

さきがけ研究領域「界面の構造と制御」

追跡評価報告書

総合所見

本研究領域は、戦略目標「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」の下、「界面状態」に着目し、新たなナノ界面機能や制御技術の創出およびその応用を目指すために設定された。

ナノスケールレベルの界面の観測、分析、そして制御技術等の開発という視座の下、最新の分子工学、界面工学、薄膜工学、精密材料創製化学、ナノメカニクス、精密分子操作、表面反応ダイナミクス、細胞や生体組織工学などのメディカル分野も含めて広範な分野において優秀な若手研究者 34 名を採択し、当該分野やそれらを融合させた研究領域に亘り、多くの優れた研究成果が得られた。

研究者それぞれの個性を最大限に奨励した研究総括の期待通り、研究終了後も 8~10 年に亘り素晴らしい発展を継続している。その研究成果は 931 報の論文に発表され、これはさきがけ研究期間中の 428 報の倍以上に上る。さらに世界で注目された論文の内、Top1%以内が 19 報、Top0.1%以内が 5 報、さらには Top0.01%以内が 2 報ある。特に科学技術への貢献の視点では、Hwang による遷移金属酸化物ヘテロ界面の新しい電子状態物理の創成や、柴田による原子内の局所電場観察を可能とした高分解能電子顕微鏡技術の開拓等、世界に注目される学術面での研究成果が多い。加えて特筆すべきことは、共同研究や共著論文が多いことである。科研費関連で 4 件が研究者同士の連名で推進されているほか、共著論文の総数は 55 報にのぼる。また特許出願も、国内で研究期間中の 2 倍以上の 136 件、海外では 3 倍以上の 71 件あり、研究期間中と研究終了後を合わせた登録特許の数は、国内で 112 件、海外で 39 件も成立している。このことは、社会・経済の観点においても世界におけるイノベーションを意識した活動が、研究終了後もより一層精力的に展開されている証左である。特に竹谷の有機半導体薄膜結晶を用いた各種電子デバイス化技術における特許では、国内で 54 件、海外で 37 件出願されており、それぞれにおいて 29 件、15 件登録されていることは特筆される。加えて松崎は、インクジェットプリント法による細胞積層化技術を大手企業と連携し製品化を推進すると共に、複数の大型研究プロジェクトに採択され発展している。

以上の成果等により、文部科学大臣賞表彰若手科学者賞 6 名、日本学術振興会賞、日本化学会学術賞、日本顕微鏡学会瀬藤賞それぞれ 2 名、日本 IBM 科学賞など 22 名が何らかの受賞をしている。

後継の研究を維持発展させる視点で重要なのが大型の競争的研究資金の獲得である。文部科学省や内閣府の諸プログラムや、NEDO、AMED、そして JST の未来社会創造事業、CREST、ALCA、A-Step など、広範な分野で複数採択され、多彩に発展している。

さらにキャリアアップについては、研究者の多くが昇任している。課題の採択時に教授は 1 人もいなかったが、調査時点では 15 名に達しているほか、助教クラスから准教授に昇任

したケース（9名）など、本研究領域から非常に多くの有望人材が輩出されている。

研究者の個性を大切に育んできた研究総括の期待は、各専門分野において大きく飛躍した研究者を何名も輩出し、卓越した形で発展していると評価できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

研究領域終了後も、「接合界面の高機能化」「界面での新規反応場・プロセス」「生体材料の界面挙動」「界面の観測手法・理論計算」の4つの技術軸で、各研究者は精力的に継続・発展しており、論文総数で研究期間中の2倍以上の931報の学術論文を発表した。このうちTop10%以内が158報、Top1%以内が19報、Top0.1%以内が5報あり、いずれも研究期間中を大きく上回っている上、Top0.01%以内の論文が2報あるなど、世界的に極めてレベルが高くインパクトのある研究が継続・発展しており、非常に卓越した研究成果を挙げていると評価できる。研究領域終了後8～10年経った現在、当時の界面で生じる新奇な現象が、今日で言うところのトポロジカル物質などを含むスピントロニクスといった新しいトピックスに繋がっており、当時の研究領域が重要なサイエンスの源流を走っていたことが逆の意味で立証されたとも言える。この界面物性分野ではHwangが世界をリードしている人材の一人である。さらに有機結晶デバイスにおける竹谷、高分解能電子顕微鏡における柴田がそれぞれ世界に注目される論文を発表するなど、最先端を走っている研究者も少なくない。さらに特筆すべきは共同研究であり、その共著論文の総数は55報を数え、界面というキーワードによって異分野研究者の交流を促した研究総括の姿勢が結実したものと考えられ、意義深い。

特許活動の視点では、国内出願は研究期間中の2倍以上の136件で、海外出願では3倍以上の71件である。さらに特許登録は、国内68件、海外25件とアカデミック研究者が大半の本研究領域としては目を見張る状況であり、我が国の科学技術の基盤となる権利の確保と新たな科学技術のイノベーションに大きく貢献したと判断できる。特に竹谷は、研究期間内での特許出願に対する意義や考え方を適格に理解し、研究領域終了後もそれを継続・発展させ、世界を視野にグローバルな事業戦略に立脚した知財活動を進めている。加えて松崎と宮田も、企業連携による製品化やライフサイエンス分野への応用展開を見据えた知財活動が認められるほか、堀によるベンチャー起業などもある。さらに400件近い新聞等の報道もなされており、総合的に社会的な貢献も非常に高く評価できる。

研究成果の発展状況を競争的研究資金の獲得状況で見ると、本研究領域への参加を契機として非常に広い分野を網羅するように増えている。例えば多くの研究者が科研費基盤研究(A)、(S)、(特別推進研究)および(新学術領域研究)などを複数獲得している。その他、文部科学省「元素戦略プロジェクト」や同省「グローバルCOEプログラム」、さらには内閣府の最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)、また国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)や国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)そして総務省の戦

略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)を獲得している。一方、JST の未来社会創造事業、CREST、ALCA、A-Step など獲得しており、後続研究が多彩に発展していることが伺える。

発展状況を考える一つの指標として受賞があり、例えば日本 IBM 科学賞 (Hwang)、文部科学大臣賞表彰若手科学者賞 6 名 (大矢、木口、柴田、西野、好田、松崎)、日本学術振興会賞 (木口、柴田)、日本化学会学術賞 (木口、福井)、日本顕微鏡学会瀬藤賞 (大島、柴田) Phys. Chem. Chem. Phys. 誌 HOT Articles (佐藤) などがあげられる。これらの受賞は、長年に亘る優れた研究業績が高く評価されたと共に、我が国の科学技術への貢献が認められた結果と判断され、その源流が本研究領域の活動にあったと推察される。

以上のことから、本研究領域を巣立った研究者は、学術分野だけでなく産業化を目指した視点においても、卓越した貢献を果たしていると評価できる。

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

科学技術への貢献という視点では、論文の量だけでなく質的にも国際的に極めて高い水準であることは前述の通りである。本章では、その具体的内容を以下に個別に紹介する。

筆頭に取り上げたいのは Hwang である。ペロブスカイト型金属酸化物を中心に、原子スケールで制御されたヘテロ界面を創製し、新奇な界面二次元電子系 (界面超伝導、磁気-電気カップリング、量子ホール効果) の学理を創出した。強相関物質系という新しい分野の源流の一つとも考えられ、物質科学における大きな潮流を築いた功績は実に大きい。さきがけ研究期間中を含めて発表された論文で Top10%以内が 32 報、Top0.1%以内の論文も 5 報あり、その研究の独創性は秀逸と評価出来る。Hwang はその後、米国スタンフォード大学の教授として招聘され、界面二次元電子系のサイエンスをさらに追求している。

柴田は、電子顕微鏡の空間分解能を 40.5pm まで高め、原子分解能観察に対応できる多分割型検出器を独自開発、微分位相コントラスト走査型透過電子顕微鏡法 (DPC-STEM) も開発し、半導体の pn 接合界面の明瞭な可視化に成功し、今日の半導体産業に大きな貢献をした。加えて、本技術を原子内部の電荷密度分布の観察にも応用し、世界に先駆けて原子レベルの電場観察や磁気スキルミオンの可視化等を可能にした。これらの研究成果は大きなインパクトを与えており、発表された論文の中には Top0.01%以内というものもあり、全世界で注目されている研究者の一人である。

竹谷は、塗布結晶化法や連続キャスト法を考案し、分子スケールで平坦な表面に、有機単結晶シートを大面積で作製することに成功した。多結晶よりも高移動度 (a-Si に近い) を示す有機単結晶シートを創製し、ウェアラブル性を活かした大画面テレビや無線タグ、高感度センサーなど各種応用も視野に入れて、製造技術も含めて研究開発を実施しており、有機半導体デバイスにおいて革新的な研究成果をもたらしている。発表論文には Top0.01%以内というものもあり、明らかに世界が注目している研究者の一人である。

松崎は、高分子とタンパク分子を積層したナノ薄膜を作製し、細胞の表面への接着の制御

を可能にすることで、細胞の配置を精密に制御して、デザイン通りの3次元組織を構築する革新的手法を確立した。これは生体外で生体組織モデルを構築するという先駆的な研究の第一歩であり、この技術を直接応用できる再生医療分野や医薬品評価ツールの分野には大きなインパクトを与えており、当該分野の産業化に向けたAMEDプロジェクトにも展開している。

木口は、単分子-金属の架橋状態を明らかにするために、単分子の振動スペクトル計測装置を独自に作製し、バルクでは絶縁体であるベンゼンが単分子接合下では金属と同程度の高い伝導性を示すことを見出した。これは金属誘起ギャップ準位を実験的に観測した初めての事例であり、有機エレクトロニクスを考える上で、最も重要な基礎・基盤技術となっており、今後さらに重要度が増すと思われる。

宮田は、分子インプリント法や精密重合法の一つである ATRP 法を用いて、標的分子に応答して膨潤・収縮するハイドロゲルの開発に成功している。分子応答性ゲルに対する先駆的な業績であり、これを基礎にドラッグデリバリーシステムへの応用やマイクロ流路デバイス中での流体制御など、広範な応用分野へと発展させた点が高く評価できる。

さらには、館山は固液界面に第一原理分子動力学計算を適用し、その対象を色素増感太陽電池やリチウムイオン電池などへ拡大し、計算科学の分野で世界をリードしている研究者の一人である。堀は、細菌表面にあるナノファイバーの主成分タンパク質分子の固体表面に対する非特異的な相互作用を究明し、細胞固定化タンパク質を人工的に設計することを可能にした。この研究成果はタンパク質化学の発展に新たな糸口を与えるものとして注目に値する。塚崎は、ZnO と MgZnO とのヘテロ界面がその自発分極差により高移動度二次元電子ガス系電界効果素子になることを研究期間中に実証、その後、分子線エピタキシー法により3次元積層超格子構造を創製し、自発分極差が結晶内全体に亘ることを実証した。また ZnO と類似の結晶形を有する GaN 系デバイスにも有効であることも実証し、半導体電子素子の設計に新機軸を与えた。叶は、独自に構築した和周波発生分光 (SFG) システムや二重共鳴ブロードバンド SFG 測定システムを細胞膜のモデルとなる脂質二分子膜に適用することで、その構造変化を捉えることに成功し、生体系における分子集合体形成や分子間力の理解に至る研究へと大きく発展している。川崎は、反応ガス雰囲気下で微粒子表面の触媒反応を観察できる環境セル透過型電子顕微鏡を多方面に発展させ多くの賞を受賞している。

上記の他にも研究終了後の継続と発展による優れた研究成果は多々あり、総合的な観点からも、科学技術の進歩への貢献は極めて卓越していると評価できる。

(2) 研究成果の社会・経済への貢献

社会・経済への波及を語る上で重要なのは、研究成果が産業応用まで発展するかどうかの見極めであり、特許申請活動もその重要な指標である。

活発な特許申請活動では、まず竹谷が挙げられる。研究終了後に国内 54 件海外に 37 件出願、うち 29 件、15 件がそれぞれ登録されており、アカデミックな環境下に在籍している

研究者としては突出した活動実績である。多数の企業との連携・共願もあり、自身の開発した有機単結晶デバイスの実用化を世界市場の視点でグローバルな戦略を実行していると想定できる。実際、無線タグなど新規な有機デバイス（あるいはフレキシブルデバイス）については、パイクリスタル社を設立し、取締役CTOに就任している上、低コスト印刷法でのアクティブマトリックスを用いた大面積サイネージ等に適応させることも視野に、オルガノサーキット社とも技術供与を含めた共同開発を進めており、実用化姿勢が強く認められる。松崎は、インクジェットプリント法による細胞の積層化技術を細胞積層培養キットが製品化されており、関連して国内特許出願も19件で登録が9件に達している。松崎が展開しているAMEDにおけるプロジェクトでは製薬会社45社が高い関心を持って参加している。また宮田は、分子応答性ハイドロゲルをドラッグデリバリーシステムやマイクロ流路デバイス（例えば μ TAS）などへの応用を視野に、特許活動を実施しており、国内での出願20件、登録12件は十分評価できる。

新留は、生体組織透過性が高い近赤外域に吸収を持つ金ナノロッドに、フォトサーマル効果を示すように表面修飾し、様々な医療診断や治療システムに応用可能な提案をしていることは技術の産業化応用の視点から意義深い。山本によるナノ流路中での生体分子（単一分子）を検出する技術は、その分離・回収する手法を確立した点も含めて、環境中の微粒子やウイルス、バクテリアなどをセンシングできる可能性があり、環境センサーへの応用が期待される画期的な基盤技術と言える。堀は、油脂分解能力に優れた微生物製剤と排水処理法を基礎に、スタートアップ企業を設立し、同社の最高科学責任者（CSO）として経営に参加している。排水処理・水の浄化は「安全な水」を謳うSGDsの重要なテーマであり、社会的な意義が大きい。野村の人工細胞モデルは今後、生物学や医療への貢献が期待されると同時に、研究の発展としてのDNAナノデバイスに関する研究を通じて、今後ますます隆盛して行くと思われる分子機械・分子ロボット研究への貢献も期待される。また生嶋が開発した音響刺激電磁波（ASEM）法は、物体の電気・磁気特性を非侵襲に計測することが可能で、固体中の電磁気的な描像を非接触な形で知ることができる非常に興味深い技術であり、医療分野や構造物の劣化センシングなどへの応用が期待される。

一方、柴田は、高分解能電子顕微鏡の開発を日本電子株式会社と共同で行い、その研究成果が製品として即、社会実装できる体制を構築している上、本技術を東京大学微細構造解析プラットフォームで公開し、他大学や他研究機関を支援している。こうした姿勢はオープンイノベーションの観点で非常に高く評価できる。なお、本研究領域を発展させて開発した本技術は瞬く間に世界中の研究者に普及してしまう状況であることから、柴田の電子顕微鏡技術は極めて注目度の高い技術となっている。

このように本研究領域の研究成果をもとに企業と共同研究を進めたり、研究者自らが起業したりするケースもあり、精力的に独自開発した技術を産業応用へ積極的に取り込んでいる研究者が予想以上に認められることは、我が国の将来を考えると大変心強く、非常に高く評価する。

(3) その他の特記すべき波及効果

人材のキャリアアップについては、研究者の多くが昇任しており、本研究領域が人材育成に果たした役割が非常に高かったことが示されている。具体的には、課題の採択時に教授は1人もいなかったが、調査時点では15名(岡田、木口、佐藤、末益、中西、ファン、福井、堀、宮田、叶、大島、柴田、竹谷、新留、塚崎)に達している。また助教クラスから准教授に昇任(9名)したケースや、研究チーム長等の指導的立場になっているケースも多くみられる。アカデミズムのポストが限られている今日において、本研究領域から非常に多くの有望人材が輩出されたことは特記すべきである。このことは、研究領域終了後も研究が順調に発展してきていることの明快な証左である。

もう一つ強調すべきは異分野融合の共同研究である。研究総括の「異なる学際分野の研究者間の交流を常に促し、研究協力・共同研究に発展し個人では成しえない研究成果に結び付ける」という方針の下、充実した共同研究が実施され、研究終了後もその姿勢が受け継がれていったことである。研究期間中にすでに領域内異分野での共同研究が6件(叶/吉田、叶/松崎、渡邊/竹谷、柴田/塚崎、中西/堀、川村/好田)あり、この活動は研究終了後も受け継がれ、科研費関連の研究助成を4件(福井/竹谷、竹谷/大島、生嶋/好田、佐藤/末益)獲得して、それぞれのプログラムを進めている。新しい研究分野の創成は、異なる研究者の共同作業から始まることが多いことを考えると、本研究領域は非常に的確に運営されていたと高く評価できる。関連して、受賞は研究者育成に大きな励みになるが、本研究領域に参画した34名中、22名が何らかの受賞を得ている。これは本研究領域に参加することで得られた研究者間の相互刺激の効果が大きかったことが容易に想定され、本研究領域の良き効能の一つと認められる。

産業界とのネットワーク形成という視点でみると、竹谷(7社)、松崎(6社)の他、宮田、生嶋、柴田、末益、川崎、館山、新留、山本らが、国内の有力企業と連携して共同研究を行い、共同出願に結びつけている。特記すべきは、松崎による細胞積層化技術の研究成果が内閣府のNEXTの採択に繋がり、国内外の30に及ぶ研究機関との共同研究へと発展している点である。また、竹谷は2社のベンチャーの立ち上げに関与し、堀もベンチャーを設立し最高科学責任者として経営に参画している。これらの、産業界と密接なネットワークを構築して社会実装に繋げている点も非常に高く評価できる。

3. その他

本研究領域は、研究者個々の自由な発想が基本になって運営されていたが、研究終了後にさらに発展して優れた研究成果を生み出し、世界の科学技術の進歩と社会・経済の発展に大きく貢献していると言えよう。「界面」というキーワードの下に、異分野融合がなされ、同時に「知」と「技」が結集して新しい科学の方向性を呈示したと言える。一方で近年、研究成果の出口を早計に求められる傾向が散見されるが、これだけの研究成果が産まれたのは、研究者

本人達のオリジナルな発想や思考が底流にあったからであり、この関係性を改めて再確認できる貴重な事例である。このような「将来の応用につながるであろう基礎サイエンスの芽を大事にする姿勢」が息づく研究領域を、今後も維持・発展させていただきたい。

また、研究領域終了後 10 年近くを経た今、研究者それぞれが関連する学会で活躍し、着実な実績を積み重ねている。当時の研究者が今日では、次の世代を担うであろう若手研究者を育成する立場になりつつある。それぞれの視点でその分野に最適な好循環を作り出して、次代の若手研究者コミュニティの構築・維持・発展に大きく尽力することを期待する。