

さきがけ「超空間制御と革新的機能創成」 研究領域事後評価報告書

総合所見

本研究領域では、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」のもと、物質を構成する元素間結合の隙間「空間空隙」の形状・寸法・次元・配列等の構造を自在に設計・制御・活用するための共通基盤となる技術（空間空隙構造制御技術）を開発・駆使し、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を目標とした。具体的には以下の技術体系の構築を達成目標とした。

- (1) 空間空隙制御材料の設計と合成（機能先鋭化）
 - ・空間空隙制御材料における構造及び相互作用の設計と機能発現
 - ・空間空隙構造を有する物質の新規合成技術開拓
- (2) 空間空隙制御材料の実装（社会実装に向けた基盤的技術）
 - ・ナノからマクロへの規模拡大、高強度化、高速合成、低コスト化
- (3) 共通基盤技術の構築（観察・解析技術、原理解明）
 - ・空間空隙制御材料における物理的諸現象（物質輸送・貯蔵及び物質・エネルギー変換等）の観測・解析技術
 - ・計算機シミュレーション及びマルチスケール・モデリングによる空間空隙構造の合成プロセス及び構造と機能の設計・解析技術

本研究領域では既存の分子技術や材料技術の単純な拡張適用ではなく、元素や分子間に存在する「空間や空隙の活用」をより上位の概念と捕らえ、これまでとは異なるアプローチをとっている。すなわち、物質中の空間空隙を高度に設計・制御する「超空間制御技術」を確立し、エネルギー変換材料、化学物質の貯蔵・輸送・分離・変換を可能にする材料、分子認識材料、医用材料、構造材料、電子材料の基盤技術の開拓を目指した。さらに、素材化・プロセス化の流れを踏まえ、空間空隙の合成化学、最先端計測・計算科学による機能解明等にも挑戦した。これらの技術体系の構築は非常に高い達成目標であり、目的をもって空間空隙を設計・合成し、その機能を自在に制御し、新しい材料やデバイス技術を生み出すというねらいは見事に達成されている。これらの「空間空隙制御技術」は、材料研究開発の究極課題の一つであり、本研究領域を推進したことは、我が国の持続的経済発展を支える技術基盤を確保する上で時宜を得たものであり大変適切であった。

研究課題の選考では、研究領域を「空間の使い方4分野」×「ターゲットとする領域5分野」のマトリックスに分類し、もれなく、だぶりなく、かつ異分野との連携・融合ができるように採択した。これらは、研究領域内外の融合・共同研究の推進を図る上で極めて有効であったと評価できる。広範かつ適切な研究領域の設定であったために、多くの若い研究者が応募

した結果、3期平均で16.4倍という高い競争率となり、選考指針に沿った38名の優秀な研究者が採択された。特に、募集初年度の選考に漏れた研究者にも詳細な審査意見や改善方針を示し、次年度以降の採択につなげた点は高く評価できる。ポテンシャルの高い研究者を選定し、オリジナリティーの高い研究の推進を誘導する「さきがけ」本来の運営方針がしっかりと反映されていたと言える。領域アドバイザー15名は、関連分野の多様性を考慮して、日本を代表する研究者により構成されており、申し分のない陣容である。領域アドバイザーによるメンター制を導入し、研究の行き詰まりや研究環境問題などへのきめ細かい助言を、個々の研究者に適時行ったことも研究推進に有効に機能したと判断できる。さらに、科学技術振興機構の国際強化支援を活用し、「海外武者修行」によって研究者の更なるレベルアップを達成したことも高く評価できる。

研究成果は、研究領域全体で論文337報（うち国際誌328報）、特許46件（うち国際出願6件）、招待講演521件（うち国際会議での招待講演は306件）に達し、極めて高い研究成果が創出されている。また、融合研究並びに共同研究の奨励・推進により、一つの分野では実現できないような融合研究の成果が多く創出され、研究期間中に研究領域内共著論文19報、海外研究者との共著論文27報（うち、海外武者修行での共著論文6報）が生まれた。本研究領域の運営がいかにも有効に機能していたかの証左であろう。本領域研究者の教授への昇進5名、准教授（特任等を含む）への昇進10名、日本化学会進歩賞受賞5名、文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞9名を数え、研究者のステップアップにも本研究領域の活動が大きく貢献している。個々の研究者の評価については後述するが、「超空間制御技術」を基軸に多くの分野で独創性豊かな研究成果が創出され、新しいスーパースターが育っている。

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

① 研究課題の構成

環境・エネルギー、医療・健康などの諸問題を解決するために、細孔径や表面構造等の従来型機能の応用や拡張を超えて、「超空間制御」による革新的機能の創成・測定技術の開発・理論計算の援用を目指した点で先駆的・独創的な研究方針であった。広い観点での組み合わせや異分野との連携・融合ができる場となるよう「空間の使い方」×「ターゲットとする領域」のマトリックス方式で申請研究の審査・採択を行ったことは高く評価できる。さらにこのマトリックスに対応させる形で領域アドバイザーを配置した点も高く評価できる。これらの努力の結果として、分野が偏らない採択が実現している。また、研究者の所属が著名な大学に偏ることなく、国研も含めて有望な若手研究者をフェアに採択できていると評価できる。応募初年度に不採択となった課題に対してその理由を丁寧にコメントし、研究者が複数回応募する過程で研究提案が洗練され、次年度の採択に繋がったことは素晴らしいことである。超空間制御に対する研究総括の該博な知見と高い視点、メンター制度導入等による

研究者育成方策がしっかりと反映された結果と言える。

②領域アドバイザーの構成

領域アドバイザー15名は、関連分野の多様性を考慮して、日本を代表する研究者により構成されている。産業界からも、反応プロセスばかりではなく機能材料やメソ構造材料など新たな分野を切り拓いてきた専門性の高い研究者を選任している。それぞれの領域アドバイザーは、専門的視点（広範な革新材料への対応可能な専門家）、産業的視点（触媒反応やメソ構造に関して新たな産業を切り拓いてきた企業在籍者）、社会情勢的視点（科学技術政策立案に携わる者）から、目標達成に向けて相互に協力しており、異分野融合の観点からも適切な布陣となっている。加えて、戦略目標を共有する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」の研究総括は民間企業に所属し産業化経験が豊富であり、領域アドバイザーとしてさきがけ／CREST間の情報交換や連携のみならず、応用・産業化視点でも貢献したと判断される。

③研究領域のマネジメント

研究領域のマネジメントに関して、個々の研究者の研究推進、共同研究の促進、さきがけ／CRESTの交流に分けて評価する。まず研究推進であるが、領域会議を合宿形式で年2回（計11回）行い、研究総括と領域アドバイザーは各研究者の研究進捗を図るとともに領域内研究者間の共同研究を積極的に支援した。また、研究総括は全研究者に対してサイトビジットを適時行っている。その際、研究者がさきがけ研究を実施することについて所属上長の理解と協力を得られるように心を砕き、研究者が課題遂行しやすい環境づくりを心掛けた点は大いに評価できる。加えて、領域アドバイザーによるメンター制を導入し、研究の行き詰まりや研究環境上の問題などへのきめ細かい助言を行った点も高く評価できる。これらが各研究者の研究推進に有効に機能し、結果的に研究成果の向上に繋がったと判断した。

「さきがけ」は、個々の優れた研究を推進するばかりでなく、優秀な若手研究者同志が分野を越えて知り合い連携することを学ぶ場でもあり、分野の垣根を越えて将来にわたり連携し切磋琢磨する素地を作る場所でもある。本研究領域は、これらの理念を実施・実現するために積極的に共同研究を支援した結果、46件もの領域内共同研究が行われたことは極めて高く評価できる。研究領域内での活発な共同研究の実現はこの目的を十分に達成している証左であろう。さらに、「海外武者修行」と称してトップクラスの海外の研究者達との連携・共同研究の開始を積極的かつ継続的に支援したことが、若手研究者の研究活動の国際化を大きく後押ししたことは明白である。この短期海外派遣により共同研究17件、情報交換ネットワーク20件などが生まれたほか、研究者が海外研究機関と独自に共同研究を30件推進したことは、本研究領域のマネジメントの主要な成果の一つと言える。

本研究領域のマネジメントの特徴の一つは、さきがけ／CREST領域間の連携である。2014年3月の「超空間」合同キックオフミーティングを皮切りに、合同シンポジウムが5回開催されている。日本を代表する研究者が活動しているCREST研究との合同シンポジウムが、関連分野で個人研究を推進するさきがけ研究者に大きな刺激となったことは想像に難くない。

上述したように、研究総括の運営・指導は、極めて卓越していたと評価できる。本研究総括の多彩かつきめ細やかなマネジメント活動は、研究者個々の科学技術を総合的に判断する能力の向上や、さらには個人的なつながりを醸成し、将来を担う人材の育成に極めて有意義であったと判断する。

④その他

オリジナリティーの高い独創的な研究提案を選考し、優れた領域運営もあり、高い研究成果が創出され、研究者の昇進、受賞などにつながった。具体的には、研究者の教授への昇進 5 名、准教授（特任等を含む）への昇進 10 名、日本化学会進歩賞受賞 5 名、文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞 9 名を数え、研究者のステップアップにも本研究領域での活躍が大きく貢献している。

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全体評価

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の創製」は当初の想定を超えて達成されていると評価できる。個々の研究で高い成果が得られているだけでなく、研究領域内外での連携・融合によって独創的・挑戦的・先駆的な研究成果が得られており、研究領域全体での研究成果は、論文 337 報（国際誌 328 報）、学会での招待講演件数 521 件（国際会議 306 件）、特許出願 46 件として結実している。

②独創性、挑戦性、先駆性で高く評価できる研究

独創的、挑戦的、先駆的な研究の具体例をいくつか挙げる。藤田（大）は、4 価ゴールドバーク多面体構造をとる物質群を発見・合成した。この巨大多成分系分子集合体の実証は、ベールに覆い隠されていた自己集合の謎を一つ解明したばかりでなく、新しい材料分野が展開する可能性を示すものである。村井は、可視光の波長とメソスケールの周期を合わせもつ材料（光回折プラズモニックアレイ）を実合成するという極めて難度の高い材料構造制御に挑戦し、表面プラズモンポラリトンの発光増強など予想を上回る成果を上げている。この研究では、フォトニック機能創出の新しい学理の証明のために新しい材料の開拓をもって挑んでおり、挑戦的かつ先駆的な研究成果が得られている。石渡は、固体物理の新しい学理の開拓に挑戦し、三次元ペロブスカイト構造を基本とする銅酸化物中にヤーンテラー効果に基づく擬一次元鎖が生成すること、元の結晶系を維持したままわずかな圧力印加により強磁性が誘起される「巨大逆磁気体積効果」とも言える新奇物理現象を見出している。さらに EuMnBi 系金属間化合物結晶で二次元電子系特有の量子ホール効果の観測にも成功している。山田（高）は、フラックス法で Na 内包トンネル化合物の単結晶を作製し、トンネル構造中の Na が大きくディスオーダーし、その特異なラットリング効果が熱伝導度の低下と優れた熱電特性に帰着するという新しい学理を提案した。これらの研究成果は、「空間空隙制

御」を電子系、原子系における概念として新しく捉えなおした意欲的な研究であり非常に注目に値する。

一方、ゼオライト、メソポーラス材料、金属有機構造体 (MOF)、多孔性配位高分子 (PCP)、ナノポーラス (NP) 金属錯体など、文字通りの「空間」を有する材料においても優れた研究成果が得られている。阪本 (康) による最先端の収差走査透過電子顕微鏡を用いたゼオライト中へテロ原子の直接観察は、ゼオライト研究者の長年の夢を実現する極めて挑戦的な優れた研究成果である。織田は Zn イオン交換ゼオライト中にオゾニド種 (O_3^-) が生成するなど、細孔空間内での酸素種の驚くべき状況を明らかにしている。松田は吸着分子の種類により I 型やゲート型といった異なる吸着挙動を示す PCP や光で吸着機能を制御できる NP 錯体を設計し、ナノ空間を光反応場として応用する基盤を構築した。

③グリーン・ライフ素材の創製

生越は、独自に見出したリング状有機空間物質 (ピラーアレーン) の柱構造を活かした集積化と構造制御を行って、分子レベルで制御された空間を有する炭素材料を創出しており、精密な吸着・分離材料などの環境分野への応用が期待されており、この新物質系のパイオニアとして 2018 年度の CREST 「革新的反応」に展開している。医療・健康分野においては安井が、酸化亜鉛ナノワイヤによって形成されるナノ空間を使って、がん化因子エクソソームの解析を可能としている。本技術を用いると、1ml の尿による非侵襲がん発症前診断が実現できる可能性があり、実用化を図るためのベンチャー企業を共同設立し、デバイス製造に関しても民間企業に技術移転を図るなど、早期がん診断技術の普及に努めている。

④社会的・経済的価値の創造につながる成果

イオン結晶吸収剤やナノ構造を制御した新規触媒・光触媒材料でも構造制御の観点から材料の新規な機能を引き出そうとする研究が実施されている。その知見は物質分離、物質変換、効率的エネルギー利用など社会的価値の創出につながる可能性のある研究成果を多数含んでいる。例えば、内田はポリオキシメタレートイオン結晶の細孔内にポリアリルアミンを閉じ込めると極めて高い水素イオン伝導性が発現することを見出し、新たな水素エネルギーシステム構築の可能性を示した。野村はシリカメソ多孔体の細孔内表面の曲率がシリカ表面の酸性度や触媒活性に大きく影響することを究明した。1-3nm の細孔の新たな空隙効果の発見はこれまでにない新しい酸触媒系の開発に繋がると期待できる。Sivaniah Easan は、独自の層状多孔体作製法を駆使して、ファウリングと流速の測定に成功した。これらの実績がベースとなり、JST 研究成果展開事業 START に展開している上、さらに CO₂ 分離膜の研究で JST 未来社会創造事業をも遂行中であり、本さきがけ研究領域の研究成果が寄与していることは想像に難くない。

以上により、本研究領域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。

2. その他

本研究領域は上に述べたように非常に適切に運営されており、実に多くの新しい研究成

果が創出されたと評価できる。今後は、研究総括や領域アドバイザーに本研究領域の研究者を継続的にフォローしていただきたい。JSTに「さきがけ終了領域」をサポートする制度が用意されているとのことなので、是非これを活用していただき、研究コミュニティの一層の強化、情報交換と共同研究の継続的発展、またCRESTへのアップグレードを期待する。

一方で、産業界から見た場合、得られた成果が大きい割には、特許出願件数が若干少なく感じる。材料の基礎的なあるいは原理的な発見も多々あることを考えると、早い段階での基本的な特許の出願、さらには応用展開での出願数アップを今後心掛けていただくことを期待する。

この先5年、10年となったときに“超空間”という領域がどのような形で発展しているのか、人材育成、研究の系譜はどうなったかを調査することも必要である。また、空間空隙の高度設計・制御による革新機能材料創成は、世界的にみても日本が先導する研究分野であり、当該領域のさらなる発展のためにも、目的を絞った次期プロジェクトが期待される。