピードを電界により数桁制御可能であることも明らかにした。これらの成果は従来の考えの延長からは予測できない成果であり、精密なナノスケール回路の集積により発揮された見事な創発現象といえることができよう。この成果は磁性だけでなく、電子の数を変えることで物質の基本性質を自在に操り、様々な性質をもたせる可能性を持っていることを示しており、新たな“錬金術”の道が開けるかもしれない夢多い成果といえることができよう。(※「(4)研究終了後に得られた特筆すべき成果」も併せて参照。)

⑨古海 誓一 研究者(第3期生)

高分子ゲルはゼリーや豆腐など我々の日常生活でなじみ深い物質であるが、古海研究者は、精密重合によって数百ナノメートルの大きさのコロイド微粒子をボトムアップ的に作製し、それを3次元的に規則配列・集積した階層構造をつくることによってゲル状フォトニッククリスタルを形成し、次世代フォトニックシステムに繋がるアクティブなレーザー発振を実現した。しかもそのQ値は 1.1×10^4 という世界トップレベルの高い値を持つ優れた性能を示した。ゲルは液体を含む高分子網目のネットワーク構造で柔軟性を示すので、応力によって変形し、赤色、オレンジ色、黄色と連続的に波長可変のアクティブなレーザー発振することも実証した。さらに、フォトクロミック化合物導入によって、マイクロパターンレーザー発振の可逆的な光スイッチングにも成功し、精密に合成した高分子ゲルがアクティブなレーザー発振できるという報告はこれまでに例がない創発現象であって、特に、サイズ可変という高分子ゲルの基本特性を生かした波長可変レーザー発振に関する研究成果は高分子科学の可能性に新たな機軸を切り開いたばかりでなく、その産業応用も大きな可能性を秘めていると考えられ、その成果は高く評価されるものである。これらの成果は論文や特許出願としてまとめられている。

⑩宮内 雄平 研究者(第3期生)

カーボンナノチューブは、光照射や電流印加によって近赤外の光が発することが知られており、将来のエネルギー光源やイメージング用の発光体として期待されているが、その発光効率は非常に低く、大幅にその効率を上げることが強く求められている。宮内研究者は、ナノチューブ1本に約1個程度の非常に希薄な割合で、励起子を局所的に閉じ込める「0次元(量子ドット)」状態をナノチューブ上に作ると、「0次元(量子ドット)状態」では、細線上(1次元状態)の励起子(約1%程度)と比べ約20倍の桁違いに高い効率(約18%程度)

で励起子1個を光子1個に変換できることを見出した(*Nature Photonics*、並びに特許出願)。この効果は、励起子が量子ドット状態に閉じ込められることで、「次元性(運動の自由度)」と「空間的広がり」が変化し、カーボンナノチューブの限界を超えて発光効率が高められることを示しており、励起子の次元性の変換に伴う創発現象を示す重要な発見と位置付けられる。この成果は将来的に新しい量子光機能素子の実現や高効率な量子光源など革新技術の実現につながると期待される。本研究はその研究成果のみならず、課題設定の仕方とアプローチの手法は研究者が持つ包括的・系統的に対象をとらえ理解しようとする優れた資質を示すものであろう。(※「(4)研究終了後に得られた特筆すべき成果」も併せて参照。)

(3)5 年型研究の成果

5年型及び、大挑戦型研究として推進した7課題においても優れた成果が挙げられた。本研究領域終了に当たり、その概要を紹介する。

①横川 隆司 研究者(第1期生)

トップダウン手法でマイクロ・ナノ構造を有する場を提供し、そこにボトムアップ的に改質したモータータンパク質を配置したタンパク駆動の輸送システムを構築することにより、「その場観察による運動タンパク1分子計測」を目標に研究を推進してきた。1-3年目は選択的にタンパク質を吸着するナノトラック内にキネシン-微小管系を配置して、制限された空間内で分子の輸送、結合現象を実時間的に実現し、*in vitro* 細胞内物質輸送モデルの提案をおこなった。

4年目以降は、キネシンとダイニンを用い、より工学的で応用を指向したナノシステムを提案した。例えば、逆極性を持つモーターによって運動する分子の結合を可視化するナノシステムや、分子輸送の方向を制御する技術を確認した。これら工学的研究で獲得した成果を生物運動の機構解決のための知見として議論して生物物理学への還元を目指した。マイクロファブリケーション技術によりパターンニングしたキネシンとダイニンの境界における微小管の綱引きの研究はその一例である。有糸分裂や物質輸送など複数のモーターによる高次の運動を *in vitro* で再現した。この結果、キネシンとダイニンが複数のモーターとして運動する際の挙動が単分子とは異なって振る舞う、すなわち、キネシンは協働性が低く、ダイニンは協働性が高く負荷に耐えうるという新事実を見出した。100分子以上のこのようなマルチモータ系においてこの現象を実証したのは初めてであり、運動速度を測定するだけで、それぞれのモーターが何分子ずつ寄与しているかということも導出できるようになった。さらに、可動バルブ付き微小流体デバイスを開発し、これまでの *in vitro* アッセイでは不可能であった、(自由拡散なしに)真に能動輸送のみによる微小管の運動を評価できるようになった。このような擬似的 *in vivo* 空間を実現することで、細胞内物質輸送を分子レベルで制御するモデルが提案できた、この技術は、将来にわたって生命科学・医学・創薬分野においてユニークな技術として展開される可能性がある。

機械工学専攻の研究者が生物輸送システムを作りかつその機構を解明するという研究は単に挑戦的というだけでなく分野融合というさきがけ研究の趣旨に応えるものであり、5年という期間の継続がなければ得られなかった成果であろう。様々な技術的工夫によって制御された運動システムが工学研究者によって作製され、それらが生物運動機構の解明に還元されるという成果が得られたのは意義深く将来の我が国の研究の在り方を示す 1 例となる。

②山内 悠輔 研究者(第1期生)

トップダウン加工によって作製した鋳型上で無機化合物を自己組織化させ、Guide Growth や外場を制御することによって集合体の方向を制御し、トップダウン方式では困難な 50nm 以下のサイズ(原子・分子サイズより一回り大きいサイズ)の精密加工ができるようになった。前半の3年間においては特に **A**: メソ細孔の作製、配列・配向制御といった基礎研究を展開した。4年目、5年目では、主として **B**: 異方性メソ細孔を用いた機能創発並びに細孔の応用に関する発展研究を行った。大きな表面積を有する、たとえば、金ナノ多孔体は新たな化学反応の場をもつ材料として様々な分野での応用可能性が提案されているが、孔径を制御できないのが現状であった。本研究では、球状ミセルを鋳型として用いて金イオンを還元させることにより、ミセルのサイズに応じたナノ細孔を膜一面に形成することに成功した。得られた金ナノ多孔体の細孔中には、高強度電場が確認され、表面増強ラマン散乱(SERS)が観測されるなどの特徴を有しており、分子センシングのための SERS 活性基板や電極触媒など様々な応用が期待される。本技術は、コバルトやニッケルなどの磁性金属に適用できること、ミセルのサイズを変えることにより広範囲に孔径制御できること、電析速度を変えることにより金属の結晶サイズを制御できること、などの特徴をもっていることで目的にかなった金属ナノ空間材料をテーラーメイドでデザインすることができるようになった。これらに加え、山内研究者は応用研究に対しても優れた才能を発揮して数多くの特許や産学連携研究の成果を挙げている。以下に2例を紹介する。

・電子ペーパーの作製

基板から垂直に配向しているナノ細孔有する薄膜を導電性基板上に作製し、電解質にロイコ染料を含有させて Passive 型の電子ペーパーの作製に成功した。溶液中に溶存するロイコ分子を電極基板上で電気化学的に酸化還元を繰り返すと色を変化させ、また様々な絵や文字を表示した。その解像度は高速書き込み条件下でもナノ構造のない通常の電極と比較してはるかに優れたものであった。

・フォトルミネッセンスデバイスの作製

高分子鎖をナノ細孔に導入すると孔の長軸に沿って配向することを発見し、共役高分子を用いて異方的な発光スペクトル(偏光版を用いてレーザー光を入射すると基板と垂直方向に偏光子を設定させたときに最も強い発光をする)を有するフォトルミネッセンスデバイスを創製した。

これらはいずれも後半 2 年間で得られた基礎研究の発展であり、異方性ナノ細孔を用いた機能創発の例である。これらの成果はトップクラスの学術雑誌に膨大な数の論文や学会発表したのみならず、多数の企業とも連携してその成果を社会に還元した。一方、メディアなどを通じて学術成果を広く社会に伝えるなど、研究姿勢もまた高く評価される。

③廣畑 貴文 研究者(第 2 期生)

Fe と GaAs の半導体中に注入したスピンの生成するスピン伝達トルクを利用し、強磁性体ナノドットの磁気モーメントの回転で駆動する世界初のナノ・モーターの実現を目標としている。初めの 3 年間で GaAs 基板上にエピタキシャル Fe 層を世界で初めて完全分離界面として作製することに成功し、これを用いた 3 端子、4 端子面内スピンバルブ素子を作成して GaAs 基板中へのスピンの注入と検出に成功している (*Physical Review B*)。3 年間で基本設計と基板製作をすでに成功裏に終了しているので 4 年目以降は全金属ナノ・スピンモーターのプロトタイプを試作した。微小全金属ナノ・スピンバルブ素子ではゲート電極組み込みが困難であるためスピン偏極電流の増幅をめざし、特殊な形状をもたせることで 7 倍以上の増幅を世界で初めて実現した。馬蹄形に分割した強磁性体ナノ細線に左右の半馬蹄形電極から交互に電流を加え、反対向きのスピン偏極電子を中央非磁性体ナノ細線に注入すると印加磁場に依りて明瞭な磁区構造の変化が観測できた。電流を 0 から徐々に印加した場合に電圧値がほぼ一定になることから、スピン伝達トルクによるナノ円板中の磁気モーメントの回転が起きていると考えられる。さらに電流値を増大させると電流注入子の磁気モーメントと平行になる過程で電圧値の緩やかな変化が見られたので、印加電流が磁気モーメントを回転させていることが確認できた。現在はゲート電極を用いて GaAs 基板中を流れるスピン偏極電子を回転させ、世界初の数 MHz で回転するナノメートルサイズのモーターの実証実験を推進中である。得られた成果はもれなく我が国の特許として登録されている。

本研究では、ナノ・モーターの基本設計、世界初の完全分離界面のエピタキシャル Fe 層の作製、全金属ナノ・スピンバルブ素子の作製、GaAs 基板中へのスピンの注入と検出、スピン偏極電流の増幅のいずれにも成功し、現在、全金属ナノ・スピンモーターの実証実験にかかっているが、これらはいずれも独創的発想と深い理論物理の知見、加えて高度のナノ制御技術があつて初めて可能となる。数 MHz で回転するナノメートルサイズのモーターの創作は世界でも全く行われておらず、人類が手にしたことのない、いわば究極のアクチュエータであり、極めて挑戦的で意欲的な研究である。本研究は、まさに 5 年間という研究期間があつて初めて可能であろう。

(尚、廣畑研究者は本さきがけ研究終了とほぼ同時にヨーク大学教授に任命され、同大学の中心的研究者として教育研究の活動をしているだけでなく、国際磁性学会理事、英国物理学会 Wohlfarth Memorial Lecture (2014)、英国王立学会 (Royal Society) Industry Fellowship (2013) 受賞するなど国際的に活躍していることを付記する。)

④白幡 直人 研究者(第2期生、大挑戦型：期間延長により5年間)

非酸化性シリコン(Si)クラスター粒子を5nm以下のサイズで連続制御するという新規超精密重合法を開発し(特許出願)、この重合法によって、そのサイズを変えるだけで300-1000nmという広波長域にわたって連続的、安定的に波長を制御できる画期的なレーザー発光に成功した(特許出願)。これは単元素から成る半導体ナノ粒子を用いて広範囲に発光領域を制御した世界初の成果である。4年目、5年目以降は初めの3年間で得られた研究成果を次の3分野で発展させた。

- 低電圧(<4.5V)で駆動できる電流注入型白色発光デバイスの開発に成功(世界3例目)(特許出願)。これはバルク結晶のシリコンのバンド構造からは予測できない強い発光であり、この発光がSiをナノ粒子化することによってHOMO-LUMO間光励起子の直接遷移的な再結合に基づいていること、周波数変調は、ナノ粒子の「相」「大きさ」「表面」の精密制御によって可能といった重要な学術的知見を得た。
- 近赤外波長域における発光スペクトルの波長可変に成功した。従来Si発光に比べ波長可変性に優れるだけでなく、格段にスペクトル諸特性(高量子収率・高対称性・狭い半価幅・安定性)に優れており(特許出願)、国際会議でProf. Klaus von Klitzing(1985年ノーベル賞受賞)をして「Surprising(驚嘆すべき成果)！」と言わしめた。
- 高効率発光をもたらすSiナノ構造を明らかにし、発光原理を解明した。
これまでSi発光はナノ結晶に発現する量子閉じ込め効果に基づくと考えられてきたが、ナノクラスターやダイヤモンド結晶のサイズ制御によって波長可変できることを示し、その機構を明らかにした。

「シリコンナノ粒子の精密重合 ⇒ 光物性・光特性評価 ⇒ 学理創出 ⇒ デバイス作製」に至るすべての工程を一研究室で完成できたのは白幡研究者の卓越した精密高分子重合に関する知見に加え、固体物理に関する深い洞察と知識に基づいており、化学と固体光物理の見事な融合の成果である。これは5年間という切れ目のない時間と経費がなければ得られなかった成果であろう。

⑤豊田 太郎 研究者(第2期生)

水中における油滴の変形・駆動を動的に解析するシステムを構築し、細胞運動と関連づけることを目標としている。1年目～3年目では、様々な分子長、官能基を有する油分子の自律遊走、分裂・集団運動する油滴分散系を見出した。4年目以降は、細胞サイズの油滴の駆動現象の機構解明を進めるため液滴型マイクロ化学デバイスを作製して単分散性の高い油滴の駆動現象を定量的に計測し、油滴の駆動速度が両親媒性分子の濃度と強い相関することを見出した。この現象は、マランゴニ流動の誘起が要因と考察し、界面張力の不均一性や勾配を準弾性レーザー散乱型界面張力測定によって測定した結果、液滴の前方表面張力勾配は後方のそれより約10倍高いこと、また液滴前方10～20mm先から表面張力が低

下し始めることなどを明らかにして、流れ場のモーメント誘起と動的構造変化が重要であるという知見を得た。本研究で油滴の遊走、分裂・集団化運動が界面張力の不均一性に起因することを表面張力測定によって定量的に評価できるようになったことは重要な知見であろう。

本研究は、細胞の活動はソフト界面の自己組織化に基づいて機能創発する分子システムであるという観点に立脚して油滴のダイナミクスを理解しようとする課題であり、これまでにない研究手法とアプローチが要求されている。時空間的に多彩な現象を生み出す油滴の駆動現象を細胞のもつ高次機能—例えば自己複製、細胞運動や集団形成—と関連付けて化学的に描出するには今後も長期的視野に立った理論と新規研究手法の開発が不可欠で、そのための基礎的知見を構築した本研究はさきがけ研究にふさわしい挑戦的な課題と言える。

⑥池内 真志 研究者(第3期生、大挑戦型)

「トップダウンで作製した血管状微細流路(人工毛細血管床)の周囲にナノファイバー構造のマトリックスを構築した立体細胞培養システムの構築」を目指して研究を進めた。それは、①高密度な細胞培養が可能、②血管と実質部分との複合機能化が容易、③移植時に生体側の血管との吻合が可能というメリットを有しているからである。初めの3年間で、独自のトップダウン方式による膜加工技術を駆使して従来不可能とされていたコラーゲンの微細加工に成功し、世界最先端に位置する三次元細胞培養組織体を構築した。この手法をさらに発展させ、4年目を以降は従来に比べ10倍以上の効率でiPS細胞の胚様体を作製できるアレイの開発にも成功した。さらに生体外で血管網を含む厚い組織や臓器の再生を目指し、独自の膜マイクロマシニング技術を用いて生分解性ポリマー製のナノファイバーカプセル型細胞培養足場を開発した。この装置は幹細胞の分化、増殖をコントロールするだけでなく、組織再生の段階に応じて足場構造や誘導因子放出などの機能を更新するというすぐれた能力を持つ。これらの研究は組織再生技術のブレークスルーになると高く評価されており製品化を進めるなど実用化の成果も出ていて今後も引き続き飛躍的成果が得られると期待される。

本研究者は工学(微細加工)専攻であり、医学・生物分野という異分野で研究を進めるには、時間的・精神的に余裕があることが必須であるが本研究の成果は5年継続されて初めて得られたものと判断される、また企業との共同研究が進展したのも4、5年目であるという。以上のように5年型研究に採択されて、一層、異分野融合研究、実用化研究が進展するようになったのは特記すべきことであろう。

⑦山田 智明 研究者(第3期生)

高感度センサーや小型高性能発電素子の開発が長らく待たれているが、それには飛躍的にすぐれた特性をもつナノスケール圧電素子の実現が不可欠である。山田研究者はこのよ

うな背景の下、従来にくらべ飛躍的に高い電気-機械エネルギー変換特性(圧電特性)を示すナノスケール圧電体の創製を目指した。研究目標としては、①クランピング効果の低減化、②新規巨大圧電メカニズムの発見、を挙げて研究を重ねてきた。研究者が着目した点は、材料開発では常法の元素選択による特性向上という手法ではなく、ナノ構造の次元性とサイズ制御で特性向上を目指そうとする点にある。まず、1)アスペクト比の高いナノ構造のボトムアップ成長技術の構築を行い、優れた圧電応答を示すペロブスカイト酸化物を中心にナノ構造のボトムアップ気相成長技術を確立した。第一原理計算で得た表面エネルギーを求めた結果、エピタキシャル成長に適した格子整合性の高い基板上で、低温かつ高圧力でレーザー堆積するという方法が最適であることを見出し、ペロブスカイト酸化物ナノロッドの作製に成功し、ナノプレートのエピタキシャル成長制御法を確立した。次に分極が垂直配向したペロブスカイトナノロッドの圧電特性を、放射光電界下時間分解 XRD システムで研究し、ナノロッドはエピタキシャル膜の 2 倍で、しかもバルク単結晶に匹敵する高い圧電定数を示すことを見出した。これらの成果は分極傾斜(オブリック)配向ナノロッドはバルク単結晶を超える圧電性をもっている可能性を示すものであり、1次元ナノ構造に特異な電氣的境界条件がもたらす全く新しい圧電メカニズムの発見につながるものである。この原理を利用した今後の応用展開が期待できる。

材料開発で常に重視される元素選択による探索研究や特性向上ではなく、本研究のように敢えてナノ構造の次元性とサイズの制御による特性向上というより困難で勇気のいる道を選ぶには、5年間という研究期間が必要であり、これがすぐれた成果が収められた重要な要因の一つであろう。

(4) 研究終了後に得られた特筆すべき成果

3年間にわたるさきがけ研究で得られた成果は研究終了後にも発展し、特筆する成果が得られており、そのいくつかは実用化、商品化されている。以下にそれらの例を挙げる。

①角五 彰 研究者(第1期生)

—モータータンパクの運動解析から脳疾病原因解明へ—

細胞内物質輸送のルールである細胞骨格系の不全が原因とされる神経系疾患に「外傷性脳損傷(TBI)」がある。しかし現時点では治療法はおろか発症機構もほとんど解明されていない。それは①細胞骨格の力学応答を細胞内環境を再現しながら評価する試験法が存在しない、②物質輸送を細胞骨格に応力場を与えながら評価できるシステムが存在しない、などが原因である。角五研究者は擬似細胞内環境下で生体分子モーターを観察/運動発現させる技術を開発し、TBIが発症した際に細胞内で観察される細胞骨格タンパクの座屈現象や断片化現象を実験室内で再現することに成功した。伸展装置ストレッチャー部位に固定した基板を伸長させることで微小管の機械的性質を定量化できるようになった。光ピンセットや原子間力顕微鏡では、細胞内のような弾性媒質環境を再現しながら応力印加することは

困難である。

基板の伸展率および微小管の臨界長からキネシンの結合により微小管のヤング率が $\sim 10^2$ 変化することも見出した。本研究 TBI や伸展損傷時における微小管の機械的欠損、安定性や剛性の変化を理解する上で重要な情報となる。

②木村 建次郎 研究者(第2期生)

ー新原理に基づく測定・診断装置開発と実用化ー

木村研究者はさきがけ研究課題「ナノシステムの大規模集積化にむけた高速電子線露光法の開発」において新原理に基づく光束制御技術(Kenjiro Kimura, “Charged particle lens system and its Control method”, Japanese Patent Application 2013-100913)を成功裏に終了したが、その後、最先端画像計測装置の開発と実用化ー安全、安心な社会を目指してーという標題のもと、あらたに「サブサーフェス磁気イメージングシステム」という新原理に基づくイメージング装置を開発し(特許出願)、かつ製品化に成功した。「サブサーフェス磁気イメージングシステム」とは物質表面に電磁波あるいは超音波を照射することにより表面下の物性の空間分布を可視化するイメージング装置で、そのコンセプトは測定結果から得たデータを境界条件として多次元場の部分微分方程式を解くことによって得られるという。この装置を用いることによって蓄電池内の電流経路や短絡箇所を映像化でき、直接観察できるようになった。これまで主にリチウムイオン蓄電池、半導体チップ、太陽電池、コンデンサ等多くの電気デバイスの故障解析や品質評価に活用されている。これらに加えて、インフラ検査装置、生体計測装置、乳がん診断装置、電子線装置などの開発に成功し実用化しつつある。

③木戸秋 悟 研究者(第2期生)

ー「間葉系幹細胞」による未分化細胞創製へー

さきがけ研究課題「細胞運動・機能を操作するナノ・マイクロメカニカルシステムの構築」において、「間葉系幹細胞」が硬いー軟らかい培養基材の間を短周期で振動運動させると、未分化性を維持する現象「分化フラストレーション」を示すことを発見した。その後、この現象は、外的環境の刺激が細胞内タンパク質の振動ダイナミクスに影響を与え、これが幹細胞性を保持する上で重要な役割を果たしていることを見出したのでこれを基礎に細胞内シグナルの解析を進め、幹細胞性の創発に関わる周囲環境のメカノバイオロジー分野の確立を進めている。臨床応用で倫理面の問題やがん化の危険性が大きい胚由来ES細胞やiPS細胞とは異なり、「間葉系幹細胞」は、成体から採取でき、他家移植可能、がん化の危険性が極めて小さいといった利点があり、安全な臨床応用には最も近い幹細胞である。一方分裂回数に限られていて老化しやすく、また培養中に幹細胞性が劣化しやすいため、安定した品質を保証して用いることが難しかった。本研究によって効率的な間葉系幹細胞培養法が発展するとその波及効果は極めて大きいものと期待される。

④山西 陽子 研究者(第2期生)

－電界誘起気泡サイエンス」の創成へ－

本さがけ研究中に電極先端に空隙(バブルリザーバ)を設けて放電するとサイズの揃った指向性ある高速気泡列が生れることを見出し、この気泡によって細胞表面加工ができることを発見した。気泡で細胞を切る「バブルメス」と呼ばれるこの新法は、高速発射した気泡の圧壊により加工表面に熱ダメージを与えずに生体試料に微細な孔を開けることができ、しかも堅い植物細胞を加工できる能力があるので、実用化しつつある。本さがけ研究終了後は「電界誘起気泡による機能創発」という課題の下、以下の3課題を中心に精力的に研究を発展させている。

- 電界誘起気泡によるインジェクション

気泡メスで細胞加工と同時に泡の気液界面付着力により試薬や遺伝子を生体試料内に輸送する新しいインジェクション技術を開発している。最近、気泡インジェクションメスを改良して空気中でも使用可能なデバイス(針なし気泡注射器)の開発にも成功し、インジェクションの使用範囲が格段に広がった。

- プラズマキャビテーションによる加工技術

大気圧低温プラズマを気泡内に内包させてプラズマキャビテーションという現象を作り出し、プラズマ放電と気泡圧壊の両方の特性を生かした難切削加工技術に応用している。

- 気液界面の反応性利用技術

射出されたマイクロ気泡は収縮していくために、気液界面に付着したタンパク質分子は凝集収縮する。この原理を利用してタンパク質結晶を短時間で生成する技術(気泡収縮・分子凝集技術)を開発中である。

山西研究者はさがけ研究終了後もこれらの成果により挑戦的萌芽研究、研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)などに採択されている。活発に実用化研究も行っておりメディアからも再三取り上げられている。

⑤千葉 大地 研究者(第3期生)

－電圧磁性制御から新しい元素特性の解明へ－

さがけ研究ではCoやFeなどの金属磁性超薄膜に強電界を加え、その電子濃度を変化させることで、磁気モーメント・磁気異方性・キュリー温度などの基礎物性パラメータを外部制御できることを発見し、*Nature Materials* その他に発表した。特に、温度を変えることなくそのキュリー温度を電氣的に制御できたことは磁性史上初めてのことであり極めて重要な成果である。その後、室温を挟んで100℃もの温度範囲で磁力をスイッチできるという画期的な成果も収め、動作温度範囲の拡張も進んだ。さがけ研究終了後は3d遷移金属や非磁性金属材料を電界で磁石化させるなどの挑戦的な研究に取り組んでおり、安価で身近な材料の磁性を自在に操る技術の確立をめざしている。千葉研究者は、磁壁の移動速

度が電界によって 20 倍程度制御できることも見出した(*Nature Communications*)。これは書き込み速度の向上と、書き込みエネルギーの低減を実現する将来技術として有望視されている。これらの成果を発展させ、天然には磁石として存在しない材料を電界によって磁石化させることができるか? という根本問題を解くべく、電界を加えることで強磁性体化を目指す試みを開始している。現在までに、非磁性体 Pd 中に誘起された磁気モーメントが電界で変化するという新事実を観測し *Scientific Reports* に投稿している。千葉研究者が開発したこの電界による磁化反転は次世代の超省エネ手法として現在広く注目を浴びている技術である。

⑥小寺 哲夫 研究者(第3期生)

ー超微細加工による量子ドットから量子コンピュータの開発へー

シリコン系は核スピンを持たないため、電子スピン量子ビットを実現すれば超微細相互作用の影響が小さくなり長い電子スピンコヒーレンス時間を得ることができる。さきがけ研究では、シリコン量子ドット中の単一電子状態の実現と電荷検出技術の開発を行い、1つの電子数変化を読み出すための電荷検出技術を開発し、これが高感度センサーとして応用可能となることを明らかにした。また、制御性に優れたシリコン量子ドットを作製し低磁場下での電子輸送特性評価を行うことでスピンの依存する電気伝導特性を明らかにした。さきがけ研究終了後は、スピン閉塞時の漏れ電流の磁場依存性を調べることによって、スピン軌道相互作用によるスピン緩和が起きていることを示し、この技術を高度化することで、多重シリコン量子ドットや、極薄膜シリコン量子ドット構造の実現、正孔スピンの関与する現象の観測、高周波応答測定などを可能にした。実験とシミュレーション、技術と基礎・理論物理の両面から研究を進めることにより、スピンを利用した量子情報素子やセンサーの実現に向けた基盤技術を開発し、その機構を解明して数々の論文に発表した。現在もスピン量子ビットの実現をして量子情報処理や量子コンピュータなどへ機能創発する新原理デバイスの実現を目指して精力的に研究を進めている。

⑦藤内 謙光 研究者(第3期生)

ー有機多孔物質の多彩な機能を社会へー

さきがけ研究では、様々な生物活性物質を選択的に取り込み、発光強度や発光色を可逆的、動的に変換できる物質の開発とその応用を目指し「有機結晶の凝集変換を利用したダイナミック発光変調物質の開発と新しい動作機序に基づく新規バイオイメージング物質の創発」という課題で研究を進めた。藤内研究者は種々の芳香族有機酸と有機塩基を混合すると多彩な超分子クラスターが形成され、それらはホルモンなどを分子形状に応じて選択的に巨大空孔に吸着するセンシング・イメージング多孔性物質を開発した。さきがけ研究終了後は、形や大きさ、キラリティーなど天然物質の微細な構造差を認識し、それに応じてより幅広い発光変調を示すマルチコンフォーマー型クラスターを開発した。これらの成果は～

10ppm 程度でも発光波長を変化する疾病関連呼気ガスセンサーシステムの開発並びに混合気体から CO₂ を分離回収する技術へとつながり、現在は回収した CO₂ を有用物質に変換することを究極の目標として意欲的に研究を進めている。これらの成果は、革新的イノベーション創出プログラム (COI-STREAM) や NEDO のエネルギー・環境新技術先導プログラムに採択され発展している。

⑧宮内 雄平 研究者(第3期生)

ー量子細線による「アップコンバージョン発光」の発見ー

異なる次元性を持つ低次元電子系において、どのような新規光物性・機能が「創発」するかを狙いとして擬1次元物質であるカーボンナノチューブ量子細線中に0次元(量子ドット)状態が埋め込まれたハイブリッドナノシステムを作り、最終的に元の1次元状態固有の物性を超えた著しい発光増強創発の発見という成果を得た (*Nature Photonics*)。

さきがけ研究集了後は、カーボンナノチューブそのものにおける量子多体効果の人工的変調が光学特性に与える影響を詳細に検討し、ナノチューブ太陽電池の高効率化を実現した。その後、低エネルギーの近赤外光を照射すると高エネルギーの短波長の発光が生じるという「アップコンバージョン発光」と呼ばれる新規な発光現象を発見した (*Physical Review*)。詳しい解析により、この発光現象も、1次元のカーボンナノチューブ量子細線に、0次元(量子ドット)様の局在状態が埋め込まれる事で生じる創発物性であることが分かった (*Nature Communications*) が、このような現象は、これまでナノチューブで生じるとは考えられなかった驚くべき現象である。これは高価な2光子顕微鏡やレアメタル化合物を用いた赤外検出器を必要とする生体組織深部のイメージングを安価なシリコン検出器と近赤外光源だけで可能にするという新手法の実現に道を開く可能性がある。

8. 総合所見

(1)研究領域のマネジメントについて

本研究領域は、生物を含め、自然界が示す自律的な秩序形成と機能創発を人工的な微細加工などの技術に取り入れ、融合させるという挑戦的な目的で設定されたが、スピントロニクスから運動タンパクの運動制御にいたる極めて幅広い分野の研究者を採択し研究を行うことができた。これらの幅広い研究分野の研究者が研究総括の掲げる「創発」という目標にどのようにアプローチし、どれほど目標とするところまで近づくことができたかは研究者によって違いがあるが、将来有望な研究がいくつも生まれていることは領域の設定と研究総括・領域アドバイザーの指導とアドバイスが適切であったことを示している。このような異なった概念が同時並列的に一つの目標のもとに、戦略的・体系的に研究を進める例は、あまり例がなく、今後の目標設定の上で参考になろう。領域の運営においても各研究者は異分野の研究に領域会議や研究室訪問で間近に接することで異分野への抵抗感が減

り、自らの研究の幅を広げるきっかけとなったほか、一人では解決できない部分について協力してもらえぬ研究者を領域の内外で探して目標の達成のために努力するようになったことがうかがえる。

(2) 研究領域としての成果、科学技術イノベーション創出への展望など

本研究領域の目標「ナノシステムと機能創発」の持つ意味をもう一度考えてみたい。機能創発とは前掲のように“局所的な相互作用を持つ個々の要素が多数集まることで、その総和とは質的に異なる高度で複雑な秩序または自律的機能やシステムが生じる現象”を指し、その発現は生物の世界によく見ることができる。しかしながらその発現機構は未解明の点が多い。今わかっていることは、そのメカニズムは現在我々が手にするあるいは将来的に描くところのエレクトロニクスに基づくナノシステムと根本的に異なっており、ある意味ではその原理は次に述べるように対照的である。

トップダウンによって実現されているナノデバイスでは電子をキャリアーとして固体半導体中を高速移動することにより演算されるので、1 素子・1 機能(シングルファンクション)であり、機能化のための回路設計製作の方法論が確立している。したがって、LSI のような機能集合体、すなわち集積回路デバイス製作が可能である。一方で高集積化、高速化に伴って発熱によるエネルギー損失が大きいという課題を現在抱えている。

一方、生物に見られる創発機能発現においては、キャリアーは主としてイオンや分子であり、それらが、水媒体中をカスケード的に極めて多段階のプロセスを経て信号を伝達し演算している。そこでのキャリアー移動速度は電子とは比較できないほど遅いものの、演算処理はパターン形成によっていて、低エネルギー損失高効率動作が可能である。

ここで問題になるのは、そのプロセスが熱揺らぎ、分岐や発展的フィードバックを持つ時空間複雑系、散逸構造やカタストロフィといったキーワードで表現される非線形非平衡系の複雑なカスケード反応によって発現されることである。それゆえ、1 集合体・多機能(マルチファンクション)システムという特徴を持つかわりに、無数の素反応からなるネットワークの全体構造が現時点で今もって描けないことである。したがって、機能集合体、即ち細胞や生体組織における機能発現メカニズムもまた不明であるので、作動制御技術はもちろんのこと、人工的に機能集合体を設計製作するすべがないということである。

このように考えてみると、創発発現の仕組みはいまだ不明な点が多く、少なくとも生物界で見られるような創発機能を現在の延長線上のナノシステムにそのまま導入することには、ある意味で飛躍があり、大きな困難を伴うのは容易に想像できる。しかしながら本領域でこのような目標を設定したことは、それゆえにこそ若手研究者に現在のナノシステムが抱える基本的課題をいち早く捉えてもらおうと同時に、我が国の将来の科学技術のあるべき方向と姿を先導的に考える機会を設け、よって社会価値観の変革を伴うイノベーションにつなげて欲しいという意欲的・挑戦的な構想のもとに設定されたものと推察される。環境や社会と調和する未来型のナノシステムを作るための挑戦をするというその観点からこ

の目標を考えてみると、「ナノシステムと機能創発」という問題提起はまことに先導的・創造的目標といえよう。

このような困難な目標設定にもかかわらず、研究成果を総括してみると、各研究者は世界を先導する数多くの萌芽的・革新的学理と次世代の産業構造を変革しうるような科学技術を提案してくれて見事にその期待にこたえてくれたものと評価される。

そして本研究領域はその活動を通じて、「機能創発」という新しい学術上の概念を達成するために、次の4つのアプローチが存在することを明らかにした。

- ① ナノレベルの高度化による機能創発
- ② ヘテロナノ構造構築による機能創発
- ③ 外部刺激によるナノ構造制御と機能創発
- ④ 生物運動制御による自発的機能創発

①では、ナノレベルでの規則構造構築を高度化(場合によってはそれらを階層化)することによって同調・集積といった新たな機能創発を見出した系で、たとえば分子シンクロナイズ効果によって強円偏光発振可能となること(内藤)、スピン閉じ込めによって量子演算素子を作れることを証明したこと(小寺)、原子レベルの解像度を持つ超小型電子顕微鏡開発による生物医学用途への応用可能性(木村)、3nm以下のサイズで制御したシリコンクラスター粒子による連続波長可変レーザー発光(白幡)、数十nmの厚みで積層堆積させた軽金属-遷移金属多層膜が瞬間発熱と素子接合への応用(生津)、世界初の数MHz電場の高速で回転するナノ・モーターの開発(廣畑)などがその例である。

②では有機-無機、バイオ-金属等、無機-バイオなど異なる物質間でナノ構造を構築することによって、単独では得られない特異的な機能創発を発現する系で、金属-抗体-セラミックス交互ナノ接合によるプラズモン共鳴(梅津)、屈折率制御が可能であることを示し、メタマテリアル創出の方向論を確立したこと(藪、吉田)、自己集合ペプチド-マンガン錯体の集積化を利用した毒性の低い磁気共鳴画像(MRI)造影剤キャリアの開発(松村)、半導体微細加工と脂質二分子膜とを組み合わせさせたチャンネル埋め込み型脂質二分子膜の形成と薬物副作用の評価法の開発(平野)、ナノギャップ金チェーン構造体による近赤外テラヘルツ光の発生(上野)、三次元微細加工技術と高密度細胞集積化によるコラーゲンゲル三次元血管モデルの創製(松永、池内)、グラフェン表面上でのペプチドの規則的ナノワイヤー構造形成(早水)、発光性多孔質有機塩と様々な有機分子、生物活性分子との錯体形成による発光変調(藤内)など数多くの例を挙げることができる。

③では外部電場印加によって、ナノレベルの構造が応答し、新たな機能が発現された系で、磁性の可逆的スイッチングのみならず、現代の錬金術にもつながるような基本物性の変換の可能性を示したこと(千葉)、ゲルという含水高分子ナノ微粒子を用いて応力による波長可変レーザーを実現したこと(古海)、化学的に作ったゼロ次元励起子は1次元CNT上で強力に発光できること(宮内)、などをあげることができる。

④では運動タンパクの自己組織集合体が数多く集合すると、それ自身、自律分散的にパ

ターン形成するように運動して、生物組織に全く新しい性質を付与したり、創発モデルを作りうること(角五)、高弾性—低弾性ゲル状に幹細胞を運動させると細胞は基材硬度依存的に未分化状態を維持(幹細胞の分化フラストレーション現象)し、幹細胞を若く元気な状態で保存できること(木戸秋)、などがその例である。

これらはいずれも、トップダウン手法によるナノレベルでの規則構造形成、あるいはボトムアップ手法による自己組織化と階層構造形成、ないしはその両方の技術の特性を巧みに構想し、高度化することによって創発機能に結び付けた例で、これほど多彩な分野と手法によってナノ構造を制御し、創発システムを本領域のように体系的に構築した前例は世界的にもなく、高く評価されるべき成果だと考えられる。また、これらの成果は「ナノレベルでの構造制御を究めた物質系反応場における応答は、適切な条件下では質的変質を遂げ、機能創発する可能性を有する」という根本的で重要な学理を提案できることを示している。

根本原理につながるこれらの独創的基礎的研究が、忽然として新産業と社会変革をもたらす可能性があることを考えると、本領域のどの研究が将来産業界に応用されるかを安易にとりあげ、それらについてさらに評論・コメントすることここでは避けたい。それぞれの成果の中に独自の考え方、すぐれた解析力、そして世界第一級レベルの高度の技術力が提示されていて、まさにさきがけ研究にふさわしい誇るべき成果の数々が生み出され、新学術領域の創出のみならず、イノベーションにつながる次世代新産業が創出する可能性を示したことを総括として誇りに思うとともに、それらを研究者、及び領域アドバイザー一人一人と共有したい。

(3)5 年型及び、大挑戦型研究終了にあたっての所見

5 年型及び、大挑戦型研究が終了するにあたっての所見、特にその意義について考えてみたい。

本研究領域では 1 期生 2 名、2 期生 3 名(うち 1 名は大挑戦型、期間延長により 5 年間)、3 期生 2 名の計 7 名がそれぞれ 5 年間研究を行った。さきがけ研究者の多くが限られた期間内に見える成果を挙げなければならないという自己暗示にとらわれ、ややもすると成果主義に追われる傾向があるとするならば、それは本来のさきがけ研究の趣旨とするところではないであろう。将来にわたって世界で活躍する先導的・指導的研究者を育成するための素養と知識を養成することを目的とするならば、研究者個々が有する資質を育て、将来の研究方向と方針、そして科学のあり方に対する基本的考え方を醸成する機会としないといけない。その観点から言えば、5 年という比較的余裕のある時間が研究資金と共に若手研究者に対して与えられるのは研究者にとって極めて貴重な機会を与えるプログラムということができよう。

事実、山内研究者は研究終了時に自らの研究過程を振り返って、「主として前半に推進した課題は「A、細孔の合成と構造制御」であったが、その部分だけでは、物質・材料とし

での真の価値を見出せない。後半に展開した「B細孔の機能発現」という領域まで到達するためには、5年間という継続期間は大変重要なものであった。5年間を通して、物質・材料の合成からその応用とすべてをカバーできる形で取り組むことができた」と述べている。

山内研究者は無機細孔物質に関し、5年間を通じて、合成—構造制御—機能展開—応用—実用化という一連の研究を体系的に研究し、基礎研究の成果を数々の企業群と連携して応用実用化研究にまで発展させることに成功した。これはイノベーションへ向けた研究の好例のひとつであり、今後の我が国の研究の在り方を示しているのではないだろうか。

池内研究者は、また別の視点から5年研究の意義を振り返っている。同氏によると、本来の研究テーマの目標からは外れるが、その過程で見出した興味深い発見・発明をA、さきがけ成果を活用した共同研究をBと仮に分類してみると、3年型研究の場合では終了時の成果報告(論文、知財など)を考えると実質的には2年半で研究終了しなければならない、申請テーマ以外のA研究に着手するのはハードルが高い。しかし5年型であれば、寄り道、回り道をする余裕がある。Bについては、「私のような工学分野の研究者が、医学・生物系との共同研究を進めるには、独自の技術的イノベーションがあり、かつ、時間的・精神的に余裕があることが必須である。本筋の技術開発に絞れば、3年型×2回でも5年型と同等以上の成果が得られるかもしれないが、少なくとも私の場合、異分野との共同研究を進められたのは、研究期間が5年あることで、3年目以降に技術的成果が上がってきた段階で、さきがけ異分野交流会に参加し、他の領域の研究者のニーズに耳を傾ける余裕があったからである。また企業からの問合せが増えたのも4、5年目である。このような経験から、5年型に採択して頂いたことは、異分野融合、実用化に非常に有効であったといえる」と述べている。池内研究者もまた5年の研究期間中に実用化、商品化するという目覚ましい研究成果を収めているのは別記記載の通りである。3年間のさきがけ研究者が別の領域で再度応募したり採択されたりしている現実が少なからずあることを考えると池内研究者のコメントは重要であろう。

機械工学を専攻する横川研究者もまた同様に、運動タンパクを用いて生物輸送システムを作るという異分野融合研究を展開し、その成果を生物運動機構の解明という生物科学の知見に貢献した。この研究も5年という期間の継続がなければ得られなかった異分野融合の成果であろう。制御工学研究者がシステムとして生物運動を制御し、それを解析することによって生物運動の理解に役立つという異分野融合の成果は意義深く、これも将来の我が国の研究の在り方を示す好例とすることができよう。

白幡研究者は「5年間の研究期間無くして後半に得られた3分野の成果は得られなかったし、5年間というのは時間の問題だけでなく、研究費を計画的に効率良く使用するためにも不可欠であった」と記述している。「ナノ粒子の精密合成→光物理学的評価→デバイスプロトタイプ作製」で示されるように、5年間あってこそ化学と物理両面からナノ粒子というものを評価できるようになり、内外の理論および実験研究者(モントリオール大学、カールスルーエ大学、トロント大学、名古屋大学など)とも分野横断的な共同研究に発展できるよう

になった」と論評している。白幡研究者によるシリコンという単一元素のみをもちいて、ナノ粒子の精密重合から光特性評価、デバイス作製そして学理創出までの過程を一貫して成功させた事は、材料開発で常法となっている元素選択という横断的探索研究ではなく、物質を固定化した上でナノ構造の次元性とサイズ制御というトポロジカル視点からのより正統的研究が5年間という研究期間があれば可能になるという極めて重要な事実を示している。

同様のことはペロブスカイト酸化物を取り上げて飛躍的に高い圧電特性を示すナノスケール圧電体を創製した山田研究者についてもいえる。同研究者はアスペクト比の高いナノ構造体をエピタキシャル成長およびナノプレートの成長制御という緻密なトポロジカルの構造制御法でバルク単結晶に匹敵する圧電定数を示す圧電体を創出することに成功した。この種のいわば正攻法的な研究は周到な理論的準備と卓越した構造制御技術を伴わなければ不可能であり、ともすれば試行錯誤的な伝統的材料開発研究とは異なるリスクと困難を伴う勇気のいる道である。5年というさきがけ研究期間がそれを可能にしたり、促進したりするならば、その意義は極めて大きいと言わざるを得ない。

廣畑研究者による数 MHz で回転するナノ・モーターの創製はこれまで人類が手にしたことのないいわば究極のアクチュエータであって、これはむしろ5年間のさきがけ研究という枠を超えたきわめて創造的で壮大な挑戦研究というべき性格を有している。スピンの生成するトルクを利用し強磁性体ナノドットの磁気モーメントの回転によって駆動するナノ・モーターの実現には、創発的基本設計に加え、完全分離しかつ完璧に整合した格子界面の生成、3端子、4端子面内スピンバブル素子の作成、スピンの注入、スピン偏極電流の増幅、スピン偏極電子の回転といったこれまで未踏のナノ領域固有の理論的・実験的物理学課題が数多くそこに横たわっているはずである。それらをひとつずつ解決することによって未知の知見と新たなナノ要素技術の世界を広げることができよう。現在、実証実験が推進されており、一刻も早い世界初のナノ・モーターの実現が待たれる。

5年研究にわたって得られたさきがけ研究の成果をまとめると以下のような特徴があることに気付く。それらをまとめると、

- ① 異分野融合研究の促進
- ② 共同研究の推進と国際連携研究の進展
- ③ 網羅的探索的研究からより論理的研究の推進
- ④ 基礎研究から応用研究までの系統的展開
- ⑤ 特許取得の促進と実用化研究への発展

このような特徴は我が国のイノベーション研究の為に強く求められている重要な要件であり、それらが若手研究者によるさきがけ研究において際立って発現されているのは将来の我が国の科学研究にとって喜ぶべきことであろう。そのような特徴は別記紹介のように3年間の研究の終了後、いくつかの例でもそれぞれ発展していることに注目すべきであろう。

さきがけ研究の発展ダイナミズムはますます異分野へ展開され、同時により社会性の強

いノベーション研究の性格を帯びつつ発展している。このような立派な成果を生み出した個々の研究者の将来と飛躍を大いに期待すると同時に、社会はそれに応える仕組みをつくる不断の努力が求められているといえよう。