

## さががけ「ナノシステムと機能創発」

### 研究領域事後評価報告書

#### 総合所見

本研究領域は、生物の世界で広く見られる「創発」という概念を物質科学に取り入れ、物質科学と生命科学およびナノサイエンス・ナノテクノロジーとの融合により自律的・非線型的な創発機能を発現する次世代ナノシステムの創製を目指すもので、文部科学省から平成 20 年度に提示された戦略目標「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」を受けて設定された。

本研究領域では、長田研究総括の選考方針に沿って独創的・挑戦的課題が平成 20～22 年度の 3 期にわたって厳正に採択され、三つの基本的運営方針に基づく極めて優れた運営が行なわれた。5 年型研究については、平成 21 および 22 年度に採択された研究課題についてそれぞれ平成 26 および 27 年度まで研究が継続された。

本研究領域の特徴は、①研究領域名にある「創発」をキーワードに、今後の科学・技術の進むべき方向の一つを的確に捉えた上述の戦略目標に沿って研究手法の全く異なる極めて多彩な分野の研究者が採択されたこと、②戦略目標に沿う機能創発性次世代ナノシステムの創製を目指す独創的・挑戦的な研究が展開され、国際的にトップレベルの成果が創出されたこと、および③研究総括ならびに領域アドバイザーの的確な指導のもとに、研究の質的向上のみならず独自の新しい研究を切り拓く人材の育成が図られたことの 3 点に要約される。

本研究領域は、金属・半導体・無機・有機・高分子・生体系など多様な物質系を用い、ボトムアップ手法の駆使あるいはボトムアップ手法とトップダウン手法との融合により、①ナノ構造体の構築やデバイス開発のための新手法・新技術の開発、②階層構造をもつナノ構造体の創出と機能創発、③新規デバイスの開発、④新手法・ナノ構造体・デバイス等を組み合わせた各種のナノシステムの構築など、創発機能を発現する次世代ナノシステムの創製に関わる先駆的・独創的かつ国際的にトップレベルの研究成果を収めた。その中には科学技術イノベーションの萌芽となる成果もいくつか含まれている。このことは、短い研究期間内に著名な国際学術誌に数多くの論文が掲載されていること、また、論文公表から短い期間内に被引用回数の多い論文が相当数あること、国際会議における招待講演件数が多いことなどからも明確に裏付けられる。特許出願も数多く行なわれ、知的財産の蓄積についても十分な成果を挙げている。領域内外の連携や共同研究が積極的に図られたことも成果の創出に寄与している。

また本研究領域は、研究総括ならびに領域アドバイザーによるきめ細かな指導を通して若手研究者の育成を図り、昇任、受賞、国際会議での招待講演の件数からも明らかのように、第一線で活躍する有能な研究者を多数輩出した。とくに、英語での発表・討論、研究の位置づけと将来展望、社会に対する説明など、さまざまなテーマを与えて発表させる工

夫を凝らした若手人材の育成は非常に効果的であり、今後のさきがけプログラムの運営に大いに参考になると思われる。

以上、本研究領域は、採択された有能な若手研究者による困難な目標への果敢な挑戦と研究総括・領域アドバイザーの熱意と使命感に支えられた的確な指導により、短い研究期間内に機能創発性ナノシステムの創製に関わる先導的・独創的な研究成果を収め、新しい学術分野としての「階層構造をもつナノ構造体を対象とするナノサイエンス・ナノテクノロジー」の開拓に貢献するとともに、それを通して多数の有能な若手人材の育成を図っており、さきがけプログラムの趣旨・目的を十分に達成することに成功している。この成功は、領域運営において発揮された研究総括の洞察力・先見性・卓越したリーダーシップ・マネジメント能力など類まれな力量に負うところが大きく、このことも今後のさきがけプログラムにとって参考になると思われる。

以上を総括し、本研究領域は総合的に特に優れていると評価できる。

## 1. 研究領域としての成果について

### (1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

本研究領域では、分野・手法の異なる多彩な課題に的確に対応できるように、研究総括ならびに女性研究者・企業所属の研究者を含めた広い分野における第一線の著名な専門家 15 名から成る領域アドバイザーによる効果的な指導体制が採られた。

課題選考は、研究総括の選考方針「創発機能を発現する次世代ナノシステムの概念の構築とその創製に向けた独自の発想に基づく挑戦的な提案を重視する」のもと、領域アドバイザーの他に外部評価者が加わった書類選考とその後の面接選考により厳正に行なわれた。平成 20～22 年度における応募総数 536 件の中から採択された 40 件の課題は、創発機能を発現する次世代ナノシステムの創製に関わる多彩かつ挑戦的な提案から成り、①ナノ構造体の構築やデバイス開発のための新手法・新技術の開発、②階層構造をもつナノ構造体の創出と機能創発、③新規デバイスの開発、④新手法・ナノ構造体・デバイス等を組み合わせた各種のナノシステムの構築など、広範な分野にまたがるバランスのとれた構成になっている。また、5 年型・大挑戦型研究は、新学術分野の開拓を目指す本研究領域を推進する上で非常に大きな役割を果たした。

本研究領域では、機能創発性ナノシステムの創製に関わる研究を対象に、研究総括の基本的運営方針「①成果主義を求めず、研究の独創性・質を高める、②異分野を積極的に取り入れて新分野・未開拓領域を切り拓く能力を育てる、③表現力・伝達力を涵養する」のもとに、適切かつ効果的な運営が行なわれた。すなわち、年 2 回の領域会議のほかには他研究領域との合同会議や研究成果報告会・公開シンポジウムなどの諸形態の会議において、個人個人の研究の独自性を尊重しながら研究の長所・短所、当該分野での世界的な位置づけ、将来への方向づけ等に関して議論を促す的確な指導が行なわれた。さらに、研究進捗状況の報告・討論といった定型にとどまらず、英語での発表・討論、世界の中での自分の

研究の位置づけと将来展望、社会に対する説明などさまざまなテーマを与えて発表させるなど、世界に発信できる表現力・伝達力の涵養のみならず研究の方向性・姿勢を内省する機会を与えて成長を促す有意義な指導が実施された。領域内外での連携や共同研究も推奨された。さらに、研究室見学会や研究総括・技術参事・事務参事によるすべての研究室へのサイトビジットの実施など、きめ細かな配慮・サポートが行なわれた。加えて、平成 25 年度に 3 年型研究が全て終了した後の 2 年間も活発な運営が継続された。

以上により、本研究領域の研究マネジメントは、特に優れていたと評価できる。

## (2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本研究領域では、生物の世界にみられる「創発」のコンセプトを取り入れて自律的・非線型的な創発機能を発現する次世代ナノシステムの創製を目指して、金属・半導体・無機・有機・高分子・生体系など多様な物質系を用い、ボトムアップ手法あるいはボトムアップ手法とトップダウン手法との融合による挑戦的な研究が展開された。その結果、①ナノ構造体の構築やデバイス創製のための新手法・新技術の開発、②階層構造をもつナノ構造体の創出と機能創発、③新規デバイスの開発、④新手法・ナノ構造体・デバイス等を組み合わせた各種の機能創発性ナノシステムの構築など、創発機能を発現する次世代ナノシステムの創製に関わる先駆的・独創的かつ国際的にトップレベルの成果が創出された。このことは、研究者間に研究業績の多少の偏りはみられるものの、研究領域期間内に 780 報(研究課題期間内に 520 報、研究課題終了後に 260 報)の論文が公表され、その大部分が著名な国際学術誌に掲載されていること(国際論文数 747 報)、論文公表から短い期間内に被引用回数が多い論文が数多くあること、国際会議における招待講演件数が多いこと、国内外への特許出願も 86 件に上り、知的財産が蓄積されていることなどから明確に裏付けられる。研究領域内外での連携や共同研究の推進も成果の創出に寄与した。

本研究領域では、挑戦的な課題に対して 3 年間あるいは一部の課題については 5 年間の短い研究期間にもかかわらず、新しい学術分野の学理の構築に資する成果ならびに科学技術イノベーションの萌芽となるインパクトの大きい成果が数多く得られた。とくに 5 年型・大挑戦型研究は、手法・技術の開発からシステム構築に至る、換言すれば、基礎研究から応用研究に至る系統的展開や分野横断的共同研究・異分野融合研究を促進させ、研究の質的ならびに量的向上に寄与した。以下にいくつかの研究成果を挙げる。

### ① 新手法・新技術の開発

- ・マイクロ波によるブロック共重合体の相分離構造の迅速形成手法の開発
- ・電界による強磁性半導体の磁化スイッチング手法ならびに強磁性金属の強磁性-常磁性相転移の制御手法の開発
- ・電界誘起気泡による細胞表面加工手法の開発
- ・間接遷移型半導体シリコンナノ粒子のサイズ制御を可能にする超精密重合法の開発

## ② ナノ構造体の創出と機能創発

- ・ボトムアップ手法によるナノサイズの相分離構造をもつブロック共重合体微粒子の作製とその金属化によるメタマテリアルの創製およびそれをレンズとして用いるナノリソグラフィー技術への応用
- ・自己組織化により形成される階層構造をもつコロイド結晶と高分子から成るゲルの創出とフォトリソグラフィーを利用した波長可変レーザー発振の実現
- ・カーボンナノチューブ量子細線上に創出した 0 次元状態の励起子からの発光増強
- ・ナノ構造の次元性とサイズ制御に基づく高性能ナノスケール圧電材料の創製

## ③ 新規デバイスの開発

- ・サイズ制御を行った間接遷移型半導体シリコンナノ粒子を用いた連続的波長可変レーザー光源の開発
- ・マイクロチャネルプレートを用いた電子線束に用いる世界初のナノリソグラフィー用量産型高速電子線露光光源の開発
- ・ナノギャップ金属構造と高分子ゲルの体積相転移を利用することによる赤外・テラヘルツ波を周波数選択的に検出する光センサーの構築
- ・異方性金属ナノ細孔を利用することによる共役高分子フォトルミネッセンスデバイスの開発
- ・全金属ナノ・スピンモーターの実現に向けてのナノ・スピバルブの作製

## ④ ナノシステムの構築

- ・階層構造を有し、自律的に機能創発する ATP 駆動型ソフトバイオマシン創製に向けた生体分子モーターの能動的集積システム
- ・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
- ・トップダウン手法で微細加工された基板を用いてボトムアップ手法で自己組織化させた分子集合体の向きをナノ空間内で自在に操る自律機能分子システム
- ・タンパク質駆動の能動輸送システム
- ・両親媒性分子の自己組織化に基づく油滴を対象とした細胞類似化学反応システム
- ・トップダウン手法とボトムアップ手法の融合による三次元細胞培養システムの一環としての iPS 細胞胚様体アレイおよび細胞培養足場の開発

これらの他にも多数の優れた研究成果が認められる。

物質科学に「創発」の概念を取り入れることにより新しい学際的学術分野の開拓ならびに科学技術イノベーションを目指す本研究領域が今後さらなる発展を遂げることが期待される。

上述の通り、本研究領域は、独創的・挑戦的かつ科学技術イノベーションの萌芽となる

国際的にトップレベルの成果を挙げ、戦略目標の達成に資する十分な成果を収めている。

以上により、本研究領域としての戦略目標の達成状況は特に高い水準にあると評価できる。

#### ⑤その他、研究領域としての人材の輩出・成長の状況

本研究領域の研究者総数 40 名(3 期性の内 1 名は他のプログラムに採用されたため研究途中で終了)の中から研究領域期間中に、4 名が国内外の教授に、13 名が准教授に、2 名が講師に昇任している。また、一般に表彰・受賞に至るには相当の時間を要するにもかかわらず、25 名の研究者がそれぞれ、文部科学大臣表彰 3 件のほか、サー・マーティンウッド賞、イギリス王立化学会 PCCP 賞、高分子学会 Wiley 賞、日本化学会進歩賞、高分子学会日立化成賞をはじめいろいろな賞を複数受賞している。国際会議における招待講演は 42 件を数え、プレスリリースも 12 件を数える。

以上のように、昇任、受賞、国際会議での招待講演の件数が極めて多いことは、本研究領域における各研究者の成果が国内外で広く認められていることの証左であり、研究者の水準の高さを示している。本研究領域に参画している若手研究者が、さきがけ研究を通して鍛えられ、大きな刺激を受けて切磋琢磨し、第一線で活躍する研究者へと成長している状況が伺える。本研究領域は、さきがけ研究の主要な目的の一つである若手人材の育成に大きく貢献しており、その優れた運営を高く評価したい。

#### ⑥その他、特記すべき事項

- \* 研究領域期間中に 747 報の論文が著名な国際学術誌に掲載され、論文公表から短い期間内に被引用回数が 136、73、67 に達する論文をはじめ被引用回数の多い論文が数多くあること。
- \* 3 年型研究終了後も研究領域期間内に多くの研究成果が蓄積されたこと。
- \* 5 年型・大挑戦型研究は基礎研究から応用展開に至る系統的研究や分野横断的共同研究・異分野融合研究を促進させ、研究の質的ならびに量的向上に寄与したこと。
- \* 領域会議への領域アドバイザーの高い出席率の下に、研究の独創性・質を高める指導のみならず、さまざまなテーマを与えて発表させるなど若手人材の育成を強く意図した細やかな領域運営が行なわれたこと。
- \* 参画研究者が自主的にシンポジウムや定期的な報告会などを企画・開催する気運が本領域内に醸成されたこと。

## 2. 研究領域の活動・成果を踏まえた今後の展開等についての提言

### (1) 本研究領域の活動や成果を、科学技術の進歩へと展開させるための方策

今後の科学技術の進むべき方向の一つを提示した本研究領域は、ボトムアップ手法の駆使あるいはボトムアップ手法とトップダウン手法との融合により創出が期待される階層構

造をもつナノ構造体を対象とする新しいナノサイエンス・ナノテクノロジーの開拓を目指す壮大な挑戦型研究領域である。本研究領域と同じ戦略目標のもとに二つの CREST プログラムが並行して進められているが、生物に見られる「創発」という高い次元に至る成果の結実と新領域の開拓のためには長期的な展望をもって取り組む必要があり、なんらかの形で本研究領域の継続が望まれる。個人型研究から拠点間共同研究へと展開させる方策も考えられる。

自己組織化されたナノ構造体の階層構造に基づく機能創発に関連する、よりの絞った研究領域として「高効率人工光合成システム」、「超高感度センサーシステム」、「バイオミメティクス」等があげられる。また、「単一分子系デバイス・システム」の構築も今後の科学技術の進むべき方向の一つとみなされている。

## **(2) 本研究領域の活動や成果を、社会還元や産業化・実用化に向けて実現させるための方策**

一般に、科学技術イノベーションの萌芽となる研究成果を真にイノベーションに導くことは容易ではない。生物における「創発」の概念を物質科学に取り入れて次世代ナノシステムの構築を目指す科学技術の研究は始まったばかりである。本研究領域内に研究成果の起業への展開を図ろうとしている研究者もすでに現れているが、本領域で得られた萌芽的成果を直ちに科学技術イノベーションに結びつけることは時期尚早であろう。

得られた成果をイノベーションへと展開させ、新産業の創成に導くためには、ノウハウと知的財産の蓄積が重要であるとともに、本研究領域における産学連携の強化が必須であり、本研究領域に特化した産学共同研究の公募は一つの方策となるのではないと思われる。

## **(3) その他の提言**

さきがけプログラムは、一つの研究室に在籍しているだけでは経験できない鍛錬の場とヒューマンネットワーク構築の場を提供しており、我が国の科学技術の発展と若手人材の育成に非常に大きな役割を果たすとともに、第一線の研究者への登竜門となっている。本研究領域における 5 年型・大挑戦型研究が研究面のみならず若手研究者のキャリアアップの面でも大きな成果を収めたことは、今後のさきがけプログラムにとって大いに参考になるとと思われる。

今後も、本研究領域のように、ヘテロな研究者集団を構成することにより広範な分野・手法を融合して新分野の開拓を図る壮大なテーマの設定が重要であると考えられる。省庁の組織横断型プロジェクト等の企画・実施も今後の施策の一つと思われる。有能な人材を登用するシステムの構築も望まれる。