

CREST「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」 研究領域事後評価報告書

総合所見

本研究領域は、戦略目標「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」の下、空間空隙構造制御技術により、そのもととなる物質が本来持ち得なかった革新的な機能を創出し、通常の方法では解決できない環境・エネルギー、医療・健康等における諸課題を解決するグリーン・ライフ部素材の創製に向け、以下の目標の達成を目指した。

- 選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を可能とする革新的な空間空隙制御材料の創製
- 空間空隙構造制御技術に係る技術体系の構築

そこで、本研究領域を大きな新産業創生の足掛かりを作るためのインキュベーション期間と位置づけ、世界で『ダントツ』の素材・製品につながる機能・物性が発現する物質・材料開発に取り組むことで、産業化の端緒となる新たな科学技術イノベーションを創出し、新産業創生の足掛かりを作ることをミッションとした。

上記ミッションを限られた期間内で達成するため、選考年度ごとにポートフォリオ・マネジメントに基づく戦略を実施し、エネルギー変換領域、物質変換領域、分離領域、新材料・新合成法、ライフサイエンス領域の5領域にわたる「超空間制御」にとってバランスの取れた研究布陣を実現させた。特に産業界との協力体制を早期から構築することを強く意識して、12チーム中7チームに企業が参画する構成で、本研究領域の最大の特徴となった。

領域アドバイザーも本研究領域の広い分野に対応させた形でバランス良く12名の人材を配置し、同時に企業から4名が選任されており、企業視点からの十分なアドバイスが得られるような体制を敷いていることは評価される。

本研究領域では研究進捗報告会(17回)や領域会議(7回)以外に、「月報」を取り入れたチームと研究総括の議論の深耕、「サイトビジット(現場主義・対面主義)」や「積極的な特許化」などの方法論が採られ、結果的に目標達成に関して良い方向に機能した。

本研究領域で得られた研究成果は質量ともに非常に優れており、国際誌の論文総数774報のうち60報以上が著名な学術誌に掲載されている。また、招待講演は国内外で1000件を越え、国際会議での招待講演は469件となった。以下、主要な科学技術視点での研究成果を簡潔に記す。

植村チームは多孔性金属錯体を用いることで、混ざり合わないポリマーを完全に混ぜる手法を開発した。まさに「超空間制御」の考え方に基づく画期的な研究成果である。さらに異なる分子を交互に配列させる技術に加え、高分子材料の末端基の違いを認識する分離技術の開発にも成功し、基礎学術への貢献に留まらず、産業応用への展開も大いに期待できる技術を構築した。野崎チームは本質的に困難かつ極めて有用な難題であるプロピレン分子と極性モノマーの共重合体を創製することに成功し、高分子化学に未踏の研究領域を拓い

た。陰山チームは、複合アニオン化合物という新たな化合物群の学理研究と機能開発研究を新しい学術領域として開拓し、目を見張る成果を上げており、世界を牽引している。関根チームは、触媒表面の水酸基に電場を印加する「表面プロトニクス」によって、触媒反応の活性化エネルギーを大きく低下できることを実証した。また共同研究者の窪田が8員環と12員環で構成される新しい3次元構造ゼオライトを発見したが、これは正に本研究領域の「超空間制御」という概念の王道を行く研究成果である。

また、各チームでの国内外での受賞数の多さも41件と際立っている。特に国内の学会・財団等からの学会賞クラスの名誉ある賞を複数の研究代表者が受賞している他、野崎のThe Karl-Ziegler Guest Professorship 受賞など国際的機関からの受賞もあり、領域全体として科学技術全体をリードしてきたことを証明する素晴らしい成果であると判断できる。

本研究領域は、社会的・経済的な視点からも卓越した研究成果を得るため当初から高度な目標設定をしている。大学研究者を主体とする研究チームに課されたこの難度の高い要求に対し、研究領域全体で、特許出願総数110件（国内87件、国際23件）を数え、すでに11件の特許登録がなされており、いずれの課題においても学術的専門性に裏打ちされた素晴らしい成果で応えた。研究総括の企業経験が、特許活動に良い方向に機能したと考えられる。

手嶋チームは、超高性能全固体二次電池の創成に向けて、フラックス法を用いる高度な無機合成手法をベースに研究を進め、世界最高の性能を示すレベルにまで到達した。本研究課題は、30社近い多くの企業との共同研究を実施することで、電池材料に必要な要素技術の確立を目指したものであり、30件もの特許出願（うち国際特許出願が11件）、ライセンス契約等の実績を上げている。野崎チームは、民間企業一社との強力な連携体制を課題採択当初から構築し、基礎研究段階から開発研究初期段階まで一貫した共同研究を進め、28件もの特許出願（うち国際特許出願が3件）の実績に至っている。このように手嶋チーム、野崎チームの産学連携の形は全く異なっているが、本研究領域の本質的な成果と意義は、全く異なったパターンの産学連携の成功事例を提示できたことであり、極めて注目に値する。

新産業創生への試みは本質的に成功確率が低いものであり、すべてのチームが成功を収めることを期待するのは無理がある。しかし、12チーム全てが大学主体の研究チームでありながら、2つ以上のチームで特筆すべき研究成果を上げたことは大いに評価できる。むしろ、失敗を恐れず、学術的価値を追求しつつ新産業創生に果敢に取り組むことにより、アベレージをはるかに超える成果を生み出すことができることを実証したことこそ、本研究領域の最大の功績であると考えられる。

加えて、陰山チームと加藤チームの研究代表者は、それぞれ新学術領域研究の領域代表者として研究領域を立ち上げたことは、本研究領域が研究代表者自身にも大きな成長と躍進を促したことの証左と言える。

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

研究統括が設定した研究課題の研究方針は、研究対象の多重性・複雑性、およびこの分野がこれからの日本を支える柱の一つであることを見据えたものとなっている。そのため、①従来路線ではない尖った『ダントツ』性、②科学的論理性、③Wants性（あらまほしき物性・機能）、④事業化可能性の4点を研究課題に要求した。さらに、模倣できない、他者の追従を許さないという視点も重要視し、理論に裏打ちされた基礎技術の組合せ・連携により、強く革新的な技術の創成を目指した。そのため、本研究領域を大きな新産業創生の足掛かりを作るためのインキュベーション期間と位置づけ、世界において他の追従を許さない素材・製品につながる機能・物性が発現する物質・材料開発に取り組むことで、産業化の端緒となる新たな科学技術イノベーションを創出し、新産業創生の足掛かりを作ることをミッションとした。

しかし、このプログラムの難しい点は、上記のミッションを限られた期間内で達成しなければならない点にある。それを満たすために、選考年度ごとに戦略を設定した点はポートフォリオ・マネジメントとして極めて適切であった。まず2013年度の選考では、研究総括によると「開発色の高い課題を選んだ」とあるが、「答えを出す」ことが期待できるのみならず、空間を原子・分子レベルで制御する確かな学理を開拓することを強く志向した王道の課題が採択されている。2014年度の採択課題はソフトマテリアルの課題がやや増え、研究分野が広がることで科学としても進化・深化したと言える。2015年度には長期視点でのインパクトを重視し、スピントロニクスによるエネルギー変換分野やドラッグ・デリバリー・システム（DDS）のようなライフサイエンス領域の課題が加わった。その結果、研究領域全体として採択された研究課題は超空間制御の概念に沿ったものとなり、エネルギー変換領域：4課題、物質変換領域：3課題、分離領域：2課題、新材料・新合成法：2課題、ライフサイエンス領域：1課題となった。ライフサイエンス領域が1課題だけとなったのは少ない感は否めないが、領域全体としてはバランスが取れたものになっている。本研究領域では応用展開を見据えた基盤的研究を推進するため、産業界との協力体制を早期から構築することが重要であるという研究総括の確固たる認識のもと、募集段階からなるべく企業と協働した体制で取り組んだ。その結果12チーム中7チームが採択当初から企業がチーム構成の中に含まれており、本研究領域の最大の特徴と言える。一方で、特に高い学術的成果を目指すチームには、必ずしも出口戦略を押し付けることなく、そのチームの特質に応じた運営をされたことも高く評価できる。

領域アドバイザーの構成は、無機領域3名、有機／高分子領域3名、バイオ領域2名、触媒領域2名、プロセス領域2名であり、本研究領域の特性をよく考慮した上でバランスよく選ばれている。また、大学等から8名、企業から4名が選任されており、本研究領域の特質を反映して企業人から十分なアドバイスを得られるよう選定されている。さらに社会・経済的視点、つまり経済学や知財戦略を含む未来社会学等、社会情勢との整合性から十分な議論が行えるよう、領域運営アドバイザーも配置されている。そのこともあり、民間企業との

共同研究が進み、科学の枠にとどまらず技術への移行まで進んだことは大いに評価できる。

本研究領域では研究進捗報告会 17 回、領域会議 7 回とチーム間の相互理解や戦略の議論を活発に行った。さらに、「月報」「サイトビジット（現場主義・対面主義）」や、「積極的な特許化」などの方法論が採られている。これらの方策は、いち早くチームの研究進捗状況を把握し、チーム内連携、特許出願、研究開発への足掛かりとして有効に働いた。また本研究領域は、さきがけ研究領域「超空間制御と革新的機能創成」（研究総括：黒田一幸）とマネジメントを協奏的に行う設計になっていたため、本研究領域の領域アドバイザーに黒田一幸「さきがけ」研究総括が参画し、逆にさきがけ「超空間制御と革新的機能創成」の領域アドバイザーに瀬戸山研究総括が加わることで、両領域の有機的な連携を図るという工夫がなされた。さらに瀬戸山研究総括は、JST ACCEL や NEDO プロジェクト等にテンポよく繋いでいくことを意識して進めた。後述の機動的予算措置も含め、研究総括の素早い判断や行動を実践したことも高く評価したい。このように短期間で効率的な成果を挙げた背景の一つには、研究総括の企業経験の長所が良い形で発揮されたことが考えられる。

国内外との連携を促進した結果、各研究チームで外部の研究機関や研究者と積極的に連携した。12 チームでの国内外の研究機関との連携は、JST 国際強化支援策等を積極的に活用するなどの施策を行ったことで、のべ 76 件（国内 43 件、国際 33 件）にのぼり、活発な共同研究を実施し、多数の研究機関、研究者からの協力を得ることができたことも大きな成果である。研究費配分についても、CREST 増額支援と総括裁量経費を使って、研究の進捗状況に従って柔軟に支援が行われた。4 千万円を超えるものもあり、研究総括が本研究領域の柔軟性を十二分に活用し、勢いのあるチームに機動的に予算措置している。各チームとも上記の JST 国際強化支援策等を通じて若手研究者の派遣による人材育成だけに留まらず、海外からの招聘なども実施し、相互コミュニケーションの醸成にも注力して効果を上げている。さらに、陰山チームと加藤チームの研究代表者が、それぞれ新学術領域研究の領域代表者として研究領域を立ち上げたことは、本研究領域が研究代表者自身の大きな成長と躍進を促したことの証左と言える。

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

①研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

各研究チームは「超空間制御」の概念をその本質を捉えながら個々の分野で再構築し独自の新たな学理的意義を創り上げ、革新的な成果に導いた。その結果は 774 報もの国際誌発表論文に結実し、ハイインパクトな雑誌への発表も多い。また 469 件の国際会議招待講演や数々のプレスリリースなど、本研究領域が科学技術の進歩に資するものとなったことは明確である。以下、特に重要と思われる研究成果の例を記す。

植村チームの第一の成果は「混ざり合わないポリマーを完全に混ぜる手法を開発」したことである。この手法は多孔性金属錯体を用いることで実現されており、まさに本領域の考え

方に基づく画期的な研究成果である。基礎的な研究だけでなく、産業応用への展開も今後大いに期待できる。さらに同チームは「細孔空間を使って異なる分子を交互に配列」させることにも成功した。構造体（結晶）を作る際に多孔性金属錯体を用いることで、微細な細孔を利用してドナーとアクセプター分子を分子レベルで規則的に交互に配列することが可能となり、性能の高い有機太陽電池構造を実現できるなど、新しいエネルギー変換技術への応用にも期待が生まれる。また、従来法では分離精製が不可能であった高分子材料の末端基の違いを認識する分離技術の開発にも成功し、高分子分離の新概念を見出した。本研究領域の高田チームの環状触媒による高分子変換技術と融合すれば、革新的な触媒反応技術となることは間違いない。

野崎チームは「極性基含有ポリプロピレン：触媒開発と樹脂設計」という、本質的に困難かつ極めて有用な難題に正面から取り組んだ。プロピレン分子と極性モノマーという性質の大きく異なる分子を触媒により互いに連結していくというこの試みは、化学者の直観からは分子の性質の一意性に逆らうかのような本質的に困難な挑戦に見える。野崎チームのこの難題への挑戦は触媒の機能設計に新たな学理を創成するとともに、成し遂げたプロピレンと極性モノマーの触媒的共重合という研究成果は、高分子化学に未踏の研究領域を拓いた。そして、これまで決して得られなかった様々な機能が期待できる新たな物質群を人類にもたらした。さらに野崎チームは、大学と民間企業の連携体制を課題採択当初から構築し、基礎研究段階から開発研究初期段階まで一体的に進めたことも特筆に値する。

陰山チームは、複合アニオン化合物という新たな化合物群の学理研究と機能開発研究を新しい学術領域として開拓し、目を見張る成果を上げている。従来の結晶化学で想定する陰イオンは一種類のみが基本である。しかし、複合アニオン化合物は複数種類の陰イオンを含むため、結晶構造の基本骨格たる陰イオンの配列そのものに新たなパターンをもたらし、教科書の基本概念すら書き換えると思われるほどの新規性を持つ。陰山チームは、これらの複合アニオン化合物群の研究に関し、世界を牽引する形で発展させ、学術的に意義深い新しい物質研究の領域を開拓した。例えば、ヒドリド（水素陰イオン）が圧倒的に圧縮されやすいことや、ヒドリドが隣接する遷移金属イオン間の磁氣的相互作用を遮断する働きをすることを発見した。さらに可視光照射下において安定に水を分解できる層状酸ハロゲン化物の発見は、学理的な機構を明らかにしつつ社会的インパクトのある機能を見出した研究成果である。これは、陰山チームの共同研究者で光触媒が専門である阿部（京大）と固体化学が専門の研究代表者がタッグを組むことで生まれたものであり、チームメンバーが有機的に協奏したことがこの発見につながった。本研究領域は個人型研究ではなくチーム型研究をベースとするシステムであるが、そのことが奏効した好例と言える。

関根チームは、触媒表面の水酸基に電場を印加することにより、メタンの改質反応やアンモニア合成といった、従来、高温・高圧を必要とした反応に対して、触媒表面上でのイオン伝導の促進、いわゆる表面プロトニクスによって、活性化エネルギーを大きく低下できることを触媒反応や電気化学的解析などにより明らかにした。このような学理面で極めて興味

深い新奇現象の発見は、近い将来において、関連する現象も含め多様な視点から理解が深化すること、あるいは解析の方法論・技術の進歩を促すという意味において、確固たる価値を持つ研究成果である。さらに、関根チームは新規物質の発見でも大きな研究成果を上げた。共同研究者の窪田（横浜国立大学）が8員環と12員環で構成される新しい3次元構造ゼオライトを発見した。この発見は全く新しいナノ細孔空間構造を持つ物質を創成したことを意味し、本研究領域の「超空間制御」という概念の王道を行く研究成果である。発見された物質はエネルギー変換に関連する化学反応に対して優れた触媒作用を持つなど、高い機能性を有する。これも国際的に極めて高い水準にある称賛すべき成果である。

一杉チームは「自律的に物質探索を進めるロボットシステムの開発」を進め、少ない実験回数で最適化する材料研究の効率的な技術開発の基礎を確立した。無機材料設計では世界的にも例が殆どなく、新材料創製の研究手法に大きな変革をもたらした。

櫻井チームは、独自に発見したプラトニックミセルの概念が一般則として成立することの実証に加えて、シクロデキストリンの包摂機能の拡張概念として、嵩高い分子、タンパク質等を効率的に分離できる手法を見出した。さらに、脳梗塞後の虚血還流症の治療剤の開発において、薬剤を内包したシクロデキストリンポリマーのナノ粒子が既存薬より優れた特性をもつことを見出し、前臨床研究での効果を確認するに至ったことは注目に値する。

その他ここに述べることのできなかった研究チームにおいても「超空間制御」の概念に深化と進化をもたらす学術的に高い水準の成果が得られていると認められる。

本研究領域の研究期間中における各チームでの国内外での受賞数の多さも2020年10月の段階で41件と際立っている。特に国内の学会・財団等からの学会賞クラスの名誉ある賞を複数の研究代表者が受賞している他、財団からの賞、そして国際的機関からの受賞もあり、領域全体として科学技術全体をリードしてきたことを証明する素晴らしい成果であると判断できる。

以上により、研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献については、特に高い水準にあると評価できる。

②研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域は、社会的・経済的な視点からも卓越した研究成果を得るため当初から高度な目標設定をしている。大学研究者を主体とする研究チームに課されたこの難度の高い要求に対し、各研究チームはそれぞれの学術的専門性に裏打ちされた素晴らしい研究成果と同時に、特許出願総数110件（国内87件、国際23件）など、応用展開でも十分応えたといえる。

手嶋チームは、超高性能全固体二次電池の創成に向けて、フラックス法による固体電解質スクリーニング、正極材料に対する稠密配向性結晶薄膜の合成法の確立、シミュレーションや理論計算等による相平衡・相転位予測など、広範囲にわたる探索と絞り込みにより要素技術を深化させ、素材性能を高め、最終的に二次電池として世界最高の性能を示すレベルにま

で到達した。本研究課題は、複数の企業との共同研究を実施することで、電池材料に必要な要素技術の確立を目指したものであり、30件もの特許出願（うち国際特許出願が11件）が戦略的に実施され、現段階ですでに4件もの特許が登録されているほか、ライセンス契約等の実績を上げている。これは30社にもものぼる多くの企業との多面的な共同研究が奏功した結果でもあり、産学連携のモデルのひとつとなり得る。さらに最近、手嶋チームは本研究領域の一杉チームと全固体電池における酸化物固体電解質の界面抵抗除去について共同研究を開始し、事業化に向けて加速していることも注目される。

野崎チームは、先に詳述したように学術的な観点から目を見張る成果を上げているが、社会的・経済的観点からも特筆すべきものがある。大学と民間企業一社との連携体制を課題採択当初から構築し、基礎研究段階から開発研究初期段階まで一体的に進めたことが特に注目される。基礎段階での研究においては、多数の企業と多重的に連携するより企業一社と特に緊密に連携することが双方向の協奏的効果を生みやすいと推察できる。野崎チームが実施したこの戦略が奏効し、その後の開発研究初期段階まで順調に進展した。特許出願が28件（うち国際特許出願が3件）あり、うち2件は登録されており、基礎段階から知的財産確保を十分に意識しながら研究を進めたことが窺える。

このように手嶋チーム、野崎チームとも本評価項目について極めて高い水準にあると結論できるが、その産学連携の形は全く異なっている。手嶋チームは複数の企業との多面的な共同研究を、野崎チームは基礎研究段階から一つの企業とタッグを組む戦略を取った。この違いは研究代表者のパーソナリティと研究課題の特質によるものであると考えられるが、本研究領域におけるもう一つの重要な成果は、二つの異なったパターンの産学連携の成功例を提示できたことであり、注目するに値する。

この他、加藤チームによる液晶相の特徴を活かした高ウイルス除去率と高透水性を両立する水処理・分離膜技術の達成や、櫻井チームによるプラトニックミセルでの知見を生かしたシクロデキストリンによるDDSのキャリア材料の開発など、環境・ライフサイエンス分野でも期待できる研究成果が生まれている。

本研究領域で設定した「エネルギー変換、分離・貯蔵・輸送、ライフサイエンス、物質変換、新材料・新合成法」は、いずれも産業的な関心が高く、次世代の産業創出の有望分野である。しかしながら、科学的な発見を新産業の足掛かりまで、しかも限られた期間内で繋げることが、言うほど簡単なことではなく、ほぼ不可能と言っても過言ではない。そこで、研究総括は安易に目標を設定せず、つまり荒唐無稽で無理な計画にせず、本研究領域での研究開発は「大きな新産業創生の足がかりを作るためのincubation期間と位置づける時間感覚で捉え」、「CREST終了時点で5合目突破を目指し、産業創出の足掛かりを作る」という目標設定にした。結果的にこの判断は極めて妥当であり、現時点で11件の特許登録がなされていることから明白である。企業との連携による新産業の芽を大きく成長させて行くためには、原資となる知財の登録は最低限の必須アイテムであり、100件以上もの出願がなされているのであるから、この11件に留まらず継続的に登録・権利化されるよう運営され、今

後の産業基盤の礎になることを切に期待する。上述したように、新産業創生の試みは本質的に成功の確率が低いものであり、すべてのチームがこの項目に関して成功を収めることを期待するのは無理がある。しかし、12 チーム全てが大学主体の研究チームでありながら、その中で2つ以上のチームで特筆すべき成果を上げたことは大いに評価できる。むしろ、失敗を恐れず、学術的価値を追求しつつ新産業創生に果敢に取り組むことにより、アベレージをはるかに超える成果を生み出すことができることを実証したことこそ、本研究領域の本質的な成果であると見ることもできる。

以上により、研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献については、特に高い水準にあると評価できる。