

戦略的創造研究推進事業

－CRESTタイプ－

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」

研究領域中間評価用資料

平成 25 年 2 月 18 日

目 次

1. 研究領域の概要.....	1
(1) 戦略目標.....	1
(2) 研究領域.....	4
(3) 研究総括.....	4
(4) 採択課題・研究費.....	5
2. 研究総括のねらい.....	7
3. 研究課題の選考について.....	8
4. 領域アドバイザーについて.....	12
5. 研究領域の運営について.....	13
6. 研究の経過と所見.....	15
7. 総合所見.....	21

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」

① 本戦略目標の具体的な内容

本戦略目標は、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。

これまで、様々なデバイスやシステムの高速度化・集積化・小型化等は、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。また、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で自律的に機能を創発する自己機能化のレベルまで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、今後の発展が大きいと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、上記次世代ナノシステムの創製をはかることを目的とする。

② 政策上の位置付け

本戦略目標は、社会・産業からの要請が強く、「True Nano」領域における革新的材料開発を伴わなければ解決困難な課題と国際競争の優位を確保する課題の解決を目指すもので、以下の戦略重点科学技術に関係する。

○イノベーションを生む中核となる革新的材料・プロセス技術の創出

○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・材料技術の創成

③ 当該研究分野における研究振興方策の中での本研究事業の位置づけ、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

本戦略目標と同様に、ナノプロセスに関連するものとして過去に次の三つの戦略目標があるが、いずれもがプロセスの基盤知の蓄積、基本原理・現象の理解、動作理論の解明な

どを目指しているものである。

- ・異種材料・異種物質状態間の高機能接合界面を実現する革新的ナノ界面技術の創出とその応用
- ・ナノデバイスやナノ材料の高効率製造及びナノスケール科学による製造技術の革新に関する基盤の構築
- ・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

これに対して本戦略目標では、プロセスとしては未だ未成熟なボトムアッププロセスの開発ならびにナノデバイスの構築に不可欠なトップダウンプロセスのより一層の高精細化によって、次世代ナノシステムを創製する研究を対象としており、前者三つとは根本的に異なる。

- ④ この目標の下、将来実現しうる成果等のイメージ、他の戦略重点科学技術等に比して優先して実施しなければならない理由、緊急性、専門家や産業界のニーズ

本戦略目標の具体的な成果等を挙げれば、以下の様な次世代ナノシステムの創製である。

- ・タンパク質やDNA等の自己組織化を利用した新たな配線構造を有するシステム
- ・ウイルスをテンプレートとして作製した電極からなる高効率イオン電池
- ・トップダウンプロセスとバイオが融合した医療用ナノシステムの構築
- ・自己機能化した有機系材料による人工筋肉
- ・光機能性分子が自己組織化してなるセルフクリーニングシステム

これらのシステムの創製には、トップダウンプロセスを「True Nano」領域にまで発展させることは当然として、生体物質を模倣し、ミクロな素過程に立ち戻って電荷分離・伝導機構を明らかにし、それらの知見に基づいてプログラムされたナノ構造体が自ら機能を創発すべく構造化することを可能とする革新的なボトムアッププロセスを開発することが必要である。このボトムアッププロセスの確立とトップダウンプロセスとの統合は、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、今まさに喫緊に取り組むべき領域であると言える。

- ⑤ 本研究事業実施期間中に達成を目指す研究対象の科学的裏付け

我が国はトップダウンプロセスの代表例のフォトリソグラフィエッチング技術で世界の最先端を走っている。線源に EUV を使うなどして短波長化させることで、加工分解能の向上が可能になるが、EUV 線源については文部科学省のプロジェクトの1つとしての取り組みが始まっている。また、量子相関を有するもつれ合い光子の特異な振る舞いを利用することでも、光の回折限界をはるかに超える加工分解能の実現が可能である。イオンビーム加工では、希ガスをを用いたイオン源の開発によって加工時の損傷を大幅に減少させることが期待される。また球面ならびに色収差補正技術の導入により、加工精度を数 nm レベルまで大幅に向上できると考えられる。この収差補正技術についても、我が国独自のシステムの

開発が文部科学省のプロジェクトで進められている。

一方、ボトムアッププロセスの開拓についても日本は優れた要素技術をもっており、特に高分子工学・有機化学は世界の最先端を走っているとされる。本戦略目標に関連するものとして以下のものが挙げられる。

・デンドリマー等に代表される高分子ナノ空間制御材料や自己構造化ナノチューブ等の研究

・ウイルスを使った金 - 酸化コバルトのハイブリッドワイヤーの室温合成ならびにそれらの二次元制御によって薄く柔軟なリチウムイオン電池を作る研究

・人工物と生体分子に代表される異種材料間をハイブリッド接合する研究

・ナノサイズ粒子を表面張力等の利用により自己構造化させる研究

・ブロックコポリマーのマイクロ相分離によるパターンドメディアの加工プロセスの研究

これらの研究に、さらに高度化させたトップダウンプロセスを用いることで、より複雑な構造や高い機能を有する次世代デバイスの創製につながることを期待できる。

⑥ この目標の下での研究実施にあたり、特に研究開発目標を達成するための留意点

本戦略目標は、単なるプロセス研究ではなく、あくまでも次世代ナノシステム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が求められる。また、一層の科学的探求を要する基盤技術に対する集中的な投資や関係機関との有意義な連携協力体制の構築なども必須である。

本戦略目標では、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やデータ処理・解析、シミュレーションといったソフト技術の発展のみならず、材料工学、分子工学、界面工学、蛋白工学、流体科学といった既存の科学領域の統合に基づく新規な科学領域の創成が必要となる。このため、大学や独法を中心とした研究体制を前提として、企業が参画した体制がより望ましい。

トップダウンからボトムアップまでのプロセス研究の知見を持つとともに、それらを駆使してナノシステムを構築するまでの広く且つ深い領域全体を俯瞰できる総括の強力なイニシアチブのもと、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、グループ内での明確な役割分担、理論と実験の融合、人材の交流等の研究投資を有効に成果につなげるための具体的な仕組みが必要となる。既存の研究拠点との連携をはかるなどの工夫が考えられるので、十分に留意すること。

(参考) 本研究事業実施期間中に達成を目指す政策的な目標

本戦略目標では、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等の次世代ナノシステムを創製することを目標としているが、これ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のさらなる高精細化をはかることと、ボトムアッププロセス

を単なる自己組織化から自己機能化まで進化させることが不可欠となる。

トップダウンプロセスでは、フォトリソグラフィにおける露光光源の短波長化によって加工精度を数十 nm から 1 nm レベルまで高めることが求められる。また、通常ガリウムイオンの照射により行われるイオンビーム加工は加工精度が 50 nm 程度であるが、ガリウムイオンによる衝撃で加工面が変質し特性劣化が起こり、それを補うための後処理工程が必要になることが多い。加工精度を数 nm レベルまで向上させることに加えて、無損傷での加工が可能なプロセスの開発が必要である。

一方ボトムアッププロセスについては、単なる自己組織化の研究にとどまることなく、ハイスループット・低コスト・省エネルギー生産を可能とする革新的なプロセス技術の開拓によって、最終的には機能の創発するナノシステムの構築に資することを目指す。このためには、多種多様な無機材料ナノ粒子やデンドリマーに代表される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技術の確立が不可欠である。また、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、自己機能化するための設計指針を確立することも重要である。

現在の製造産業においては、トップダウンプロセスによる微細加工が中心であるが、より発展したトップダウンプロセスと実用化レベルまで進化したボトムアッププロセスとを統合することは、国内のナノテク産業が国際的に成功をおさめるのに必須要素であると言っても過言ではない。

(2) 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」

(平成 20 年度発足)

本研究領域は、フォトリソグラフィ等のトップダウンプロセスと自己組織化に代表されるボトムアッププロセスの高度化と統合化を進めることによって、革新的な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す。

具体的には、トップダウンプロセスによって作られた微細な電子回路、MEMS・NEMS 等のナノ構造デバイスと、ボトムアッププロセスによって生成されたバイオ・有機材料、自己組織化材料等との融合を図ることにより新たな機能を発現させる研究、または機能を有するボトムアップナノ構造体を工学的に応用可能なシステムとして構築する研究を対象とし、従来にない機能、性能をもつセンサ、アクチュエータ、バイオチップ、電子・光デバイス、エネルギーデバイス等の基盤構築を目指します。さらに、これらを集積・最適化した次世代ナノシステムの構築まで念頭に置いて研究を推進します。

(3) 研究総括

氏名 曾根 純一 (所属：独立行政法人物質・材料研究機構 役職：理事)

(4) 採択課題・研究費

採択課題と研究費の一覧を表1に示す。ここで、研究費とは平成24年度上期までの実績額に平成24年度下期以降の計画額を加算した金額を示す。染谷チームは、平成24年度よりERATOに採択されたため、研究費の配布額が少ない。

表1 採択課題と研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時所属・役職	研究課題	研究費
			総研究費	5,058
平成20年度	浦岡行治	奈良先端科学技術大学院大学 教授	生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム	423
	澤田和明	豊橋技術科学大学 教授	イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築	370
	西澤松彦	東北大学 教授	電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用	245
	畠 賢治	産業技術総合研究所 上席研究員/チーム長	自己組織プロセスにより創製された機能性・複合CNT素子による柔らかいナノMEMSデバイス	204
	藤岡洋	東京大学 教授	自己組織化グラファイトシート上エレクトロニクスの開発	298
	宮原裕二	東京医科歯科大 ¹⁾ 教授	機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製	450
平成21年度	宇理須恒雄	名古屋大 ²⁾ 特任教授	光神経電子集積回路開発と機能解析・応用	243
	北森武彦	東京大学 教授	拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成	431
	寒川誠二	東北大学 教授	バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現	444
	染谷隆夫	東京大学 教授	大面積ナノシステムのインタフェース応用	134
	辻井敬亘	京都大学 教授	濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製	246
	藤井輝夫	東京大学 教授	マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築	408
平成22年度	齊藤英治	東北大学 教授	スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出	326
	野地博行	東京大学 ³⁾ 教授	生体分子1分子デジタル計数デバイスの開発	394
	樋口昌芳	物質・材料研究機構 グループリーダー	エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー	213
	山元 公寿	東京工業大学 教授	新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立	229

1) 採択時：物質・材料研究機構 2) 採択時：自然科学研究機構分子科学研究所 3) 採択時：大阪大学

H24年度上期までの予算の追加配賦について表2に示す。当研究領域では領域研究費の約1割を総括裁量経費として確保し、これまでに領域内の研究チーム間の共同研究に対する支援や、研究を加速する目的で研究費の追加配賦を行ってきた。また、領域研究費の外枠でも、JST-RA制度、社会還元策、男女共同参画支援などの制度を利用して予算追加を行った。

総括裁量経費によるチーム間共同研究の支援はH22年度に開始し、年1回テーマの募集・選定を行っている。研究総括が提案テーマの審査・予算査定を行い、これまでに共同研究テーマ7件を採択、総額94百万円を配賦した（詳細は補足資料1を参照）。また、毎年度の研究計画見直しの際、各研究チームに対して予算増額・前倒しの希望を調査し、必要に応じて研究加速等のための予算を総括裁量経費から配賦した。

H21年度に実施されたJST-RA制度では、博士課程在籍者を対象としてCREST専任RAを募集し、人件費の追加配賦を行った。また、H21年度には「社会還元策」として研究成果の社会還元を促進する目的でテーマ募集が行われ、当領域からは澤田チームによる「高画素イオンイメージセンサの試作」に対して予算が追加配賦された。

男女共同参画支援による予算追加は、JST「出産子育て等支援制度」の下に実施されたもので、H23年度とH24年度に博士研究員の出産・育児に伴う負担軽減のための予算が追加配賦された。H23年度には、東日本大震災からの復旧を支援するため、各研究チーム・研究グループに対して震災による被害状況を調査し、追加予算配賦した。その際、必要性・緊急性の高いものについては、総括裁量経費により迅速に措置した。

表2 予算追加配布の状況

(単位：百万円)

費目	執行額
総括裁量経費（チーム間共同研究）	94
総括裁量経費（研究加速、震災復旧）	33
JST-RA制度	26
社会還元策	40
男女共同参画	7
震災復旧支援	11
その他追加配賦	62
合計	273

H24年9月末日現在

2. 研究総括のねらい

ナノ構造体の形成，物性解明，さらには機能発現に関する研究は，着実な進展を見せており，工学的な応用を図ろうとする気運が高まっている。これらの機能は情報通信分野，環境・エネルギー分野，ライフサイエンス分野における機器やデバイスに大きなイノベーションをもたらす可能性を秘めている。しかしながら，ナノ構造体の工学的・産業的応用は大きな期待を受けながら，十分にその高いポテンシャルを具体的に提示できているとは言い難い。本研究領域では，これまで個々に技術蓄積がなされてきたナノプロセスを統合化し，新たな機能を有するナノシステムを創製することを目的としている。本研究領域のテーマ設定，遂行にあたっては，トップダウンプロセスとボトムアッププロセスのインテグレーション，ならびに異分野融合が，重要なキーワードであると考えている。以下にその理由を述べる。

これまで，半導体の微細化によるデバイスの性能向上が電子機器の驚異的な発展を支えてきた。しかしながらトップダウンプロセスによる微細化が数十 nm の領域に入り，その技術的，経済的限界が顕在化しつつあり，より微細な領域へは，自律的な化学反応を利用したナノ構造体の自己組織的な形成，即ち，ボトムアッププロセスが何らかの形で必要と考える。ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスを組み合わせることで，原子・分子レベルまでのナノ構造体形成が可能になるだけでなく，低コスト生産が可能になり，広範な分野におけるナノシステムの展開が可能になると期待される。

快適・利便で安全，安心な将来社会を実現するためには高度に発達した情報通信技術の活用が必要なのは言うまでもない。将来の高度情報社会においては，我々の身の回りに様々なセンサーが配置され，センサーからの情報は通信網にアップロードされ，通信網に接続された高性能サーバー群によって集積された多量のデータの分析，加工，知識化がなされる。これらのサーバー群からは，個人に必要な情報が必要な時に，多様な情報端末を通して提供される。そこでは高速に情報処理を実行し，情報を伝える電子デバイスや光デバイスだけでなく，人間の五感に対応する多様なセンサー，個人の健康状態を，リアルタイムに，分子レベルでモニターするバイオチップ，上記のセンサーや情報端末にエネルギーを供給する高性能電池等々，多様なデバイスが必要になる。これらのデバイスは小型化，ウェアラブル化，タグ化された形で我々の身の回りに配備されるであろう。このような機能を実現するためには異分野間の技術融合が必要であり，それによって初めて集積化されたナノシステムへの展望が見えてくると考える。

上記では，次世代ナノシステムに関するひとつの考えを提示したが，これに留まるものではなく，ナノシステムが提供する新しい機能は環境・エネルギー分野，医療・健康分野でも大きなイノベーションにつながる可能性を秘めている。とりわけヒトゲノムの解読，iPS 細胞の創出に見られるように近年のライフサイエンスの進展は著しく，100 年前の量子力学勃興期を彷彿させる発展期にある。量子力学をベースに現在のテクノロジーが開花したことを考えると，DNA や細胞などの生体物質を半導体チップ上に搭載し，ライフサイ

エンスの膨大な知の集積と融合させることから生まれるイノベーションへの期待は大きい。また、究極のボトムアッププロセスで形成される生体物質を、トップダウンプロセスで形成される人工的なナノ構造体上に持ちこみ、いまだ未知な生命体の機能解明や診断、医療、創薬への活用を生み出す事は、本研究領域の重要な挑戦課題である。本研究領域ではこれらの研究課題の実行を通して、次世代ナノシステムの多様な可能性を探索し、そのイメージを固めると共に具現化していきたい。

なお、本研究領域は「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」といった大きな戦略目標を、立教大学入江教授による「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」と協同で担う。入江領域ではナノ構造体の創出に力点が置かれるのに対し、当領域では明確な出口を意識したナノシステムの創出がミッションとなる。そのため、領域の運営にあたっては、研究成果により新しい学問分野を切り拓くことだけでなく、常に工学的応用と新しい市場の創出を意識して進めていく。これにより、日本がこの分野で世界をリードし、世界へ次世代ナノシステムとしての骨太なメッセージを発信していきたいと考えている。

3. 研究課題の選考について

3.1. 研究課題の選考方針

ナノ構造体の形成、物性解明、さらには機能発現に関する研究は、着実な進展を見せており、工学的な応用を図ろうとする気運が高まっている。これらの機能は情報通信分野、環境・エネルギー分野、ライフサイエンス分野における機器やデバイスに大きなイノベーションをもたらす可能性を秘めている。しかしながら、ナノ構造体の工学的・産業的応用は大きな期待を受けながら、十分にその高いポテンシャルを具体的に提示できているとは言いがたい。本研究領域では、これまで個々に技術蓄積がなされてきたナノプロセスを統合化し、新たな機能を有するナノシステムを創製することを目的としている。本研究領域のテーマ設定、遂行にあたっては、トップダウンプロセスとボトムアッププロセスのインテグレーション、ならびに異分野融合が、重要なキーワードであると考えた。以下にその理由を述べる。

これまで、半導体の微細化によるデバイスの性能向上が電子機器の驚異的な発展を支えてきた。しかしながらトップダウンプロセスによる微細化が数十 nm の領域に入り、その技術的、経済的限界が顕在化しつつあり、より微細な領域へは、自律的な化学反応を利用したナノ構造体の自己組織的な形成、即ち、ボトムアッププロセスが何らかの形で必要と考える。ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスを組み合わせることで、原子・分子レベルまでのナノ構造体形成が可能になるだけでなく、低コスト生産が可能になり、広範な分野におけるナノシステムの展開が可能になると期待される。

快適・利便で安全、安心な将来社会を実現するためには高度に発達した情報通信技術の

活用が必要なことは言うまでもない。将来の高度情報社会においては、我々の身の回りに様々なセンサーが配置され、センサーからの情報は通信網にアップロードされ、通信網に接続された高性能コンピュータ機器によって分析、加工、知識化される。これらのコンピュータ機器からは、個人に必要な情報が必要な時に、多様な情報端末を通して提供される。そこでは高速に情報処理を実行し、情報を伝える電子デバイスや光デバイスだけでなく、人間の五感に対応する多様なセンサー、個人の健康状態を、リアルタイムに、分子レベルでモニターするバイオチップ、上記のセンサーや情報端末にエネルギーを供給する高性能電池等々、多様なデバイスが必要になる。これらのデバイスは小型化、ウェアラブル化、タグ化された形で我々の身の回りに配備されるであろう。このような機能を実現するためには異分野間の技術融合が必要であり、それによって初めて集積化されたナノシステムへの展望が見えてくると考える。

上記では、次世代ナノシステムに関するひとつの考えを提示したが、これに限るものではなく、ナノシステムが提供する新しい機能は環境・エネルギー分野、医療・健康分野でも大きなイノベーションにつながる可能性を秘めている。本研究領域では研究課題の実行を通して、次世代ナノシステムの多様な可能性を探索し、そのイメージを固めると共に具現化していきたい。また、研究課題間の共同作業を積極的に奨励し、次世代ナノシステムとしての骨太なメッセージを世に発信していきたいと考えている。なお、工学的応用を図る意味では、産学連携による提案も歓迎する。また、これまで CREST 等のナノテク関連プロジェクトで要素技術の開発がなされ、次のステップとして新たな機能を有するナノシステムとして工学的応用を目指す研究の提案も歓迎する。テーマ選択に当たっては、提案内容の独創性が最重要ポイントであることは論を待たないが、ナノシステムとしての発展性、技術の波及効果としての広がり、産業的インパクトの大きさも十分に考慮したい。具体的な採択判断ポイントは、1) ナノ構造体がもたらす特異な機能を積極的にナノシステムへ活用しようとしているか、2) 新しい学問分野、新しい市場を切り拓くようなイノベーションの可能性を秘めているか、3) 上記の可能性につながるような独創的なアイデア、それを具現化する技術、そのエビデンスデータが示されているかである。

研究領域として以上に述べてきた目的を達成するためには、それにふさわしい提案を採択するだけでなく、採択後3年目に実行する中間評価も重要である。課題の目標達成が難しいと判断される場合は、大幅な内容の見直し、場合によっては中止もありえると理解頂きたい。日本がこの分野で世界をリードし、世界へ情報発信していくために、多くの人の積極的な提案を期待した。

3.2. 平成21年度、平成22年度募集における付加要項

前年度までの応募状況を見たうえで、公募時に強調したい点を募集・選考の方針として付け加えて発信した。平成21年度は、ナノシステムの環境・エネルギー分野への挑戦に関する応募を、平成23年度はナノシステムによる環境・エネルギー分野への挑戦、エレ

クトロニクス分野における省エネルギー化への挑戦をそれぞれ奨励した。これは毎回、バイオ系の提案が多く、領域の目標としては、手厚く選考できたものの、ナノテクノロジーの応用として重要になりつつ環境・エネルギー分野、省エネルギーエレクトロニクス分野が手薄になっていると判断したからである。なお、平成23年度は最終募集となる事から、若手の勇気ある提案を奨励した。

3.3. 選考結果

3.3.1. 平成20年度選考結果

本研究領域の戦略目標は、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスと半導体技術に代表されるトップダウンプロセスを組み合わせ、革新的な機能を有するナノシステムを創製することにある。提案に当たっては材料に関する科学的知識、プロセスに関する融合的な基盤技術が必要なだけでなく、ナノシステムとしての応用展開をしっかりと見据える必要があり、提案は容易ではないと想像する。そのような中で、ナノシステムとしてのイノベーションを引起そうとする挑戦的、意欲的な提案が32件集まった。提案をあえて分野別に分類すると、バイオ応用6件、M(N)EMS応用5件、エレクトロニクス応用4件、エレクトロニクス/バイオ融合7件、物理/化学/バイオ融合7件、エレクトロニクス/エネルギー融合3件となる。ここでいうエレクトロニクスにはフォトニクスも含まれている。これらの提案に対し、上記分野をカバーできる10名の領域アドバイザーと共に、書類選考、面接選考を行い、エレクトロニクス/バイオ融合領域で3件、エレクトロニクス/エネルギー融合領域で1件、化学/バイオ融合領域で1件、M(N)EMS/エレクトロニクス応用で1件の計6件を採択した。全体的にボトムアッププロセスとしてバイオに関連した技術の提案が多かったように思う。結果として、バイオ技術を半導体に代表されるトップダウンプロセスと組み合わせ、ナノシステムとして将来への大きな発展性を示した提案が今年度は多く採択されることになった。これだけの難しい研究領域に挑戦してくる提案だけに、皆、粒ぞろいで、光る部分を持っている。アドバイザーの意見も分かれたが、最終的には、1)ボトムアップとトップダウンの融合プロセスに挑戦しているか、2)大きなイノベーションにつながる可能性を秘めているか、3)上記の可能性につながる独創的なアイデア、それを具現化できる保有技術、エビデンスデータはあるか、で判断した。

バイオと物理・化学分野との融合、バイオ技術とエレクトロニクス、エネルギー技術との融合は今後の大きな技術の流れであり、引き続き、同領域の有望な提案は採択していきたい。同時に、自律的な化学反応により形成される広い意味での自己組織化ナノ構造、それを利用して実現されるエレクトロニクス・フォトニクス応用、環境・エネルギー応用も安全・安心で持続可能な将来社会を実現するうえでますます重要な技術になってくることは間違いない。次回以降、そのような提案も多いに期待したい。

3.3.2 平成21年度選考結果

本研究領域の戦略目標は、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスと半導体技術に代表されるトップダウンプロセスを組み合わせ、革新的な機能を有するナノシステムを創製することにある。提案に当たっては材料に関する科学的知識、プロセスに関する融合的な基盤技術が必要なだけでなく、ナノシステムとしての応用展開をしっかりと見据える必要があり、提案は容易ではないと想像する。2回目の募集となる今回は、ナノシステムとしてのイノベーションを引き起こそうとする挑戦的、意欲的な提案が48件集まった。応募件数も前回に比べ、1.5倍に増加、粒よりで激戦となった。提案は、分子・DNA操作、バイオ・ニューロチップ、マイクロ流路・MEMS、CNT・グラフェン応用、スピントロニクス応用、エレクトロニクス・フォトリソグラフィ応用、エネルギー・環境応用など、非常に多岐の分野にわたっている。これらの提案に対し、上記分野をカバーできる11名の領域アドバイザーと共に、書類選考、面接選考を行い、神経細胞チップ、マイクロ流路のバイオ応用、マイクロ流路のエネルギー応用、分子技術のエネルギー応用、有機分子技術のエレクトロニクス応用、バイオ技術のエレクトロニクス・エネルギー応用の計6件を採択した。本研究領域では、ナノシステムとして新しい融合分野の開拓を目指しており、必然的にカバーする分野も多岐にわたってくる。アドバイザーの意見も分かれ、多岐に議論を戦わせたが、最終的には、1) ボトムアップとトップダウンの融合プロセスに挑戦しているか、2) 新しい技術分野、学問分野を拓く可能性、あるいは社会に大きな影響を与える産業応用につながる可能性を秘めているか、3) 上記の可能性につながる独創的なアイデア、それを具現化できる保有技術、エビデンスデータはあるか、を評価基準として判断した。今回の公募に当たっては、エネルギー・環境分野への挑戦を歓迎するとのメッセージを事前に発したが、結果的にそれが反映されたような形となった。

今、ナノテクノロジーは、エネルギー・環境問題といった地球的な課題の解決に、また健康・安全・安心といった生活の質の向上に向かって、決定的に重要な技術になりつつある。そのためには日本が先行して築き上げてきたナノテクノロジーをベースに分野融合的な発想を喚起し、ナノシステムとして社会の喫緊のニーズに答えていく必要がある。1回目と2回目の採択プロセスでは、上記評価基準の(1)をかなり厳密に適用してきたが、最終となる次回はナノシステムに対するこれらの期待を勘案し、(1)の基準はこれまでに比べて広く解釈し、(2)、(3)を重要視していこうと考えた。

3.3.3 平成22年度選考結果

本研究領域の戦略目標は、プロセスインテグレーションにより革新的な機能を有するナノシステムを創製することにある。提案に当たっては材料に関する科学的知識、プロセスに関する融合的な基盤技術が必要なだけでなく、ナノシステムとしての応用展開をしっかりと見据える必要があり、提案は容易ではないと想像する。本研究領域の最終募集となる今回は、ナノシステムとしてのイノベーションを引き起こそうとする挑戦的、意欲的な提案

が64件も集まった。これまで3回の募集を行ったが、提案数は、32件、48件、64件と、大幅に増えてきており、この研究領域の盛り上がりを感じた。今回は最終年度ということもあり、予算の関係から採択件数を4件と絞らざるを得ず、競争率1.6倍の激戦となった。そのため、優れた提案でありながら採択できなかった案件も多く、まさに後ろ髪を引かれる思いの選考となった。提案は、原子・分子・DNA操作、バイオ・医療応用、マイクロ流路・MEMS、CNT・グラフェン応用、スピントロニクス応用、エレクトロニクス・フォトリソグラフィ応用、エネルギー・環境応用など、非常に多岐の分野にわたっている。今回の募集では若手からの意欲的な提案を期待する旨のメッセージを事前に発信したが、それを反映して若手からの提案が多かったのも特徴である。これらの提案に対し、上記分野をカバーできる11名の領域アドバイザーと共に、書類選考、面接選考を行い、触媒応用などを目指した原子の精密操作、医療応用を目指した生体分子の超高感度計測、スピンの新たな制御法による新物理開拓、新たな金属・有機ハイブリッドポリマーによるディスプレイ・エネルギー応用の計4件を採択した。いずれも独創性の高い挑戦的な提案ばかりである。本研究領域では、ナノシステムとして新しい融合分野の開拓を目指しており、必然的にカバーする分野も広く、選考は容易ではないが、最終的には、1) 新しい技術分野、学問分野を拓く可能性、あるいは社会に大きな影響を与える産業応用につながる可能性を秘めているか、2) 上記の可能性につながる独創的なアイデア、それを具現化できる保有技術、エビデンスデータはあるか、を評価基準とした。

今年度、新政権による日本の新成長戦略が発表された。日本が世界に伍し、世界を先導していくために、グリーンイノベーションとライフイノベーションにより、社会の喫緊のニーズに応え、科学技術立国を目指そうとするものである。ナノテクノロジーは物質科学をベースにして分野融合的な発想でこれら両イノベーションの牽引役となることが期待されている。当研究領域におけるこれまで3回の採択課題を、今、改めて見直してみると、まさにこれら両イノベーションの創出に真正面から取り組んでいるものばかりである。採択が完了した今後は、採択テーマ間連携、グローバル展開、死の谷を越える産業化等を通じて研究の加速を図り、上記の社会からの期待に少しでも応えていきたい。

4. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザーの一覧を表3に示す。領域総括の専門が物理学と電子工学であり、関連する分野の研究はほぼカバーできるとの考えから、その分野については、少数の信頼のできるアドバイザー（松本、冬木）を配するに留めた。領域目標から、バイオ関連、化学関連の研究テーマの応募が多いと予想されたため、その分野の研究アドバイザーを手厚く選んだ。鳥光、西本、馬場の各氏が前者に、また栗原、清水、坂東の各氏が後者に相当する。MEMS関連の応募も想定されたため、小野氏と、また研究領域が開始するときに実施されていたNEDOによるMEMSプロジェクト「BEANS」の評価委員、出川氏に加わって

頂いた。初年度の公募でスピントロニクス関連の応募が散見されたため、その分野に詳しい大橋氏に次年度（平成21年度）から加わって頂いた。産業界との連携については、領域総括が企業の研究所で基礎研究の推進に長く携わってきたため、対応できると考え、特に産業界の人を選定することはしなかった。各専門領域での学術的リーダをアドバイザーとして選定したが、結果的には企業から3名加わることになった。全体的には上記の体制で思惑通りの運営ができています。

表3 領域アドバイザー一覧

領域アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
大橋啓之	日本電気株式会社 グリーンプラットホーム研究所	主席研究員	平成21年4月～ 平成28年3月
小野崇人	東北大学大学院工学研究科	教授	平成20年4月～ 平成28年3月
栗原和枝	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構	教授	平成20年4月～ 平成28年3月
清水敏美	産業技術総合研究所	ナノテクノロジー・材料・製造 分野副研究統括/ ナノチューブ応用研究センター 副センター長（兼務）	平成20年4月～ 平成28年3月
出川 通	株式会社テクノ・インテグレーション	代表取締役社長	平成20年4月～ 平成28年3月
鳥光慶一	NTT 物性科学基礎研究所 (現、東北大学 大学院工学研究科)	主席研究員 (現 教授)	平成20年4月～ 平成28年3月
西本清一	(財)京都高度技術研究所 /京都市産業技術研究所	理事長/ 所長	平成20年4月～ 平成28年3月
馬場嘉信	名古屋大学大学院工学研究科	教授	平成20年4月～ 平成28年3月
板東義雄	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	NIMS フェロー/ MANA 最高運営責任 者	平成20年4月～ 平成28年3月
冬木 隆	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	教授	平成20年4月～ 平成28年3月
松本和彦	大阪大学産業科学研究所	教授	平成20年4月～ 平成28年3月

5. 研究領域の運営について

本研究領域では、ボトムアップとトップダウンのプロセス融合によって新しいナノ構造体を形成、そこで発現する機能を活用し、ナノシステムとしての新たな工学的応用を目指す研究を推進する。そのために必要な学問領域は物理、化学、生命科学、電子工学、分子

工学，機械工学，細胞工学等，多岐に渡る。これらの研究課題から学術的に高い成果を生み出すためには，多様な専門分野をカバーするアドバイザーの積極的な協力が必要となる。また，具体的なイメージが不明確なナノシステムを追及するには，分野融合が必須であり，領域内での共同研究を積極的に推進する必要がある。工学的応用を図るには産業界との連携が必要であり，出口を意識した研究の推進と産業界との連携を図る必要がある。以上の課題を達成するために，以下の運営を実施した。

(1) 多様な専門領域から成る研究課題の指導・助言

- ・物理と電子工学を専門とする研究総括をサポートするため，化学，生命科学，細胞工学の分野で活躍する専門家をアドバイザーとして手厚く配置した。
- ・研究代表者毎に，専門領域が合致するアドバイザーを2名ずつ配置，その研究課題に関し，責任を持って研究総括を支援する体制とした（補足資料3に記載）。その一環として，対応する研究課題へのサイトビジット（下記記載）には原則同行してもらう。
- ・領域会議：年1回，全ての研究課題に対し，進捗を発表する領域会議を開催，アドバイザーと共に助言を行ってきた。なお，平成23年度から，中間評価が終わった課題については公開シンポジウムの形で実施している（今年度は平成21年度採択課題につき，3月4日に実施予定）。
- ・サイトビジット：研究代表者の研究実施場所をアドバイザーと共に訪問し，研究内容につき密な議論を実施，研究の方向性につき指導・助言を行っている。実施は採択直後と3年目（中間評価前）を基本とする。それ以外に進捗が懸念された2課題（藤井研究代表者，浦岡研究代表者）につき別途訪問し，議論を実施した。
- ・なお，浦岡研究代表者による課題については，一部テーマにつき見直しを実施，計画を変更する。藤井研究代表者の課題については，生命科学的な意義について再確認，今後，医療・創薬応用に向け研究を加速する。澤田研究代表者については成果のバイオ応用が課題であったが，多くのバイオ専門家との共同研究が実施されるに至る。
- ・その他，各研究代表者の主催する会議には，日程の許す限り参加している。

(2) 領域内共同研究の推進

- ・領域内の研究代表者間の共同研究を奨励するために，毎年，共同研究テーマを募集，選定されたテーマについては総括裁量経費を配賦して実施する。領域内の共同研究により，個々の研究課題に対する補完技術が導入され，その進展が期待できるだけでなく，ナノシステム創製という共通目標が，より具体的な姿にブレークダウンされることを期待している。代表的成果として，CNT バイオ電池が挙げることができる。これは高密度に林立したCNTで酵素を巧妙に挟み込み，糖の分解を行うことで，バイオ燃料電池として世界最高出力密度を達成したものである。共著論文2件，特許出願2件，プレス発表3件に結びついた（その他のテーマについては補足資料1を参照のこと）。

(3) 領域間連携の推進

- ・同じ戦略目標下の3領域（CREST「ナノ構造体」、「ナノシステム創製」、さきがけ「ナノシステム」）での連携を図るため、各々の領域会議に研究総括、技術参事、領域担当が相互に参加しあう。
- ・上記3領域の合同会議を提案、第1回目として平成24年10月に実施する。有意義な交流が図れたため、次年度以降も継続して実施する予定である。

(4) 産業界との連携奨励

- ・工学的応用としての出口を意識した研究を目指す。当初、研究領域全体でも少数に限られていた産業界との共同研究が63件（補足資料2に内訳を記載）と飛躍的に増大する。その中には研究総括、アドバイザーが直接、仲介を取り、共同研究につながったケースもある。
- ・企業コンソーシアムとして先端半導体の研究を行っている LEAP（超低電圧デバイス技術研究組合）と浦岡研究代表者との意見交換会を実施した。

(5) その他

- ・研究領域内の類似の研究課題に関し、領域内ワークショップを開催し、専門的な議論を行っている。第1回目としてバイオ系の課題を選択し、全体を3つの分野（細胞のハンドリング、バイオ計測、脳神経）に分け、問題意識を共有したうえで、集中的な議論を行った。今後も、重要で共通的な課題を設定したうえで、継続的に実施していく。
- ・平成20年度に2件を Feasibility Study として選択、1年間をかけ、その課題の将来性、妥当性を提案者と議論、うち1件を次年度の課題選考会議にかけ、採択した。

(6) 研究費の配分

- ・領域運営のため総括裁量経費を研究費の約一割を確保している。
- ・総括裁量経費は主に「チーム間共同研究」、「特定テーマの研究加速」、「震災復旧」、「その他、突発的事項」に対して配賦している。
- ・領域外枠からも各種制度を利用して予算配賦（詳細は1.(4)の追加配賦に関するコメントに記載）した。

6. 研究の経過と所見

本研究領域ではナノ構造体で発現する新たな機能を用いてナノシステムを実現することを目指している。ナノシステムという概念そのものがカバーする技術領域は広いが、その具体的な姿はまだ明確ではなく、発展途上にあると言える。そのような中で、本研究領域の活動は、ナノシステムという概念の具体的な姿を明示していくプロセスそのものでもあ

る。カバーする技術領域は広いので、以下ではエレクトロニクス、エネルギー、バイオ、さらにはナノシステム新領域開拓といった応用を元に6つの領域に分け、各々、研究のねらい、現在までの研究の経過、今後の展開につき述べる。最後に、研究領域内の各研究課題間で実施されている共同研究についてもまとめる。

(1) 自己組織化生体材料を用いて作製されるエレクトロニクス・フォトリクス素子

生体超分子の持つ特異的な機能を積極的に活用することで、半導体プロセスに代表されるトップダウンプロセスでは実現不可能な微小なナノ構造体の集合体を形成、高機能ナノシステムの実現が可能になると期待される。本研究領域では、浦岡研究代表者が、無機材料を内包した、あるいはペプチドが導入されたフェリチン分子が有するサイズ均一性、自己組織化機能、特異的無機材料認識機能を利用し、新規な半導体デバイスの開発を試みている。寒川研究代表者は上記の生体超分子の導入に加え、独自の中性ビームによる低損傷エッチングを用いて超高密度量子ドットアレイを形成、GaAs系高性能量子ドットレーザとSi系高効率量子ドット太陽電池といったフォトリクスデバイスの開発を試みている。現在までにSi基板上、GaAs基板上に自己組織的にフェリチン分子を高密度に配し、それぞれフローティングゲート型、抵抗変調型の不揮発半導体メモリーやGaAs系量子ドット発光素子、Si系太陽電池の試作、動作に成功している。

浦岡研究代表者が研究を進めている前者の半導体不揮発メモリーはデバイスとしての完成度も高く、産業的な出口を目指し、国内半導体メーカーの研究開発コンソーシアムであるLEAP（超低電圧デバイス技術研究組合）の主力メンバーとの討論会を持った。多くの貴重なコメントを頂いたが、新メモリーとしてその市場価値を見極められる段階になく、すぐに企業で受け取るのは難しいとの判断になった。引き続き、頂いたコメントを参考に研究を継続し、主要学会での発表を通じ、本技術の優位性を発信していく。

寒川研究代表者が研究を進めているGaAs系量子ドットレーザは従来素子に比べ、均一性が著しく高く、1桁近い高密度の量子ドットアレイが利用でき、現在までにトップダウンのビームエッチングを用いて作製された素子では、初めてレーザ発振の可能性を示す光学モード利得値を得ている。今後、電流注入型の高輝度量子ドットレーザの実現を目指す。Si系量子ドット太陽電池では、同種の素子としては世界最高の変換効率12.6%を得ており、今後、3次元化によりバルクのSi系太陽電池を大きく上回る30%以上の変換効率を目指す。

(2) ソフト基板材料上のエネルギー・エレクトロニクス・バイオ素子

畠、藤岡、西澤、染谷研究代表者は、従来の高価なSi基板、GaAs基板ではなく、プラスチックあるいはグラファイトシート、さらにはゲル状物質のようなフレキシブルで安価、さらには生体との共存が可能なソフトな基板材料上にエネルギー・エレクトロニクス・フォトリクス素子を搭載し、次世代ヒューマンインターフェース、あるいはロボットのような

なヒューマノイドに応用可能なナノシステムの実現を目指している。

染谷研究代表者は自己組織化単分子膜をゲート構造に用いた有機トランジスタを開発し、高い歩留りでの安定動作に成功している。その結果、プラスチックシート状に有機トランジスタの各種集積回路を実現することが可能となり、具体的に有為なシステムを提示することで、新たな応用分野の開拓を行った。本研究は Nature Materials を始めとする多くの重要な論文誌での成果発表、招待講演、受賞により高く評価されている。本研究は3年を経過した時点で終結し、今後は ERATO の「生体調和エレクトロニクスプロジェクト」、多くの企業が参加する産学連携の「次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合」に引き継がれる。

藤岡研究代表者は、独自のパルススパッタ堆積法を用いて、グラファイトシート上に GaN 系の LED を試作、窒素の組成を変えることで、青、緑、赤のフルカラーの発光が可能な事を示した。従来、GaN の光学素子、電子素子は高額なサファイヤ基板、あるいは SiC 基板を用いて作製されているが、フレキシブルなグラファイト基板を用いることで、大面積化、低価格化、高熱伝導化が可能になり、新たな応用の開拓が可能になる。今後、LED のさらなる高効率化の追求、太陽電池や GaN/InGaN ヘテロ接合トランジスタなどの電子デバイスの開発を目指す。

樋口研究代表者はビス（ターピリジン）と鉄などの金属イオンと有機モジュールとをナノスケールで数珠つなぎに結合した有機/金属ハイブリッドポリマーの開発を行っている。このハイブリッドポリマーは酸化還元反応に基づく優れたエレクトロクロミック特性を有しており、金属イオンを選択することで、3原色の発光、また消光が可能である。これらの特徴を活かし、プラスチックなどのフィルム上に塗布プロセスで形成されるエレクトロクロミック型のフルカラー電子ペーパーの開発を目指している。また本ハイブリッド材料は特定のガス蒸気に触れさせることで発光するガスセンサー、あるいはパターンをフィルム上に印字する電子スタンプなど、様々な応用が可能であることを実証している。

西澤研究代表者は、導電性高分子からなる電極のマイクロパターンを酸素、栄養分が通過可能なゲルシート上に転写する技術を実現、実際に筋細胞が電気刺激によって運動するアッセイシステムを開発した。これにより生体に違和感なく電子デバイスを埋め込むことが可能になると期待される。また畠研究代表者と協力し、ナノ材料（高密度に林立する単層 CNT）にバイオ材料（酵素）を均一、高密度に導入した複合体を作製、糖の分解によって発電する世界最高出力のバイオ燃料電池を開発した。

畠研究代表者は高密度に単層 CNT が林立して基板上に成長する技術を開発、これをプラスチック基板上のエネルギーデバイス（スーパーキャパシタ、バイオ燃料電池）や、ねじれ・引き伸ばしセンサーに応用可能な事を示した。後者はロボットや人に張り付けることで、その運動状態を感知することが可能となる。

以上のようにプラスチック基板上、あるいはグラファイトシート上にエレクトロニクス素子、フォトニック素子およびエネルギー素子が、さらには生体と共存可能なゲル状物質

上に電極配線が搭載可能なことを示してきたが、これにより、フレキシブルなソフト材料基板上に所望の機能を持ったナノシステムの搭載が可能になると期待される。次のステップとしてはこれら個別デバイスの集積化で、大規模ヒューマンインターフェースや、ロボットのようなヒューマノイドへの応用が期待される。本 CREST 領域では、それらが十分に展望できる状態にまで、技術レベルの高度化を図っていく。

(3) 脳神経活動計測

脳神経は自然がボトムアッププロセスで作上げた極めて複雑で、高度のナノ構造体システムである。脳神経は極めて高度の情報処理を、人類が作り上げたコンピュータシステムとは全く異なる仕組みで行っている。その情報伝達の仕組み解明を目的に脳神経活動を細胞レベルで計測する技術を開発する。同時にその計測・分析技術は脳神経活動の異常を察知することで医療診断システムとして活用する事が期待される。この挑戦的な課題に対し、トップダウンの半導体プロセスで作製されるセンシングデバイスを開発することで挑んでいく。

澤田研究代表者は神経伝達物質の動きを CCD の原理を利用して、高い SN で 2 次元画面上にイメージングするセンサの開発を行う。これまでに、アセチルコリン、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ といった神経伝達物質をリアルタイムに非標識で、2 次元空間上にイメージングできるセンサの開発に成功した。半導体微細化技術を用いて 40 万画素の集積化にも成功しており、細胞への化学刺激で、上記神経伝達物質の放出、吸収が起きることを観測している。今後、センサ上での神経細胞の培養系を確立し、神経細胞のネットワーク化の様子を観測していく。本技術はイメージング応用に焦点を当てた当初の構想を超えてインフルエンザやアルツハイマーなどの診断にも適用可能であり、現在、経産省プロジェクトへの採択、多くの企業との共同研究に発展している。

宇理須研究代表者は培養型のプレーナパッチクランプを開発することで、神経細胞ネットワークの機能解析を目指している。プレーナパッチクランプは集積化では上記イメージングセンサに劣るものの、デバイス上部で神経細胞ネットワークの蛍光イメージング、デバイス下部でパッチクランプによる神経細胞への刺激、あるいは神経細胞のイオン電流計測が同時に行えるとの利点を持つ。現在までにラット神経細胞の Ca イオン電流計測に成功しており、今後、CREST 期間中に 20 個レベルのプレーナ型パッチクランプの集積化を実現し、神経系難病の原因究明につながるハイスループット診断技術へと発展させていく。

(4) バイオ（単一細胞、単一分子等）計測

DNA、タンパク質、糖鎖、細胞などの生体物質を単一分子レベルで、あるいは単一細胞レベルで解析することで、複雑な生命現象を生体分子反応といった分子素過程から理解したり、個々の細胞活性の違いや抗ガン剤などの細胞による感受性の違いを知ったりする事が可能になり、分子、細胞レベルからの診断、医療、創薬に結びつくと期待される。単一分

子、細胞といったナノ構造体をトップダウンプロセスで作製されたマイクロ流路やセンシングデバイスで計測しようとの試みが当研究領域でなされている。

宮原研究代表者は、ゲートを機能性分子で修飾した半導体トランジスタで、DNA、タンパク質、糖鎖、細胞などの検出を行おうと開発を進めている。DNA 検出は技術の完成度が高まっており、米国企業による DNA シーケンサとしての製品化に結びついた。タンパク質、糖鎖、細胞などについてもガン転移や細胞の活性などの非侵襲モニタリングとして医療部門との共同研究が進んでいる。一方で、同じ目的の競合技術も存在し、半導体トランジスタを用いた当該技術が、ラベルフリー、小型化、集積化といった特徴をどこまで活かしてその優位性を主張できるのか、また競合技術との補完関係を構築できるのか、今後の進展に期待したい。

北森代表研究者は拡張ナノ空間と呼ぶ径が100nm クラスの微小なマイクロ流路を用いて、単一細胞中の分子の計測を試みており、現在までに従来のカラムクロマトグラフィに比べ10～100倍の分離能を持つマイクロ流路による構成分子の分離、微分干渉熱レンズ顕微鏡による個々の分子の検出に成功している。今後は分析目的に応じた選別的な細胞サンプリング手法の開発などを進め、単一細胞に対する単一分子レベルの計測・解析を進めていくことが望まれる。

野地代表研究者は、抗原抗体反応に起因する発光を利用して特定のタンパク質を検出する ELISA を、多数の超微小空間に閉じ込めることで1分子デジタル計測を実現した。本手法で得られる検出下限は、従来の ELISA 手法に比べ100万倍低く、アットモルレベルの超高感度検出が可能である。本技術のプレス発表を昨年行ったが、複数の企業から問い合わせが寄せられ、共同研究の検討がなされている。現在、CMOS イメージセンサ上で上記の1分子デジタル計測が実行できるシステムを開発中であり、まだ課題は多いが、将来的には持ち運び可能な超高感度バイオアッセイの実現を目指す。

(5) 細胞ハンドリング

マイクロ流路内に各種デバイス構造を導入し、流路中の細胞の新たなハンドリングを実現することで診断、医療、創薬への応用を目指した研究を行っている。藤井研究代表者は、デバイスとして人工バイオ界面を埋め込み、細胞外微小環境における液性、液流条件や細胞の人工バイオ界面への接着条件を制御できるナノシステムを構築、これにより、ES細胞、iPS細胞の分化過程や血中循環腫瘍の挙動を時空間的に観測することを目指している。これまでにES細胞に対し、液性条件を空間的に調整することで複数胚葉への分化が可能な事を実証した。また人工バイオ界面上に搭載されたペプチド・アプタマーで血中循環する腫瘍の捕捉を実現した。今後、これらの技術を各種ガン細胞の転移活性評価系、転移阻害スクリーニング系に適用する事、さらには再生医療に応用する事を目指す。

西澤代表研究者は、電気化学的手法で、マイクロ流路内のタンパク質、細胞、導電性高分子を設計した場所に固定するバイオリソグラフィやバイオ誘電泳導法を開発、人工的な

細胞組織の構築を可能とした。これにより抗体のオンディマンド固定が可能な抗体チップ、血球チップ、細胞治療ツールなどへの応用を意図した試作機を開発している。今後、パーソナル診断バイオナノシステムへの発展につなげていく。

(6) ナノシステム新領域開拓

有機材料を用いて新たなナノ構造体を合成し、ナノシステムとしての多様な応用可能性を追求する課題研究、スピン流が生み出す新規物理現象の解明とその工学的応用を目指した課題研究を実施している。これらはまだ基礎段階にあるが、新しい学理の構築と工学応用分野の開拓を目指している。

辻井研究代表者は、自身の提案による分子組織体「濃厚ポリマーブラシ」の階層構造化を図ることで、エネルギーデバイス応用、バイオデバイス応用の実現を目指している。これまでに多様なナノブラシ合成ルートの確立とその階層化を実現してきた。蓄電デバイス応用では、ナノブラシの積層3次元構造からなる固体電解質を開発、Liイオン電池における優れた伝導チャンネル特性を実証し、高電圧化が可能なバイポーラ型電池の試作に成功している。この固体電解質膜は燃料電池やスーパーキャパシタなどの他の電気化学デバイスにも応用可能である。今後、これらのエネルギーデバイスでは競合技術とのベンチマークを徹底し、その優位性を示していくことに注力する。バイオデバイス応用では細胞接着抑止機能が確認できたことで、医療応用への期待が持たれ、海外企業との共同研究も進んでいる。さらにナノブラシの持つ特異な性質からそれぞれ、マイクロ流路壁面応用、バイオセンシング応用を目指し、当研究領域内での共同研究の検討が始まっている。

山元研究代表者は樹枝状の有機分子 dendrimer の構成元素を順次、金属元素で置き換え、金属元素の原子数や配合比を精密かつ自在に制御したサブナノオーダーの金属、半導体、酸化物、多元素合金などの「新金属微粒子」の創製とその工学的応用を目指している。今後、dendrimer の階層構造を構築し、金属微粒子のカプセル化や集積配列制御の開発、また高い触媒機能が実証された12個の金原子クラスターや特定元素からなる合金の構造と機能の解明を目指す。

斎藤研究代表者は固体中のスピン流と熱、動力、電気との間の量子力学的変換を可能とする新たな技術体系を構築し、スピントロニクスと熱工学、機械工学との融合により生まれる新たな応用分野の開拓を目指している。これまでにスピンゼーベック効果による熱電変換効果の増大を目指した研究においては、フォノン機構の発見を始めとする複数のメカニズムを解明し、出力電圧の増大を実現してきた。またこの逆効果に相当するスピン流による熱輸送現象の発見、液体金属微小液滴ジェット流の白金薄膜への入射により、力学的運動からスピン流が生成されることの発見を行ってきた。この分野では世界を先導しており、世界に先駆けての新しい学理体系の構築を目指す。

(7) 研究領域内共同研究（詳細は補足資料1に記載）

領域内の共同研究により、個々の研究課題に対して補完技術が導入され、その進展が期待できるだけでなく、ナノシステム創製という未知なる共通目標が、より具体的な姿にブレークダウンされることを期待している。このため、毎年、領域内の代表研究者全員に対し、共同研究テーマを募集、選定されたテーマに対しては総括裁量経費を配賦して実施している。代表的成果として、CNT バイオ電池が挙げることができる。これは高密度に林立したCNTで酵素を巧妙に挟み込み、糖の分解を行うことで、バイオ燃料電池として世界最高出力密度を達成したものである。共著論文2件、特許出願2件、プレス発表3件に結びついた。それ以外にも、大幅な性能向上に結び付いたグラファイト上 GaN ヘテロ接合素子の中性ビームによる低損傷エッチング、マイクロ流路におけるエレクトロアクティブアレイ技術の生体分子デジタル計数デバイスへの適用による抗体付与マイクロビーズの高効率捕獲の実現など多くの成果があがっている。新たな共同研究も複数走り始めており、今後の成果に期待したい。

7. 総合所見

7.1. 本領域の意義

研究領域が設定された当初（平成20年）の問題意識は、半導体微細化技術の限界を打ち破るプロセス融合への期待とそれによって実現されるデバイス機能にあった。融合プロセスとしては、生命体などに見られる自己組織的なナノ構造形成機能への期待であり、デバイスでは半導体の世界で言うところの“**MORE THAN MOORE** 技術”，即ち多様な機能の集積への期待である。上記の問題意識から発せられる期待に応えるとの当研究領域の方針はこの間、変わっていない。一方で、その後、環境・エネルギー・資源問題や高齢化社会における医療、健康の問題が顕在化し、グリーンイノベーションとライフイノベーションをもたらすナノテクノロジーへの期待が高まってきた。グリーンイノベーションでは、太陽電池、二次電池の開発に見られるように素材のイノベーションが強く求められている。また、ライフイノベーションでは、iPS細胞研究の急速な進展にも見られるように細胞ハンドリング、分化制御、バイオ計測の進展をもたらすナノ材料技術が強く求められている。その意味では当初の問題意識は徐々に形を変えつつあるが、ナノ構造体の重要性は不変であり、そこで生まれる機能をベースに、時代が要請するニーズに答え得るシステムを構築していく事の重要性は同じである。当研究領域で取り扱っている研究課題は全てグリーンイノベーションとライフイノベーションのどちらか、あるいは両方に関わっており、今から振り返ると、研究課題の選定、方向付けが時代の要請する方向に沿ってきたのではないかと自負する。

ナノシステムとしての具体的な姿は本領域の研究を通じて少しずつ見えてきたが、まだまだ不十分であり、引き続き、この難しい課題を追求していく事が要請されていると認識している。

7.2. 課題選考，領域運営に関するマネジメント

当初，産学連携のテーマを期待したが，産業界が主体になった応募は残念ながらなかった。募集を開始した平成20年度は，丁度，リーマンショックが起きた年で産業界が基礎研究を行う余裕をなくしたことが一つの原因と考える。この傾向はその後も続いており，基礎研究を担うアカデミアの役割は重くなっており，成果の社会への発信と産業界との連携がますます重要になっている。当研究領域では課題研究の進展に伴い，各研究代表者が多くの産業界との共同研究を積極的に実施しているのは心強い。当研究領域で時代の要請に答える技術を生み出している事の一つの証であろうと認識する。一方で，ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスの融合を追求し，同時に出口としてのナノシステムの創製を視野に研究を実施するには，それなりの研究資金や協力体制が必要であり，実施できる研究者は限られている。そのため，研究課題の選別にあたっては，プロセス融合はかなり広くとらえ，むしろ新しい学理の構築を目指しているか，出口としての工学的応用をしっかりと見据えているか，夢を実現するだけのしっかりとしたエビデンスデータを持っているかという点を採択の判断ポイントとした。

運営にあたっては，領域内共同研究の推進がうまく機能していると考ええる。バイオ燃料電池や一分子バイオデジタル計測に見られるような成功例も出てきている。また今回の報告書では記載していないが，今後が楽しみな共同研究の検討も始まっている。カバーする領域が広いため，異分野融合という視点で，技術面，知識面で補完関係を構築する上でメリットは大きい。このような共同研究を通じて，領域全体でナノシステムの具体的な姿を追求していきたいと考えている。

一方で専門的な議論の深化という点では分野を類似にする研究者が集まって議論することも重要と考えている。領域内の研究者を対象にバイオ関連ワークショップを開催したが，バイオ領域共通の問題意識を醸成し，それを仲間内で徹底的に議論，意識を共有するという面では有意義であった。今後も，問題意識を共有する類似テーマにつき，同様のワークショップを開催していきたいと考えている。

研究課題の選考，あるいは領域の運営にあたっては，アドバイザーの協力，支援が大きな力となっている。特に化学，バイオ関連において専門家としての意見は大変参考になった。各研究代表者担当のアドバイザーを設けたことも，責任をもって対応していただく点で良かったと考えている。

7.3. 研究成果と今後の展望

1) 自己組織化生体材料を利用して作製されるエレクトロニクス・フォトニクス素子

いくつかのテーマについては進捗遅れ，あるいは計画の見直しも必要になっているが，提案された主要テーマ（不揮発半導体メモリ，高密度量子ドットレーザ，量子ドット太陽

電池)については着実に進展していると判断している。デバイスになると競合技術も多く、徹底的なベンチマークが必要になってくる。従来素子に対してどれだけ性能、機能面で優位性を出せるか、今後が勝負所と考える。デバイス化の進展に期待したい。合わせてナノ構造体の特徴を活かした新しい機能も、継続的に追求すべきと考える。

2) プラスチックなどのソフト基板材料上に形成されるエレクトロニクス・フォトニクス・エネルギー・バイオ素子

有機トランジスタ, グラファイト上 GaN 光・電子デバイス, エレクトロクロミックディスプレイ素子, バイオ燃料電池, 動きセンサー, ヒトにインプラント可能な電子デバイスと言うように, 多くのデバイス技術が開発されてきた。これらを集積化することで実現されるヒューマンインターフェース, あるいはヒューマノイドとしてどのようなものが実現できるのか, 将来へ向かってのロードマップを描く事が重要と考える。今後, 上記に焦点を当てた領域内ワークショップを開催し, 徹底的な議論を行いたいと考えている。染谷研究代表者は ERATO プログラムに専念するため, 23年度で研究終結となったが, この分野のシステム化における先導者として議論には関与していただく予定である。

一方で個々の技術単独で, 応用が開けそうなテーマも多い。現存の GaN デバイスが高価で熱伝導率が低い基板を用いざるを得ないことから, 応用がかなり制限されている事を考えると, グラファイト上 GaN デバイスが市場にもたらすインパクトは大きい。上記に記載した他のデバイス技術も全く新しい応用分野を開拓するポテンシャルを有しており, 今後の進展に期待したい。

3) 脳神経活動計測

センシングデバイスの開発は, 集積化も含め着実に進んでいる。今後の共通の課題として, デバイス上での脳神経ネットワークの長期培養系の構築が挙げられる。これまでに蓄積されてきた従来技術の確認も含め, ここに注力する必要があると認識している。センシングデバイス技術に関して, 多くの外部機関と連携した医療診断応用が進みつつある。一方で, 本来の目的である脳神経ネットワークそのものへアプローチするバイオ研究者との連携は十分とは言えない。脳神経ネットワークの活動計測という難しい課題への挑戦との側面もあるが, 今後期待し, 積極的に成果の情報発信を行っていききたい。

4) バイオ計測

全体に着実な研究の進展がなされている。特に, 宮原, 野地研究代表者のセンシング技術は高度化されつつあり, 今後は実際の診断, 医療, 創薬への応用を真剣に考えるフェーズに来ている。従来手法に対する徹底したベンチマークを行い, これらのデバイスの得意分野を同定し, 応用に向けた性能の実証, また既に始まっているが外部医療・診断機関と

の連携を強めていく必要がある。

5) 細胞ハンドリング

iPS 細胞, ES 細胞といった幹細胞の研究の進展に伴い, 再生医療応用への期待が高まっております。マイクロ流路を用いた細胞ハンドリング技術やナノ構造体を用いた足場材料の開発が重要になっている。マイクロ流路に設けられた人工バイオ界面に特定の細胞を捕捉し, 細胞に対して擬似的な外部環境を作りだし, 細胞の分化や動態変化を制御・観測するシステムの構築は興味深い。現状は基本機能の確認ができた段階だが, 今後は医療研究者, バイオ研究者にとって意味のある情報や知見が本システムからどれだけ得られるかが試金石となる。医療研究者, バイオ研究者とのいっそうの連携が重要と認識している。

6) ナノシステム新領域開拓

濃厚ナノブラシが当初の予想を超えて, 多様な分野への展開が可能になってきた。本課題研究では, ナノブラシ合成の高度化とその階層構造化は研究代表者が行っているが, 応用展開は外部の研究者との連携で進めており, 2次電池, 燃料電池, スーパーキャパシタといった電気化学素子応用, 生体材料付着抑止材料としての応用, マイクロ流路, バイオ計測への適用, さらには本 CREST 領域外となるがナノトライポロジーへの応用が多くの研究者との連携で進んでいる。どれが最終的に本物の技術になるかは予断を許さないが, 独自の材料を持つことの重要性を再認識している。その意味では樹枝状の有機分子 dendrimer の構成元素を置換して作製される新金属微粒子も同様であり, このユニークなナノ構造体の応用展開を図ろうとする研究者との連携を今後, 強化していく必要がある。

スピン流をベースとしたエレクトロニクス, 熱工学, 機械工学との融合は全く新しい領域への挑戦であり, 新しい学理への追求でもある。今のところ, 本研究領域の中では純物理学にフォーカスしたユニークな存在となっているが, 今後は他の領域内研究者との交流, 連携を期待したい。特にスピン流と動力間とのエネルギー変換では, マイクロ流路を用いての実証を行おうとしており, マイクロ流路の研究者, あるいはナノトライポロジーの研究者との連携に期待したい。

以上