

## ERATO 北川統合細孔プロジェクト事後評価（予備評価）報告書

【研究総括】 北川 進 （京都大学物質－細胞統合システム拠点副拠点長／教授）  
Omar M. Yaghi (Professor, Department of Chemistry and Biochemistry and  
Molecular and Medical Pharmacology, University of California,  
Los Angeles (UCLA))

### 【評価委員】（五十音順）

岩本 正和 （委員長：東京工業大学 フロンティア研究機構 教授）  
大久保達也 （東京大学大学院工学研究科化学システム工学専攻 教授）  
佐田 和己 （北海道大学大学院理学研究院化学部門 教授）  
寺崎 治 （韓国科学技術院(KAIST)、ストックホルム大学 教授）  
府川 伊三郎 （福井工業大学産業ビジネス学科 教授）

### 評価の概要

ERATO 北川統合細孔プロジェクトは、有機配位子と金属イオンから成る多孔性配位高分子（Porous coordination polymer: PCP）の機能を体系的に確立し、新規な機能性物質群の創製とこれまでにない機能発現の場を開拓することを研究構想として掲げ、2007年にスタートした。本研究では特に PCP の化学的合成の体系化に加え、外的刺激により細孔構造を制御するという、既存の PCP では実現されていない新規な機能性細孔材料の創出を目指している点で独創的かつ挑戦的である。

プロジェクトではこの構想を実現するため、外的環境等の変化に応答して細孔機能を発現する PCP、PCP と PCP あるいは他の材料とのハイブリッド化による複数機能の発現、それらの応用展開と、3方向からのアプローチを実施する体制で研究を推進している。その結果、これまでの約4年間の研究で、オリジナリティの高い、多くの研究成果が報告されている。中でも、細孔に吸着するゲスト分子や外的環境に応答しフレキシブルに細孔構造が変化する PCP を創出し、包接あるいは吸着機能の制御を達成したこと、この PCP のガス吸着特性と細孔構造変化の関連を解明したこと、PCP の結晶成長機構の解明とその制御に成功し、ハイブリッド PCP の創製を実現したこと等は、従来の概念を大きく超える成果であり、特筆に値する。これらの知見は、ガス吸着材料や触媒材料、生体材料、電子デバイス等、これまでに想定されていなかった領域での新規材料としての利用拡大に繋がる可能性があり、プロジェクト終了後も研究のさらなる深化や応用が期待できる。

一方、プロジェクトの運営に関して付言すると、上記のように新規かつ科学的意義が非常に高い研究結果が次々と生み出されていることは、先に挙げた研究のアプローチ及び体制がうまく機能した結果と言える。また、様々な結合様式を取り込んだ PCP の設計を検討するた

め、多孔性物質の豊富な合成ノウハウを有する Omar M. Yaghi 教授（カリフォルニア大学ロサンゼルス校）と研究情報を共有し、緊密な連携で国際共同研究を進めて来たことは研究の高度化の観点から極めて有用であったと考えられる。

以上、ERATO 北川細孔プロジェクトは、有機配位子と金属イオンの自己集合により合成される PCP について、合成方法の確立、ナノサイズ細孔への様々な機能・応答性の付与、触媒等への応用展開等の諸分野において斬新な成果を挙げ、世界をリードする研究展開が実現していると言える。本研究では、北川研究総括が目指している「世界で初めて扉を開けた研究」が実際のものとなっており、戦略目標「プログラムされたビルドアップ型ナノ構造の構築と機能の探索」に資する成果が十分に得られると期待される。

## 1. 研究プロジェクトの設定及び運営

### 1-1. プロジェクトの全体構想

ゼオライトや活性炭等の多孔性材料は古くから石油工業における分離材料や環境の浄化用材料として広く使われている。一方、近年、有機配位子と金属イオンから成る多孔性配位高分子（Porous coordination polymer: PCP）という新しい有機-無機複合材料が見出された。しかしながらこの構造体は、共有結合やイオン結合よりはるかに弱い配位結合によって形成されているため、安定性に問題を抱えていた。このため、物質内部の細孔空間にゲスト分子を取り込ませることが出来ても、これを取り除いた瞬間に構造体が崩壊してしまうことが多く、多孔性材料としての利用は困難であった。北川研究総括は 1997 年に内部のゲスト分子を取り除いても安定な構造を保つ PCP を世界で初めて合成し、その化合物がメタンを吸蔵、脱着できることを実証した。ガス分子が脱着しても壊れず、安定した構造を保つ PCP の報告は、配位高分子の定説を覆すものであり、世界中の多くの研究者の注目を集めた。また、多くの追随研究を誘起し、大きな新しい流れが出来上がっている。

現在、個々の研究を眺めると、世界中で様々な PCP が合成され、素晴らしい特性を示す PCP が報告されていることは言うまでも無いが、PCP を特徴付ける普遍的な構造及び機能（普遍的属性）の解明、即ち体系的な理解まではまだ進んでいないと言わざるを得ない。これに対し ERATO 北川統合細孔プロジェクトでは、多孔性配位高分子から成る新しい機能性細孔材料の創製はもちろん、これに付随する普遍的属性を体系的に確立すること、さらにはこれまで想像もされてなかった機能を発現させることを目指して研究を開始している。

これらの目標を実現するため、本プロジェクトでは「多能性細孔」「融合細孔」「応用細孔」の3チーム体制を組んでいる。まず、「多能性細孔」グループでは、PCP を構造的あるいは電子的に応答・変化させ、従来に無い特異な吸着機能や分子変換機能を系統的に発現できる PCP の創出を目指すこととしている。即ち、個々の PCP を用途別に合成する従来型の手法の代わりに、PCP の一般性・特性を解明し、それを利用して新たな用途へ適用する方策を提案することを企画している。具体的には、まず細孔表面の活性化やゲスト分子・電場・光・圧力等の外部刺激に対する PCP の応答性、即ち細孔の構造及び機能の変化を究明する。次いで、これに基づいて外的環境に応答するために必要な細孔構造、吸着等の機能の一般化を図り、機能制御可能な PCP を創出することとしている。「融合細孔」グループでは、この PCP を用いて異なる機能を有する PCP 同士の組み合わせ、あるいは PCP と他の細孔材料の組み合わせ技術を開発し、複数の機能が同時に発現するハイブリッド材料を創出している。本グループの後者の研究では、ナノメートルサイズ領域において様々な材料と融合し、複数の機能を併せ持つ新規 PCP の創製を目指している。PCP と融合させる材料としては例えば数十マイクロメートルサイズの細胞やナノメートルサイズの電子デバイスの基板表面などを考えている。北川総括はこのような新しい機能性細孔物質を統合細孔と定義付け、これまで想定されなかった領域で利用できる細孔物質の可能性を探求することとしている。この研究において PCP そのものの結晶成長メカニズムの解明とその応用の研究は不可欠であり、本グループ

では PCP 結晶の成長機構を解明し、結晶のサイズや形状の制御が可能な PCP の合成法を開発することも目標としている。一方、これらの研究の途上で多孔性構造の柔軟性や細孔に取り込んだガスや溶媒分子の挙動がバルクとは大きく異なることが明らかになって来た。そこで、本プロジェクトで創出した多孔性材料が実際の工業材料に利用できる可能性を検討するため、プロジェクト遂行途中の 2010 年 4 月に、「応用細孔」グループを立ち上げ、追加のアプローチを開始している。

本プロジェクト開始当時、類似の分野では金属-有機構造体（Metal organic framework: MOF）の名称で多くの研究が実施されていた。世界的に突出した成果を出していたのは米国（Yaghi ら）、フランス（Ferey ら）の研究グループであるが、前者では主に水素吸蔵能力の向上に、後者では MOF のフレキシビリティあるいはゲスト吸着能の向上に終始していた。本プロジェクトでは、これらとは異なり、PCP における構造と機能の相関関係の一般化・普遍化、統合細孔という新しい概念の確立に重点を置き、構造制御が可能で様々な機能を併せ持つ細孔材料の創出及びその機能発現原理の解明に取り組んでいる。この挑戦は極めて独創的であり、既往の研究の単純な横展開では達成できないものである。本プロジェクトから発信されている新原理や新たな機能性細孔材料は、世界中で追試や拡張研究が行われており、新しいサイエンスが切り開かれつつあると考える。

## 1-2. プロジェクトの運営

本プロジェクトでは研究構想を実現するため、多能性細孔グループ、融合細孔グループ、そして応用細孔グループの 3 グループを設定している。多能性細孔グループは、外部の環境や刺激などに応答して適切な機能を発揮する機能性細孔材料の創製に挑戦するために設置された。融合細孔グループは、機能が異なる PCP 同士あるいは PCP と他の細孔材料とを組み合わせ、PCP 結晶一粒が複数の機能を有し、様々な環境に対応できるハイブリッド材料の開発を目指すために設置された。さらに、多能性細孔及び融合細孔グループで得た基礎研究の成果の応用展開を図るために研究期間途中で新規に組織されたのが応用細孔グループである。プロジェクト期間中に、研究成果の社会還元を念頭に、新たな研究グループを設置した柔軟な対応は高く評価できる。これらの研究体制から、本プロジェクトが基礎研究を重点としつつも、応用まで広範に考慮されたものであることが見て取れる。基礎研究によるイノベーション創出という観点から高く評価できる。

本プロジェクトに参画した研究者の専門分野は、錯体化学、有機化学、高分子化学、無機化学等の化学分野に加え、超分子科学、結晶学、界面電気化学、電子工学など、幅広い分野に渡っており、分野横断的な研究チームの結成が意図されていることが理解できた。これらの編成により、新規性の高い研究構想を実現できる可能性が感じられる。ただ、PCP を特徴づける普遍的な構造、機能の中には、物理的な事象も含まれる可能性があるため、今後はその分野の研究者の参画（あるいはその分野の研究者との議論）が考慮されても良いと思われる。

また、各グループが若手研究者を中心に組織されているばかりでなく、グループリーダーにも若手を積極的に登用しており、研究分野の推進や広がり意欲的に取り組んでいる様子が伺える。プロジェクト発足から4年間で発表論文数が57報、国内外の会議・学会での発表件数が300件超に達していること、さらに研究員の国内外での受賞が多いこと等は本プロジェクトの活発な活動の証であろう。さらに、多くの研究員が国内外の大学・研究機関に採用されており、本プロジェクトが若手研究者育成の場として有効に働いていると評価できる。プロジェクト研究員のプロジェクト在籍期間が比較的短いことは、長期的なあるいは腰を据えた研究という意味では気になるところであるが、昨今の博士研究員の求職のしにくさを考慮すると、本プロジェクトを巣立った方々の高い能力（そのような能力が本プロジェクト研究で身につけたこと）を表していると考えられ、むしろプラス要因と考えるべきであろう。

本プロジェクトは国際共同研究タイプ（ERATO International）として運営されている。研究相手は、カリフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA）の Omar M. Yaghi 教授である。Yaghi 教授は、多孔性物質の合成及び機能解明の分野において世界的に高名な研究者である。本国際共同研究では、Yaghi 教授のグループで開発された新しい多孔性物質のうち、特に共有結合性有機構造体（Covalent organic frameworks: COF）に焦点を当てて共同研究を実施している。PCP と COF の結合様式は、それぞれ配位結合と共有結合である。本プロジェクトにおいて PCP 用に研究開発した技術を COF に適用することの可能性・妥当性、可能であった場合の細孔物質の機能の変化、さらには結合様式の多様化による新しい材料創出の可能性等を検討することができる。逆に、UCLA 側の設計・合成ノウハウを本プロジェクトに取り込み、COF 創製によって得られた知見を新規な PCP 材料の展開に反映できるかもしれない。これらの観点から、Yaghi 教授グループとの間に補完的研究体制が構築されていると評価できる。

## 2. 研究成果

### 2-1. 多能性細孔グループ

本グループでは、PCP に化学的／物理的操作を加えることで細孔表面を活性化させて吸着能を増大させること、特異な環境下に置くことにより PCP を構造的あるいは電子的に応答・変化させ、従来に無い特異な吸着機能及び分子変換機能を発現させること、即ちフレキシブルな応答性細孔の創出を試みている。

まず、酸化還元サイト、カウンターアニオンサイト、強酸性基、オープンメタルサイト等を導入することで、細孔表面の性質を改質（活性化）し、より高い吸着機能を持つ機能性細孔材料の創出に成功している。これらの成果は吸着材や触媒材料への利用を期待させるものである。実際、酸化還元サイトを細孔表面に導入した PCP が選択的なガス吸着材として機能すること、強酸基を導入した PCP がセルロース等の分解反応触媒として機能することなどの知見が得られている。

応答性細孔についても新機軸を打ち出している。ゲスト分子応答、光応答、熱応答、電場応答などの応答性を有する新しい細孔材料を創出し、ガス吸着能の向上と吸着挙動の解明に成功している。中でも、フレキシブルな構造変換を水素結合等で制御し、ゲスト分子の吸着特性を変化させるゲスト応答性細孔の研究は特筆されるべき成果である。この場合、合成時の溶媒分子の脱着による PCP 分子構造の変化を詳細に観察し、いくつかの結晶構造をとりながら最終的には非多孔性結晶となる過程を明らかにしている。さらに、その逆過程として水の吸着が 4 つのステップで起こり、水素結合の有無がキーとなっていることを明らかにした。また、光応答性の研究では、光照射による吸着能の制御が可能であることを実証し、オンデマンド型吸着に道を拓いた。これらの成果は、効率的なガス分離・除去材料の応用展開に繋がるものと期待される。

さらに、微細な構造解析・評価をその場観察 (in-situ) することにもトライし、SPring-8 の粉末 X 線回折ラインを用いて所期の目的を達成している。この時点で、構造解析分野の研究として世界トップレベルの成果が出ているのであるが、本研究グループは吸着挙動のメカニズムを真に解明するには吸着が起こる圧力、温度の各点においてリアルタイムに構造的、分光学的情報を収集し、吸着に伴う構造変化やゲスト分子の状態を明らかにする必要があると考え、さらなる検討を行っている。本グループは、吸着挙動のリアルタイム解析のため、吸着・粉末 X 線回折同時測定装置、吸着・赤外分光同時測定システム、及び吸着・ラマン分光同時測定装置を開発している。これら測定装置により吸着実験と構造解析・評価が同時に実施できるようになったため、研究全体が一段高い水準に押し上げられたと感じる。特に、吸着・粉末 X 線回折同時測定装置は、PCP 細孔の持つ構造のダイナミクスな変化を調べる上で必要不可欠な装置であり、細孔へのガス吸着現象の理解を深めることが可能になったと言えよう。

今後のさらなる研究展開として、これらの現象における統一的な原理の確立を期待したい。例えば、ガス吸着の機構には表面の結晶欠陥由来のものとはバルク由来のものがあるとの報告があったが、それぞれの吸着機構を定量的に観察する必要があると思われる。吸着に伴う構造変化の観察が可能な、本グループ開発の吸着・X線回折同時測定装置を駆使し、ガス吸着の挙動解明とそれに伴う構造変化を明確にすることができれば、この課題に対する回答を得ることができるであろう。

## 2-2. 融合細孔グループ

本グループでは、PCP と様々な材料の融合（ハイブリッド化）、特に細胞等の生体物質や電子基板等のナノメートルサイズの物質とのハイブリッド化を達成し、微小空間において元々の PCP の機能と融合させた材料の機能が同時に発現する材料の創出を目的として研究を行っている。

一般に、金属イオンと有機配位子を用いて PCP を合成すると、サイズ・形が不揃いなマイクロメートルサイズの大きさの結晶が得られるのみである。PCP の細孔結晶をビルディングブロックとして機能性材料を創製するためには、機能性の付与と共に、そのサイズをナノ

メゾ領域において制御する必要がある。しかし、PCP の結晶成長メカニズムは未だ不明な点が多く、PCP の結晶サイズを自由に選択しながら合成する手法は確立されていなかった。これに対し、本グループでは結晶成長における金属イオンと有機配位子の間の相互作用を制御するためには、元になる PCP がどのように結晶成長するかを理解する必要があると考え、PCP の自己集合化過程の解明とその制御を検討することとした。本グループのこのアプローチ法は妥当であり、新規な材料合成法の開発に効果的であると判断できる。本グループは、精力的な検討の結果、PCP の結晶成長メカニズムを明らかにし、任意のサイズ・形状の PCP の合成が可能になる新しい合成方法「配位モジュレーション法」の開発に成功している。PCP の合成において、結晶サイズや形状の制御に成功したことは画期的である。

PCP のハイブリッド化は、1 つの PCP の上に別の PCP を成長させる、1 つの PCP を他の細孔材料に組み込む、の二観点から検討されている。まず前者では、PCP 単結晶上に同型の骨格構造を有する結晶を成長させるため、結晶界面を制御しながらヘテロエピタキシャル成長を試みている。その結果、1 つの結晶で様々な機能を併せ持つハイブリッド型 PCP の創製に成功している。例えば、高い分子選択能と高い貯蔵能を有するハイブリッド PCP を創出し、一般的にはトレードオフの関係にある分離性能と吸着容量の両立に成功している。

次に、PCP 以外の他の細孔材料とのハイブリッド化に挑み、PCP 結晶表面の配位子交換反応を利用して、PCP 結晶表面に他の単分子膜を構築することに世界で初めて成功している。夢の材料と言われている表面一層制御に大きく近づいた材料として高く評価できる。また、水晶振動子固定 PCP によるセンサー検出感度向上に成功する等、これまで PCP が使用されなかった領域に PCP の利用の場を拡げることが可能であることを示しており、今後の展開が期待される。

本グループの研究では、合成的試みと構造・物性解析がよくマッチしており、機能性細孔材料の概念を飛躍させる大きな成果と考えられる。ただし、ナノ空間のヘテロ接合やナノ空間を集積場に用いる検討は、既に 1990 年代半ばにゼオライトやメソポーラスシリカを用いて行われている。これらの既往の研究と比較することで、本研究の特性がさらに明確になるとともにさらなる発展が期待できると思われる。

### 2-3. 応用細孔グループ

近年、PCP の中で酸・塩基耐性を持つものや、耐水・耐熱の機能を有するものが見出されてきており、実社会で役立つ機能材料としての検討も行われ始めている。本プロジェクトでは PCP の多孔性構造の柔軟性や、細孔に取り込まれたガスや溶媒分子がバルクとは異なる挙動を示すことを明らかにしている。これらの基礎的事象の解明を実社会での活用に拡張するため、即ち PCP を基盤とした新規多孔性材料の応用展開を検討するため、当初の研究計画に追加する形で、第三研究グループ、応用細孔グループが研究期間の途中（2010 年 4 月）で立ち上げられた。

PCP はガス吸着・脱離の過程で細孔構造が大きく変化するなどの構造柔軟性を有する。本グループでは、柔軟な構造を有する gate-open 型の PCP とタイプ I 型吸着性を示す PCP が

相補的に固溶する場合があること、その固溶の程度を調整すると混合ガスからの二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の選択的分離が可能になることを見出している。本系では極めて低いエネルギーで高選択的な分離が可能になっている。この知見は実用化のシーズとなる可能性があると思われるが、実用化のためには競合技術とのさらなる比較検討が必要であろう。

固体イオン伝導体は電解質やガスセンサーなどに応用可能であり、非常に重要な機能性材料の一つである。これまで有機高分子や無機酸化物など様々な材料を用いたイオン伝導体が開発されているが、固体構造中に運動性の高いイオンを共存させることは一般的には大変困難なため、伝導性の向上が求められている。また、燃料電池分野では一般的に無加湿・中温領域（100～300℃）でのイオン伝導が困難とされており、この領域で伝導性を示す材料の開発が望まれている。本グループでは、高いプロトン伝導性を示す PCP 複合材料の合成を試み、無加湿・中温領域でプロトン伝導性を示す材料の開発に成功している。これは、PCP の多孔質構造ゆえに実現できたことであり、革新的な成果である。今後、現在の燃料電池用高分子膜材料である「ナフィオン」（デュポン社製）と同等の伝導度を達成する等のさらなる改良を期待したい。また実用化に際しては、現状のペレット形状から膜状へ形態転換する工夫が求められるであろう。耐水性改良も必須である。種々の課題が山積しているが、さらに発展することを期待したい。

### 3. 総合評価

本プロジェクトは、PCP の機能原理を確立し、従来の固体材料に無い新たな機能性物質群を創出するとともに、PCP の応用分野（機能発現の場）においても新たな成果を挙げている。本プロジェクトの報告に基づいて他のグループの研究者が水平展開を図っている事例、あるいは本プロジェクトの成果を拡張した報告が数多く見られることは、本プロジェクトの独創性の高さを証明していると言える。これまでに得られた研究成果は当初設定された研究構想の実現に資するばかりでなく、新たな研究分野の開拓に貢献しており、研究の進捗状況は十分なレベルに達していると考えられる。

従来の PCP の概念から大きく進展した成果としては、まず細孔に入るゲスト分子や外的環境に応答してフレキシブルに細孔構造を変える PCP 材料の創出に成功したことがあげられる。これらの機能を、ガス吸着装置と連動した各種分析装置で解明し、PCP のガス吸着挙動の究明に成功したことも注目できる。また、結晶成長制御が可能な新しい PCP 合成法（配位モジュレーション法）の開発、それによる結晶成長機構の解明と結晶サイズ制御を達成していることも特筆できる。ハイブリッド PCP の研究分野では、基礎的な事象の解明ばかりでなく、それらを応用した、PCP と他材料のハイブリッド材料の創出に成功している。さらに、PCP を基盤とした新規の多孔性材料の応用展開を検討し、選択的なガス吸着能を有する固溶化 PCP あるいはプロトン伝導性の高い PCP 複合材料を合成し、これまでの概念を超えた PCP の創出に成功している。

これらの研究成果は本プロジェクトに属する研究者の独創的な挑戦によって達成されたものであり、PCP の分子論的挙動の解明に有用なばかりでなく、今後の新規な展開を可能にす



ると考えられる。例えば創出された新しい機能性細孔材料は、ガス吸着材料や触媒材料、生体材料、電子デバイス等への応用が可能になるかもしれない。これらの利用法は、PCPの利用そのものがこれまでに想定されていなかった分野にまでPCPが浸透することを意味している。本研究でも検討されているCO<sub>2</sub>吸着材としての応用は地球温暖化対策として機能する可能性がある。もちろん実用化までにはさらなる工学的研究が必須であり、企業参画なども含め、長期的な視点で考えていく必要があるが、新たな産業・社会的価値を生む可能性が認められることは高く評価できる。

以上、本予備事後評価会で報告された成果は卓越したものであり、ERATOの研究成果として相応しい業績である。北川研究総括の独創的な発想と、若手研究者の意欲的な取組が大きな成果に結実しつつあるものと高く評価している。

最後に、残る研究期間における要望を挙げて本報告書の締めとしたい。まず、合成分野での大きなブレイクスルーを期待したい。例えば、融合細孔グループで種々の結晶形状の制御が試みられ、多くの成功を収めているが、PCP結晶の最小の基本単位の集合（組み上げ）方法については、現段階では未だ体系化された合成法という段階に達していないと感じる。PCPの合成についてさらに解析を行い、体系化することにより、汎用化することを提案したい。合成法の体系化への取組は、本プロジェクト自ら行うことはもちろんであるが、それだけではなく、合成における出発物質、温度、濃度、時間等の合成条件と生成物の関連などのトライ&エラーを積極的に外部に発信することで、プロジェクト外の研究も含めて進展が図れるのではないかと考える。併せて実用化を見据えた高収率な結晶合成手法の確立についても検討を望みたい。

一方、PCPを特徴づける普遍的な構造、機能の体系的な確立については、まだ十分とは言えない。北川総括は、本プロジェクトで創出された細孔材料の概念を「フレキシブルに構造変化することで機能が付与する柔軟（ソフト）な材料」と定義しているが、ゼオライトやメソポーラスシリカ、炭素材料等の他の細孔体をも包含する統一的な物質観を形成あるいは提案することを強く望みたい。このような統一概念の確立によって本プロジェクトで創出されたPCPの特徴がさらに明確に示されることとなろう。

本プロジェクトが4年間という短い期間に、科学的側面での成果を着実に積み重ねながら、新規な現象を見出すとともに、新規な概念を構築していることは高く評価できる。得られた成果の深化並びにその応用の更なる展開を大いに期待するものである。本プロジェクトの成果が、今後「社会貢献」と認知されるほどの科学技術に育つことを期待している。

以上、ERATO北川細孔プロジェクトは、オリジナリティの高い研究構想を策定し、それを実現するための研究方法及び研究体制を整備していることはもちろん、PCPの全く新しい機能制御法の確立、高機能ハイブリッドPCPの創出、CO<sub>2</sub>の選択的分離等に成功し、国際的に高く評価される研究成果を挙げている。このことから、戦略目標「プログラムされたビルドアップ型ナノ構造の構築と機能の探索」に資する成果が十分に得られると期待される。

以上