

フェムト量子多体系で探る物質の起源～量子時代に輝く人材育成

	研究代表者	東京大学・理学系研究科・教授 中村 哲 (なかむら さとし) 研究者番号：50280722
	研究課題情報	課題番号：25K24464 研究期間：2025年度～2031年度 キーワード：フェムトメートルスケール、クォーク多体系、バリオン多体系、グルーオン多体系、量子色力学

この国際共同研究の重要性・面白さは何か（研究の目的と意義）

●フェムトメートルスケールの世界から、「物質の起源と進化」に迫る！

私たちの体や身の回りの物質は、どこから生まれ、どのように現在の姿になったのか。この問いは、現代物理学における根源的な課題の一つである。本国際共同研究は、その答えを探るために、髪の毛の太さの約1兆分の1という極微の世界、フェムトメートル（ 10^{-15} m）スケールに踏み込む。このスケールでは、物質は量子力学に支配された全く異なる姿を示し、粒子が集団として振る舞うフェムトスケール量子多体系が現れる。

●3つの量子多体系と、それを切り拓く3つの国際共同実験

物質の世界は、観測する大きさによって主役となる自由度が変化する階層構造を持つ。本研究では、フェムトメートルの世界に現れる次の3つの量子多体系(図1)に注目し、それぞれを我が国が牽引する3つの国際共同実験によって調べる。

第一に、高温・高密度の極限状態では、物質の最小構成要素であるクォークが自由度の主役となり、クォーク多体系が形成される。この量子系は、CERNで行われているALICE実験により研究され、初期宇宙に存在した高温物質の性質を明らかにする。

第二に、原子核の世界では、陽子や中性子、ハイペロンといったバリオンが集団として振る舞い、バリオン多体系が現れる。この量子系は、米国のJefferson Lab (JLab) 実験によって精密に調べられ、原子核物質の構造と相互作用の理解を深める。

第三に、クォーク同士を結びつける強い力を担うグルーオンの集団的な性質は、グルーオン多体系として発現する。この量子系は、今後本格稼働するElectron-Ion Collider (EIC) 実験によって初めて精密に探究され、物質内部における力の起源に迫る。

●個別研究を越える！フェムト量子多体系物理学の創成

これら3つの量子多体系は、互いに独立した存在ではなく、ミクロな物質を異なるスケールと視点から見た姿である。したがって、それらの関係性を統合的に理解して初めて、「物質の起源と進化」に迫ることが可能となる。本研究では、3つの国際共同実験と理論研究が緊密に連携し、個々の成果を横断的に結びつける。これにより、量子多体系に共通する普遍性と、その違いが生じる物理的機構を明らかにし、従来の枠組みを超えた新たな物理学、すなわち「フェムト量子多体系物理学」の創成を目指す。

●量子時代に輝く研究者を育てる

本国際共同研究は、科学的発見の創出にとどまらず、人材育成においても重要な役割を果たす。ALICE、JLab、EICという異なる実験を横断し、実験と理論を結びつける研究経験を通じて、若手研究者は広い視野と国際的な感覚を身につけることが可能である。フェムトメートルの世界を舞台に、物質の起源と進化を解き明かすと同時に、将来の国際研究を牽引する「量子時代に輝く研究者」を育成することが、本研究の大きな目的である。

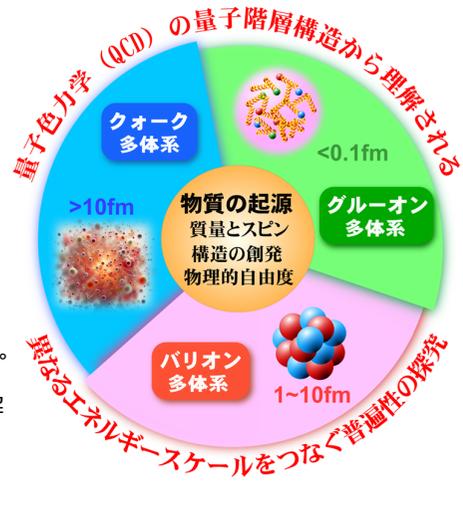


図1 クォーク、バリオン、グルーオンから構成されるフェムトスケールの量子多体系研究

誰がこの国際共同研究を行うのか（優れたグループによる国際共同研究体制）

本研究は、図2に示すような世界各国の第一線で活躍する研究者を中心に、国内外のアクティブな研究者および若手研究者によって実施される。米国ジェファーソン研究所(JLab) CEBAF加速器を用いてハイパー核研究を展開する研究者、欧州核物理研究機構(CERN)LHC ALICE実験を牽引する研究者、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL) で準備が進んでいるEIC-ePIC計画を主導している国内外の第一線で活躍する研究者らが実施する。これらの研究者が推進する実験研究に加え、スパコン、AI および量子計算などの先端技術を取り入れ従来のスケール毎の現象論的モデルによる解析の枠組みを超越した理論研究を展開し、QCD第一原理計算に基づき異なるスケールの壁を突破する。

図2 本研究を推進する国内外の第一線で活躍する研究者

本国際共同研究は、開発段階や研究位相の異なるALICE、JLab、EIC実験プロジェクトを戦略的に連携することで、各量子系の知見を相互に還元・展開しながら階層を超えた理解へと繋げることが可能である。

どのように将来を担う研究者を育成するのか（人材育成計画の内容）

●量子時代に輝く人材を育成

本国際共同研究では、国内外の研究グループが研究目標に向かい緊密に連携したネットワークを形成する。国内の主要な研究者がプラットフォーム構築に参画し、若手研究者が継続的に多彩な研究に参加する機会を提供する。国内外で展開する当該分野のプロジェクトの横断的なプラットフォーム化によりこれを実現し、第一線の研究者のメンターのもとで日本の若手研究者がそれぞれの研究で主導的な役割を果たすべく、その育成を図る。このように世界を舞台として海外研究者とともに研究活動することで、最先端を切り拓き、将来の国際研究プロジェクトをリードする量子時代に輝く人材を育成する。これにより、実験、理論両面からの研究および素粒子や宇宙など周辺領域における研究への波及効果も狙う。

●本計画で実施する若手育成計画

本計画では、若手研究者の海外派遣、国際ワークショップ、各種セミナー、スクール等を活用した海外研究者の国内招聘に加えて、自分の専門分野とは異なる専門性を持ったメンターとの共同研究を行うことで若手研究者が新たな専門性を獲得するインターン制度や若手研究者が自ら研究テーマを提案し、一定の裁量と責任を持って研究を推進する若手プロジェクト研究を実施し、世界的な視野を持った次世代のアカデミックリーダーを育成する。



図3 研究分野を「越境」するインターン制度や若手が主導する若手プロジェクト研究で、量子時代に輝く人材を育成する

アルゴリズム、組合せ最適化、離散数学の次世代の国際共同研究

	研究代表者	国立情報学研究所・教授/東京大学・情報理工学研究所・教授 河原林 健一 (かわらばやし けんいち) 研究者番号：40361159
	研究課題情報	課題番号：25K24465 研究期間：2025年度～2031年度 キーワード：グラフアルゴリズム、離散数学、組合せ最適化、量子アルゴリズム

離散数学、組合せ最適化研究の目的と意義

組合せ最適化と離散数学は、アルゴリズム設計の基礎となる柱である。理論的な学問分野としての重要性に加え、あらゆる科学分野での応用が可能であるため、実用上もコピケタスである。組合せ最適化と離散数学は、過去数十年にわたり、アルゴリズムの様々な方向性の研究を生み出し、これらの個々の研究領域は、アルゴリズム研究全体の進化に不可欠な役割を果たしてきた。さらに、これらの研究はアルゴリズムや計算量理論における多くの進歩をもたらしてきた。動的計画法、整数計画法、ヒューリスティクスといった技法は、組合せ最適化から生まれ、NP困難問題の解法の限界を押し上げてきた。これらの技術革新は、計算の複雑さについての理解を深めるだけでなく、AI（ロボットの経路計画）やビッグデータ解析（機械学習における特徴選択）などの現代技術にも力を与えている。本提案の主目的は、組合せ最適化、離散数学、アルゴリズムにおける多くの新しい理論的アイデアとテクニックを開発することである。具体的には、以下の3つの課題に主に取り組む。

グラフ彩色と4色定理： グラフ彩色の研究は、離散数学の中心的テーマであり、豊富な理論と多くの重要な未解決問題を持っている。例えば、グラフ理論における最も古い問題の一つは、1852年に提起された、平面グラフの彩色に関する有名な4色予想である。一方、現在でも平面グラフの4彩色の本質が解明されたとは言い難い。また、アルゴリズム的には、平面グラフをより高速に4彩色するためには、平面グラフの大域的な状況を利用する必要があるが、この大域的な性質と4彩色との関係はまだ明らかになっていない。本提案ではこの離散数学での重要な問題に対して本質的な貢献を目指す（図1がグラフ彩色と4色定理）。

組合せ最適化： 組合せ最適化は、ある可能性の中から最良の選択枝を選ぶというモデルを解くために使われ、科学、経済、工学の分野だけでなく、希少資源の配分、ロジスティクス、ネットワーク計画などの問題にも広く応用されている。本提案では、組合せ最適化の計算的側面を中心とした研究課題に対して、実際の問題を解くためのテクニックを提供し、計算能力の可能な限界を検証することを目指す。

量子アルゴリズム： 本提案での研究目標は、新しい量子アルゴリズムを開発し、量子中規模コンピュータが古典コンピュータを凌駕するような新しいアプリケーションを開発することである。具体的には、計算機科学の新しい問題や物理学の重要な問題に対する量子アルゴリズムに焦点を当てる。また、計算複雑性理論の手法など、理論計算機科学からのアプローチを用いて、これらの新しいアルゴリズムの量子的優位性を厳密に確立することを目指す（図2が量子アルゴリズムの外観）。

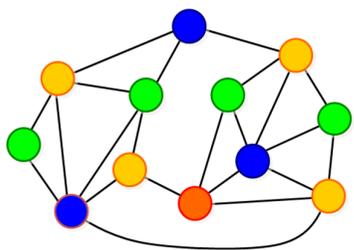


図1 グラフ彩色と4色定理

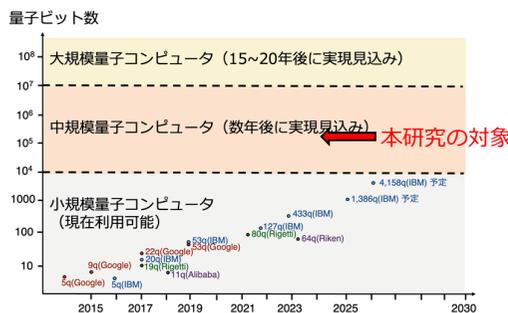


図2 量子アルゴリズム

国際共同研究体制

●日本側

PI: 河原林健一 (国立情報学研究所・東大)

Fulkerson賞2021, Humboldt賞2024, ACM Fellow 2025

Co-PI: 湊真一 (京大), François Le Gall (名古屋大)

共同研究者

吉田悠一 (NII教授), 平原秀一 (NII准教授)

●海外共同研究者

Bill Cook (University of Waterloo), Luc Devroye (McGill University), Stephan Kreutzer (TU Berlin), Frédéric Magniez (IRIF, CNRS), Bojan Mohar (Simon Fraser University and University of Ljubljana), Janos Pach (Renyi Institute), Ben Rossman (Duke University), Mikkel Thorup (University of Copenhagen), and Carsten Thomassen (Technical University of Denmark).

国際的な共同研究者は皆、世界のリーダー。これまでに、フンボルト賞 (Cook and Devroye), ファルカーソン賞 (Thorup), Beale-Orchard-Hays Prize (Cook) など、権威ある国際的な賞を受賞している。さらに Cook, Pach, Rossman, Thomassen はいずれも国際数学者会議で招待講演。Cook, Devroyeは、それぞれの研究機関で特別教授でもある。

研究体制

PI: 河原林健一 (NII) Fulkerson賞, Humboldt賞, ACM Fellow 2025
Co-PI: 湊真一 (京大): アルゴリズム研究の権威 (学術変革AのPI)
Co-PI: François Le Gall (名古屋大): 日本における量子アルゴリズムの主力 (Q-leapなど)



図3 研究体制

人材育成計画の内容

PI (河原林) は、JSTがスポンサーである「情報科学の達人」プログラムの総責任者でもあり、日本のトップ才能の高校生を指導を多数行ってきた。このプログラムは目覚ましい成功をおさめており、毎年数名の参加者が情報オリンピックで金・銀・銅メダルを獲得している。特にIOI (情報オリンピック) の日本代表チームは、常に世界のトップ5にランクインしており、中国チームと互角に戦ってトップの座を獲得した年もある。今回の人材育成の最大の目標の一つは、**高校世代のトップ才能をなるべく早く世界の場に送り込むこと、そして世界の場で活躍できるようにおぜん立てすることである。**この目的のためには「学部生」から**トップ研究者のもとへの派遣が必要である。われわれの国際共同研究者も、若手育成にも理解があるため、彼らの機関への学部生の派遣の派遣も視野に入れている (間接経費を使う予定である)。**

グーグルなどが主催するプログラミングコンテストでは、日本の大学院生や学部生が上位入賞している。このような優秀な学部生・大学院生を派遣し、世界の舞台で活躍する準備をさせたい。具体的には、今回の研究体制からの国際交流から、20代前半から一段階上の研究成果を残すことができる研究者 (大学院生、学部生) を輩出していきたいと考えている。そして、これらの学生を世界の研究コミュニティの中で目立つ存在にすることができると信じている。彼らを半年ほど派遣予定である。

図4 エコシステム & 10年計画



国際「社会脳」ネットワーク育成

	研究代表者	東京大学・ニューロインテリジェンス国際研究機構・特任教授 ヘンシュ 貴雄 (へんしゅ たかお) 研究者番号：60300878
	研究課題情報	課題番号：25K24466 研究期間：2025年度～2031年度 キーワード：社会脳、臨界期、Early Life Stress、AI、認知ロボティクス

この国際共同研究の重要性・面白さは何か（研究の目的と意義）

● 「社会脳」を多角的視点から研究するための国際頭脳ネットワークの育成

- **背景**：社会的つながりは精神・身体の健康に深く関与し、その喪失は精神疾患の重篤化や死亡率の上昇につながる。しかし、困難や失敗に適應できるストレス耐性の高い「**社会脳 (Social brain)**」が、どのように発達期の脳可塑性や環境要因、文化的背景のもとで形成されるのかは未解明であり、有効な介入法も確立されていない。特に、発達期の「**臨界期**」における虐待などの逆境経験や、自閉症リスク、さらに東洋と西洋における文化差が社会脳形成に与える影響は、国際比較を通じて初めて明らかにできる重要課題である。
- **目的**：本国際共同研究は、東洋（日本・シンガポール）と西洋（フランス・イタリア・米国）の研究拠点が連携し、動物モデルによる神経科学的基盤研究から、ヒトを対象とした脳機能計測（fMRI・fNIRS）、AI解析、認知ロボティクスまでを統合することで、社会脳の定型・非定型発達のメカニズムを多角的に解明することを目的とする。これより、文化的背景に配慮した介入方法や個別的な支援の開発につながるべく、分野横断的かつ国際的に活躍できる次世代研究者の育成を目指す点に、本研究の大きな意義と面白さがある。



図1 ヒト疾患・動物モデル・AI・ロボティクスを網羅した多国籍サブ・プロジェクト

誰がこの国際共同研究を行うのか（優れたグループによる国際共同研究体制）

● 世界トップレベル研究者による国際共同研究体制

国内外8研究機関に所属する世界的に著名な主任研究者14名を中核として実施される。

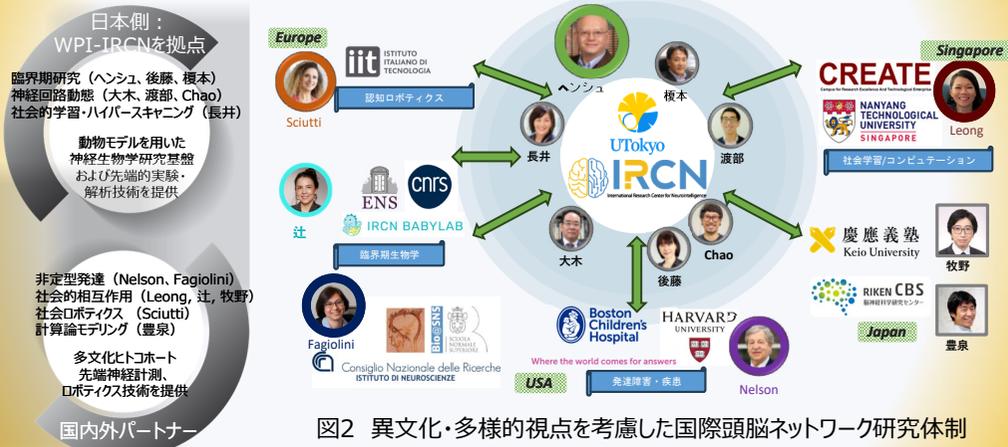


図2 異文化・多角的視点を考慮した国際頭脳ネットワーク研究体制

ヒト・動物・ロボットを横断した比類なき研究体制を構築するとともに、女性研究者を含む多様なリーダーシップの下で、国際的に活躍できる次世代研究者の育成を推進する。

どのように将来を担う研究者を育成するのか（人材育成計画の内容）

● 国際環境で活躍できる若手研究者育成の必要性と方針

近年、若手研究者の長期海外留学は減少しているが、異文化環境での研究経験は日本発の研究力強化に不可欠である。国際経験豊富な研究代表者とWPI-IRCNの国際ネットワークを基盤に、双方向型の国際人材育成を体系的に推進する。

● 国際シンポジウムを通じた交流基盤と企画力の育成

初年度にシンガポールにて国際キックオフシンポジウムを開催し、若手研究者が海外パートナー研究室の研究環境を理解する機会を提供する。2年度目以降は、若手主導による国際シンポジウムを海外拠点で持ち回り開催し、企画力・国際協働力の育成を図る。

● 長期・短期海外派遣による体系的な研究者交流

2年度目以降、海外パートナー研究室に1～2年間滞在する長期派遣研究者を毎年数名選抜し、5年間で最大16名を支援する。数か月～半年の短期派遣を毎年度4～10名程度実施し、博士課程学生を含む若手に海外研究経験を提供する。日本側から100名近く海外パートナーからも同規模の来日研究者を見込む。

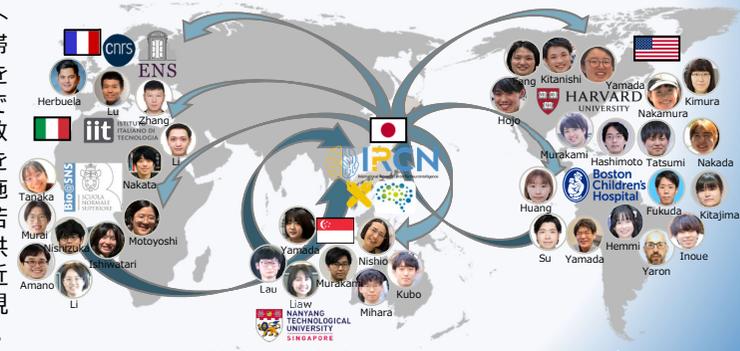


図3 若き“社会脳”を育成するためのネットワーク循環プラン

植物の自律的な器官形成を支える情報分子ネットワークの解明

	研究代表者	名古屋大学・大学院生命農学研究所・教授 榑原 均 (さかきばら ひとし) 研究者番号：20242852
	研究課題 情報	課題番号：25K24467 研究期間：2025年度～2031年度 キーワード：情報空間、植物ホルモン、遺伝子制御ネットワーク、器官形成、数理発生学

この国際共同研究の重要性・面白さは何か（研究の目的と意義）

●植物がもつ柔軟かつ強靱な器官発生の原理に迫る

植物は、ホルモンやペプチドなどの情報分子の相互作用によって組織内に「情報空間」を形成し、その情報に基づき細胞運命を自律的に制御している。この植物特有のしくみにより、栄養条件の変動、組織損傷、他個体との相互作用などの環境刺激に応答し、葉・根・寄生器官などの器官形成を継続することで可塑的かつ頑健な生命力を発揮している。近年、情報空間を構成する要素分子の同定は進展したものの、その時空間的なネットワーク構造が細胞運命決定とどう結びついているのか、さらには、様々な器官や環境要因を貫く共通原理が存在するのかが未解明のままである。

そこで本研究では、「情報空間はどのように植物の細胞運命を制御することで、環境に応答した自律的な器官発生を可能にしているのか？」という核心的な問いを掲げ、植物特有の生存戦略を理解するために、情報分子ネットワークの時空間的構造と、細胞分化を制御する遺伝子発現ネットワークとの相互制御関係、さらには異なる器官発生に共通する制御原理を体系的に検証する。国内の強みである植物ホルモン研究や幹細胞生物学、数理発生学を基盤に、国際共同研究体制により、シングルセル解析、数理モデリング、ホルモンイメージング技術を統合し、情報空間の構造と機能を一細胞レベルの解像度で記述し、その普遍的制御原理の抽出を目指す（図1）。

●緊密な連携と統合的解析により植物器官発生の基盤原理を明らかにする

本研究では、「情報空間による細胞運命制御」を共通軸とし、シュート発生・根組織再生・寄生器官形成という異なる現象を横断的に解析する。研究前半では、研究チーム全体が一丸となり、茎頂、根端、寄生吸器において遺伝子操作などで擾動を与え、一細胞RNAシークエンスにより遺伝子発現変動の時系列データを収集

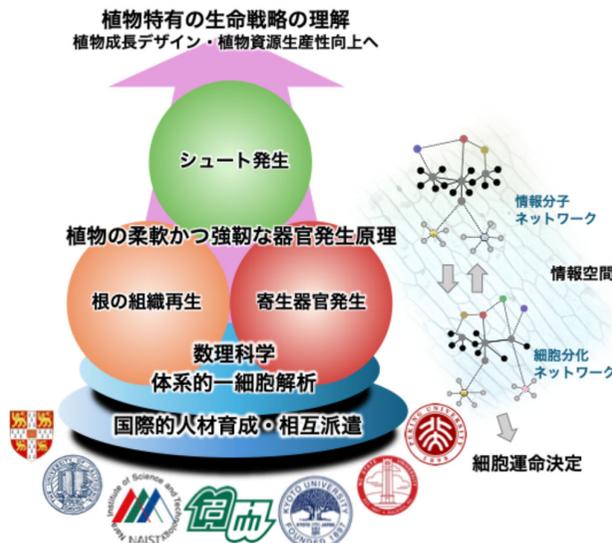


図1 研究全体の概念図

誰がこの国際共同研究を行うのか（優れたグループによる国際共同研究体制）

●機関連携を柱に日・米・中・英のトップレベルの研究者が集結

本研究は、名古屋大と米国NCSU、奈良先端大と米国UC Davisの長期かつ強固な機関間連携を柱に、日本と海外のトップ研究者が結集した国際的枠組みのもとで推進する。日本からは、研究代表の榑原（名古屋大/シュート発生・ホルモン制御）、梅田（奈良先端大/根の組織再生）下遠野（名古屋大/根幹細胞新生）、吉田（奈良先端大/寄生植物の器官形成）、望月（京都大/数理発生学）の、それぞれの研究分野を牽引する5名が中核を担う。海外からは、Dr. R. Sozzani（米国 NCSU/根発生モデリング）、Dr. S. Brady（米国 UC Davis/システム生物学・多層オミクス）、Dr. Y. Jiao（中国 北京大/シングルセル解析・器官発生）、Dr. A. Jones（英国 TSL Cambridge/ホルモンイメージング）の4名が参画し、世界的に卓越した専門性を提供することで、統合的アプローチを可能にする。

博士研究員5名、博士学生18名、若手助教8名を含む計約30名規模の研究体制を構築し、共通プロトコル・解析基盤・数理モデルを共有しながら、シュート・根・寄生器官にまたがる横断的研究を展開する。

本体制により、情報空間による細胞運命制御機構の解明に向けた学際的かつ戦略的な国際共同研究を強力に推進する。



図2 国際共同研究体制

どのように将来を担う研究者を育成するのか（人材育成計画の内容）

●体系的・戦略的な次世代若手リーダーの育成

本プロジェクトは、「主体性・創造性・国際性を備えた次世代研究者の育成」を最重要課題に位置づけ、研究推進と並行して人材育成施策を体系的・戦略的に実施する。具体的には以下の三段階の取組みにより、若手が国際的に通用する研究者として自立するまでの一貫した成長プロセスを確立する。

ステップ1：在外研究（海外派遣）

博士学生・ポスドク研究員・若手教員を対象に、キャリア段階に応じた短期（博士学生 3ヶ月）・中期（研究協力者 4～8ヶ月）・長期（本プロジェクト雇用研究員 最大2年）の海外派遣を実施し、最先端研究への参画機会と国際的な研究ネットワークの形成を支援する。また、海外研究機関から若手研究者を招聘し、相互交流と新たな国際共同研究の創出を促進する。

ステップ2：主体性・創造性・実践力の涵養

「ミニ国際共同研究 Grant」を設置し、若手が自ら課題を設定し、海外研究者との国際共同研究を主体的に立ち上げる実践力を養成する。隔年開催の国際シンポジウムでは、若手が企画・運営を担い、世界トップレベルの研究者との直接対話を通じて、企画力と国際発信力を強化する。さらに、毎年開催の若手リトリート、海外PIを含むメンター制度、研究費申請・論文作成支援、女性研究者を対象としたメンタリングセッションを有機的に組み合わせ、全PIが連携して体系的な若手育成を行う。

ステップ3：独立時の支援

スタートアップ経費により、研究室の立ち上げを支援し、独立後の研究活動を円滑に始動できる体制を整える。これらの取り組みを通じて、将来を担う国際的リーダーの輩出を目指す。



図3 次世代若手リーダー育成スキーム