

CREST 研究領域「ナノ界面技術の基盤構築」

追跡評価報告書

総合所見

本研究領域は「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」を戦略目標とし、材料・デバイスの機能を制御する重要な要素のひとつである異種材料間・異種状態間の接着界面に焦点を当て、ナノ界面の新しい機能や制御技術の創出につながる学術基盤および基礎技術を確立すべく設定された。エレクトロニクスにおける有機・無機界面、環境浄化触媒における表面・界面、さらにはナノバイオ医療用の生体材料と人工物界面などが研究対象とされ、採択された 15 課題の各研究代表者はいずれも独創的で高水準な科学者として国内外で知られている人材であり、研究期間中に数多くの卓越した研究成果が得られた。

研究期間終了後においても、研究期間中の研究成果をさらに発展させ、界面機能に関する広範な分野横断的研究がなされた。発表された 700 報近い論文の 2 割以上が Top10%以内であり、これは CREST 研究期間中の Top10%以内論文の 2 倍以上となっており、世界的にインパクトのある基礎・基盤研究の展開と実用化研究の推進へと順調に移行していると非常に高く評価できる。

具体的には、有機-金属構造体(Metal Organic Framework: MOF)を基盤材料としたナノ合金材料の創製と新しい触媒材料の開発、トポロジカル性などの新しい界面電子物性の基礎研究、サイズ制御された金ナノ粒子の高活性・高選択な触媒材料の開発と応用、オペランド計測法の触媒反応等への応用展開、有機分子の自己組織化プロセスによる電子構造や発光特性などの発現・制御、超分子錯体の形成するナノ空間を利用した極微量サンプルの立体構造解析(結晶スポンジ法)の改良と医療分野等への展開、生体防御反応を制御するナノバイオ界面の創製、酸素耐性を有する新規ヒドロゲナーゼ(S-77)の発見と類似機能を持つ錯体触媒の開発、グラフェンを用いたバイオセンサデバイスの開発などであり、有機から無機材料に至る多様な物質系の界面制御により、新材料の創製、新機能の探索、さらには界面の新測定手法の開拓に至る幅の広い研究領域が構築された。

また特許活動を継続的な視点で見ると、CREST 研究期間中から調査時点までに登録総数は(国内、海外)表記で(103、42)であり、そのうちの登録総数は(62、21)である。加えて企業との共同研究やベンチャー企業の設立の他、医療応用に向けた取り組みなど社会貢献度の高い実績も考慮すると、産業への芽となる技術の権利化やその発展に十分貢献していると評価できる。

上記の研究成果に対して、紫綬褒章、学士院賞・恩賜賞、ウルフ賞(化学部門)、トムソン・ロイターリサーチアワード、トムソン・ロイター引用栄誉賞、高分子学会功績賞、高分子学会賞が各 1 名に、文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)が 8 名、同賞(開発部門)が 1 名に授与されている。

本研究領域のその後の発展は、研究終了後の各研究者の予算獲得状況からも判断できる。多くの研究者が科研費（特別推進研究）のほか、JSTのALCA、ACCEL、NexTEP、そして研究成果展開事業(COI)のほか、AMED、FIRST、SIP、NEDOなどの大型の研究費を継続的に獲得しており、精力的に研究が行われていることがわかる。これらのプロジェクトの中には個別の新しい学術領域の新規立ち上げに中核的な役割を果たし、当該研究領域の発展に大きく貢献している研究者も少なくない。

以上のことから、研究終了後も多くの研究代表者は、その研究のクオリティを一層向上させた形で活躍しており、非常に高く評価できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域終了後、各研究代表者は精力的に継続・発展させ、699報の論文を発表している。これは、CREST研究期間中に発表された論文の1866報と比較すると少ないが、Top10%以内の論文が152報、Top1%以内の論文が17報であり、高い被引用数の論文数比率がCREST研究期間中と比べて12%から24%と約2倍に増加しており、世界の研究者から注目されるインパクトの高い論文を多く生んでいることが見て取れる。

例えば、強相関係酸化物材料のトポロジカル性などの新しい界面電子物性の分野で発展している川崎、ナノスケール合金の創製とそれによる新しい触媒能を見出している北川、独自に開発した結晶スポンジ法を大きく発展させている藤田の3名は、Top10%以内の論文が、CREST期間中から調査時点まででそれぞれ50報を遥かに超えており、研究の高いクオリティが継続されている。加えて、オペランド計測法を触媒反応や燃料電池、そしてリチウムイオン電池等へ応用することで実績を上げた尾嶋、金ナノ粒子の触媒活性の条件解明やその後の展開に注力した春田、テラヘルツ電磁波の増強効果を発見してその応用が期待される平川、そしてフォトン・アップコンバージョンの発見と応用技術で注目される君塚らも、Top10%以上の論文をそれぞれ20報以上発表しており、国際的に高い水準の研究成果を発信している。

特許活動に関しては、研究終了後に国内・海外合わせて33件が出願され、うち14件が登録されており、継続的に高い登録率を堅持している点は評価に値する。またCREST研究期間中から調査時点までに稲垣、川崎、北川、春田、君塚らは、国内外にそれぞれ18件、24件、27件、14件、14件出願しており、特に研究終了後に関しては、北川はナノ金属粒子の開発で9件、君塚はフォトン・アップコンバージョンの実用的な応用開発で7件出願しており、産業化への展開を視野に入れながら研究を加速させていることが注目される。

いずれの研究代表者も発展的に研究を展開しており、多くは大型の助成金を着実に獲得している。例えば川崎は、FIRSTやCRESTなどにより、北川は元素戦略視点に立脚したCRESTとそれに続くACCELで、それぞれの研究分野を深耕している。また藤田は、ACCELや国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)などによって結晶スポンジ法の改善に取り組み、製薬会社の関心が高い含窒素化合物の解析成功率を大幅に向上させるなど、医薬関連の有

機化合物の構造解析に関して汎用性の高い実用的な解析手法へと発展させている。一方小江は、研究期間終了後も生体模倣触媒に関する研究を継続し、2018年度からのCRESTにおいて、水素や水を用いた触媒技術による新プロセスの構築に取り組んでいる。さらに櫻井はNexTEPなどにより、薬物輸送用DDSの研究を継続しており、自身が設立に参加したベンチャーのNapaJen Pharma, Incにおいて、免疫抑制核酸医薬DDSを用いて、副作用を飛躍的に抑えた治療アプローチの実現を目指しており、現在、Chief Scientific Officer(CSO)として臨床試験を実施している。さらに、北川、春田、藤田、尾嶋、栗原、櫻井、松本らは、個別に企業や複数の大学と実用化に向けた共同研究を行っている。具体的には北川は、開発した合金ナノ粒子について民間企業と多くの共同研究を行うだけでなく、企業へのナノ合金触媒の無償提供を積極的に行い、より実用的な材料開発への展開を目指している。春田はベンチャー企業のハルタゴールド株式会社を設立して、金ナノ粒子触媒を販売して実用化を推進している。

このように、研究期間中の研究成果を発展させて研究終了後に実用化研究にも積極的に推進しており、このような活動は特筆すべき点である。これらの研究成果は、「ナノ界面」が多方面に亘る研究・技術の一つの基盤となることを証明している。

一方、これらの研究成果に関連して多くの重要な授賞がなされた。春田はトムソン・ロイター引用栄誉賞、藤田はトムソン・ロイターリサーチフロントアワード、紫綬褒章、ウルフ賞(化学部門)、日本学士院賞・恩賜賞を受賞した。また、文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)は、藤田、君塚、小江、尾嶋、川崎、北川、稲垣、栗原の8名が、また同賞(開発部門)に一ノ瀬が、日本女性科学者の会功労賞に栗原がそれぞれ受賞している。それぞれの研究者が、各分野において卓越した貢献を果たした証である。

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

本研究領域は、物理学、有機化学、無機化学、高分子化学、そして生命系を加えた幅広い領域・分野の基礎から応用までを網羅した横断的で活発な研究がなされた。多様な研究の取り組みによって、異種材料・異種物質状態間の接合界面に着目した新たなナノ界面機能および制御技術の創出に寄与する優れた研究成果が得られ、科学技術の進歩に向けて大きく貢献したと考えられる。主な研究成果事例をいくつか以下に記す。

川崎は、酸化物エレクトロニクスを深掘りする形で、酸化物二次元界面の量子機能とデバイス応用のための基礎技術や、トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子相関など物性物理の基礎研究に専心した。ここでは電子の電荷・スピン・軌道の自由度を様々に変化させた界面構造を設計し、量子物質の完全エピタキシー技術を駆使して接合デバイスや人工超格子を創製した。これらの先進的な研究成果は、インパクトの高い論文発表(Top10%以内が45報、Top1%以内が6報)によっても裏付けられた。

北川は、MOF等の技術を追求すると共に、元素戦略の視点にも立脚する形で、化学的還元

法を適用してバルクでは合金化出来ない組成の合金ナノ粒子の作製や結晶構造の制御を行い、新規触媒を低コストで作製できる可能性を示した。研究終了後の論文は、責任著者論文 82 報（このうち Top10%以内が 30 報、Top1%以内が 4 報）で、継続的に独創的な研究を行っている点を高く評価する。

春田は、金ナノ粒子の触媒研究で世界をリードしており、活性発現の 3 条件が①担体、②粒径（直径 6nm 以下）、③金ナノ粒子と担体粒子の密着状態であることを明らかにするとともに、金ナノ粒子触媒の特徴は「室温でも活性、水分が反応を促進、ユニークな選択性」であるとした。研究終了後も責任著者論文は 23 報（このうち Top10%以内が 12 報、Top1%以内が 1 報）あり、2012 年にトムソン・ロイターの引用栄誉賞を受賞した。

尾嶋は、シンクロトロン放射光での X 線分光をメインにした「オペランド計測法」を高度化し、実用触媒の反応進行中での観測に加え、燃料電池やリチウムイオン電池等の実デバイスの動作中観測に成功し、白金触媒の劣化メカニズム解明に繋がる重要な結果を得るなど、さらなる改良に資する知見も得た。この手法は汎用性も高く、様々な材料やデバイスに適用される極めて貴重な研究成果である。

君塚は、低エネルギーである長波長光の利用を可能にする革新的なエネルギー創生技術であるフォトン・アップコンバージョンにおいて、大幅な効率化、近赤外光から可視光、可視光から紫外光への効率的なアップコンバージョン、変換色素領域の拡大など、多くの課題に対する解決の道筋を明らかにし、新たな概念のアップコンバージョンを実証した。研究終了後の論文は、責任著者論文 39 報（Top10%以内が 15 報、Top1%以内が 2 報）と、CREST 研究期間中の研究成果（Top10%以内が 5 報）を大きく上回っており、独創的な研究を大きく発展させている点が高く評価できる。

平川は、ナノギャップ電極間に捕捉された単一分子にテラヘルツ電磁波を照射すると、ナノギャップのアンテナ効果によって電界強度が 10 万倍に増強されることを発見し、その現象を用いた超高速時間分解単一分子計測を可能とした。これは計測技術において大きなブレークスルーであり、その実用化に向けたテラヘルツ電磁波検出用のボロメータ開発も進行しており、高く評価できる。

小江は、CREST 研究期間中に見出したヒドロゲナーゼ型活性触媒に関して、研究終了後に燃料電池触媒として機能することを実証すると共に、酸素の活性化も可能な触媒や一酸化炭素(CO)や過酸化水素をも燃料とする燃料電池の開発、さらには燃料電池と太陽電池を融合する同一触媒の開発など、より実用性に重点を置いた研究を展開した。

稲垣は、光捕集システムを二酸化炭素の還元資源化系や水からの水素発生を駆動する光触媒と融合することで、太陽エネルギーを効率よく吸収し、化学エネルギーに変換する人工光合成系の開発に展開した。

ライフサイエンスに関連した分野では、由井、櫻井、および松本らの研究成果が注目される。由井は、生体内で安定に存在し続けるバイオマテリアル開発をめざし、動的な機能を持つ界面の創製に取り組んだ。シクロデキストリン (CD) の内孔にポリエチレングリコール

(PEG) が貫通したポリロタキサン (PRX) を材料表面に固定化した材料を開発し、幹細胞の分化誘導が促進されるという興味深い結果を得た。再生医療への貢献が期待される研究成果である。

櫻井は、高分子ミセル化医薬の内部構造を放射線 X 線小角散乱法等の先端分析法と組み合わせ解析することで、新しい薬物送達システム (DDS) 技術を提供することに貢献した。研究終了後にはさらに、カリックスアレーンを頭部に持つ両親媒性化合物が数学的に限られた構造を作るとするプラトニックミセルを発見するなど、学術的に注目すべき研究成果を上げている。櫻井はこの発見を主な業績として高分子学会賞を受賞している。

松本は、これまでに培ってきたカーボンナノチューブの研究からグラフェンを使ったデバイスの研究にシフトし、鳥インフルエンザウイルスなどを検出できるグラフェンバイオセンシングデバイスを開発し、高病原性インフルエンザウイルスの検出、鑑別を可能にするなど、インパクトの高い研究成果をあげた。

このように多くの研究代表者において、研究の拡がりや深耕が見て取れ、7～9 年を経た現在、国際的な水準で大きく発展・継続していると評価できる。

(2) 研究成果の社会・経済への貢献

本研究領域では、当初から企業との連携や共同研究が多く、また終了後も技術開発への取り組みが積極的になされており、その研究成果は近未来に社会・経済の発展に貢献するものと思われる。実際にどのような産業移行が行われたかという視点で、社会・経済への波及効果が期待できる研究成果の一部の例を以下に示す。

藤田が 2013 年に発表した結晶スポンジ法に関しては、含窒素化合物の解析成功率を大幅に向上させるなどの技術改善に取り組んだ結果、製薬や食品関係をはじめとする企業からの関心が非常に高く、様々な形での連携を実施している。また、文部科学省ナノテクノロジープラットフォームへの結晶スポンジ法の技術移転を行い、サイズの大きな分子や高極性化合物の成功例も増え、これまでに 200 以上の化合物の解析事例を積み上げると同時に、産学に向けた結晶スポンジ法の依頼測定にも対応している。また結晶スポンジ法に米国屈指のベンチャーキャピタルが高い関心を示し、ベンチャーが立ち上がろうとしていることも世界が注目している事例の一つである。一方、藤田の発表した論文に関しては、CREST 期間中から調査時点までで Top10% 以内の論文総数は 57 報、Top1% 以内の論文は 9 報あり、科学技術貢献と汎用性を含めた応用への取り組みの両方の視点で卓越した研究成果を継続していると評価できる。

春田は、2013 年に首都大学東京と連携して設立したベンチャー企業：ハルタゴールド株式会社を通じて、研究用および商業用の金ナノ粒子触媒を販売し、金触媒の実用化促進を図っている。さらに分子・元素レベルで金触媒作用の解析が進められることで、金触媒の化学プラントでの使用だけでなく、エネルギー分野や環境浄化へ応用が拡がることが期待される。春田自らが NBC メッシュテック株式会社及び NIMS と共同で、「一酸化炭素を室温下で

無害化する新触媒を用いた空気洗浄機」の実用化を目指していることは、注目に値する。

北川は、開発した合金ナノ粒子について民間企業と多くの共同研究を行うだけでなく、企業へのナノ合金触媒の無償提供を積極的に行い、より実用的な材料開発への展開を目指している。具体的には、ナノ合金触媒の低価格大量製造について工業用貴金属加工会社と共同で取り組んでいる事例がある。研究期間終了後の特許出願は、国内5件（登録3件）、海外4件（登録2件）であり、産業化を十分に意識した研究開発に取り組んでいる。

櫻井は、製薬会社および独立行政法人医薬基盤研究所（現、国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所）と共同で多糖核酸複合体の核酸医薬 DDS の開発を進めている。また、2004年に設立した創薬ベンチャーのNapaJen Pharma社において核酸医薬 DDS のプラットフォーム技術の実用化のため、複数の大学機関等との共同研究を進めている。核酸医薬 DDS はすでに非臨床試験も行っており、オーストラリアにおいて臨床試験も予定されている。さらに、均一性の良いミセル形成の新技术を開拓するなど、今後の実用化への期待は大きい。

君塚は、上述のフォトン・アップコンバージョン技術の応用という視点で、研究期間終了後に特許出願を国内で7件、海外で2件行っており、産業化を視野に入れた研究開発が実施されている。

由井は、シクロデキストリン（CD）を用いたポリロタキサン（PRX）を材料表面に固定化した独自の材料を開発した。その研究成果は再生医療や、小児の先天性代謝異常症であるニーマン・ピック病に有効な医薬品として、また光応答性の末端官能基を用いることにより、歯科用レジンへの応用のほか、非侵襲的歯科治療の新規材料としても今後期待される。

松本は、基板上に直接グラフェンを合成するという効率的なデバイス作製法を開発し、グラフェンバイオセンサーの小型化や集積化に務めた。さらにワイヤレス化により、ウェアラブルセンサーなどへの展開を可能にし、簡便かつポータブルな鳥インフルエンザウイルス検出システムとして、今後は空港等でのオンサイトな利用なども視野に、電子部品企業や中部大学、香川大学、京都府立医科大学とグラフェンバイオセンサーの共同研究を行い、nano tech 2018 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議において産学連携賞を受賞している。因みに、Lab-on-Graphene は松本の造語であり、ヘルステック分野でのキーワードとして発展する可能性がある。

さらに尾嶋は、自動車メーカーと燃料電池に関して放射光を用いたオペランド解析の共同研究を行うなど、企業との連携を幅広く進めており、最先端科学技術を支える分析技術で大きな波及効果が期待される。また栗原は摩擦やトライボロジーに関し、東北大学をはじめとする東北地方のネットワークを利用して研究を進め、震災後の東北地方への地域貢献、復興支援に繋げた。平川は、テラヘルツ波などの電磁波未踏領域の利用に貢献しており、医療分野や所持品検査などへの応用が期待される。

本研究領域終了後も、継続的に優れた科学技術とその応用への貢献が多数生み出されている。特許活動という観点では、研究終了後の国内出願20件・国内登録8件、海外出願13件・海外登録6件の実績であり、研究終了後に特許件数が大きく増加したのは君塚(国内7

件、海外 2 件)である。

このような特許活動の数値だけを見るととりわけ多いとは言いがたい面もある。しかし上記したように、CREST 研究期間中あるいはその後の発展で得た多くの研究成果を、応用、開発、製造、あるいは汎用化という次のステージにおいても、多くの研究者が地に足を付けた形で広範に貢献・活躍していると高く評価できる。

(3) その他の特記すべき波及効果

本研究領域は、総勢 50 を越える主たる共同研究者を抱えた陣容であったこともあり、人材育成については、参加した数多くの研究者がキャリアアップして新しいポジションに移っている。本研究領域終了直後の時点で、ポスドクから助教などへの異動が 40 件、助教から准教授などへの昇進が 56 件もあるのは、本研究領域が活発な「人材育成の組織」としても機能していたことを如実に示している。

3. その他

国内外で高く評価されている研究者が参集した本研究領域は、ナノ界面技術に造詣の深い研究総括の指導力の下で自由闊達に研究活動が行なわれた。その後継として「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」という戦略目標が設定され、「超空間」を共通キーワードとした新たな CREST 及びさきがけの研究領域が発足したのも、本研究領域が大きな要因であると推察できる。その根幹となる概念は、「チャレンジングな基礎研究とサイエンスを深耕する学術研究の実施」である。短期的な出口指向の研究ではなく、研究者間の交流も含めて新たな発想の芽生えを醸成できる、研究支援体制の構築が大事である。また、優れた萌芽的基礎研究の芽を育てることを考えて行くと、Impact Factor の高い学術雑誌に論文発表を行うことや、被引用数に一喜一憂するのではなく、そうならないような研究環境上での工夫も重要である。新たな土俵を創るような、あるいはパラダイムシフトがなされるような真の意味での高度な研究成果におけるブレイクスルーが産まれてくることを、これまで同様今後も CREST やさきがけ事業に期待する。