

研究領域「原子・分子の自在配列と特性・機能」事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本研究領域では、原子や分子を自在に結合、配列、集合する手法を駆使して、次元性、階層性、均一・不均一性、等方・異方性、対称・非対称性、複雑性などの観点からユニークな構造をつくり出し、その構造がもたらす新しい化学的、物理的、生物学的ならびに力学的に新奇な特性や機能を引き出すことによって、基礎科学のイノベーションを起こすとともに、社会インフラや生活を豊かにする革新的な物質科学のパラダイムを構築することを目的とします。

具体的には、近年、飛躍的に進歩してきた化学合成、原子操作、分子集合技術を基盤として、新しい発想や戦略のもとに、独創性に溢れた新物質、新構造体を生み出します。そのユニークな物質・構造体を、進化が著しい化学構造解析、結晶構造解析、ナノ配列構造解析や原子レベルの精密分析技術、さらに、大規模計算による精密な構造や化学的性質・物性の予測・解析法などと組み合わせることによって、類のない特性や機能の発現へ展開します。

原子・分子を要素とする物質や構造体の合成・変換・組合・配列とそれらの分析・解析を対象とする化学に加えて、理論に基づいて物質の特性を予測、解析する物理学、生体物質や生物機能の仕組みの分子レベルでの解析やそれらに作用する物質の開発を行う生物学、デバイス作製を行う工学などが連携して、未来社会に有用な俯瞰的な新しいモノづくりを行うことによって、社会が抱えている持続可能な開発目標、SDGsの達成に貢献する科学技術を切り開きます。

本研究領域は、文部科学省の選定した戦略目標「自在配列と機能」のもとに、2020年度に発足しました。

2. 事後評価の概要

2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

「戦略的創造研究推進事業(先端的低炭素化技術開発及び先端的カーボンニュートラル技術開発(ALCA-Next)を除く。)の実施に関する規則」における「第4章 事業の評価」の規定内容に沿って実施した。

2-2. 評価対象個人研究者及び研究課題

2020年度採択研究課題

- (1) 太田 誠一(東京大学大学院工学系研究科 准教授)

塩基配列からナノ粒子配列への自在変換が拓く生命情報検出

- (2) 北浦 良(物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター 主席研究員・グループリーダー)

二次元系の自在超構造化と機能創出

- (3) 草田 康平(京都大学白眉センター 特定准教授)

金属ナノ粒子における原子の三次元自在配列技術の構築

- (4) 近藤 美欧(東京工業大学理学院 教授)

金属錯体触媒の精密配列に基づく反応場の自在構築と正と負の触媒効果

- (5) 佐藤 弘志(理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー)

トポロジカル結合の自在配列による革新的機械特性発現

- (6) 佐野 航季(信州大学繊維学部 助教)

ナノシートの配列制御に基づく革新的ソフトマテリアルの創成

- (7) 澤田 知久 (東京工業大学科学技術創成研究院 准教授)
可逆的ペプチド鎖による高次ナノ構造構築法の開発
- (8) 菅原 克明 (東北大学大学院理学研究科 准教授)
MBE・原子置換・パターンニングを融合した新原子層材料の創製
- (9) 砂田 祐輔 (東京大学生産技術研究所 教授)
ケイ素鋳型分子を活用した金属自在集積
- (10) 塚本 孝政 (東京大学生産技術研究所 講師)
特異的原子配列が創るエキゾチッククラスターの開拓
- (11) 中野 祥吾 (静岡県立大学食品栄養科学部 准教授)
離散的配列ブロックに基づく人工タンパク質配列自在設計技術の開発と応用
- (12) 中野 匡規 (東京大学大学院工学系研究科 特任准教授)
強相関ファンデルワールス超構造の創成
- (13) 原田 尚之 (物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター 独立研究者)
準2次元金属の層配列制御による界面機能の創出
- (14) 廣瀬 崇至 (京都大学化学研究所 准教授)
らせん状 π 共役分子の自在配列によるキラル分子機能の創出
- (15) 山田 裕貴 (大阪大学産業科学研究所 教授)
液体中のイオン・分子配列制御と電気化学新機能の開拓

2-3. 事後評価の実施時期

2023年12月19日(火曜日)、12月21日(木曜日) 事後評価会開催

2-4. 評価者

研究総括

西原 寛 東京理科大学研究推進機構総合研究院 特任副学長・総合研究院長

領域アドバイザー

稲垣 伸二 (株)豊田中央研究所ビヨンドX研究部門 理事

岩佐 義宏 東京大学大学院工学系研究科 教授

平野 愛弓 東北大学電気通信研究所 教授

宮下 精二 東京大学大学院理学系研究科 名誉教授

宮田 浩克 名古屋大学大学院工学研究科 特任教授

山元 公寿 東京工業大学科学技術創成研究院 教授

渡邊 正義 横浜国立大学先端科学高等研究院 上席特別教授

外部評価者

該当なし

3. 総括総評

本領域では、原子・分子の自在配列にもとづく物質科学を探究する幅広い専門領域の研究者が集っており、1 期生 15 名の研究は、物理学、化学、生物学に及んでいる。

物理学を基盤とする研究に関しては、北浦 良氏は、独自の MOCVD 装置を完成させ、二次元物質のシャープなアトム界面をもつヘテロ接合構造 $\text{WS}_2/\text{MoS}_2/\text{WS}$ の作製に成功した。菅原克明氏は、MBE 法を用いて遷移金属セレン化物、テルル化物ナノシートを作製するとともに、独自の原子置換装置を用いて、遷移金属硫化物ナノシートを作製して STM 観察と ARPES を駆使するバンド構造の解析を行い、新しい超構造や電子状態を見出した。中野匡規氏は、MBE によるエピタキシャル成長技術を用いて磁性体、超伝導体、トポロジカル物質、励起子絶縁体などの様々な性質の二次元物質のファンデルワールス超構造を作製して、創発フェロバレー強磁性の実証、巨大な超伝導整流効果の観測、特異な遍歴磁性の発見、新奇二次元磁性の開拓という独創的な成果を上げた。原田尚之は、大きな仕事関数を有する PdCoO_2 をはじめとするデラフォサイト酸化物薄膜のラシュバ分裂の決定、 n-GaN などのワイドギャップ半導体との接合による良好なショットキーダイオード効果など基礎から応用に至る成果を上げた。

化学を基盤とする研究に関しては、草田康平氏は、fcc 構造と hcp 構造が知られている Ru ナノ粒子 (RuNP) の bcc 構造をつくり出すことに挑戦し、コアシェル型構造を活用することにより、この目標を達成した。近藤美欧氏は、三次元ポーラス構造中に金属錯体触媒サイトを配置した分子性触媒モジュールの集積化により、 CO_2 の電気化学的還元反応、光還元反応などで高活性を示す系を構築した。佐藤弘志氏は、カテナンを骨格に含む MOF の合成と詳細な構造解析に成功し、ナノインデンテーション法による結晶の低ヤング率や高圧下での構造の縮小を見出した。佐野航季氏は、酸化チタンナノシートの磁場による二次元周期配列、三次元周期配列、2 周期含有配列などを実現し、さらに、酸化グラフェンナノシートの配列制御にも成功した。砂田祐輔氏は、多様な構造・次元性・Si-Si 結合の数を持つ鋳型分子を用いた金属ケイ化物クラスター分子の構築を展開し、パラジウムの 4, 5, 7, 11 核からなる平面上クラスター分子の合成や亜鉛イオンやカドミウムイオンと Si-Si 結合の組合せでは、呈色や発光などの可視光応答の発現を達成した。塚本孝政氏は、金属クラスターの対称適合軌道モデル (SAO) を高次分子の概念まで拡張するとともに、活性化エネルギーがほぼゼロの Ni_{28} 系温室ガス変換クラスター触媒や Sn_{28} 系エレクトライドクラスターを発見した。廣瀬崇至氏は、様々な化学構造の π 拡張型らせん状分子を、独自の合成手法で系統的に合成し、それらの新しい分子の構造解析、量子化学計算、円偏光発光特性 (CPL)、SQUID、キャリア移動度、分子ばね特性測定など、ユニークな構造に基づく特性を明らかにした。山田 裕貴氏は、配列的特徴に起因する電解液新機能開拓に関して、リチウム塩の水和融体に加えて、ナトリウム塩、カリウム塩、セシウム塩、フッ化物イオンの水和融体まで展開し、それらの中で幅広い電位窓を有する水和融体の発見、高いイオン伝導性を示すフッ化物塩水和融体の発見、ATR-SEIRAS を用いた電極表面の in-situ 解析による電位窓拡張のメカニズムの解明を達成した。

化学と生物学の境界領域の研究としては、澤田知久氏は、配位結合の可逆性を利用したペプチドの連結によって、新たな高次構造をつくる研究で、平行 β シート、 β バレル、 β ヘリックス二重鎖等の様々な β ストランド型及び 7~10 以上の絡まり型の高次ナノ構造など、自然界に存在する構造に近いものだけでなく、自然界で発見されていない美しい構造の構築に成功した。

生物学を基盤とする研究に関しては、太田誠一氏は、DNA をリンカーとした機能性ナノ粒子の配列技術を基盤とした酵素法に代わる新たなバイオマーカー検出法の開発を行い、触媒反応による蛍光強度の増大による高感度化などを達成した。中野祥吾氏は、タンパク質配列中に隠された離散的配列ブロックを同定するアルゴリズム、iAnglerNet と最適化するアルゴリズム、GAOptimizer を開発し、実証実験によって、それらの革新的な解析手法の有用性を示した。

3 年半の研究期間では、サイトビジット、領域会議や個別討論会などを通して、研究総括、領域アドバイザー、さきがけ研究者同士との専門分野を超えた自由で忌憚のない意見交換や相互交流を密に行いながら、互いの研究を活性化し合い、各研究者はそれぞれの得意技や持ち味を生かした研究を展開した。

その結果、論文 157 報、学会発表 545 件、書籍・総説・その他 28 報、特許出願 7 件、受賞 24 件の成果につながった。また、ほぼ全員がキャリアアップした。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 塩基配列からナノ粒子配列への自在変換が拓く生命情報検出

2. 個人研究者名

太田 誠一（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

3. 事後評価結果

太田誠一氏は、DNA をリンカーとした機能性ナノ粒子の配列技術を基盤とした酵素法に代わる新たなバイオマーカー検出法の開発を研究目標とし、独創的なアイデアに基づく課題に取り組んだ。低濃度検出を可能とするために、触媒反応による蛍光強度の増大を試み、PCR 法と同程度の感度を達成した。また金ナノ粒子のプラズモン共鳴の変化を利用した核酸マーカーの検出も検討した。この方法は蛍光ラベル法と比べて感度は低いが、検出を可視化できるメリットがある。さらに、サイズラベルによる核酸検出、タンパク質の検出なども試み、研究目標に対して、着実な進展が確認された。当初の計画にはなかった研究でも、金粒子の集積の様子の可視化が、共同研究により実現され、論文投稿レベルの成果が得られている。

太田氏のナノ粒子を用いる DNA の着脱可能なリンカーとしての性質に着目したバイオマーカー検出手法は挑戦的で、他の手法に比べて検出感度、簡便性、マルチ性の観点で優位点があり、国際的に高水準の発展が見込まれる。本技術が確立できたら、従来の酵素法に代わるバイオマーカーの簡便・高感度・マルチ検出が可能となり、医療分野へのインパクトは極めて大きい。現行の PCR に対する優位点が明確な手法を構築できれば、社会・経済に大きな波及効果をもたらす。研究成果については、企業と共願で特許が出願されており、社会実装に向けた準備が始められている。

研究の進め方は、提案した研究を計画に沿って着実に進捗させ、その中から新しい方向性が打ち出されており、適切であった。共同研究を通じて新たな検討を行い、研究のレベルを向上できたことも評価できる。予算については、バランスよく、必要な物品購入に使われた。

太田氏は、2020 年に現職の准教授に昇進し、その年にさきがけ研究を開始した。東京大学卓越研究員にも選出された。したがって、さきがけ期間中、新たな研究室の立ち上げと研究に専念し、順調に研究成果を積み上げた。その結果、国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

今後は、開発したナノ粒子を用いるバイオマーカー検出手法を更に発展させ、より汎用で社会実装できるところまで研究を進捗させることを期待する。社会実装には、感度を始めとする性能のみならず、コスト、使い易さなど種々のポイントがあると思われる。また競争の激しい分野と思われるので、従来技術を置き換えるのは容易ではないが、是非、本系のキラーアプリケーションを見出して頂きたい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 二次元系の自在超構造化と機能創出

2. 個人研究者名

北浦 良（物質・材料研究機構ナノアーキテクニクス材料研究センター 主席研究員・グループリーダー）

3. 事後評価結果

北浦良氏の研究は、MOCVD による二次元物質のナノ構造の構築と電子状態解明であり、二次元物質をヘテロに組合せて超構造を作り、その特性を明らかにすることを研究目標としていた。二次元物質の成長法で最もメジャーな MOCVD 法の制御性をより高める技術であり、原子レベルでフラットな境界を形成して、異なる TMD を接合できる成膜装置を、高い完成度をもって製作することができ、シャープなアトムミックス界面をもつ WS₂/MoS₂/WS をつくることに成功しており、目的は概ね達成している。しかし、装置の整備に多大な時間を取られたようで、物質・材料研究機構（NIMS）への異動もあったため、様々な超構造作製に関しては、期待した十分な成果を得るには至らなかった。一方、面内界面に由来する特異な電子構造による新しい物性の開発を計算と実験から進め、さらにストライプ構造やドット構造でのキャリア局在状態などを達成している。

自作の MOCVD 装置の利点を生かした単層 TMD 作製を駆使して、超微細ヘテロ構造の実現を行っていることは、独創的で国際的に高水準の研究である。今後どのようなナノ構造を作るかが、国際的に高水準の研究に発展するかどうかの鍵となる。現在は、張り合わせによるゼロ次元量子ドットの作製を目標にしているが、物性の有用性（実用的価値）を踏まえた、より挑戦的な目標も見つけることを期待する。

最先端の微細加工技術であるが、現在は半導体二次元材料をベースに作製される低次元系材料の物性に関する基礎研究的色彩の強いものである。このような低次元系材料から革新的な物性を見出して、波及効果科学技術への波及効果が生まれることを期待する。

研究の進め方は、研究室の異動に伴う装置の立上げ、故障などへの対応に時間がとられたが、その中でも、着実に装置を改良し、新たな研究展開を行っており、適切であった。予算はバランスよく執行され、この材料の作製に必要な装置の完成のために有効に使用された。

北浦氏は、名古屋大学大学院理学研究科 准教授から NIMS ナノアーキテクニクス材料研究センター 主席研究員・グループリーダーへ異動し、研究の自由度を得て、より研究に打ち込める環境をつくり、キャリアアップに努めた。本さきがけ研究の成果が認められ、国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

MOCVD を用いる最先端の二次元物質超構造作製法を開発しているので、今後、マスク法やプリント法へのこの方法の利点を追求、正確で系統的な操作法の確立、さらにはストライプ構造を越えてより広いデザインへの挑戦、などが期待される。さらに類を見ない超構造とそこから生まれる新現象を追求して、独創的な研究を継続することを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 金属ナノ粒子における原子の三次元自在配列技術の構築

2. 個人研究者名

草田 康平（京都大学白眉センター 特定准教授）

3. 事後評価結果

草田康平氏の当初の大きな研究目標は、Ru ナノ粒子（RuNP）の bcc 構造をつくり出すことによって、すでに達成している fcc 及び hcp 構造と合わせて、3 種すべての構造を同一物質で実現することであった。この目標は原子科学のロマンの追求であるが、熱力学的に極めて難題である。草田氏は、いろいろな面からの果敢な挑戦を行い、当初の計画にあったアプローチではなく、コアシェル型構造を活用することにより、シェル部に RuNP の bcc 構造をつくり出すことを達成した。また、固溶合金（RuIrPt, PdRu）での結晶構造の制御とそれに伴う物性や触媒活性変化を見出すなど、目標以上の成果も得られている。コアシェルで達成された大きく歪んだ構造は、現時点では革新的とまで言える特異的特性の発現には至っていないかもしれないが、将来的に大きな可能性を秘めた材料だと思われる。

草田氏は、基礎科学として金属ナノ粒子の配列に関する単純で大きな独創的・挑戦的研究課題にチャレンジしているので、成果を積み上げることによって、国際的に大きな反響を得て、高水準の発展が期待できる。今回の構造制御に関して元素の拡張性を示し、桁違いな触媒活性などの新奇な物性が確認されれば、技術の価値は一層高まり、社会的な波及効果も期待できる。

研究の進め方は、さきがけ研究に相応しく、極めて大きな課題に対していろいろな角度から柔軟なアプローチで解決策を探っており、適切であった。予算は主に物品購入目的で、時期的なバランスをもって使われており、研究遂行に対して有効に使われた。

草田氏は、研究開始時の京都大学大学院理学研究科 特定助教から、さきがけ期間中に京都大学白眉センター 特定准教授に昇任しており、キャリアアップに努めた。さらに、JST 創発的研究支援事業にも採択されており、研究者としての飛躍につながった。

今後は、自在配列の概念で金属（単金属、合金）ナノ粒子と結晶構造に関する独創的な研究を継続して、より多彩な金属クラスターの系統的研究で有用な物質創成を展開し、一つの研究領域を創出して国際的に先導することを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 金属錯体触媒の精密配列に基づく反応場の自在構築と正と負の触媒効果

2. 個人研究者名

近藤 美欧（東京工業大学理学院 教授）

3. 事後評価結果

近藤美欧氏は、分子性触媒モジュールの設計などを空間的な「反応場」の考え方から進め、研究課題の正と負の触媒効果のうち、①触媒モジュールの精密配列に基づく反応場の自在構築と、②精密配列がもたらす正の触媒効果については、順調に研究が進捗した。三次元ポーラス構造中に金属錯体触媒サイトを配置し、その構造の特長を活かした分子性触媒モジュールの集積化により、水中での CO_2 の電気化学的還元反応、光還元反応などでは、フレームワークの無い触媒と比べ高活性を示すことを見出した。その他にもフレームワーク触媒を用いて有機物質変換や電解重合触媒高分子膜の作製などで、今後の発展が期待される研究成果が得られ、多くの論文を発表した。③負の触媒効果については、正の触媒効果ほどの目覚ましい成果には至っていないが、目標達成に向けての重要な戦略が得られている。以上から、掲げた研究目標は十分に達成された。

触媒機能部位の配列効果を明らかにした独創的・挑戦的研究であるが、配位子に触媒活性部位を付与した MOF と比較して、何が決定的に有利なのかが明確になると、研究の価値が一層高くなると思われる。さらに触媒効果向上の原因として電子論的な協同現象などが明らかになれば画期的な展開につながる と期待できる。

本研究で開発した触媒には従来よりも高活性なものや取扱い易いものが含まれており、従来の触媒に比しての優位性が総合的に高ければ、科学技術や社会への波及効果が期待される。

研究の進め方は、研究室メンバーとの連携もよく、多くの論文掲載に至っており、堅実で適切であった。近藤氏は、さががけ期間中に、大阪大学院工学研究科 准教授から東京工業大学理学院 教授へキャリアアップした。予算は、執行額が後半に増大しているが、最終年度に異動されたことを踏まえると妥当と言える。さらに、JST 創発的研究支援事業にも採択されており、研究者としての飛躍につながった。

今後は、集積化による触媒性能の向上は重要な知見であるが、そのメカニズム（ CO_2 濃縮効果、活性点の近接効果）の提唱は、根拠を揃えて慎重に行い、類似のフレームワーク構造を有する MOF や COF との違いのオリジナリティを明確にできるような実験を心掛けていただきたい。分子集積触媒化学の分野を切り拓くと同時に、実社会に貢献できる成果（高活性・高性能触媒）も目指していただきたい。さらに、柔軟な発想で、金属錯体を基盤とする物質科学、触媒化学、電気化学、光化学などで新しいテーマに挑戦しているので、新しい研究室にて、それらを活かした新分野を築くことを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： トポロジカル結合の自在配列による革新的機械特性発現

2. 個人研究者名

佐藤 弘志（理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー）

3. 事後評価結果

佐藤弘志氏は、研究開始時に目標としていたカテナンを骨格に含む MOF の研究を順調に進めてその合成に世界で初めて成功し、詳細な構造解析に加えて、ナノインデンテーション法を初めて溶液中で計測可能として結晶の力学特性を評価し、ヤング率が小さいことや高压下での構造の縮小を見出した。力学特性という観点からは、本物質系は革新的と位置付けられるレベルではなく、また当初予想していた MOF 結晶の圧縮による吸着分子の脱離現象の確認には至っていないが、研究目標を十分達成したといえる。想定していなかった結果としては、色の圧力応答がみられる。さらに、カテナンのみから多孔性結晶を作ることに挑み、興味深い結果が得られている。領域外の研究者との共同研究が進んだ。

カテナンを骨格に含む MOF として初めての物質の合成に成功し、詳細な研究成果を挙げて、Nature 誌に掲載されたのは国際的に極めて高水準の独創的で挑戦的な研究であることを示している。この研究テーマを発展させるには、その柔軟な骨格構造を活かした機能・応用へ展開できると、大きな発展が見込まれる。

カテナン骨格の柔軟性を利用した展開が革新的な科学技術を生み、社会への波及効果が大きいと思われるので、これまでの構造設計の展開と限界を見極めて、新たな構造設計を行うのが重要であろう。そのことを佐藤氏はすでに認識して、新たなカテナン多孔性結晶の構造設計を進めているので、今後の展開が楽しみである。

研究の進め方に関しては、さきがけ研究開始時の物質に関して着実に問題点を解決し、その物質の構造の限界を明らかにして次の物質設計につなぎ、本研究に必要な先端計測法を有する研究者との共同研究を行うやり方は適切であった。また、佐藤氏はさきがけ期間中に東京大学から理研に異動して PI として研究室を構え、研究体制を整えた。それに必要な追加予算を申請して獲得しながら、研究を順調に進めた。

佐藤氏は、採択時は東京大学大学院工学系研究科 講師だったが、2021 年 4 月から理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダーに着任した。さらに、広島大 WPI の特任教授就任など、顕著なキャリアアップに努めた。また、本さきがけ研究の成果が認められ、国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

今後は、従来の柔軟性 MOF の中に相互貫入型 MOF があり、吸着により結晶格子が動くことが報告されているので、その様な MOF と佐藤氏が開発したカテナン-MOF との本質的な違いが明確になると、本研究の価値は更に上がる。柔らかい結晶、大きく変形する結晶という観点からは、カテナン構造の延長（二つの鎖から三つ、四つの鎖にするなど）が考えられる。また、他のフレキシブルな構造を組み込んだ多彩な固体材料系への展開で、新しい領域を開拓、先導されることを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ナノシートの配列制御に基づく革新的ソフトマテリアルの創成

2. 個人研究者名

佐野 航季（信州大学繊維学部 助教）

3. 事後評価結果

佐野航季氏は、さきがけ研究開始時は、酸化チタンナノシートの磁場による相対配置制御を基にした研究構想であり、その研究では二次元周期配列、三次元周期配列、2 周期含有配列などを実現した。計画では革新的機能の開拓も掲げていたが、この点についての成果は今後に期待したい。さらに、酸化グラフェンナノシートなどへの展開で目標以上の成果を挙げた。ナノシートの配列制御によるソフトマテリアルの創成という研究分野を切り開き、種々の革新的動的構造体を創成していることは高く評価される。

磁場印加による一軸配向だけでなく、第二の刺激（イオン拡散、力学刺激、熱的刺激）による二次元、三次元の配列制御はあまり前例がなく、ナノシートの配列構造を自在に操る本研究は、独創的である。高レベルの国際誌に掲載され国際的にも高く評価されている。さらに、余剰イオンの排除や対イオンの選択による配列制御も理論面を含めて系統的に調べられており、酸化チタン以外のナノシートにも適用できることから、今後の発展も期待できる。

現時点では、構造の外場刺激による制御で新しいナノシート配列構造をつくる基礎研究に焦点が注がれているが、物質輸送やフォトニック機能などの機能性に関する成果も生み出されており、今後、実用に結びつくような機能が開拓されることで、科学技術や社会への波及効果が増大する。

佐野氏は、理研から信州大へ PI としての助教へ異動したが、その異動時期にも研究の歩みを止めることがなかった。また信州大では PI として学生との共同研究を行い、新たな可能性を求めて多くのトピックに同時に取り組んでいる。研究の進め方は適切であった。予算は研究室のスタートアップに有効に使われた。

佐野氏は、理研から信州大へ PI としての助教へ転任したが、年齢からすると非常に大きなキャリアアップである。さきがけ研究期間中に、理化学研究所より桜舞賞を受賞（2022 年 3 月）、日本化学会東海支部より日本化学会東海支部奨励賞を受賞（2023 年 11 月）し、本分野の若手研究者のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

さきがけ研究で、無機ナノシートの配列技術確立してきたので、今後は、機能設計に注力していただきたい。酸化チタンや酸化グラフェンなどのナノシートは電気化学的な応用が可能であり、従来材料を凌駕する機能の発現を期待する。さらに、PI として研究の幅を広げているので、その勢いで、ナノシートに限らず、新しい物質科学にチャレンジされることを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 可逆的ペプチド鎖による高次ナノ構造構築法の開発

2. 個人研究者名

澤田 知久（東京工業大学科学技術創成研究院 准教授）

3. 事後評価結果

澤田知久氏は、配位結合の可逆性を利用したペプチドの連結によって、新たな高次構造をつくる研究で、自然界に存在する構造に近いものだけでなく、平行 β シート、 β バレル、 β ヘリックス二重鎖等の様々な β ストランド型及び 7~10 以上の絡まり型の未踏の高次ナノ構造の創製に成功した。特に複雑で大きなトーラス結び目分子や、大きなポリヘドラルリンク分子については、自然界で発見されていない美しい構造であり、自然界にも同様な構造が存在できる可能性を示唆する点で興味深い。60 交点数の巨大球殻構造の構築は特筆に値する。また、非常に完成度の高い研究成果を一流紙に掲載し、その内容には予期していなかった構造の発現等が含まれているだけでなく、構造的特徴が物性の特徴にもつながっている。当初の提案にあった一次元直線状、二次元層状構造については未達のところはあるが、上記のように、十分に目標を上回る研究成果を挙げている。

澤田氏のペプチドをモチーフにして、天然にはない可逆的な配位結合を用いて高次構造をつくる取り組みは極めて独創的で、成果はいずれも高レベルの国際誌に掲載されており、この分野で世界をリードする研究者であることが証明されている。創製した構造体が水中で不安定などのいくつかの課題がクリアでき、新しい構造の機能を容易に利用できるようになれば、さらなる発展が期待できる。また、人工酵素機能、生理活性、薬物活性等が発現すれば、医療分野など産業応用に繋がる可能性もあり、社会・経済への波及効果は絶大である。

研究の進め方は、類稀な科学的センスからいろいろな構造を設計し、それに適合する金属イオンの種類とペプチドの構造を導き出すことに成功しており、適切であった。澤田氏はさきがけ期間中に東大から東工大に異動し、研究環境が変わったが、スタートアップ支援を有効に活用して研究室の立ち上げを迅速に行い、デザイン、合成、構造評価などをバランスよく行う研究体制を整えたと評価される。

澤田氏は、東大から東工大へ、准教授としての異動であったが、PI になることができた。本さきがけ研究を活かして、キャリアアップに努めた結果である。さらに、本さきがけ研究の成果が認められ、国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

今後は、化学と生物の両方に関わる幅広い面白さを持つ新物質である短いペプチド断片から多様な構造体ファミリーについて、幅広い領域の研究者と共同して機能発現の課題を克服し、新しい研究領域として発展されることを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： MBE・原子置換・パターニングを融合した新原子層材料の創製

2. 個人研究者名

菅原 克明（東北大学大学院理学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

菅原克明氏は、MBE 法を用いて遷移金属セレン化物、テルル化物ナノシートを作製するとともに、さらに原子置換装置を立ち上げ、Se から S への元素置換を用いて、遷移金属硫化物ナノシートを作製して STM 観察と ARPES を駆使するバンド構造の解析を行い、へき開法で得られる単層とは異なる構造で、異なる超構造や電子状態を有することを見出した。これは競争が激しい二次元物質の研究分野で国際的に極めて高水準の独創的な技術と成果である。研究開始時の中心的テーマであるヤヌス構造については研究途中であるが、機械的加工による一次元リボンやゼロ次元ドット構造をつくり、エッジ状態などへの研究にも挑戦した。総合的には十分な目標達成状況である。

菅原氏のグループはナノ ARPES やナノテラスなど非常に環境を整えつつあり、世界トップの研究を推進できるポテンシャルを有する我が国の数少ない研究グループである。研究は純粋な基礎科学研究であるが、今後、経済的な価値に繋がる革新的な材料物性が得られた場合、科学技術や社会・経済への波及効果が生まれることが期待できる。

研究の進め方は、細かな努力を蓄積され、最終的には、従来の装置の完成度を大きく引き上げ、より高いレベルの成果をあげており、適切であった。予算は研究に必要な機器や材料の計画的購入に有効に使用された。研究成果は高レベルの国際誌に多く掲載され、プレスリリースも 4 件と積極的に行っている。さらに、本さがけ研究の成果が認められ、国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

菅原氏は、さがけ採択時から現在まで東北大学大学院理学研究科 准教授であるが、多彩な共同研究を進めながら、業績を上げたので、今後のキャリアアップを期待する。

今後は、菅原氏が開発した手法を利用した新規材料の作製と Nano-Terasu に設置する Nano-ARPES を用いた更に詳細な電子状態の解析に関する研究が発展し、研究領域を先導する役割を果たすことが期待される。自分の研究の独自性、優越性を異分野の人にも理解されるように背景を丁寧に説明して、さらに、多くの人から高い評価が得られるようになることを望む。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ケイ素鑄型分子を活用した金属自在集積

2. 個人研究者名

砂田 祐輔（東京大学生産技術研究所 教授）

3. 事後評価結果

砂田祐輔氏は、当初の研究計画として、多様な構造・次元性・Si-Si 結合の数を持つ鑄型分子を用いた金属ケイ化物クラスター分子の構築を展開してきた。パラジウムの 4, 5, 7, 11 核からなる平面状金属クラスターの合成に成功している。これをまとめて、ケイ素鑄型の構造と集積される金属種の構造の相関を解明しており、この成果はクラスターの自在合成に一步近づいたと言える。さらには当初計画の構造を反映した機能（触媒機能）の開拓を展開し、従来のパラジウム炭素触媒に比較して、極めて効率の高いアルケンの水素化反応を達成している。従来触媒では進行しない反応を効率よく進行させた点は特筆すべきである。さらに計画外の成果として、ケイ素化合物を鑄型として他の金属イオンやヘテロ元素の組み合わせを用いて研究を進め、特に可視光応答性の無い金属イオンである亜鉛イオンやカドミウムイオンと Si-Si 結合の組合せでは、呈色や発光などの可視光応答を見出した点は極めて面白い。

砂田氏の提唱する「鑄型合成法」は、独創的な着想に基づいた金属クラスターケイ素化物を合成する方法である。既にさきがけ研究で示したように、いろいろな金属イオンやpブロックヘテロ元素の組合せにも適用が可能と思われるので、国際的な認知度や評価も高まると予想される。また、新物質の基礎科学としての重要性が高いが、水素化触媒などの機能にも興味深い結果が得られており、社会への波及効果も現れてくることが期待される。

研究の進め方は、研究室のメンバーと一緒に、一步一步、確実に理解しながら、丁寧にかつ適切に進めてきた。予算もバランス良く、使用されてきた。

砂田氏は、さきがけ期間中に准教授から教授に昇進しており、キャリアアップに努めた。多くの論文を国際誌に報告し、プレスリリースを行った。本研究で得られた成果をもとに国際誌に総説を出版して新たな研究分野を開拓しつつあり、研究者としての飛躍につながった。

今後、ユニークな物質群を生み出す「鑄型合成法」という概念の国際的な認知度や評価を高めて、新研究領域としての展開を先導することを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 特異的原子配列が創るエキゾチッククラスターの開拓

2. 個人研究者名

塚本 孝政（東京大学生産技術研究所 講師）

3. 事後評価結果

塚本孝政氏は、研究開始時までに開発していた金属クラスターの対称適合軌道モデル（SAO）を拡張し、高次分子の概念まで拡張した。またそれらのモデルを実証するための様々な化学的・物理的性質をもつ分子を合成し、興味深い結果を得た。特に、活性化エネルギーがほぼゼロのNi₂₈系温室ガス変換クラスター触媒（CO₂ + CH₄ → 2CO + 2H₂）の発見やエレクトライドクラスター（Sn₂₈）の発見のインパクトは大きく、目標以上の成果が得られている。

クラスターの電子状態を元素に見立てた対称適合軌道モデルの提唱は、極めて独創的で挑戦的である。構築した理論モデルについては、今後の実験的証明やモデルのさらなる進化が必要だが、その適応範囲は極めて広い。また、表面ステップなどの触媒効果がある構造を取り入れる設計の指針としての理論は物質設計の上で重要であり、国際的に高水準の発展が見込まれる。

さらに、理論モデルは一般化すれば、ナノ物質の周期表の利用により、新物質や機能材料の探索がより効率的にできるため、科学技術への波及効果が大きい。高活性触媒となる金属クラスターについては、基礎的研究の色彩が強いが、クラスター材料科学の進歩が社会的な意義を有する材料に繋がる可能性はある。

研究の進め方は、異動による環境の変化が、計画に影響を及ぼしたが、理論科学や分光測定の特任家との共同研究が活発に行われ、適切であった。

塚本氏は、さきがけ期間中に、東京工業大学科学技術創成研究院 助教から東京大学生産技術研究所講師に異動し、キャリアアップに努めた。また、さきがけ期間中に、第72回進歩賞（日本化学会、2023年3月）、新世代研究所研究奨励賞（新世代研究所、2022年5月）、IIRウィーク優秀発表賞（東京工業大学、2021年8月）、Nanoscale Horizons Award（ナノ学会・イギリス王立化学会、2021年5月）、手島精一記念研究賞 若手研究賞（東京工業大学、2021年4月）を受賞した。さらに、本さきがけ研究の成果を国際誌 Nature Reviews Chemistry 及び Accounts of Chemical Research にアカウントレビューとして報告して新たな研究分野を開拓しつつあり、研究者としての飛躍につながった。

今後は、理論と実験を組み合わせたバランスの良い研究を行っているので、新研究室において、さらに、理論を発展させ、その有用性を実証して示すことによって、新しい研究領域を構築することを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 離散的配列ブロックに基づく人工タンパク質配列自在設計技術の開発と応用

2. 個人研究者名

中野 祥吾（静岡県立大学食品栄養科学部 准教授）

3. 事後評価結果

中野祥吾氏は、タンパク質配列中に隠された離散的配列ブロックを同定・利用することで、機能を制御した人工タンパク質設計を目標とし、配列ブロック同定アルゴリズム iAnglerNet を完成させ、離散的配列ブロックを最適化するアルゴリズム、GAOptimizer の開発を行い、それらのツールを用いた実証実験を進めた。また、実際に設計した組み合わせがタンパク質として機能しない場合に対する工夫も行っている。実際に同定したブロックは、空間構造を反映しており、従来の考え方と整合性も見えてきている。その意味で、配列ブロックなる考え方は成功していると評価される。さきがけ研究スタート時には、提案の基となる、タンパクの機能をコードするアミノ酸の離散的配列ブロックの存在がある筈だというアイデアを懐疑的に感じていたこの分野の研究者達も、この仮説を実証するための一連の研究を通じ、考えを変えつつあり、革新的研究成果である。研究成果を多くの論文として報告して高い評価を得られており、共同研究が進むなど目標以上のレベルに達している。これから研究成果が公表されていくにつれ、国際的な評価は更に高まるものと期待される。

アミノ酸配列の解析のみでタンパク質の機能まで導くことのできる中野氏の解析手法は、人工タンパク質の自在設計法として広く活用が期待できるものであり、科学技術及び社会・経済への波及効果は大きい。配列ブロック推定の精度が高ければ、新しい生物合成科学分野を拓く成果となりうる。

研究の進め方は、タンパク質の構造と機能に関する理論と実証の両輪の研究を、多くの国際誌の論文発表の他に特許の出願、またさきがけ研究領域内外での共同研究など、非常にアクティブにバランス良く行い、適切であった。予算については、研究室立ち上げに必要な設備等を適切に導入して短期間で大きな成果をあげた。

中野氏は、研究開始時は静岡県立大学食品栄養科学部 助教だったが、さきがけ期間中に静岡県立大学食品栄養科学部 准教授に昇進し、独立した研究室を立ち上げた。開発した GAOptimizer 法については Github 上で公開して新たな研究分野を開拓しつつあり、研究者としての飛躍につながった。

今後、中野氏が開発したプログラムが多くの研究者のタンパク質の構造—機能相関の研究に利用され、さらに国際的に評価されて、展開されることを期待する。とくに世界中に仲間を作り、情報系の機械学習などの専門家と共同ですすめるなど、研究の輪が広がり、配列ブロックとタンパク質の空間構造の関連性をより多くの場合に調べ、それらの関係の有無がわかれば、更に大きな発展が期待できる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 強相関ファンデルワールス超構造の創成

2. 個人研究者名

中野 匡規（東京大学大学院工学系研究科 特任准教授）

3. 事後評価結果

中野匡規氏は、MBE によるエピタキシャル成長技術を用いて磁性体、超伝導体、トポロジカル物質、励起子絶縁体などの様々な性質の二次元物質のファンデルワールス超構造を作製して、新しい物性を発現させることを目指した研究であり、自在配列制御という研究領域によく合致したテーマ設定である。当初から予定していた新物性だけでなく、層間へのインターカレーションによるアプローチは当初の想定と異なるもので、MBE で作製し、空気中で物性を評価するユニークなアプローチにより、創発フェロバレー強磁性の実証、巨大な超伝導整流効果の観測、特異な遍歴磁性の発見、新奇二次元磁性の開拓という四つの独創的な成果を上げた。論文掲載などにより、国際的に高水準の発展が見込まれる研究成果であることを示した。領域内共同研究なども行い、目標以上の達成状況である。

この研究は、二次元物質の構造制御と物性発現に関する基礎研究的色彩の強いもので、すぐに社会実装や経済に波及効果を与えるものではないが、作製できる材料の幅が広がり、予想を超える革新的物性が発現されれば、波及効果が期待できる。

研究の進め方は、研究室メンバーや領域アドバイザー、理論科学研究者と連携しながら適切であった。領域会議の度に新しいトピックスが報告され、研究は良く練られた計画の下で適切に進められた。その中で偶発的な結果を見逃さず、新しい方向性を打ち出したことは高く評価できる。

中野氏は、積極的にキャリアアップに努め、2024 年度より、他大学の教授に着任することが決まった。JST 創発的研究支援事業にも採択されており、研究者としての飛躍につながった。来年度より、新たに研究室を立ち上げ、本研究で得たシーズを基に自由で挑戦的・融合的な多様な研究を展開し、二次元物質の領域を先導することを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 準2次元金属の層配列制御による界面機能の創出

2. 個人研究者名

原田 尚之（物質・材料研究機構ナノアーキテクニクス材料研究センター 独立研究者）

3. 事後評価結果

原田尚之氏は、大きな仕事関数を有する PdCoO₂ をはじめとするデラフォサイト酸化物薄膜の電子物性と応用に絞った研究をテーマとしたが、ラシュバ分裂の決定、n-GaN などのワイドギャップ半導体との接合による良好なショットキーダイオード効果など基礎から応用に至る広い範囲で、設定目標を非常に高いレベルで達成した研究だと評価される。パワーエレクトロニクスへの応用だけでなく、採択時は強調されていなかった透明導電膜、触媒、配線材料など多様な応用を提案し、市販用のターゲットを開発するなど、企業との共同研究が複数発展している点は非常に素晴らしく、想定していなかった成果と言える。一方で、「自在配列」に最も合致する研究である層配列制御に関しては想定した進捗に達しているとは言えないが、総合的に判断して、目標は達成されたと判断できる。

デラフォサイト酸化物の金属相は電気伝導性が高いことで知られていたが、薄膜の研究はほとんどなかった。そのため、本研究は非常に独創性が高く且つ挑戦的であった。近年バルクでも薄膜でも論文数が増えてきており、原田氏は薄膜研究の先頭に立っているようで、さきがけ研究はこれに貢献できている。本研究の成果はデバイス応用に直結するため、今後さらに国際的に注目されると予想される。原田氏は、企業との共同研究を始め、応用の実証に向けた研究もすでに開始している。パワーデバイス等への応用が実現すれば社会・経済への波及効果は大きいと考えられる。その環境を整えて行く努力を重ねて頂きたい。

研究の進め方に関しては、高い物性を利用した重要なテーマを設定し、着実にそのテーマに関する成果を挙げており、適切だった。原田氏はさきがけ研究のスタートとほぼ同時期に東北大学金属材料研究所 助教から物質・材料研究機構ナノアーキテクニクス材料研究センター 独立研究者に異動し、キャリアアップに努めた。本提案は PdCoO₂ をはじめとするデラフォサイト酸化物薄膜に的を絞った比較的小規模の研究だったので、メンバーのいない PI になった原田氏にとって非常に良いテーマ設定となった。共同研究を積極的に行うとともに（フランスとの共同研究は有効であった）、企業との連携を図るなど、NIMS らしい材料研究を展開した。予算に関しては、新しい拠点でのスタートアップに必要な物品の購入に、有効に使われた。2023 年にさきがけ研究と深く関連した「層状酸化物の表面分極を利用したヘテロ構造デバイスの研究」のテーマで文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞し、研究者としての飛躍につながった。

原田氏は、基礎研究で高い成果を出しながらも、社会実装を視野にいれた取組も精力的に行っており、研究のバランスが大変良い。基礎と応用のいずれも継続し、層配列制御の研究や、より広い物質群での物性特性探索を進めて、国際的に高い評価を得て、本研究領域を先導することを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： らせん状 π 共役分子の自在配列によるキラル分子機能の創出

2. 個人研究者名

廣瀬 崇至（京都大学化学研究所 准教授）

3. 事後評価結果

π 拡張型らせん状分子は、広く興味を持たれる物質群であるが、その合成に手間がかかるため、多くの研究者が参入するには至っていない。廣瀬崇至氏は、合成の難しい様々な化学構造の π 拡張型らせん状分子を、独自の合成手法を駆使して系統的に合成し、それらの新しい分子の構造解析、量子化学計算、円偏光発光特性(CPL)、SQUID、キャリア移動度、分子ばね特性測定など、ユニークな構造に基づく特性を明らかにし、研究目標を概ね達成した。ただし、当初から期待されていた、らせん状の電気伝導経路に由来する「分子ソレノイド特性」や、「有機スピンフィルター特性」の発現について未達なところがあった。一方、キラルカラム構造に関して結晶的な物性への挑戦を行い、分子間相互作用に関してもキャリア移動度との相関を解析するところまで展開しており、目標以上の成果が含まれている。二重縮環型キラル π 拡張型らせん状分子の研究成果が高レベルの国際誌に掲載されるなど、多くの論文を著して十分な成果を上げた。多くの課題を並列して進めているため、ある特定分野で大きな成果を達成したというより、新しい研究分野を切り拓いている途上と判断される。

廣瀬氏は、積極的な人的交流や研究室メンバーとの共同作業によって、研究を加速させた。当初の計画に比較して、合成を軸に据えた研究になったが、最初から発散するよりも、ある項目を重点化して進めるやり方で、確実に独自技術を構築できた。物性計測等に関し、他のさきがけ研究者とのコラボレーションに向けて活動しており、適切な研究の進め方をした。

予算は殆ど物品費に充てられており、各年度比較的均等に使われていることから、有効にバランスよく使われている。さきがけ研究の開始時の京都大学化学研究所 准教授からの職位の変化はなかったが、研究室を整え、研究環境としては良くなったので、キャリアアップに努めたと言える。令和4年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 をさきがけ研究と深く関連した業績名「らせん状分子の光機能と機械的物性に関する研究」で受賞し、また国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

今後は、らせん状 π 共役分子の科学については、合成は長鎖になるとますます難しくなると思われるが、それを克服して、この研究領域を拡大、先導していただきたい。例えば、研究提案に示されている長鎖のらせん状高分子への分子ソレノイドとしての性質が発見されれば、科学技術及び社会的波及効果は更に大きくなると予想される。また、膜張力プローブ分野のように、従来の物質にゴールドスタンダードが存在しない領域を目指すことも期待したい。領域会議などで活発に発言し、領域を活性化するだけでなく、いろいろな分野の研究に興味をもって、さきがけ研究を楽しんでいたのも、現在の積極性を継続し、自分の専門領域を狭く設定せず、いろいろな領域に、他との連携を通してチャレンジしていくことで、研究の幅と深さが増していただくことを期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 液体中のイオン・分子配列制御と電気化学新機能の開拓

2. 個人研究者名

山田 裕貴（大阪大学産業科学研究所 教授）

3. 事後評価結果

山田裕貴氏は、配列的特徴に起因する電解液新機能を開拓し、新規電気化学デバイス・反応の概念実証を行うという目標に対し、リチウム塩の水和融体に加えて、ナトリウム塩、カリウム塩、セシウム塩、フッ化物イオンの水和融体まで展開し、それらの中で幅広い電位窓を有する水和融体の発見、高いイオン伝導性を示すフッ化物塩水和融体の発見、ATR-SEIRAS を用いた電極表面の in-situ 解析による電位窓拡張のメカニズムの解明を達成した意義は大きい。更に、水和融体の利用により、CO₂ の電気化学還元反応において、H₂ の生成を抑制し、特定の炭化水素の選択性が向上した点は、水和融体利用のメリットを示すものとして今後の展開が期待される。その結果、4V 級水系電池が出来る可能性が示され、実用化に向けた技術蓄積が着実に進んだと評価できる。いずれの研究も、水分子の配列制御に深く関連するもので、本領域のスコープに良く合致した内容である。材料の多様性に関しては、性能改善に止まらず、新たな構成を検討しより高い性能発現に繋げるという、挑戦的研究であった。新しい二次電池に関する技術は、エネルギー問題に直結する世界の最重要技術の一つであり、本研究の成果は、国際的に大きな発展が期待できるものであり、社会・経済に与えるインパクトは非常に大きなものである。

山田氏は、さがけ期間中に、東京大学大学院工学系研究科 准教授から大阪大学産業科学研究所教授に異動・昇任し、キャリアアップに努めた。異動と、それに伴う研究室の立ち上げなどで、思うように実験ができない中、リソースに合わせた研究を遂行し、着実に研究を前に進めた。材料開発など、新たな発想に基づく段階的な検討がなされており、研究のマネジメントは非常に良かった。また、予算は研究室の立ち上げに、有効に使われた。研究室が立ち上がった後に人的リソースを増やしたようで、予算執行は適切だった。また、本さがけ研究の成果が認められ、国際学会の招待講演が増え、本分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍につながった。

今後は、優れた研究成果を論文として目に見える形で世に出すとともに、研究に終わらず、是非実用化につなげることを期待する。電極表面の解析など、科学的理解を重視した非常に丁寧な研究スタイルは継続され、還元側の水素発生を如何に抑制するかが、高電圧二次電池への水系電解液の応用の鍵と考えられるので、新しい電解液の設計指針の構築とともに、キラーアプリケーションを探索して頂きたい。