拠点構想の概要

※A4　３ページ以内で作成すること.

拠点名：持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点（SKCM^2）

ホスト機関名：広島大学

ホスト機関の長：越智　光夫，学長

拠点長候補者：Ivan I. Smalyukh，広島大学 SKCM^{2}拠点長／コロラド大学ボルダー校 教授

事務部門長候補者：安倍　学，広島大学　学術・社会連携室　理事・副学長（学術・社会連携担当）

１）拠点形成の全体像

提案するWPIは，「結び目（ノット，knot）のあるキラルな超物質（***KCM^2***）」というパラダイムを導入する．私たちの身の回りにあるものは，私たち自身を含めてすべて普通の物質である．反物質も存在しうるが，加速器や宇宙線の衝突などの過程で反粒子は生成されるものの，巨視的な量の反物質はこれまで観測されたことはない．***KCM^2***は，独自の基本粒子・反粒子の類似性と，それに基づく新物質設計の物理原理を利用し，あらゆる物質の内部機構から生命の起源，そしてSDGsに必要なグリーンテクノロジーを可能にする基本的ブレイクスルーまで深い洞察を与える．WPIの***KCM^2***パラダイムは，基本的な粒子・反粒子ペアから準原子，準分子，結び目を有する液晶・固体結晶，極めて珍しい性質を持つ物質まで，あらゆるものの全く新しい姿を作り出すことを目指している．時間・空間スケールを超えたキラル結び目を明らかにすることにより自然現象の基本的理解を深めるとともに，あらかじめ設計されたメタ物質を作り出すことによって，新物質や珍しい，または非常に望ましい物質特性を設計する．***KCM^2***推進によってエネルギー需要の増大と気候変動という難問を地球規模で解決しようとするものである．

２）世界を先導する卓越研究と国際的地位の確立

２）-1．研究内容

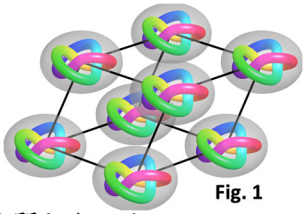
Fig. 1

アインシュタインは，ブラウン運動を説明しながら原子・分子の存在を間接的に証明し，いわゆる「コロイド原子」という概念を導入した．その後，コロイドを利用して粒子（原子）結晶やガラスの挙動を解明し，最近では，あらかじめ設計された人工的な分子や原子などの粒子の集団である，「準原子」を構成要素とする光学的，機械的な多くの超物質を生み出している．しかし，このような人工的な構成要素から作られた既知のメタマテリアルの疑物質（メタ的）挙動は，屈折率や力学的挙動といった単純な特性のみに限られている．私たちは，結び目を持つトポロジカルソリトン，ボルテックス，コロイドや（バイオ）ポリマー分子鎖の結び目などの粒子的準原子の特性を基に，「ノットキラルメタ物質」，***KCM^2***パラダイムを創造することを想定している．私たちの***KCM^2***は，通常の物質・反物質ペアの多くの性質を共有し説明することができると同時に，それらの基本的限界を克服することができると期待される．例えば，Fig. 1はSmalyukhがキラル液晶中でトポロジカルソリトンの自己組織化によって開発した結び目結晶である [Science 2019]．このような準原子の結び目結晶は，従来の物質の結晶で知られているよりも2桁以上大きな50％にも及ぶ異方性電歪を示す[Science 2019]．結び目ソリトンはキラルな性質を持つことができるが，キラリティーが果たす重要な役割は，そのような粒子状物体のエネルギー的安定化である．***KCM^2***の別の例として，主任研究者（PI）の佐藤らによって開発された，分子の輪が連なった結晶（Fig. 2）[Nature 2021]がある．トポロジカルな連結が興味深い物性をもたらし，二酸化炭素の回収やエネルギー効率の向上に必要な透明熱超断熱が実現できる可能性がある．これらの例と同様に，私たちが設計し創造する***KCM^2***の世界は，私たちを取り巻く世界の限界を克服するのに役立つ．このビジョンを実現するために，私たちは物理空間と運動量空間の両方におけるトポロジーの最近の発展を利用する．また，新しいキラル液晶からコロイド，磁石，（バイオ）ポリマー，ゲル，その他の凝縮物質や生物系に至るまでの多種多様な秩序変数空間においても利用する予定である．***KCM^2***パラダイムでは，（反）物質の基本的な構成要素の性質や生命の起源に関する洞察を得ることができ，増大するエネルギー需要，気候変動，人間の健康への脆弱性といったグローバルな問題に対処するための基盤を作ることができる．

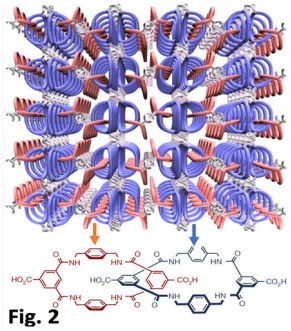
Fig. 2

２）-2．融合研究

結び目をカギとしたキラル超物質を用いた持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点（***SKCM^2***）は，数学，物理学，化学，材料科学，生物学，宇宙論，惑星科学などを結び目のように堅く結びつけ，全く新しい研究分野

を創出し，持続可能な未来の実現に貢献する．***KCM²***では，異なる背景を持つ研究者の共同研究が本質的に必要であるが，WPI共同研究室によって，世界中から集められた研究者の学際的共同研究を確実に進める．共同研究を促進する方法の一つは，若手研究者，博士課程学生，ポスドクの複数分野のメンターによる共同指導である．これらの研究者は，WPI補助金の支援を受けながら，共同研究を行い，共著者となる第一，第二，第三の共同指導者を持つことになる．共同出版を行うことは，業績評価の重要な側面となる．WPIの主要機能を新しい建物の一つ屋根の下に設置することで，異なる分野の研究者間の議論と科学的交流を促進する．さらに，自分の専門分野とは異なる分野の重要な概念を教え合うために，様々なチュートリアルや短期コースを開催する．正式なセミナーに加え，WPIメンバー全員による研究成果に関する非公式なディスカッションフォーラムを開催する．海外・国内PIとそのチームでオンラインミーティング，海外・国内PIや若手研究者の相互の短期・長期滞在を最大限に利用する．

３）国際的な研究環境と組織改革

３）-1．国際的研究環境

SKCM²のPIのネットワークには，MIT，ケンブリッジ大学，マックスプランク研究所，コロラド大学ボルダー校など，世界のトップレベルの研究機関が参加する予定である．サバティカル，クロスアポイントメント，コンサルティング，その他の契約を通じて，海外PIが広島大学で過ごす時間を2-3ヶ月より長くするよう努める．WPI補助金による共同研究スペースと設備は，プロジェクトの初期に最優先事項として外国人PIに提供される．海外PIは広島大学で採用されたポスドクのメンターとなり，ポスドクは50％を海外PIの研究室で，50％を広島大学で過ごすことになる．広島大学のメンターに加えて，WPIが支援するすべての博士号候補者は，外国人PIの共同メンターを持ち，～50％の時間を海外で過ごすことになる．研究グループに参加することで，海外PIと広島大学のPIは，若手研究者を介して，家族のようなつながりで結ばれることになる．

３）-2．拠点運営・システム改革

本拠点は，文部科学省が WPI 拠点に対して求める水準を満たす高い自律性を持つ．拠点長は人事，雇用，予算など，全ての重要事項において最終決定権を持つ．また，ノットキラル運営委員会の図に示されているリーダーシップチームの支援によって，本プロジェクトのビジョンと目標が達成される．現在の PI グループを構成する人員の大半は，***KCM²*** 新領域における研究リーダーで構成されており，国際公募でトップレベルの若手研究者を新規に採用することによってさらに強化され，10 年の事業実施期間中に 5～10 名の PI が新たに加わることになる．また，産総研にサテライトを設置する予定である．WPI を利用した意欲的な改革を全学展開するため，安倍は採択当初，理事・副学長と事務部門長を兼任する．その後すみやかに，理事・副学長は交代し，安倍は事務部門長専従となる．副拠点長 3 名のうち 2 名（薮田・小鳥居）は女性で構成され，役員のうち女性が多数となる．薮田が科学担当，小鳥居がアウトリーチ・広報担当，井上が教育担当となる．さらに，薮田と小鳥居は戦略企画グループを担当し，安倍とともに日常業務を統括する．文部科学省のビジョンに沿って，男女および経験者・若手研究者をバランスよく構成し，WPI を大学改革の種として利用することおよび自律的な運営を維持することで，拠点の全体的な運営が達成される．また，小鳥居，Senyuk，薮田，井上は，本拠点の 4 つの研究分野をリードする．拠点長と PI は，越智学長の強力な支援のもと，大学改革の種として WPI の教育・システム改革を企画・実施する．拠点長は毎月学長と面会する．WPI 発足後は，拠点長のリーダーシップのもとで導入された「実力主義」のコンセプトによって，研究・教育活動を評価する．トップクラスの国際誌に掲載されるような画期的な研究を推進するため，PI が執筆した論文の年間累積インパクトファクターを，掲載誌のインパクトファクターの合計で体系的にモニターし，拠点長が PI にリソースと賞与を配分する際の評価基準とする（例えば材料科学と純粋数学間の分野特有の差異を考慮する）．また，外部資金，国際的な賞，WPI のミッションへの傑出した貢献，その他の主要な成功も同様に報酬の対象とする．このような人事評価制度は本学には存在していない考え方であり，この新しいシステムの有効性が本 WPI 拠点によって確認されれば，既存制度の改善点として全学に展開する．また，本拠点に参画する外国人研究者の各所属機関における事務手続きのベストプラクティスを採用することで，本学の事務制度の改善に繋げる流れを構築するガバナンス改革を進める．

４）次代を先導する価値創造

４）-1．基礎研究の社会的意義・価値の創出・発信

高インパクトファクターの論文やアウトリーチを通じて，私たちの基礎研究が，エネルギー需要の増大や気候変動など，世界が直面する深刻な問題の解決にいかに役立つかを，科学界のみならず一般の人々にも伝えていく．例えば，建物は，生産されたエネルギーの40％を冷房と暖房に消費し，そのうち20％は窓から失われている．窓

は，建物外皮の中で最もエネルギー損失の大きい部分である．魔法瓶のように，エネルギーを消費することなく，建物内の快適な環境を維持することはできないだろうか？佐藤とSmalyukhは，分子の結び目を利用し，新しいエアロゲルを低コストで作製し，透明な超断熱材を開発するため，共同研究を行っている．また，Vignoliniとは，多孔質キラル構造を用いて温度調節を行う黄金虫にヒントを得た建築外皮素材を開発している（金色/銀色の反射は魔法瓶の銀コーティングのような役割を果たすが，代わりに黄金虫等はキチン繊維のキラル自己集合から生成される力を利用する）．自然界に学び，ナノセルロースから低コストでエネルギー効率の高い材料を開発する研究である．金色や銀色の材料は意匠の観点で魅力があり，この技術が将来普及することに役立つ可能性もある．また，エレクトロニクスの発展のためには，さらなる小型化が必要であるが，微小スケールの量子効果がその壁となっている．この限界は，私たちが開発したキラル磁気スピン系やトポロジカル絶縁体によって克服することができる．例えば，レーストラック・メモリは，ホップフィオンのようなトポロジカルに保護された多次元ソリトンを情報キャリアとして利用する．場の結び目のようなトポロジカルな物体が情報キャリアとなる，全く新しい原理の未来の電子デバイスを設計することが可能なのである．生物医学の観点からは，タンパク質のキラリティーやノットの変化は，アルツハイマー病などのタンパク質変成症の原因となるため，その検出と制御ができれば，治療法の開発に役立つと考えられる．また，コロナウイルスのRNAゲノムにも結び目が見られる．コロナウイルスの変異によって変化するスパイクタンパク質の被膜は，ワクチン効果の低下の原因である可能性があり，PIのHsuの研究は，世界が直面する緊急の問題解決に役立ち，日本のSociety 5.0 のミッション達成にもつながる可能性がある．私たちは，アウトリーチ・広報担当のチーフPI小鳥居の指揮のもと，サステナビリティを可能にする***KCM²***研究の認知度を高め，優秀な若者を科学の道に引きつけるために，様々なアウトリーチ活動を行う．米国NSFのアウトリーチのガイダンスを参考に，各PIはWPIの活動において独自のアウトリーチ活動を展開し，研究の面白さを広く伝えていく．ノーベル平和賞受賞者による公開講座は，WPIでの研究・教育プログラムを補完し，世界平和を維持するために科学者が果たすべき重要な役割を再認識させる．また，WPIは，広島大学が日本のハーバード大学となるように，学内改革や研究業績を押し上げていくきっかけとなる．グローバルな視点を持った新しい世代の研究者を育成し，エネルギー需要の削減，気候変動の抑制，日本政府が掲げるSociety 5.0や経済成長に貢献していく．

４）-2. 高等教育とも連動した次代の人材育成

WPI事業費の50％以上を，博士課程学生を含む若手研究者の支援に充てる予定である．学際性の高い研究を推進するため，才能ある若手研究者，博士課程学生，ポスドクに，異なるバックグラウンドを持つ2人以上の共同指導者をつける制度を導入する．例えば，広島大学の物理学の博士課程学生が，学内の化学や数学のPI，海外のPIから研究指導を受ける，といった制度である．特別な大学院コースワークをPIたちで設計し，実施する．また，世界トップクラスの研究拠点として，広島大学，東京工業大学，理化学研究所，東京大学の学生やポスドクを，マサチューセッツ工科大学，ケンブリッジ大学，コロラド大学ボルダー校といった他の参画機関に長期にわたって滞在させる．逆に，日本の研究機関は，海外機関から若手研究者を受け入れることとし，全て海外と国内のPIで共同指導する．これらにより，博士課程の学生は本プログラムに参画している大学で専門的な講義を受けることができる．さらに，大学院教育改革，国際研究交流，スクール，会議，フォーラムに加えて学際的なコースワークを導入し，より広い学際的なコミュニティとなることを目指す．WPIの事業費で，米国の大学院と同様に，博士課程学生に給与を支払うとともに，日本と海外の参画機関の学生・ポスドクの交換を支援する予定である．マッチング・ファンドを利用して，プログラム期間中に5～10名のPIを雇用し，最も優秀な若手研究者の獲得とジェンダーバランス，多様性の確保に努める．このWPI事業は，広島大学および日本全体の教育・研究改革の起点となり，学術界の国際化とジェンダーバランスを促進し，持続可能で平和な未来のため，研究力を結集・強化する．特に，女性PIと女性アドミニストレーターの雇用に努力する．WPIの研究者5～10名の採用比率を男女比，日本人と外国人比をそれぞれ50％とすることで，ジェンダーバランスを確保し，刺激的な分野横断・多文化の研究環境を実現する．若手研究者は，世界のトップ機関と広島大学を結びつけ，数学から物理学，惑星科学に至るまで，共同メンターを含めた研究活動により，分野間の境界をなくしていく．

４）-3. 自立化を見据えた拠点運営，拠点形成後の持続的発展

全てのPIは，日本国内だけでなく海外PIが居住する国々においても，個々に研究資金の申請を行う．***SKCM²***の国際ネットワークと研究成果の知名度により，このような資金獲得の機会は強化されていく．これらの従来の資金に加えて，私立財団（米国のサイモンズ財団，テンプルトン財団，ムーア財団など）の助成金も申請し，広島，日本，世界の慈善家，企業，広島県・市等の自治体と共同で，寄附講座のポストや学生・ポスドクのためのフェローシップ制度を設立する予定である．広島大学からの支援は10年目以降も継続され，，獲得する競争的資金は研究成果が出るたびに増加し，***SKCM²***は卓越した研究拠点として完全に独立したものになる．

拠点構想

拠点名：持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点（SKCM^2）
ホスト機関：国立大学法人広島大学（HU）
ホスト機関の長名：越智 光夫 (広島大学学長)
拠点長候補者：イワン スマリュク (コロラド大学ボルダー校教授及び広島大学SKCM^{2}拠点長)
事務部門長候補者： 安倍 学 (広島大学理事・副学長兼教授)

１）拠点形成の全体像

SKCM²拠点のビジョンとミッションを表すショートスローガンとして、「結び目（ノット）をつないで持続可能な世界を構築する」を掲げる。***SKCM²***拠点で実施される結び目の学際的な基礎研究が、科学的知見を広げるだけではなく、持続可能で平和な未来の実現に役立てられるよう力を注ぐ。

→ キラルノット超物質を扱う学際新領域の確立
→ 新しく設計可能な準原子および準分子としてのノットソリトンを開発
→ 学問分野や時空間スケール超えた結び目のトポロジーとキラリティの融合
→ 複雑に絡み合う地球規模の問題を解決するための技術革新の基盤を構築
→ 若い才能を磁石のように引き寄せ、グローバルに相互を結びつける
→ 国内外における、研究に根ざした教育改革の試行の場を提供
→ 連携持続可能社会と世界平和を導く自然科学と社会科学の融合

以下の事項を ***SKCM²*** 拠点の主なアイデンティティとして、グローバルな舞台で他にはないユニークな存在感を放つ。

→ 多次元ノットトポロジーとキラリティ研究を統合する世界で唯一の研究を展開する。
→ 自然の恩恵に頼ってきた数世紀にわたる既存の物質研究とは異なり、***SKCM²***拠点は、予めデザインされた基本的な(反)粒子から独自の(反)物質と材料を創出することを目指す。
→ 広島大学から東京大学、マサチューセッツ工科大学、コロラド大学ボルダー校、ケンブリッジ大学までつながる「壁のない」グローバル研究拠点としての経験を活かし、国内外の教育改革で世界をリードする。
→ 国際的で学際的な視野を活かして、次世代の若い才能を育成しながら、比類のないレベルで研究協力を行う。
→ 世界平和と日本のヒューマンヘルス関連の Society 5.0 の目標に寄与するのみならず、エネルギー効率を高めて気候変動を和らげることで、持続可能な未来をも可能にする高度な基礎研究を実施する唯一の WPI 拠点となる。

上記のミッションとアイデンティティを指針に、***SKCM²***拠点の主要目標として、基本的な粒子と反粒子の類似物を使い、あらゆる自然現象の仕組みから生命の起源、そしてそれを維持するために必要なグリーンテクノロジーを可能にする根本的なブレークスルーに至る非常に深い知見を活かして、「キラルノット超物質（***KCM²***）」のパラダイムを創成する。本拠点の ***KCM²*** パラダイムは、基本的な(反)粒子から人工原子や人工分子、結び目構造をもつ液体と固体の両者の結晶、極めて特異な性質を有する物質に至るまで、万物を全く新しく体現化することを目指しており、予めデザインされた類似物を創成することにより、自然現象の基本的な理解を深め、さらには特異で非常に望ましい材料特性を持つ物質を設計することにより、エネルギー需要と気候変動の増大という複雑に絡み合った地球の問題を解決する。本拠点のチャレンジングな目標は、純粋数学から材料科学、素粒子と宇宙スケールの物理学に至るまで、相互に交流することがほとんどない研究分野を交差・融合させることで、フィールズ賞やノーベル賞、その他の WPI スケールの評価につながる可能性を生み出すことにある。さらに本拠点の重要な役割として、我々を取り巻く世界の理解を深め、新たな技術と生活の質の向上を実現させる根本的なブレークスルーを導入することにより、世界をより持続可能にする手段を今後創り出していく。

２）世界を先導する卓越研究と国際的地位の確立

２）-1. 研究領域

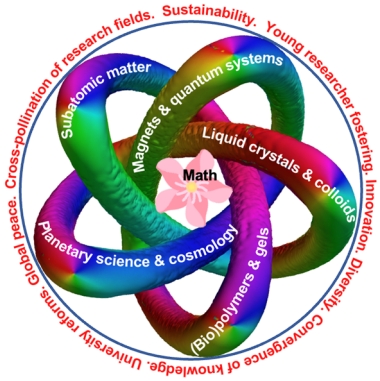

図3.1 多様な研究分野と自然な階層は、***KCM²***のパラダイムにより結びつくと同時に、教育を改革し持続可能な未来を築くうえでの大きな価値を生み出す。

SKCM² 拠点の活動(図 3.1)は、純粋数学をソフトマター物理学と量子凝縮系物理学、素粒子物理学と生物物理学、化学、および惑星科学と宇宙学に統合しながら、主に数学と物理科学の分野に重きを置いている。***SKCM²*** 拠点が導入し開発する新しい ***KCM²*** パラダイムは、これらの研究分野に新たなレベルでの融合を引き起こす。***SKCM²*** 拠点は社会科学者と協力して、若い研究者のニーズに的確に応えていき、持続可能性に重点を置く研究の必要性や、世界平和を確保するために科学者が果たすべき役割について、国内外の人々の意識を高める。

学際的な新しい研究分野とパラダイム変化は、科学と技術の複数の分野において、予想できないほどの革新的な進歩をもたらす。***SKCM²*** 拠点は、物理場のトポロジカルノットソリトンとその基本的な構成要素として機能する結び目のような分子を使用して、「キラルノット超物質（***KCM²***）」の新たな研究パラダイムを確立する。***KCM²*** に関連する研究分野の論文はすでにいくつか発表されており、その多くは ***SKCM²*** 拠点メンバーによって発表されているため、本拠点では、***KCM²*** を新たな国際的に知られた学際的な研究分野として確立することができる。***KCM²*** の研究は、対称性の破れの基本的な概念とソリトンから結び目の数学的記述にまで及び、凝縮物質と生物系における結び目構造の実験による具現化と詳細な研究による成果を生み出し、生命の起源と基本粒子におけるノットキラリティの役割を探求し、物質の特性と物理的挙動を制御する手段を確立する。このことにより、新しい技術とその他の持続可能な未来の価値の基礎を創成するという大きな目標を達成することができる。また、***SKCM²*** 拠点に参加する国内外のトップクラスの研究者間の学際的で大規模な共同研究ネットワークの構築によって、この取組を加速し、充実させることができる。***SKCM²*** 拠点の学際的な基礎研究の成果は、純粋数学、物理学、生物学、惑星科学、その他の科学分野のブレークスルーと重要な発展の原動力となるだけではなく、将来の技術や気候変動などの地球規模の課題に取り組む人類の可能性に重要な変革をもたらし、***SKCM²*** 拠点の研究の取組が、フィールズ賞とノーベル賞の両方につながると期待される。これまで何世紀にもわたり行われてきた研究は、我々の周りにある自然物質を理解して利活用することに焦点が当てられていたが、***SKCM²*** 拠点研究は、結び目構造がその構成要素として機能できるという考えに基づいて、独自のあらかじめデザインされた超物質を創成することにより、従来のアプローチをはるかに凌駕する物質を創成可能とする予定である。***SKCM²*** 拠点は、将来の新技術の基盤開発に資する根本的なブレークスルーをもたらすことを目指し、数学、物理学、化学、生物学、材料科学のさまざまな分野におけるキラリティと結び目のトポロジーに重点を置いた研究を統合する。***SKCM²*** 拠点は、持続可能な未来と人々の健康に大きく寄与するために、新たなキラルノットの力を探求して活用する。

SKCM² 拠点は、学問分野や時空間スケールを超えたトポロジーとキラリティの知識を融合させることを通じて、従来の水晶、ガラス、液体、液晶の対応物を含む人工的な類似物を創成し、我々の周りの通常の物質の理解を深める。本基礎研究によって、自然に発生する系では見つからない、また、予想できないが、エネルギー需要の増加や気候変動などの地球規模の課題に対処するために非常に望ましい、予めデザインされた特性を備えた超物質を創製するための基盤を構築できる。トポロジーとキラリティの組み合わせによって、***KCM²*** の学際的な新しい分野の基盤が構築でき、このことにより、WPI のミッションを達成できる。WPI は日本だけではなく世界にとってもユニークなプログラムであり、パラダイムを変える研究を推進できる非常に魅力的なプログラムである。日本で世界トップクラスのキラル研究が実施されていることはよく知られており、キラル関連のノーベル化学賞および物理学賞を複数受賞している。また、宇宙論、生物物理学、量子物質、および材料科学において真に突出したキラル研究を行っている。世界をリードする一流の科学者だけでなく、水引の芸術作品からも理解されるように、日本の一般人もトポロジーの側面、特に結び目に真に魅了されていることに気づかされる。広島大学（HU）は、数学的

な結び目理論（純粋数学の観点からこのトピックに焦点を当てている 4 人の数学者がいる）から、物理学、化学、生物医学、惑星科学における多次元トポロジーに至るまで、本拠点が結び目の科学として定義する分野において優れた研究成果を挙げている。このことが、広島大学に「キラルノット超物質（***KCM²***）」の拠点を置く大きな理由であり、持続可能社会を導く ***KCM²*** 基礎科学を考究するという目標を置き、本拠点のミッションとする。

図3.2 新しいWPIは、期待される改革を広島大学および中国四国地方全体にもたらすことになる。

持続可能な未来には、世界平和、気候変動の減速、人の健康に関連する課題への対応と解決が必要である。新型コロナウイルス感染症が世界的に蔓延する中、第二次世界大戦で原爆の被害を受けた広島において、ロシアとの戦争で苦しむウクライナ出身の PI3 名(拠点長候補者を含む)とともに、日々地球温暖化が加速している中で比類なき知識と創造性をもって基礎科学研究を行い、持続可能な未来に向けた地球規模の課題に対処するのに役立ちたいと感じ、かつ、そう願っている。

ホスト機関となる広島大学は、平和都市である広島に所在する、日本における広い地域でありながら、改革を可能にする WPI プログラムの恩恵をこれまでに受けることのなかった中国四国地域（図 3.2）の主要大学である。留学生の割合が高い広島大学は、WPI プログラムの支援と優れた海外研究機関とのパートナーシップによってのみ達成可能な、高いレベルでの持続可能性を導く主要な国際的研究拠点になることを目指している。

SKCM² 拠点は、多くの点で世界的にユニークな拠点となり、キラルノット超物質に関する基礎研究の本拠地、および ***KCM²*** パラダイムの発祥地となることを目指している。本拠点で提案する非常に基礎的な研究は、増加するエネルギー需要と気候変動を減らし、人の健康関連の課題を克服するために必要な新たな知見、技術および物質を創製することにつながり、持続可能な世界を実現するうえで役立つことを目指している。主要なミッションの中に持続可能性を追求している研究拠点として、国立研究所、研究機関、及びその他の組織が世界中に多くあるが、これらの機関の多くは、長い開発の伝統がある成熟した技術とアプローチに重点を置いている。

一つ例を挙げると、スマリュク拠点長は、コロラド大学ボルダー校と米国の国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の共同研究所である再生可能・持続可能エネルギー研究所（RASEI）の創設フェローである。NRELとRASEIはいずれも、太陽光、風力、その他の再生可能エネルギー源からの再生可能エネルギーの発生技術の開発に焦点を当てている。その研究は応用研究を志向し、世界中の数十にわたる他の機関によっても実施され広く受け入れられているアプローチに基づいている。既存のWPIの一つであるカーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I^2CNER）も、持続可能な未来にとって非常に重要な目標を達成することを目指しているが、そのアプローチは、この目標を達成するための材料、プロセス、および技術を改善することにある。NREL、RASEI、I^2CNERや同様の目標を持つ他の多くの機関とは異なり、***SKCM²***拠点は、必要となる物質が不存在であったために、これまで誰ひとり発想することがなかった、エネルギー需要や気候変動の問題に対処するためのアプローチの選択を可能にする。

KCM²パラダイムにより、本拠点では、これまで不可能であった特性・性能を有する特異な物質を結び目から開発する。一例として、佐藤とスマリュクが相互連結/結び目分子を活用して、超断熱性と高い光透過性を備えた高多孔質材料を作成することに成功した場合、これらの材料を窓や建物の外壁の他の部分に使用すれば、従来、暖房や空調を利用して快適な室内環境を維持するため、商業用建物や住宅で浪費されてきたエネルギーの約40%を節約することができるようになる。このことにより、魔法瓶がエネルギーを消費せずに中身を適温で維持できるように、***SKCM²***拠点が想定する素材を使用して建造される未来の建物は、エネルギーを消費せずに快適な室内環境を維持することができるであろう。***SKCM²***拠点は、エネルギー需要と気候変動という差し迫った現代の問題を解決するアプローチを未来像としているが、歴史を振り返ると、同じようなことが繰り返されていることに気づく。

約 200 年前、ニューヨークのような急速に成長している都市は、馬を使った交通手段の限界を懸念した。より良い清掃方法が発明されなければ、都市は文字どおり馬の排泄物で覆われてしまう。しかし、馬

は当時の常識では考えられなかった発明である自動車に取って代わられ、この馬に関する課題は解決されることになった。同様に、ノットによって可能になる予めデザインされた超物質が、いつの日かエネルギー消費をある程度まで削減し（生成された全エネルギーの 40%が建物によって消費されることに注意)、すべての必要なエネルギーが再生可能なエネルギー源だけで賄われることに貢献することを願っている。この例は、持続可能性に関連する ***SKCM²*** 拠点の独創的な考え方を示すものである。つまり、エネルギーを無駄にしないようにし、このエネルギーの生成に関連する気候変動の問題が解消されるように、不可能と考えられていた物質を発明することである。我々の知る限り、そうしたビジョンを持っている機関は世界中にはないが、これは地球を救うためには必要である。

SKCM² 拠点の研究の主な動機と目標設定に有効な持続可能性の考えを超えて、結び目のトポロジーとキラルの概念は、他の機関にはない本拠点の特徴である。トポロジーは最近、固体物理学で非常に良く研究されており、そうした研究が行われている機関が世界中に多くあるが、この既存の研究はトポロジーの知識と系の比較的狭い材料物理学を組み合わせ、特定の研究分野に焦点を当てている。さらに、固体材料の運動量空間におけるトポロジーの側面には、通常、低次元の物理的および秩序パラメーター空間が含まれ、***SKCM²*** 拠点のミッションの学際的な研究で追求および適用するノット理論の側面とは異なる。純粋数学のサブフィールドである結び目理論を研究する数学者は、通常、学科/大学ごとに 1 人程度であり、世界中に散逸している。ところが、興味深いことに、広島大学には、その研究分野に 4 人の有能な数学者がいる（PI の小鳥居だけでなく、寺垣内教授、古宇田教授、野崎助教も含まれる)。純粋数学と理論物理学の研究が融合した拠点の典型的な例は、米国のプリンストン高等研究所（IAS）である。量子場の理論が数学的結び目理論の深い知見に繋がった有名な Ed Witten の成功例があり、Witten は、数学者にとって最高の栄誉であるフィールズ賞を授与された唯一の物理学者である。しかし、IAS 内での分野融合には、これまでのところは実験的な要素がなく、数学と理論物理学の枠を超えていない。

バーミンガム大学の Mark Dennis 教授は、かなり広範囲に展開された学際的なトポロジー拠点を率いている。拠点長候補のスマリュクは、この国際ネットワークに参加しており、コロラド大学ボルダー校の研究室にバーミンガム大学の博士課程の学生を頻繁に受け入れている。我々の ***SKCM²*** 拠点の研究範囲はさらに広く、トポロジーとキラル研究の融合の上に構築されているが、それでもバーミンガム大学の拠点での経験は、***SKCM²*** 拠点のビジョンを実現する上で重要である。かなり研究目的は異なるところがあるが、両拠点間の共同研究と学生交換のための取り決めを行う予定である。

キラリティに焦点を当てた研究拠点が、分子科学研究所、理化学研究所、名古屋大学、大阪府立大学、産総研、千葉大学、広島大学、Spring-8、九州大学、九州工業大学などの日本の研究機関を含め、世界各地に多数存在し、それぞれの研究機関で特徴的な研究が実施されている。すでに我々もそれらの研究機関と提携を始めている。日本は、不斉触媒反応に関する優れた研究（野依の 2001 年のノーベル化学賞）や素粒子における対称性の破れ（2008 年の南部、小林、益川のノーベル物理学賞）に関する研究で特に有名である。日本のキラリティ研究に関する取組は、宇宙論、生物物理学、量子物質、材料科学などに広がり広く普及した卓越した研究が実施され、年間約 1,000 の論文に「キラル」の文言がタイトルに入っている。このような卓越したキラリティ研究の歴史があり、今回、***SKCM²*** 拠点を設立することができている。数学、物理学、化学及び工学を融合したキラル効果をさらに探求し開発して、従来の強みの上に本拠点を構築し、それらを更に強化する。今回提案する本拠点を除き、結び目のトポロジーとキラリティ研究を統合する研究機関の例はない。

上記した ***SKCM²*** 拠点のユニークなアイデンティティを有する研究組織は日本にも世界のどこにもない。影響力の大きい Nature および Science ジャーナルの論文のタイトルに「結び目(ノット)」を含む論文の 50%以上を、本拠点の主任研究者らで構成する研究チームが発表している。したがって、本拠点の研究チームは、***KCM²*** の新しいパラダイムを独自に確立する準備が整っている。

２）-2. 研究達成目標及び計画

提案する本拠点は、基本的な粒子と反粒子の独自の類似物を使い、自然現象の仕組みから生命の起源、そしてそれを維持するために必要なグリーンテクノロジーを可能にする優れたブレークスルーに至る非常に深い知見によって、***KCM²*** のパラダイムを創成する。本拠点の ***KCM²*** パラダイムは、基本（反）粒子から準原子と準分子、結び目構造を有する液体と固体の両方の結晶、また非常にユニークな特性を持つ

物質に至るまで、万物を全く新しく体現化することを目指し、予めデザインされた類似物を作成する。このことにより、自然現象の基本的な理解を深め、エネルギー需要の増大と気候変動という複雑に絡み合った世界的問題を解決する望ましい材料を設計する。

この***KCM²***パラダイムは、コロイドまたは（バイオ）ポリマー分子で構成されるトポロジカルノットソリトン、ノット渦、および結び目の粒子のような準原子特性を基に構築されている。***KCM²***は、通常の物質と反物質の多くの特性を持ち合わせているだけでなく、それらの物質が本来有する限界を超えることが出来る。例えば、ノッテドソリトンの準原子のノット結晶[Smalyukh, *Science* 2019]は、従来の物質の結晶で知られているものよりも2桁以上大きい、約50%の異方的な電歪を示した。また、本拠点PIの佐藤らが開発した分子リングが連結した結晶は[Sato, *Nature* 2021]、トポロジーリンクが、二酸化炭素の回収とエネルギー効率を高めるために必要となる透明な超断熱材が実現出来る興味深い物理的特性を生み出している。これらの例のように、本拠点で設計し創造する***KCM²***の世界は、自然界で認識されている現在の限界を克服することができる。

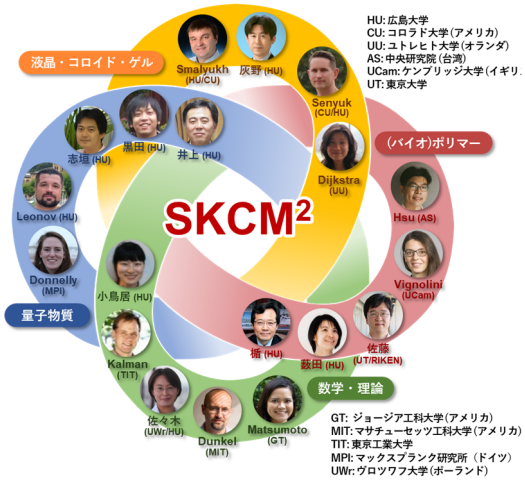

図3.3 PIと拠点の参加機関が、T(4,3) トーラスノットの助けを借りて描いた研究の要旨

これまで不可能とされてきた、物質科学におけるパラダイム変化を可能にする新しい概念の構築と材料/構造設計に関する戦略は、本拠点の極めて学際的なPIの国際チーム（図3.3）によるトポロジーとキラリティ研究の融合で初めて達成される。たとえば、数学における結び目とホモトピー理論により、さまざまな物理系のホップフィオンなどのトポロジカルソリトンの研究を行うことができる。それらの安定性と存在そのものをDerrickの定理は否定しているが、これらの制限をキラリティの存在によって克服できる。たとえば、キラル磁石と液晶のハミルトニアンのキラル項により、キラル凝縮物質の多次元トポロジカルソリトンの安定化が可能になり、液晶の1定数近似でハミルトニアン式が事実上同じになる。物理系での数学的記述のこのような類似性は、異なる系における対称性の破れに関連しているため、長さと時間スケールの階層全体にわたって観測できる。ホップフィオンと呼ばれるソリトンのスピンテクスチャは、オーダーパラメーターにおける有名な数学的ホップファイブレーションの物理的な体現化である。

現在では、液晶と磁石、および創発磁場で実験的に研究することができる。実験的研究と理論的研究を組み合わせることで、キラリティによって安定化できるトポロジカルノットソリトンの種類を明らかにし、素粒子物理学や宇宙論など、実験的にアクセスしにくい他のシステムのトポロジー的に類似したオブジェクトに対する知見が提供できる。キラルスピン系と量子色力学におけるハミルトニアンの類似性は、位相、非線形性の起源と結果、普遍性クラスと一般化の統一された基本的な理解を確立する機会を提供し、すべて、素粒子物理学と凝縮物質の理論間の画期的な相互インスピレーションで行われる。これらの取組と相乗的に、液晶やコロイドなどのソフト凝縮物質系における新しい相の発見を研究する。そこでは、秩序、キラリティ、トポロジカルノッティング及び流動性の共存という非常に根本的な問題も発生するが、モデリングと実験の両方により解決できる。

本拠点研究の大部分は、液晶、コロイド、磁石、バイオポリマーなどの実験的に非常にアクセスしやすい系に焦点を当てているが、我々の研究結果は、存在そのものすら知られていない、いまだにとらえどころのない種類の素粒子や宇宙ひもなどのアクセスしにくい系の研究に展開することができる。逆に、素粒子物理学と宇宙論の理論は、非常にアクセスしやすい凝縮物質と生物系の研究によって、関連する現象のより深い理解と実用的な有用性を生み出すことが出来る。創発的なノッテドキラリティの研究によって可能になる応用研究の範囲は、エネルギー効率の高い建築技術から断熱材、生物医学的

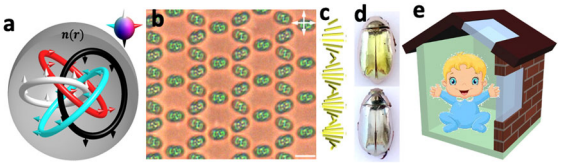

図3.4 (a)素粒子物理学の純粋数学と理論から、(b,c) 新材料、ソリトンと構造、(d)生体にヒントを得たフォトニクスと熱制御、および(e)持続可能な未来の実現に及ぶ基礎研究を追求する、提案した研究プログラムの全体的なビジョン

検出と病気の治療、さらにスピントロニクス、電気光学とデータストレージにまで及ぶ。

本拠点のアプローチの強みは、専門分野の境界を越えながらもそれぞれの研究には多くの共通点があり、知識の相互交流を行うことが出来るところにある（図3.4）。スマリュクらは、「ヘリノトン」と名付けたトポロジカルホップソリトンのマイクロメートルスケールでの結晶格子の創発的自己集合を、液晶分子のキラル炭素中心が誘起することを見出した[Tai & Smalyukh, *Science* 365, 1449-1453 (2019)]。後に、そうしたキラリティ安定化ホップフィオンと、数十ナノメートルの長さのスケールで磁性固体の創発場に置いて、興味深い量子力学的効果が現れることが理論的に予測された[Voinescu & Smalyukh, *Phys. Rev. Lett.* 125, 057201 (2020)]。次に、特定のカブトムシのキューティクルや、バクテリアが作ったコロイド状セルロースナノ結晶のキラル自己集合体で、そうしたソリトンが存在することを実験的に発見している。素粒子系との関係は明らかではないが、有名な数学的ホップファイブレーションとホップ写像に基づいた理論モデルを開発した最初の研究者は素粒子物理学者であった。いわゆる重力ホップフィオンは、最近大きな反響を呼んでいる宇宙ブラックホールと関連した数理モデルである（不思議なことに、それらの偏光像は、長さのスケールは非常に異なるものの、液晶ホップフィオンの画像に類似している）。

セルロースナノ結晶のらせん相をテンプレートとして、窓の透明断熱材などの建物外壁材に応用できる高多孔質・高断熱のエアロゲル材料を創製する。これらの例は、トポロジカルソリトン（図 3.4a）の抽象的な数学的概念が､合成キラル液晶(図 3.4b)に埋め込まれたヘリノトン型ホップソリトン(図 3.4b)の結晶格子や、生物由来のセルロースナノ結晶で形成されたもの、および、黄金・銀色スカラベカブトムシのキューティクルにおけるキラル構成（図 3.4c,d）でいかに実現できるかを示している。設計可能な反射率を備えた生物模倣多孔質フォトニック材料は、エネルギー需要と気候変動への影響を低減するために、超断熱建物外壁材として利用できる（図 3.4e)。各階層レベルで、創発的な基本現象は、実用的な有用性を兼ね備え、キラル磁性コロイド液晶の場合の磁場のように、外部刺激によって制御できる、複雑な物理挙動を制御する。そうした効果のある学際的な研究は、新しい基礎知識を生み出し、さまざまな分野の研究者が自身の分野で開発された概念を効果的に応用し交換できるようになる。このような不可分なノッテドキラリティ中心の科学的知見は、数十年かけて分野横断的に「拡散」して、基礎的な知見だけでなく実用的な有用性も生み出すようになる。我々が提案する WPI では、学問分野の垣根を取り払うことで、この時間は、100 分の 1 に短縮される見込みである。

研究計画の概要　利用可能なリソースを最も効率よく活用しながら、高い志で掲げる研究目標を最大限達成できるように､図3.3に示した4つの研究推進領域で本拠点を構築する｡スペースに制限があるので、最初に、異なる研究推進領域の研究計画とそれらの間の相互作用の概要を簡単に説明し、その後、具体的な取組の例に関連した詳細を追加する。液晶・コロイド・ゲルに関する研究推進チームでは、目標は、結び目のソフトマターの新しい形態を開発することである。灰野が新しいキラル液晶とナノコロイド系を合成する。スマリュクは、それらを新しいソリトン、渦、および結晶のホスト媒体として使用し、一方、Senyukは、そうしたソリトン活性物質を利用して、非平衡設定でのノッテド準原子の挙動に関する知見を得る予定である。さらに、設計可能な高次元秩序パラメーター空間を持つ液晶は、Dijkstra、スマリュク、灰野、および、co-PIのTasinkevychによりモデル化され、共同開発される。佐藤は、ヒドロゲルエアロゾルのような新しい種類のノットを利用した高孔質ゲルを合成し、スマリュクと協力して、将来の外壁用途に必要な赤外線反射率、可視範囲の透過性、および熱伝導率などの特性を制御する。

量子物質の結び目の研究推進チームでは、スピン系と量子色力学（QCD）の実空間と運動量空間の両方における多次元トポロジーを考究する。井上は、1 次元・多次元トポロジカルソリトンとその結晶を取り込むように設計された新しい磁性材料の合成を推進する。これらの取組は、Leonov とスマリュクによる安定図のモデリングを利用し､Donnelly による直接的で実験的な 3D 可視化/写像によって目的を達成する｡佐々木と Leonov は､スピン系の相図と量子色力学の間の基本的な相乗効果を探るために協力し、志垣は井上と Donnelly と協力して、凝縮物質と核物理学の観点からこれらの知見を実験的に調べる。黒田は、佐々木、小鳥居、Leonov と緊密に連携して、運動量空間の多次元トポロジーを研究し、固体中の Wyle 半金属や Dirac 半金属に関連する素粒子物理学との相乗効果を再び発展させる。

バイオポリマー研究推進チームにおいて、薮田は、隕石などの地球外物質に含まれるナノサイズの有

機物のトポロジーを研究し、地球外物質に含まれるアミノ酸だけでなく、より大きな一連の有機化合物のエナンチオマー分析を行い、化学的進化において、宇宙の分子キラリティがどのような役割を果たしたかを解明し、生命の起源を明らかにすることに繋げる。楯と Hsu は、RNA と DNA などの生体高分子の物性におけるノット構造やソリトン配置の役割と、ノット構造のリンク状態の基本的な特性を調べ、アルツハイマー病とコロナウイルス変異に至るまでのさまざまな現象に寄与するタンパク質の構造変化について研究する。佐藤は、結び目や連結が制御されるように「プログラム」された分子合成を行う。また、キラリティによって自己制御される結び目と連結によって可能となる特異なメソスケール構造を持つ材料を自己組織化する分子の合成を実施する。Vignolini とスマリュクは、共同研究者の Matczyszyn とともに、甲虫のキューティクルのような自然のフォトニック構造と、階層的に自己組織化したセルロースナノ結晶ベースのキラル液晶の両方で、ノットソリトンがどのように出現するかを研究する。

本拠点では、渦、コロイド、液晶、タンパク質などにおけるさまざまなノット(および、その結晶）とキラリティとの関係に関する多くの基礎的で学際的な問題に取り組む予定である。小鳥居、Kalman、佐々木、Dunkel と Matsumoto、および全広島大学ノット理論グループの co-PI による数学的ノット理論モデルと深く結びつけることによって、多様な物理、化学および生物系におけるさまざまなノットとソリトンの研究を統合する。広島大学に 5～10 人の新規雇用者を迎えることで、本拠点を拡大し、これらの研究の推進力を強化し統合して、多様な研究分野間の相互作用をさらに促進する予定である。紙面の都合で、代表的な活動についてのみ、その詳細な計画やアプローチを以下に示す。

キラルノット超物質に対する純粋数学と応用数学の洞察　PIの小鳥居およびco-PIの古宇田、野崎、寺垣内は、スマリュクとの共同研究により、ホップファイブレーションとトポロジカルソリトンを純粋数学の立場から研究する。ホップファイブレーションは、3次元球面S^3から2次元球面S^2への連続写像であり、2次元球面S^2上の3次元ホモトピー群$\pi_3(S^2)$ の生成元の代表元である。S^2の各点のホップファイブレーションによる逆像（ファイバー）は、S^3内の自明なノット(結び目)であり、任意の2つのファイバーのペアは、ホップリンクと呼ばれる非自明なリンク(絡み目)になる。一方、3次元トポロジカルソリトン（非特異ベクトル場）は、3次元ユークリッド空間R^3から2次元球面S^2への連続写像と見なすことができ、一点コンパクト化により、$\pi_3(S^2)$ の元と見なすことができる。実験により、ヘリノトンと呼ばれる3次元ホモトピー群の元としてホップファイブレーションとは異なるトポロジカルソリトンが明らかになった。
スマリュクは、外部刺激によって物理状態が変化し、ある時点で劇的にトポロジーが変化するトポロジカルソリトンを見出した。結び目理論の研究者達は、これらの変化に対応する数理モデルを構築する。このチームは、新しいトポロジカルソリトンおよび相互変換の可能性を探る。MIT のダンケル教授は、純粋数学の観点から応用数学の観点まで、このようなソリトン相互変換のエネルギー的経路を研究し、すでに研究されている実験例を超えて、このような挙動を示すことができる物質系の部分集合に関する洞察を得るために、研究を進める予定である。

また、広島大学の純粋数学/トポロジーチームのメンバーである古宇田、小鳥居、野崎、寺垣内は、本 WPI の他のメンバーと連携して、ノットとリンクのキラリティを研究する。キラルノットとは、その鏡像と同値ではないノットであり、つまり、その鏡像に連続変形で移り合わないようなノットのことである。ノットキラリティの存在に関する判別/認識は、古くから知られてきた問題である。三葉結び目のようなよく知られた例を含む多くのノットはキラルであり、ジョーンズ多項式などのノットの不変量によってこれを示すことができる。しかし、すべてのノットに対してそれらのキラリティを判別する不変量はまだないため、交点数が大きいすべてのノットを体系的に認識することはできていない。自然科学におけるノットやリンクのキラリティを調べる方法を探る予定である。さらに、仮想交点を追加して、古典的なノットを一般化した仮想ノットのキラリティも調査する。数学者は、現象を理解するために、WPI の化学および生物学推進チームのメンバーと連携して、仮想ノットと自然界における対象を関連付け、キラリティの観点から物質に新しい特性を付与する研究を実施する。さらに、仮想ノットのキラリティを調べることで、それらの分類と新しい可能性を確立する予定である。

広島大学の小鳥居と東京工業大学のKalmanは、本拠点において、化学および生物学のメンバーと連携して、閉じていない紐の高次絡み数の物理的発現についても研究する。タンパク質やDNAなどの紐状の化学物質の形状は、結び目理論によって区別され分類される。ただし、これらの紐はループしていな

いので、閉じた紐を扱う結び目理論を適用するには、それらを閉じてループにする必要があった。それらを閉じる標準的な方法はないため、これらの分類が閉じ方に依存するという問題が発生する。そのため、既存のリンクの不変量を一般化することにより、非プールとプールの紐を直接区別する指標を導入する。特に、高次絡み数を閉じていない紐に対して一般化する。ここで高次絡み数は絡み数の拡張であり任意の成分数をもつリンクに対する不変量である。その後、本拠点の（バイオ）ポリマー推進メンバーと連携して、タンパク質とDNAのシミュレーションを用いることによって、これらの指標の適用可能性を検証し、これらの紐を分類/区別する。

ノッテド物質に関する純粋数学、応用数学および物理学の視点を併用することで、以下の学際的に重要で基本的な問題に取り組む体制ができる。

→ ノットの配置とその物理的安定性の間で許容される変換は何か？
→ 素材の対称性が異なると、ノット型にどのような制限が課せられるか？
→ どのノット不変量が各(キラル)ノッテド場の実現に対して物理的に重要な意味を持つか？
→ ソリトン型と特異なノッテド場はどのように共存するか？
→ どのような新しいノットソリトン凝縮物質相が可能か？
→ ノットが消失または出現するとき、異なる系におけるノット型のトポロジカルカスケードは何か？
→ トポロジーの複雑さとエネルギー状態の関係は何か？
→ ノット構造はどのように相互作用するのか？特異ノットやソリトンノットはどのようなダイナミクスを実現できるのか？
→ 動的現象におけるトポロジーの概念は、どのようにして物質特性のもつれを引き起こすことができるか？
→ 高次元パラメーター空間(SO(3)=$\mathbb{S}^3/\mathbb{Z}_2$ & SO(3)/D$_2$=$\mathbb{S}^3/Q_8$のノットは可能か？
→ 高次元のトポロジーオブジェクト$\pi_4(\mathbb{S}^3)$ = $\mathbb{Z}_2$と動的ノットを持つ$\pi_4(\mathbb{S}^3)=\mathbb{Z}_2$は非平衡物質で発生するか

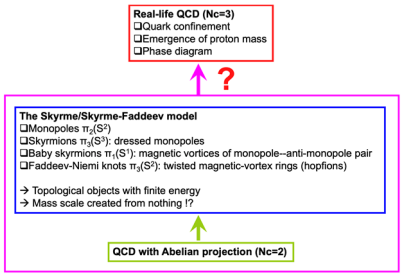

図3.5 ***SKCM*^{2}**拠点によるトポロジーとキラリティのパラダイム融合から生じる素粒子/原子核物理学の基礎的知見

素粒子から宇宙スケールまでのSKCM^2　量子色力学(QCD)は、原子核内の陽子と中性子を結合する核力の源である強い相互作用を記述する現代理論である。陽子質量を生成する機構は、ビッグバン後の宇宙における物質の形成に決定的な影響を与える。漸近的自由性と呼ばれる量子色力学の特性により、素粒子(クォークとグルオン)の複合系（ハドロン)への閉じ込めが生じ、またクォークと反クォークのペアが凝縮して、量子色力学のグローバル対称性(キラル対称性)の自発的破れに繋がり、ハドロンの基底状態や一連の共鳴状態に質量を与える。今日に至っても、この2つの現象の間の不思議な関係性について、現代的なコンセンサスに達することは未だ非常に困難である。これは、現在および近未来の加速器により到達可能な10^{12}ケルビン（注：太陽の中心でも10^7ケルビンに過ぎない）もの温度に達した初期宇宙や、我々の周りの通常の物質よりもはるかに高密度なコンパクト天体の物理を理解する上で、中心的な課題の1つである。

ハドロンで構成される通常の物質は、高温や高密度ではクォークとグルオンのプラズマに変化すると期待される。このような相転移は、グルオンが媒介する強い相互作用の高温/高密度媒質中での劇的な変化が引き起こす。ここでの主要目標は、質量をもつハドロンの出現とクォークやグルオンの閉じ込めとの間の、極限環境における関係性を解きほぐし、最終的には量子色力学とその相図の本来的な特性を確立することである。キラル磁性体の相構造との興味深い類似性が存在する事実に鑑み、佐々木は理論推進研究の取組を主導し、それらの系の根底にある対称性とトポロジーに関連する複雑な現象の根本的な記述を目指す（図 3.5)。

量子色力学におけるトポロジカルオブジェクト：Skyrme 模型は、核子をパイ中間子理論の静的ソリトンとして記述する。興味深いことに、この模型は、物理学で知られるすべてのトポロジー解を生成する。(1) $\pi_2(S^2)$を備えたモノポール、(2) ドレスモノポールとしての $\pi_3(S^3)$を備えたスキルミオン、(3) モノポールと反モノポールの対を接続する磁気渦としての$\pi_1(S^1)$を備えたベビースキルミオン、および(4) らせん状のベビースキルミオンでできるねじれた磁気渦輪としての $\pi_3(S^2)$ を備えた Faddeev-Niemi ノットで

ある。したがって、Skyrme 模型は、有限エネルギーを運ぶトポロジカルオブジェクトを構築するモノポールの模型である。Skyrme 模型は 2 色の量子色力学からも導くことができ、3 色を伝達する実世界の量子色力学のトポロジー的側面を記述できる可能性が高い。提案する研究プロジェクトは、上記の枠組みをさまざまな条件での量子色力学に拡張して、有限な温度、バリオン密度、および外部磁場における理論のさまざまな様相だけでなく、強い相互作用のゲージ動力学によって生成すると考えられる陽子質量の起源の探求も目指す。

高密度量子色力学の物質相：高密度のスキルミオン物質結晶は、半スキルミオンの体心立方（BCC）格子によって記述されることが知られている。強相関多粒子系では、トポロジー欠陥のために 2 次量子相転移が実現できる。相変化は、境界においてスキルミオンが 2 つの半スキルミオンへ「閉じ込めから解放」されて起こり、U(1）ゲージ場が出現する。場の量子論では、そうした創発的なゲージの自由度が自然に期待される。根底にあるダイナミクスが「低速」モードと「高速」モードに分離できて後者が統合される場合には、非アーベル的ゲージポテンシャル（ベリー位相）が誘発される。トポロジーを用いた高バリオン密度での量子色力学の物理の研究は特に興味深い。また、重イオン実験や天体物理観測における実験的検証だけでなく、与えられた外部パラメーターに対してトポロジーの転換がどのように起こるかを見出す。

量子色力学の臨界点：有限温度有限バリオン密度での量子色力学における 2 次相転移の存在は未だ仮説であるが、強相関電子系では臨界点の位置を決定する方法論が確立している。この方法を適切な拡張を加えて採用し、量子色力学における臨界点を予測することが目標である。

理論に導かれた実験的知見：QCD相図は、少なくとも温度、バリオン化学ポテンシャル（クォーク密度）、および磁場の3つのパラメーター軸について探査できる。重イオン衝突実験で制御可能なパラメーターは、衝突エネルギー、原子核質量数、衝突幾何（中心度）と、かなり制限されており、その中でも衝突エネルギーが支配的な影響を及ぼす。本拠点PIの志垣は、佐々木と協力して、スイスのCERN研究所LHC加速器での最高衝突エネルギーを用いて、低い化学ポテンシャルにおいて最高温度への到達に取り組む。有限な化学ポテンシャルの領域へは、より低い衝突エネルギーを使用して到達できる。これについては以前から考慮されていたが、中性子星の状態方程式などに関連して、現在はより広く関心を集めている。

量子色力学対キラルスピン系：本拠点研究者らは、キラル磁性体のキラルスピン構造の相図と QCD 相図との類似性を探り開拓する。対称性の破れに関連して、固体磁石やキラル液晶におけるキラルスピン系のハミルトニアンは、単一キラリティの素粒子を記述するハミルトニアンと共通点を持つ。したがって、素粒子の挙動は、キラル磁石や液晶のキラルスピンによってモデル化できる。井上と志垣は、佐々木ら数人の量子色力学理論家（福嶋健二、日高義将他）と連携して、磁性固体と量子色力学系におけるスピン系の比較から何が抽出できるかを見いだす。アイデアの 1 つは、キラルスピン系で知られている不均一性が、量子色力学系で出現する可能性があるというものである。PI らは、提案された現象を探索するための実験的手法を導入する。現在、ALICE 実験でこの問題を扱う実現性を評価中である。ALICE（2022 年～2025 年）での高統計データにより、より向上した精度でこの挙動を確認してスピン系と比較する。

ソフトマターに発現するノット相　QCD 相図からの着想に基づき、スマリュク、灰野、Senyuk、佐藤らは自然界では遭遇しえない新奇な物理的振る舞いをする秩序化された低対称性（三斜晶他）流体を創出し、この流体を新奇なソリトンやトポロジカル相を安定化する液晶性ホスト媒体として利用する。配向秩序と流動性を合わせもつ物質の状態であるネマチック液晶は、多くの技術開発に応用されると共に、素粒子から宇宙論に至るまで、実験的に取り扱いが難しいシステムの振る舞いをモデル化するのに役立つ。しかし、教科書に記載されている結晶性固体の対称性だけでは、多様な液晶性流体を分類するには不十分である。実際、低秩序の三次元流動性をもつネマチック液晶の対称性は、これまでにほんの数例しか見つかっていない（<10）。

　最近、スマリュクらは、サーモトロピック性とリオトロピック性を（図 3.6）を合わせもつ分子性コロイドネマチック液晶を見出し、ナノサイエンスに大きなブレークスルーをもたらした[*Nature* 590, 268-274 (2021)、*Science* 360, 768-771 (2018)]。そして、分子およびコロイド間相互作用を刺激に

より制御することでオングストロームからマイクロメートルの幅広い階層で、多様な相構造が現れることを見出した。これらの液晶を利用することで、単斜晶や斜方晶の対称性などに見られる新奇秩序と流動性を明らかにできる。さらに、これらの液晶が粒子のように振る舞うトポロジカルソリトンを安定化することが見いだされたことで、ソリトン結晶や動的に制御できる新しい物質形態を創出できると期待される。歴史的に、液晶は、多くの場合、偶然に発見されてきた。発見の可能性を高めるための一般的な方法は、求める相構造を生み出すと期待される対称性や相互作用を組み込んだ構成要素（分子または分子集合体など）を創り出すことであった。

しかし、スマリュクは最近、対称性の高い円盤状および棒状のコロイドや分子が創り出す新しい効果を発見し、これにより斜方晶系および単斜晶系ネマチック相が誘導されていることを明らかにした。また、単斜晶系ネマチック相の場合、分子やコロイドからなる構成要素が斜めに配向していることがわかった（図3.6a）。分子性のネマチック液晶相に安定化されたコロイドナノ粒子の配向秩序は、キラルでトポロジー的に興味深い一軸分子ネマチック液晶のD∞h対称性に「対称性の破れ」を導くと予想される。しかし、熱力学的に最安定状態としてこのようなコロイド粒子が形成される学理を明らかにする必要がある。以前の研究の多くは、多重極静電的、弾性的および磁気的相互作用が重要な役割を果たすナノコロイド間相互作用とその自己集合の解明に注目してきた。これらの相互作用を理解することで、PIはさまざまな秩序の対称性をもつ液晶を創出する。

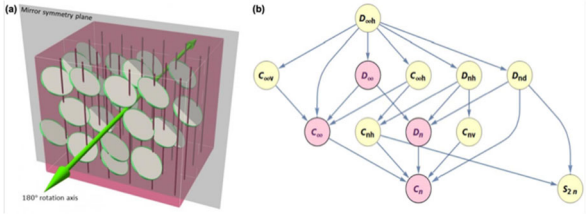

図3.6 分子性-コロイドネマチック液晶。(a)ネマチックホスト内でマゼンタの線に沿って分子配向した薄い板状構造が作る単斜晶系ネマチック相。対称面と軸を図中に示す。コロイド粒子の端の緑色の界面で液晶分子と粒子が相互作用する。(b)さまざまな幾何学的形状のコロイド粒子が安定化された一軸性D∞h分子によって形成されたメソ構造ネマチック液晶に現れる点群と対称操作。キラルおよびアキラル相はマゼンタと黄色で表す。

本拠点PIのDijkstra、スマリュクおよびco-PIのTasinkevychは、三斜晶系ネマチックのように、低い配向秩序と流動性を備えたメソ構造複合体を開発する。彼らは、不斉な湾曲構造をもつシリカナノ粒子を分子ネマチック液晶流体に分散させることにより、最も対称性の低い三斜晶系ネマチック液晶性流体の開発に成功している。実験的に明らかになったことにより、さまざまな低対称性ネマチック液晶は、対称性が秩序パラメーター空間に関連する、新しいトポロジカルソリトンを安定化するホストと期待される。

結晶の対称性が結晶格子と一致する固体とは違い、これから発見されることが予想される多様な対称性をもつネマチック液晶流体にはそうした制約は無い。三斜晶系ネマチックのように、特異な配向秩序と流動性の対称性をもつ分子-コロイドハイブリッド液晶を開発するための一般的な手法はまだ無いので、今回の提案の重要な研究課題である。多様な対称性をもつ新奇な配向秩序は、競合する異方的、弾性的、立体的および静電的コロイド相互作用で維持される分子やコロイド粒子の配置の熱による自発的再配向から誘導されると期待される。実際、コロイド界面における湾曲コロイド粒子間に働く静電的立体的相互作用と異方的な分子間相互作用の解析により構築されたモデルは、スマリュクの単斜晶系ネマティクスに関する最近の研究で行われたように、三斜晶系分子-コロイド液晶の配向分布とコロイド表面電荷の温度-濃度相図をよく表現する [*Nature* 2021]。

事実、C_{2h}対称性をもつ湾曲構造コロイドシリカナノ粒子は、粒子の表面相互作用を制御する配向軸が分子ネマチック液晶の主軸と異なる場合、三斜晶系C_{1h}ネマチック相を形成するようである。大きな曲がり角度（～150°）をもつ湾曲構造コロイド粒子の場合、配向秩序に三つの軸が見出される。また、すべてが互いに傾いており、そのうちの1つは分子に対応し、2つはコロイド粒子に対応している。本拠点の研究者は、液晶性分子とコロイド粒子の体積分率（数密度）を制御することで、ネマチック液晶性コロイド粒子の弾性特性がコロイド液晶相をどのように安定化しているかを解き明かす。実験的に、コロイド粒子間相互作用を、レーザーピンセット、ビデオ顕微鏡、光散乱と三斜晶系およびその他の中間相の配向場をマッピングできる非線形光学イメージングを使用して精査する。

また、分子コロイド液晶の体系的な研究を遂行し、さまざまな中間相とリオトロピック-サーモトロピック相図が、粒子の表面電荷、幾何学的形状（ベントコア粒子の曲がり角など）と界面条件（垂直対接線

対円錐縮退)、および液晶ホスト流体の性質（キラル対アキラルなど）にどのように依存するかを解明する。Senyuk とスマリュクは、Mertelj と協力して、分子とコロイド粒子の配向の磁気スイッチングを研究する。Dijkstra と co-PI の Tasinkevych は、その後の相図の数理モデリングにより実験的事実を補完する。熱力学的に安定な三斜晶系ネマチック液晶相は、対称性の低い配向秩序と流動性がどのように共存することができるかを明らかにする。

トポロジーは最近、硬い凝縮物質の相の発見で重要な役割を果たしているが、トポロジー的に非自明な場形状を持つ相は、ソフトマターでも発生し、キラル液晶の挙動を豊かにする可能性がある。ねじれ粒界とアブリコソフ相などの最もエキゾチックな凝縮物質相の一部には、基底状態にトポロジー欠陥の配列も含まれている。3D粒子のようなトポロジカルソリトンは、特に対称性の低いネマチック液晶で実現された場合、エキゾチック相の構成要素にもなることができる。スマリュクは最近、いわゆる「ヘリノトン」（図3.7）[Tai & Smalyukh, *Science* **365**, 1449-1453 (2019)]、材料ディレクター場**n**(**r**)およびらせん軸**X**(**r**)の非物質場の渦（回位）結び目における特異でないホップソリトンであるという二重の性質を持つ3Dトポロジカルソリトンの一種（図3.7b, c）を発見した。ヘリノトンは、三斜晶系結晶などの、閉開した、さまざまな結晶格子を形成する（図3.7d～g）。重要な問題は、ヘリノトンが自己組織化してソリトンの配向秩序のみを持つソリトニック液晶になるには何が必要かということである。

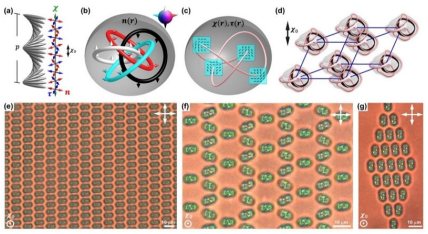

図 3.7 ヘリノトンのトポロジーと結晶。(a) 正規直交のトライアドを含むフィールド **n**(**r**), **χ**(**r**), **τ**(**r**)。(b) スムーズにベクトル化されたプリイメージ **n**(**r**)上の向きに応じて色付けされたヘリノトンの$\mathbb{S}^2$（挿入図）。(c) **χ**(**r**)と **τ**(**r**)中の渦線のノットと同じ位置にある **n**(**r**)中の結ばれたスキルミオン構造。(b, c)の灰色の等値面は、歪んだらせん状態の領域を示す。(d) 三斜晶系結晶の単位セル。歪んだらせん状の背景の等値面は、赤い渦ノット、黒/白および **n**(**r**)の原像と同一の場所に位置する。(e, g) 閉じたヘリノトン結晶格子、(f) 開いたヘリノトン結晶格子。

Senyuk とスマリュクの最近の研究では、ヘリノトン間の相互作用は、すでに数個の KBT と数百の KBT の間で制御でき、また効果的な形状は、ほぼ等方性であるものと非常に細長いもの間で制御できている。予備研究では、サブミクロンピッチのキラルネマチックで出現するヘリノトンは、無秩序なアモルファス相および斜方晶ネマチック相に自己組織化し、すべての構成要素が粒子状のトポロジカルソリトンであることが明らかになった（図.3.7d, e で示すものと類似しているが、より小さくかつより細長い）。これにより、ナノメートル長の有機分子がヘリノトンをホストするキラルネマチック液晶ホスト媒体を形成し、その後これらのマイクロメートル長のトポロジカルソリトンがさらに別のソリトニックネマチック液晶をより大きなスケールで形成する、階層的な液晶性がもたらされる。そうした系で出現できるネマチックメソ相は何か？ 予備研究では、同じまたは異なるトポロジー不変量、Hopf インデックス、およびホストネマチック流体を薄い層に閉じ込めることによって制御できるものを使って、ソリトン状態を含む多安定スイッチングの点で挙動が豊富であることが示されている（図 3.8）。トポロジー的に非自明なソリトン場構成によって形成されるこれらの安定した相のために、どのような種類の新しい物理的挙動と特性が生じる可能性があるか？ 技術的ニーズと基本的なニーズは、さまざまな対称性、トポロジーの多様性および秩序と流動性のさまざまな組み合わせを持つ液晶を明らかにするための研究を必要としている。

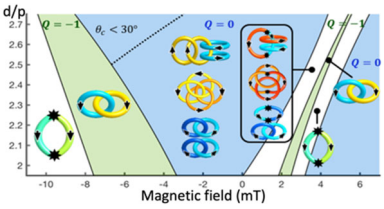

図3.8 調整磁場によって調査された、らせんピッチ*p*を持つキラルコロイド液晶の、厚さ*d*の薄いフィルムに閉じ込められたソリトン相の安定性の相図

特に興味深い高次元秩序パラメーター空間は、SO(3)=三斜晶系の$\mathbb{S}^3/\mathbb{Z}_2$ およびSO(3)/D_2=上記の斜方晶系ネマチック液晶の$\mathbb{S}^3/Q_8$である。これらの系で許容されるトポロジカルソリトンは、ホモトピー理論に基づいて理解されているが、それらの安定性と相互作用についてはほとんどわかっていない。これらのソフトマター系には、どのような種類のソリトニックノット場構成が存在できるか？ たとえば、$\pi_3(\mathbb{S}^3/Q_8)=\mathbb{Z}$と$\pi_3(\mathbb{S}^3/\mathbb{Z}_2)=\mathbb{Z}$トポロジカルソリトンは、$\pi_3(\mathbb{S}^3)=\mathbb{Z}$の高エネルギー物理学におけるSkyrmeソリトンのかなり興味深い類似物であるが、これらの系でグローバルまたはローカルな自由エネルギー最小値として出現できるか？また、それらは空間充填結晶状態を形成できるか？ ここでの新しいネマチック液晶設計のための2つのアプローチは、仮説的に融合することが

でき、これが発生すると、階層型液晶のさらに一層カラフルなスペクトルが出現することになる。スマリュクはLeonovと協力し、分子-コロイドとソリトニックネマチック液晶の両方の研究において、階層的ネマチック液晶の自己集合体の他の層を探し、これらの系の活性物質の類似物を開発するためにスマリュクらが発見した光を動力源としたコロイドスピニングを採用する[*Nature* **570**, 214-218 (2019)]。分子コロイドおよびソリトニック液晶の新しい対称性は、材料特性を与える可能性がある。それらはまた、分子、高分子、ミセル、その他の系における対称性の低い凝縮物質状態の探求を刺激する可能性がある。これからの発見の道は、凝縮物質とその技術的有用性のこれらの美しい状態の全く新しい世界を約束するものである。

創発的ノットおよび生物由来系のキラリティ　配向的に秩序化されたフォトニック構造は、多くの場合、液晶の構造と類似しており、カブトムシからカニ、魚と鳥に至るまで、多くの生命体に共通しており、さらに恐竜の化石からも発見されている。これらの中規模の機能は進化して、生存や優位性の特定のニーズに対する自然のオールインワンソリューションになっている。たとえば、太陽放射のスペクトルの選択的または広帯域反射および過酷な環境条件での熱エネルギーの管理を可能にする。自然界の多くのフォトニック構造は、通常、熱管理を可能にするために、近赤外線範囲（熱に変換される傾向がある太陽放射によるエネルギーの50%以上を占める）で反射する。カタグリフィス・ボンビシナのような特定のアリは、広帯域の可視および近赤外線反射（銀色の外観の原因）を使用するだけでなく、放射冷却によって熱を放散し、低い熱伝導率を可能にするために多孔質構造を示すことによって、過酷な温度条件下で生き残る。

さまざまなフォトニック超物質の設計が、選択的または広帯域の反射性の制御と放射冷却の両方のために最近開発されているが、自然は類似の設計を明らかにすることで我々を驚かせ続けている。光と熱の調節のための生物学的解決策は、その多くが依然として発見されておらず解明されていないが、生体模倣材料と生物由来材料の開発を刺激するために重要である。たとえば、現代の建物（エネルギー使用量の40%を占める）における熱管理の技術的ニーズは、ほとんどが過去数億年にわたって地球上のさまざまな形態の生命が直面してきたものを思い起こさせるものである。その結果、自然の光制御および熱管理ソリューションは、より効率的な建材やスマートな衣類などの開発に採用できる。自然界に見られるさまざまなフォトニック反射板や熱障壁を模倣して、窓、壁、屋根、外壁のその他の部分に適用するためのエネルギー効率の高い建築材料を製造できる。

さらに、そうした材料は、木材、さらには廃棄物のような汚れた初期原料から抽出される、最も豊富なバイオポリマーであるセルロースから作ることができる。光と熱を制御するための自然の特に興味深いアプローチには、らせん状のコレステリック構造が含まれており、最も単純な形では 1 次元のフォトニック結晶として機能する。そうした自然のデザインのより洗練された形は、金または銀のような反射ベースの外観、狭帯域または広帯域のスペクトル反射性、さまざまな種類の集束と光/熱の方向転換などを可能にする。さまざまな自然の体現形態における構造の多様な特性は、反射光の波長を決定する、らせんピッチ、構成要素が 360°回転する距離を変えることによって、さらにはピッチ、欠陥、多層構成などのさまざまな空間勾配を形成することによって達成される。たとえば、スマリュクと Vignolini は、最近、カブトムシのキューティクルに見られる多層構造を模倣した太陽光利得を調整するスマートウィンドウフィルムを開発した（図 3.9）。そこでは、らせん状構造の層は、ネマチックのような複屈折層によって間隔が空けられている。

これは、カブトムシが進化の中で発達するには非常に洗練された設計のように思えるかもしれないが、彼らはスマリュクが合成液晶で発見した「ヘリノトン」と呼ばれるトポロジカルソリトンの証拠を見つけて驚いた[*Science* 2019]。ヘリノトンの概念が登場してまだ 2 年しか経っていないが、カブトムシやその他の生命体は、何億年もの間、光管理および熱管理においてそうしたトポロジカルソリトンを引き起こしていた可能性が高い（図 3.9d のヘリコイドの下部を参照）。これは、カブトムシのキューティクルおよびセルロースベースの液晶および刷り込み液晶秩序を持つ、それらによってテンプレート化された固体フィルムにおけるソリトニックトポロジー構造の基本的な研究を必要とする。研究者は、エネルギーの安定性とそうした系における空間的に局所化されたソリトンの潜在的な技術的有用性の背後にある物理的原理を明らかにする予定である。

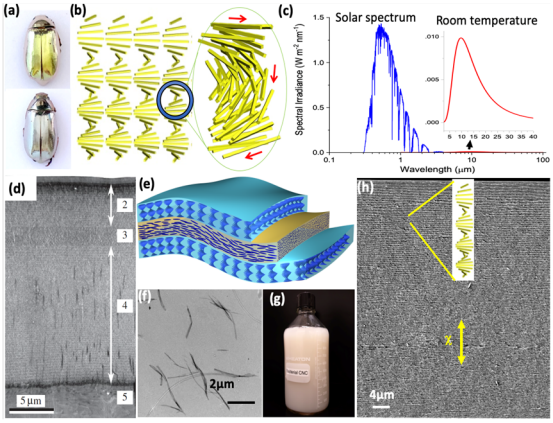

図3.9 自然および生体にヒントを得たらせん構造とソリトン。(a)クリシナ・リスプレンデンス、金色スカラベカブトムシ(上)とクリシナ・クリサルギレア、銀色スカラベカブトムシ(下)の写真、いずれもそのキューティクルのらせん構造によって広帯域の光反射を実現している。(b)キューティクルにおけるそれを模倣したセルロースナノ結晶によって形成されたキラル構造の模式図。(c)地球表面の太陽スペクトルと（挿入図）室温での熱スペクトル。(d)クリシナ・リスプレンデンスのキューティクルの外側部分を通る断面で、エピキューティクル(1)と上部ヘリコイド(2)、ネマチック様層(3)と下部ヘリコイド(4)からなるエクソキューティクルおよびエンドキューティクル(5)の領域を示す。画像は、[J. Roy. Soc. Interface]による。(e)キューティクルに見られる、ネマチックリターダーによって分離された2つのらせん層によって形成されたほぼ100%の反射率を持つ3層フォトニックアセンブリの模式図。(f, g)ナノセルロースのTEM像(e)と～10重量%の水性コロイド状ナノセルロースの写真(g)。(h)セルロースナノ結晶のらせん構造のSEM画像。

人工フォトニック結晶の出現により、それらが光とどのように相互作用するかについての理解が深まり、さまざまな形態の生命における光と熱の両方の管理が可能になった。ただし、そうした系に見られる空間的に局所化された構成にはほとんど注意が払われなかった。これは、コレステリックヘリコイド構成のような均一な遠距離場の背景に埋め込まれていることが多く、合成液晶材料で最近広く研究されているヘリノトンやスキルミオンなどのトポロジカルソリトンに類似している。このことは、ナノセルロースベースのキラルネマチック液晶でそれらを理解し、再作成して、ナノセルロースベースの液晶でスキルミオン、ホップフィオン、ヘリノトンなどのエネルギー的に安定したトポロジカルソリトンを実証し、自然界に見られる類似した空間的に局在化した構造との潜在的な関係を研究することを必要としている（図.3.9）。スマリュク、VignoliniとCo-PIのMatczyszynは、可視光と熱管理のために、また明確に定義された局所的な中規模構造をテンプレート化するために、そうした組織をどのように研究できるかを明らかにするために、セルロースナノ材料のソリトン構造の潜在的な用途も明らかにする予定である。トポロジカルソリトンは、数学的/非線形物理学の驚異であるが、自然界や生物学的に派生した物質でそれらを見つける可能性は依然として研究されていない。実験（スマリュク、VignoliniおよびLin）と数理モデリング（楯）を組み合わせることで、このニーズに対処する予定である。このことは、熱管理および光管理アプリケーション、局所構造のナノテンプレート化、エネルギー効率の高い超物質などを可能にするため、革新的である。トポロジーによって決まる自己組織化の背景にある組織化の原則を特定すること、およびその後の自己組織化された構造を使用して、その引き換えに光と熱/エネルギー伝達を制御することに焦点を当てる。本拠点で実施する研究は、また、学生のトレーニングのための魅力的なプラットフォームであり、多数のアウトリーチ活動と統合する。

ノットとリンク分子の結晶　本拠点PIの佐藤は、最近、[2]カテナンが構造成分として使用された分子のノット、またはカテナンからなる多孔性結晶を実現した。得られた多孔質結晶は、既知の結晶材料の中で非常に小さいヤングのモジュールを示し、結晶でありながら、力学的応力が加わる前後で、グミのように巨視的な形状を柔軟に変化させることができる[Sato & team, *Nature* **598**, 298-303（2021)]。本WPIプログラムでは、佐藤は、次の3つの取組に焦点を当て、さまざまな種類の分子のノットから成る優れた力学的特性と熱特性を備えた「結び目」のある材料の開発に取り組む予定である。

優れた力学的特性と熱特性を備えたキラル分子ノットベースの結晶は、スマリュクと共同で開発され、本拠点PIのKalmanと小鳥居およびco-PIのShokef（テルアビブ大学、イスラエル）によってモデル化される。以前に報告した多孔質結晶[Sato & team, *Nature* **598**, 298-303 (2021)]は、キラル空間群で結晶化し、［2］カテナン成分は多孔質結晶中にらせん状に配列している。これらの結晶の力学的特性を調べ、キラリティ、ノット不変量と力学的特性の間の関係を明らかにする。たとえば、多孔質結晶にトルクを加えてねじったときに発生する剛性率を評価し、ねじれの方向と分子のノット（[2]カテナン）の配列との関係を調べることができる可能性がある。物質のキラリティや力学的特性は、生物が作り出すさまざまな構造にも関わる問題であり、本拠点研究で扱う基本的な問題である。

分子のノットベースのエアロゲルは、佐藤がスマリュクとSenyukと共同で開発する。彼らは、共有結合やイオン結合などの強い結合ではなく、分子のノットで構成される多孔質材料の断熱特性を調査する。

彼らは、多孔性と分子のノットの両方を持つ材料の熱伝導を調査し、優れた断熱特性と高い光透過性を同時に示す材料の開発を試みる予定である。具体的には、さまざまなアルコキシシランやシラン官能化分子のノット（シラン官能化カテナン）を重合して新しいエアロゲルを合成し（図3.10a）、その後、その物性を調べる。

ノットソフトマターを形成する別の戦略は、ノットのあるタンパク質ベースの多孔質材料を使用することである。ノットのあるタンパク質とペプチドを集めることにより、新しい材料を開発する。ノットのあるタンパク質/ペプチドの固有のキラリティと、自己組織化プロセスによって生成される中規模キラリティを組み合わせることにより、新しい材料特性が実現する。ノットのあるペプチドの例として、約20個のアミノ酸残基から形成されるラッソペプチド構造が、多孔質材料の成分として利用される（図3.10.b）。

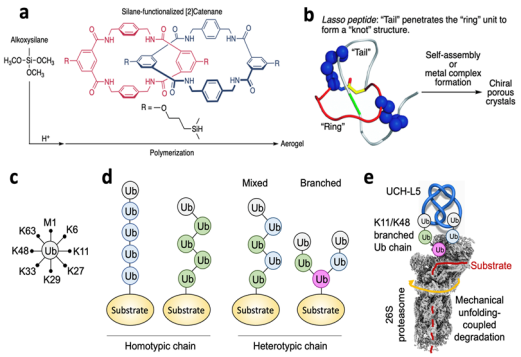

図 3.10　（a）シラン官能化カテナン、（b）タンパク質、および生物系で自然に発生する（d-e）タンパク質のノットに基づくノット分子結晶およびゲルの化学設計戦略

ユビキチン鎖分岐構造およびタンパク質の結び目構造　タンパク質のユビキチン化は、酵素のカスケード反応を介して、ユビキチンタンパク質が標的タンパク質基質にタグ付けする。これは、さまざまな細胞機能制御のシグナルとなる翻訳後修飾である。ユビキチンは、ポリペプチド鎖の先頭にある7つのリジン（K）残基とメチオニン（M）残基を含む8つの接続点の1つを介して、基質となる別なユビキチンに結合する（図10c）。異なるユビキチン結合タイプは、異なった生体シグナルをコードする。通常のユビキチン化は、ユビキチン-プロテアソーム系で使われる。この場合、K48を介して繋がったユビキチンは、26Sプロテアソームに認識され、ユビキチン化された基質タンパク質のアンフォールディングと分解が行われる。

単一結合様式で連結したユビキチン鎖に加えて、異なる結合様式による鎖状構造のユビキチン鎖、複数の部位で結合して分岐型構造をもち複雑なトポロジーを形成するユビキチン鎖も報告されている（図10d）。ユビキチン鎖は数多くの分岐構造を取り得るため、ユビキチンの分岐構造形成機構を最適な時空間分解能で理解するに、HsuとTateは新しい実験と理論を構築する。K11/K48分岐構造をもつユビキチン鎖は、細胞周期の調節とハンチントン病で生じるタンパク質変性に関わる。K11/K48鎖は、基質タンパク質分解のためにプロテアソームによって認識される。興味深いことに、K11/K48鎖は、5_2ノット構造を持つユビキチンC末端加水分解酵素UCH-L5に好んで結合する基質であり、K11/K48ユビキチン鎖が結合することでUCH-L5のユビキチン除去が活性化される（図10d）。

PIのHsuは最近、UCH-L5が前例のない程の安定性をもち、それが細菌プロテアソームにおける機械的変性に対する耐性を与えることを見いだした。結び目構造が、UCH-L5が過酷な環境下における力学的変性とプロテアソームによるK11/K48ユビキチン化基質タンパク質分解の間でのバランスを制御するために必要なUCH-L5の機械的安定性を提供することを示唆する。Hsuは、プロテアソームとUCH-L5の両方に対するK11/K48鎖認識の原子レベルでの構造的基盤を収集するクライオ電子顕微鏡観測のために、K11/K48鎖のヒトプロテアソームおよびUCH-L5複合体を生化学的に再構成する計画である。WPIのこの推進領域の長期的な目標は次のとおりである。(i) さまざまな分岐ユビキチン鎖のトポロジーを定量的に記述する新しい技術を開発する、(ii) 分岐ユビキチン鎖を検出するセンサーとしてのUCH-L5が使われる意味を研究する、（iii）結び目構造をもつUCH-L5とプロテアソーム間の動的な相互作用を理解する。***KCM²***は、複雑な生物学的問題を解決するための学際的な共同研究を可能にし、ユビキチン分岐の役割の解明を明らかにする。***KCM²***の活動の中で、張力下でのUCH-L5の力学的特性を研究する。

学際的な取組の統合：上記の計画は、今後追求される多くの***KCM²***の活動の一例に過ぎず、あまりに多様であるため、関連性がないという声が上がる可能性はある。しかし、それらはすべて、トポロジー、キラリティおよびそれを基に進歩が築かれる結び目理論の基盤により相互に結びつき、相互にリンクする。これらの異なる分野間の情報交換を、異なる分野のバックグラウンドと地理的に異なる場所にいる3人のPIが各学生/ポスドクを共同して指導することにより、また毎週実施するハイブリッドセミナー、スクー

ル、会議などを通して可能にする。

２）-3. 研究推進体制

***SKCM*²**拠点の非常に挑戦的な研究と教育の目標をサポートするため、効率的で費用対効果の高い機能を備えた卓越した研究拠点を構築する。拠点長候補者のスマリュクは、WPI拠点にふさわしい研究運営、ガバナンス、社会への普及、事務業務全般を指揮・監督し、また、国際公募によるトップ若手研究者の新規採用を行うことで、10年の事業期間中に5～10名の新規PIが着任する予定である。挑戦的なWPIに対応した改革を広島大学全体に実施するため、安倍は、まず、現在の広島大学の理事・副学長の役割とWPIの事務部門長の役割を兼務する。その後、安倍はできる限り早急にWPIの事務部門長としての役割に専念することになる。佐々木は、様々な国でキャリアを積んだ経験をもとに、MITやケンブリッジ大学などの海外PIや若手研究者と広島大学の研究者との、研究交流、会議、国際助成金の共同申請などのエンゲージメントをコーディネートする。

本拠点は、2015年以来、PIの井上が主導してきており、過去に成功を収めたCore-to-Coreプログラムである「スピンキラリティを軸にした先端材料コンソーシアム」を一部活用する予定である。井上はこれまでの経験を生かし、教育ミッション担当副拠点長を務める。彼はまた、広島大学放射光科学研究センターの施設やその他の最先端共同利用施設と、本WPIで新たに追加された施設との円滑な統合も監督する。相田は小鳥居とともに若手研究者育成の指揮を執り、日本と広島大学の女性がアカデミック環境で指導的地位に就けるように力付けることを目指すドリームチームを形成する。池上は、越智学長、安倍、スマリュクと緊密に連携し、県、東広島市、産業界のパートナーとのWPIの緊密な関係を構築する。池上と島原は、WPIの助成金/資金調達プログラムを主導し、個別の提案を通じてPIが確保する政府および産業助成金、また日本及び国外の慈善家や私立財団による資金源を活用することで、このWPI補助金を補完することを目指す。副拠点長の小鳥居は、このWPIのアウトリーチ活動を監督し、展示やデモンストレーションの形で学校や広島の中心地にある原爆ドームなどの公共の場所で、ノットキラリティ科学を一般人に紹介する。薮田は科学担当副拠点長となる。運営委員会には、図3.11に示すように、合計4名の女性が就任する（図3.11）。さらに、薮田と佐々木は、安倍とともに戦略立案グループを形成し、スマリュクを支援する。小鳥居、Senyuk、薮田、井上はまた、WPIの4つの研究推進領域も主導する（図3.3）。

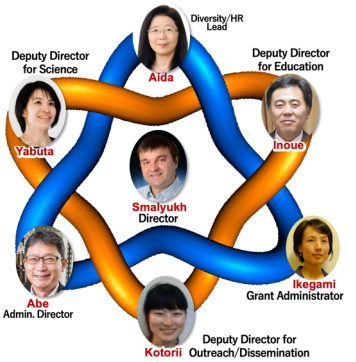

図 3.11 拠点の管理と研究活動は、研究、教育、アウトリーチの成果、および持続可能な未来への恩恵を最大化するために巧みに相互にリンクされる。

拠点の全体的な機能は、「事務組織の結び目」の図に要約されている（図3.11）。ここでは、文部科学省のビジョンに従って、性別構成、経験、若いエネルギーや、WPIを改革の種として使う必要性および管理の自律性を維持する必要性などのバランスを取ることが配慮されている。我々のリーダーシップは、拠点で雇用される高いスキルを有するスタッフによってサポートされる。本拠点のリーダー達は、越智学長ならびに中国四国地方および日本全体の他の大学の強力な支援のもと、このWPIを種として、広島大学全体の教育改革やシステム改革を計画・実行する。拠点長と事務部門長は、越智学長と毎月会合を持ち、WPIの支援ニーズを確認し、改革の進捗について議論する。サマースクール、ウインタースクール、シンポジウムでの全拠点構成員による年次総会と全PIによる月例ミーティングを催し、助成金への共同申請、セミナーシリーズ、コース開発計画などを含むWPIの長期的発展の戦略立案に役立てる。効果的な日々の運営を保証するため、拠点の執行部と事務担当者から構成される運営委員会を毎週開催する。また、拠点長は、定期的に5名の外部アドバイザー、著名な研究者、他の拠点長に助言を求め、広い視野から本拠点の運営を牽引したり独自に評価したりすることに役立てる。

***SKCM*²**拠点の成長と繁栄が続くよう努めることにより、やがていつの日か数千人規模の従業員雇用が実現することを期待している。ただし、事業期間中の人員配置の短期的な目標は、事業期間の5～7年後に、約20～25人のPIと約150～180人のコア研究者を配置することである。本拠点は、女性の科学者と管理職を雇用するように努める。新規に雇用する5～10人のPIのうち、50：50の男女比、外国人比を採用することで、ジェンダーバランスを高め、多数の若い才能ある研究者を抱えた刺激的で非常に多様な

学際的で多文化的な環境を生み出す。

約 2 年後に、広島大学キャンパスのすぐ隣にある産総研広島支部とクロスアポイントメントの可能性がある新規 PI を採用する予定である。これは、産総研広島支部のサテライト拠点の設立につながる可能性があるが、この選択肢は、産総研の執行部や、文部科学省とも相談の上、共同で後日検討される。ここでのビジョンは、スマリュク、Vignolini（英国のケンブリッジ大学所属の PI）と産総研広島支部のリーダーが協力して、オープンで国際的な人材サーチを通じて、クロスアポイントメントを用いて非常に成功した新しい PI を採用する可能性を検討する。国立研究所と大学間の非常に実りある研究パートナーシップは、JILA（コロラド大学ボルダー校と NIST の共同研究所）の例のように、多くの科学的ブレークスルーやノーベル賞をもたらした。産総研-WPI-広島大学の連携は、広島大学と産総研間のそうしたパートナーシップを体現化したものになる可能性がある。ナノセルロース関連のトポロジー/キラリティ研究における産総研広島支部の既存の強みを活かし、キラルトポロジカルナノセルロース系に関する共同研究が、新規 PI の新たなジョイントアポイントメントの可能性を念頭に確立される。このような採用活動においては、ジェンダーバランスの改善を実現させ、才能ある多様な若手研究者が数多く集結し、広島大学に惹きつけられるように鋭意努力する。

連携する研究者の所属機関（図3.12）には、サテライトの設置は行わない。現在、広島大学以外の日本の機関には、理化学研究所・東京大学の佐藤と東京工業大学のKalmanの2人のPIがいる。Kalmanと佐藤とのパートナーシップと共同研究は、結び目理論の記述とインターノット分子を含む物質の化学合成の観点から、拠点のミッションを達成するための鍵である。しかし、日本の***SKCM²***の研究者が行う科学的な交流とそれに伴う共同出版には、日本の他の約20の機関の研究者も参画する（PI以外の共同研究者として、そうした共同研究のために自身で資金を確保する）。我々が意図しているのは、柔軟なオープンドアポリシーを維持し、日本国内および世界中で相互に有益な共同研究を促進することである。東京のPIとのパートナーシップには、研究だけでなくアウトリーチと教育の要素もある。たとえば、東京を拠点とするVRベースのプラットフォームは、東日本（東京プラットフォーム）のアウトリーチと教育に使用される。そこでは、移動教室用の機器を利用可能として、日本の他の機関の共同研究者とともに使用され、それは西日本向けのプラットフォーム（広島大学プラットフォーム）とは異なる。

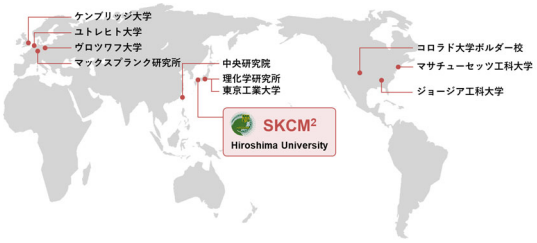

図3.12 壁のない国際機関としての***SKCM²***

海外連携先となっている研究者の所属機関（図3.12）には、米国の3つの大学としてコロラド大学ボルダー校、MITおよびジョージア工科大学、台湾の中央研究院、およびヨーロッパの3つの機関として英国のケンブリッジ大学、ドイツのマックスプランク研究所とオランダのユトレヒト大学が含まれる。これらの機関は、PIの所属機関であるだけでなく、共同訪問や長期滞在のために日本から来るポスドク研究員や博士課程の学生を受け入れる。研究や各種施設の利用にとどまらず、日本の若手研究者がこれらの機関を訪問中に専門的なコースを受講できるように取り決めることで、若手研究者の学際的な訓練の幅を広げることができる。これらの海外機関のPIは、日本の博士課程学生やポスドクを共同で指導するとともに、日本のポスドクの主指導者となり、彼らの他の学生やポスドクを広島大学や他の連携先の機関に派遣して共同研究を行う。海外PIは、通常、年に2～3か月日本に滞在し、さまざまなサマースクール/ウインタースクール、シンポジウム、会議などの共同開催を支援する。他のページで記載したように、PIはWPI関連の取組に対して、給与（日本訪問時の夏季給与など）、コンサルティング料およびボーナスの組み合わせにより支払いを受ける。WPI事業開始直後、海外PIは日本を訪れ、共同研究および教育活動の広範な計画を立てるとともに、広島大学の拠点長および他のPIがさまざまな連携先を訪問して、これらのパートナー機関および研究グループを効率的に統合/相互接続して、本拠点のミッションを遂行する。ポスドク研究員と博士課程学生の国際公募も実施する。海外PIは、すべてのキャリアレベルで本拠点のより良いジェンダーバランスを実現するために、広島大学が有能な女性科学者を採用する手助けをする。若手研究者は、MITやケンブリッジ大学などの世界トップレベルの研究機関と広島大学を結びつけ、数学から物理学および惑星科学に至る分野間の専門分野の境界を（複数の共同メンターと協力することによ

り）なくす。本拠点は、トップレベルの国際的研究機関とのパートナーシップによって強化され、大学改革の種をまき、評判を高め、広島大学を日本のハーバード大学のようにし、グローバルな視点とエネルギー需要の削減、気候変動の緩和、日本のSociety 5.0目標と経済成長への貢献力を備えた新世代の研究者を育成する。

ａ）主任研究者（教授、准教授相当）

（人）

	事業開始時点	令和４年度末時点	最終目標（令和９年４月頃）
ホスト機関内からの研究者数	9	9	10
海外から招へいする研究者数	8	8	10
国内他機関から招へいする研究者数	2	2	4
主任研究者数合計	19	19	24

ｂ）全体構成

	事業開始時点		令和４年度末時点		最終目標（令和９年４月頃）	
	人数	%	人数	%	人数	%
研究者	39		78		156	
外国人	17	43.6	35	44.9	79	50.6
女性	14	35.9	32	41.0	79	50.6
主任研究者	19		19		24	
外国人	10	52.6	10	52.6	12	50.0
女性	7	36.8	7	36.8	12	50.0
その他研究者	20		59		132	
外国人	7	35.0	25	42.4	67	50.8
女性	7	35.0	25	42.4	67	50.8
研究支援員数	2		4		4	
事務スタッフ	7		13		13	
構成員の合計	48		95		173	

	事業開始時点		令和４年度末時点		最終目標（令和９年４月頃）	
	人数	%	人数	%	人数	%
博士後期課程学生	8		22		72	
うち雇用見込み	8	100.0	22	100.0	72	100.0

２）-4. 研究資金等の確保

過去の実績

FY	Total amount (yen)	
	All PIs	All personnel
2017	649,865,481	834,889,314
2018	658,549,889	864,233,723
2019	576,281,565	837,314,565
2020	571,884,136	882,617,136
2021	561,063,726	788,393,393
2017-2021	3,017,644,798	4,207,448,131
Average	603,528,960	841,489,626

この表は、現在の PI の研究資金をまとめたものである。たとえば、Vignolini とスマリュクは、様々な政府および民間の資金源から年間 200 万ドルを超える資金を獲得している。我々の PI の中には、キャリアが浅くとも、また、ポスドクや学生でありながら、競争的フェローシップや助成金などを通して資金調達に成功した者もいる。

拠点設立後の見通し

海外PIは現在、広島大学のPIの5～10倍の資金を確保している。その理由として、一部には、広島大学や日本の研究者は概して日本国外に資金源を求めることがほとんどないことが挙げられる。しかしながら、本拠点に資金が提供されれば、そのような状況は変わるであろう。国際財団への申請方法に関するコーチングセッションが導入され、広島大学のPIは、世界中の多くの民間/慈善団体からの資金提供にアクセスする。英語を話せる本拠点の事務職員は、そうした助成金申請をサポートすることができる。さらに、広島大学のPIと世界のトップ研究機関のPIとの広範な協力により、彼らの申請の競争力は高まることになる。したがって、広島大学のPI一人当たりの助成金合計額は、今後5年間で3倍になり、事業期間の終わりまでには5倍になると予想される。海外PIの研究資金は、10年で2倍になると予想されている。上記の見積もりは、この提案に基づくWPI補助金を除いた外部資金のみを考慮したものである。

過去の実績から、各海外 PI の資金調達額の総額は、事業期間内で PI1 人あたり 100 万から 300 万ドルの範囲になると見込まれる。日本の PI および PI と共同研究する Co-PI の予想される資金調達額は、PI あたり 20 万ドルから 100 万ドルの範囲である。PI が獲得する追加の外部資金額は、程なく文部科学省からの WPI 補助金の総額を超えるが、本拠点のすべての PI および Co-PI は共同で、WPI 補助金のみの場合よりもかなり大きな年間資金で運営し、事業期間内に増加するため、10 年後に WPI 事業が終了したとしても拠点運営は問題なく進めることができる。本拠点を 10 年後も維持するために、WPI の新規雇用を含め、外部資金によってプロジェクトを運営し、大学のコミットメントを維持し、国際的な財団からの資金を確保する（詳細については、以下のセクション 4.3 を参照）。

２）-5. 融合研究

トポロジーとキラリティは、結び目理論のような純粋な数学や惑星科学だけでなく、素粒子から生物系および宇宙系に至るまでの自然の階層を越えて、さまざまな長さと時間スケールの現象に現れる。トポロジーとキラリティは、双方とも、表出（モデル化されて目に見えるようになること）の象徴的な例である。各部位が集合した際に、全体よりも小さくなるため、よく理解された基本要素から全体像を説明しようとするよう還元主義的アプローチを用いて理解することは不可能である。重要な新発見を約束するノットトポロジーとキラリティの創発的な相乗効果には、長さと時間スケールの階層を扱うだけでなく、全く新しい概念、法則および一般化を創出する必要があり、それらは我々が提案する学際的な国際研究ネットワークにおいてのみ可能である。たとえば、構造のキラリティは運動のキラリティで時空間を構成することを可能にし、またその逆も可能であるが、これらの創発的な現象を理解することは学問分野の境界によって妨げられている。

そこで、トポロジーとキラリティに焦点を当てた研究分野を掛け合わせ、通常であれば交流することのない研究者を集め、融合させる。このような理念は、我々が提案する拠点の根底にある動機を提供するものである。それは、物理学、化学、生物学、材料科学の分野でも工学の一分野でもなく、むしろこれらを真の意味で学際的に融合した分野であり、これらすべての分野との関連で同時に大幅な進展が得られるような、キラルノット超物質の創発に焦点を当てた新しい学際的研究分野を生み出す。本拠点は、卓上研究と基礎知識の応用への展開に焦点を当てて、素粒子から宇宙スケールまでのキラリティとノットトポロジーの役割を総合的に探求し、キラルノット超物質という新しい分野を生み出す。結び目理論やホモトピー理論のような数学的概念は、新たな発見を理解し、分類し、一般化するのに役立つ。我々の研究の大部分は、液晶、コロイド、磁性体、生体高分子など、実験的に非常にアクセスしやすい系に焦点を当てているが、我々の研究は、ブラックホールや素粒子などの実験的にアクセスしにくいスケールの物質や現象の研究に直接影響を与える。逆に、素粒子物理学と宇宙論の理論は、これらのアクセス可能な生物系と物性物理系に基づく関連する現象のより深い理解と実用化に大きな影響を与える。拠点の基礎研究によって可能になると予想される将来の技術的応用は、持続可能なエネルギー効率の高い建築技術から、地球外で居住するための材料、病気の生物医学的検出と治療、スピントロニクスとデータストレージデバイスにまで及ぶ。このような研究の将来的な価値を積み重ねることで、持続可能な未来を保証することができる。

３）国際的な研究環境と組織改革

３）-1. 国際的研究推進体制(拠点を構成する研究者等)

我々が構築しようとする研究所は、壁がなく、世界の中でもひと際存在感を放ち、高い知名度を誇る卓越した研究センターである。したがって、我々は、我々の取組に参加してもらうために、世界トップクラスの機関から高い認知度のあるPIを呼び寄せた。海外サテライトの設置は予定していないが、我々の協働およびPI間の共同研究を生み出すもととなる若手研究者へ共同で助言・指導を行い、我々の活動を相互に結び付けることによって、我々の***SKCM²***拠点のすべての研究および教育ミッションへ貢献する者として、国際PI、co-PIおよび若手研究者を強力に参画させる予定である。これは、PI間の交流やパートナーシップを仲介する若手研究者の共同アドバイスやメンタリングを通じて、私たちの活動を相互に結びつけることによって実現される。若手研究者は、国際的な人材発掘を通じて採用され、海外機関のPIと共同で選考される。こうすることで、当該ポストへの候補者は、皆の高い要求に応える、すなわち実りある国際共同研究に必要とされる水準に適うようになる。

拠点長は、人事、採用、予算など、国際化に関連するすべての重要な決定権を有する。「事務組織の結び目」の図に概説されている彼のチームは、提案したプロジェクトのビジョンと目標の実行を支援し、WPI採択が発表されるとすぐに実行に移すことができるようにする。WPIの資金提供について通知を受けると、直ちに（必要に応じてビザ申請用の書類を確保することから始めて）国際PIとco-PIを広島大学に訪問させるようにするための作業を行う。広島大学は、海外のPIの広島大学での滞在時間を増やすために、彼らの所属する機関の教育や付随業務の一部をバイアウトする。例えば、長期サバティカルやその他の滞在制度、クロスアポイントメント、コンサルティングなどの契約を用いて、実現する。海外PIは、広島大学で採用されたポスドクの主たる指導者となり、ポスドクはそのPIの研究室で50%の時間を海外で過ごす。海外PIは、本拠点で支援するすべての博士課程学生の共同指導者となり、学生らはそのPIの研究室で50%の時間を海外で過ごす。本研究グループに参加することは、本拠点のPIにとって家族になるようなもので、外国人PIは皆、広島大学で雇用されたメンバーと家族のような結びつきを持つことになる。新しいメンバーを迎えることは、外国人PIが楽しみにしていることである（彼らのコミットメントレターを参照）。これらのPIは、広島大学の若手研究者が目指す素晴らしい見本となり、彼らに世界的な視点での研究の展望を示し、世界のトップ100機関のからのメンタリングにより、最高の知識を統合・習得することになる。広島大学および若手研究者は、トップグローバル研究拠点と広島大学を結びつけ、数学から物理学および惑星科学に至る専門分野の境界を（複数の共同メンターと連携して）消し去る。提案するWPIの国際的活動は、ウクライナでの学部教育から米国での博士課程、教員としてのキャリア、そしてドイツ、フランス、イスラエル、英国、オランダ、日本での一連の長期滞在とサバティカル訪問に至るまで、多様な国際経験を持つ拠点長（スマリュク）の貢献も大きい。彼の経験は、広島大学と他のPI、co-PIとの協働を成功に導くと期待される。スマリュクは、過去に採択された他のWPI拠点長のうち、米国を拠点とする3名の経験をもとに、日本に滞在する時間を含め、WPIの様々なミッションに専念できるよう、最大限に努める。また、広島大学、コロラド大学、そして世界中の機関との共同研究や運営をリードしながら、拠点の様々な参画機関に出向き、研究コミュニティの構築を目指す。彼の昼夜を問わない強いコミットメント、熱意、献身は、グローバルな視点を持つ新しい世代の研究者を刺激し教育するために不可欠であり、また、彼が直接かつ全面的に関与することになる広島大学でのセンター立ち上げとその運営を成功させるためにも不可欠なものである。 広島大学で定期的に対面でのセミナーを開催し、海外の研究者も参加できるようズームで行い、異なるタイムゾーンにいるWPIメンバーが快適に参加できるような時間帯で実施する。パンデミックが国際交流を制限し続ける場合、VRやテレビ会議プラットフォーム、Google Glassや同様のツールを使用した実験的リモートトレーニングを使用して、その影響を緩和する。

３）-2. 国際標準の研究環境

国際共同研究や若手研究者に最適な条件を備えた、堅牢で効果の高い環境を確立する（図3.13）。海外のPIは、広島大学の研究グループに在籍し、共同研究を指揮し、広島大学のポスドクや学生を指導・協働指導するために日本/広島に物理的に年に2～3か月滞在する。定期的な研究セミナーや会議を毎週オンラインで開催し、WPIの他のメンバーと進捗状況を共有する。スクールを毎年組織し、すべてのメンバーが1週間か2週間集まって、広範な議論を行い、アイデアを交換できるようにする。本WPIの運営においては、メンバー間の緊密なコミュニケーションが最優先事項であると認識している。組織化され、さまざまな機会に頻繁に意見交換することで、相互の知識交流により生産的な学際的研究が確実に行われる。

主な取組には次のようなものがある。
→ 大学院教育の改革と分野横断的なトレーニング
→ 国際研究交流、スクール、会議およびフォーラム
→ 広島大学ウインタースクールでの、科学を補完するようなノーベル平和賞受賞者による公開講義
→ 広島平和フォーラムとのパートナーシップと相乗効果
→ コロラド大学ボルダー校のTASI(Theoretical Advanced Study Institute)および凝縮物質に関するスクールとの相乗効果
→ 2027年のカリフォルニア大学サンタバーバラ校カブリ理論物理学研究所のプログラムを佐々木、スマリュクおよびMark Bowick（KITPの准ディレクター）が主催し、さらに幅広い研究者コミュニティを約12週間集める。
→ スタッフの20%以上を日本国外から採用し、事務処理や全ての業務を英語のみで行い、国際的研究センターとして非常に効果的な環境を整備する。

図3.13 拠点は、国際的な研究環境を確立する。

拠点の目標とミッションを迅速に達成するため、煩雑な各種手続きを廃止する。事務スタッフには、より効果的かつ先を見越して業務を進めるための広範な裁量権を与える。また、雇用や日常生活に関わる手続きや事務手続きの「ワンストップサポート」を提供するスタッフを配置する（図3.13）。広島大学のPIの作業負荷を見直し、教授レベルの者が行う必要のない業務は、サポート担当者に委譲する。これに伴い、拠点長やPIがより研究に専念できるように、適切なスキルを持つ秘書やその他の事務アシスタントを、必要な人数、拠点で雇用する。これらの措置は、本拠点が、不要な事務作業から研究者をできるだけ早く解放できるように、2023年度末までに実施する。大学のURA部門は、国際的な助成金の獲得、研究者の募集、地方自治体や産業界などとの連携、東広島市や近隣地域の他機関との関係の促進を、支援する。我々は、WPIのPI/拠点長のすべての管理業務に関する作業負荷を10～20%以内に維持するよう努める。これにより、彼らがほとんどの時間を研究と教育/アウトリーチ活動に割けるようにする。

図3.14は、スマリュク（上）と井上（下）が主催するイベントで、学生から感謝の言葉を受けた様子を示している。

スマリュク、井上、およびすべてのPIは、サマースクール、シンポジウム、会議などの国際会議の開催経験が豊富である（図3.14）。たとえば、スマリュクは、アメリカ、イギリス、アルゼンチン、ウルグアイ、中国、オーストラリア、南アフリカなどのすべての居住大陸で開催されたInter-continental Advanced Materials for Photonics（iCAMPサマースクール、https://www.colorado.edu/i-camp/）を組織した。その成果は、Nature Photonics、Physics Today、Liquid Crystals Today他多数のジャーナルで、研究者や編集者により大きく取り上げられた。井上は、JSPSが資金を提供する広島大学でのCore-to-Coreプログラムの一環として、多数の国際会議を開催した。

この経験を基に、提案するWPI拠点の教育と国際研究交流のミッションを遂行するため、一連のサマースクール/ウインタースクールやその他の会議を開催する。WPIのサマースクールとウインタースクールの主要目標は、高度な大学院レベルの教育と、多様な文化を持つ世界の中での研究/教育のベストプラクティスについて学ぶことである。一部のスクールは広島大学で開催されるが、他の参画機関や、他の場所での開催も予定している。いずれの場合も、講義はリアルタイムで配信され、後でアーカイブに保存される。WPIのシンポジウムとワークショップは、この分野における最新の科学的発展を共有するために、世界のトップ研究者に参加してもらうことにより、スクールの教育ミッション（1～2週間）を補完する。少なくとも年に1回のスクール、シンポジウムまたはワークショップを開催する予定である。ただし、さらに多くの会議が予定される年もある。

３）-3. 運営

本拠点は、広島大学、ひいては他の日本の大学を改革する先行事例と見なされ、広島大学内で自律的に機能する独立した研究組織となることを想定している。

本拠点は、イワン・スマリュク教授を拠点長に指名する。スマリュクは、ウクライナのリヴィウで学部生および研究助手としてキャリアをスタートさせた。その後、米国で博士号を取得しポスドクとなった後、2007年にコロラド大学ボルダー校で独立したキャリアをスタートさせた。スマリュク教授は、大規模な研究グループ（過去10年間では一時に30人から40人、2007年から2022年のグループメンバーの総数は現在200人に近づいている）を運営した経験がある。スマリュクは、コロラド州ボルダーにある再生可能エネルギーと持続可能なエネルギー研究所（国立再生可能エネルギー研究所（NREL）およびコロラド大学の共同研究所）の創設フェローであるため、研究所の設立と管理に精通している。また、コロラド大学の材料科学工学プログラムの創設タスクフォースおよび執行委員会の一員である。彼の優れた業績、幅広い視野、優れたコミュニケーション能力は、新しく設立される本拠点が世界中からトップレベルの研究者を引き付け、効果的な研究機関として組織化されるための有用である。添付の書簡の多くが示すように、彼は提案する拠点の拠点長のポストの最有力候補である。彼は定期的に広島大学に、さらに広くは日本に最大限滞在し、拠点全体の運営を監督することを目指している。

過去７年間に幾度となく訪問をしていたことに加え、コロラド大学ボルダー校からのサバティカル休暇中に、スマリュクはすでに広島大学で合計 1 年近く過ごしている。彼の広島大学の研究者および東京の研究者との共同研究も盛んである。ハーバード大学、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校、カリフォルニア大学バークレー校の 3 人の米国在住 WPI 拠点長の経験をもとに、日本での物理的な滞在期間も含め、本拠点に割く時間を最大にするよう努める。スマリュクは、日本不在時、スタッフと毎日 Zoom を行い、拠点の計画・活動・運営は薮田-小鳥居の委員会の支援を受ける。広島大学の学長室は、スマリュクと緊密に連携し、拠点が国際的に大きく成功できるよう導くために必要なすべてのサポートを確実に受けられるようにする。文部科学省からの採択通知を受けた後、すぐに、スマリュク拠点長、広島大学学長室およびコロラド大学ボルダー校は、本 WPI 拠点長の効果的なリーダーシップに必要なすべての関連事項を規定する覚書（MOU）に署名する予定である。ホスト機関である広島大学内で、本拠点は、文部科学省から WPI 拠点に期待されているような、自律的機能を持つことになる。拠点長は、人事、採用、予算などに関するすべての重要な決定を行う。「事務組織の結び目」の図 3.11 に概説している彼のチームは、提案したプロジェクトのビジョンと目標の実行を支援する。

事務部門長の安倍は、拠点長と協力し、すべての管理業務の過程で、拠点長と事務担当者が策定した計画の遂行、ミッションの遂行に必要な事柄を差配する。安倍教授は世界トップレベルの化学研究に従事しており、拠点の研究ミッションを完全に理解している。彼は、広島大学の理事・副学長であり、大学システム全体の改革を試す場として、本拠点での改革を効果的に利用することができる。彼の人脈により、有能な事務担当者を採用することができる。彼の国際舞台での経験と優れた語学力はまた、外国人研究者や事務職員とのコミュニケーションも容易にする。安倍教授は本拠点始動後、当初は、現在の広島大学の理事・副学長とWPIの事務部門長の役割を兼務する予定である。その後、安倍教授はできる限り早急にWPIの事務部門長としての役割に専念する。

拠点長は、拠点の組織運営に必要なすべての権限を得て、拠点の機能において以下の主要役割を果たす。

1) 拠点長は、長期・短期の両ミッションと目標を含む戦略を決定し、それらを効果的に実施する計画を決定する。
2) 拠点長は、研究者同士の交流と共同研究を最大限発揮できるようなアイデア、計画をデザインし、広島大学内の事業体として拠点の組織を強化する。
3) 拠点長は、割り当てられたタスクを効果的に遂行できる強力なリーダーシップ/管理チームを募集し、その組織構成は継続的に更新していく。
4) 拠点長は、有望な若手研究者および新規 PI の募集を行い、決定する。
5) 拠点長は、リーダーシップチームの助けを借りて、さまざまな資源の投資/支出を監督するだけでなく、拠点の研究成果、科学界および社会への発信を差配する。

事務部門長および副拠点長は、拠点長が国際活動などの外部の業務に従事している間、他の拠点メンバーと連絡を取り合う。専任の副拠点長である小鳥居、薮田および井上は、アウトリーチ/広報活動を実施し、研究ミッションを統括し、国際交流と共同研究を組織し、大学院教育を改革する。

本拠点で採用し、パートタイムの特別任用で共同研究を行う外国人研究者の給与報酬は、米国を拠点とする世界トップクラスの研究機関に匹敵するレベルである。日本を拠点とする研究者が海外の参画機関に滞在する場合は、ホスト機関と同等のレベルで補償されサポートされる。たとえば、MITのポスドク研究員の最低給与は60,000ドル以上（博士号取得後の年数によって異なる）であるため、このことは重要であり、大学はそうした最低要件が満たされている場合にのみ、客員ポスドク研究員に必要な書類を発行できる。したがって、本拠点は、研究者が国際的共同研究を快適に行え、十分な支援を受けられることを保証するために、さまざまな側面を十分に配慮し、若手/上級研究者の各機関との相互訪問を推進する。

参加する PI の年俸は、クロスアポイントメントの場合も含み、所属機関によって設定されるが、本拠点では、その発展に貢献する非常に優れた成果をもたらした者に対して、成果を評価することでボーナスを支給するよう努める（能力主義の概念が、当拠点長によって導入される）。このボーナス割り当て手順を実施するために、本機関は、パフォーマンス評価期間の初めとその後は年間ベースで、いわゆる「WPI の PI パフォーマンスインデックス」(PIPI$_{\mathrm{WPI}}$、Π^2_{WPI}として示される）を計算する。広島大学を拠点とする PI と協力して、拠点長はこのインデックスについて次の式を導き出した。

$$\Pi^2_{WPI} = \sum_{i=0}^{n} \delta\eta_i + \pi \sum_{j=0}^{m} \chi_j \,/\delta + \pi^2 \sum_{k=0}^{l} \Omega_k + \pi^3\Delta - \pi^4 \mathrm{Z},$$

ここでは、$\pi \approx 3.14$および第一項$\sum_{i=0}^{n} \delta\eta_i$は、出版物に報酬を与えることを意図するものである。δは出版物の共著者として関与した拠点のPIの数である。η_iは、論文が発表されたジャーナルのインパクトファクターで、特定の年に PI が発表した論文の数 n で合計される（$\eta_i > 1$のジャーナルのみ）。この項は、影響力の大きいジャーナルでの共同出版を奨励することになる。第 2 項は、文部科学省からの WPI 補助金を補完するために PI が獲得する研究資金に対しての報酬を与えるものである。χ_jは、獲得された資金の 100 万ドルに相当する数で、m は、特定の年に受け取った資金の件数である。第 3 項は、特定の年に PI が受賞した主要な国内および国際的な賞に対して報酬を与えるものである。Ω_kは、研究と教育の成果に対する主要な賞をカウントし、特定の年の賞の数を合計する。第 4 項と第 5 項は、それ以外のポジティブな貢献Δと本拠点に対するネガティブな影響 Z に対して報酬あるいは「罰則」を与えることを意味する。毎年、Π^2_{WPI}インデックスのしきい値が決定され、PIPI$_{\mathrm{WPI}}$ インデックスに比例して「ボーナスバンク」が PI に割り当てられる。これは、優れた研究と WPI のミッションへの傑出した貢献を促す制度である。本制度は経験に基づいて改善していき、最終的には広島大学全学での適応を検討する。PIPI ベースの能力主義制度は、PI と広範に議論され、PI の承認を得たものである。さらなる改善のためのフィードバックをもらい、プロジェクトの開始時まで検討する。

３）-4. 環境整備

生産的な研究のためのスペースと環境を提供するために、広島大学は、現在9人の広島大学のPIが占有している研究スペースを確保し、採用時から本拠点で利用できるようにし、また、共同研究施設を完全に無料で利用できるようにする（図3.15）。本拠点は当初、広島大学の研究スペース（1,800m^2、大学に所属するPIが占有）およびベンチャービジネスラボラトリー（VBL、1,510m^2）に収容される。これらのスペースに加えて、既存の建物に直結する新しい研究棟を確保し、WPIメンバーが一堂に会することができるようにする。拠点の中核となる新研究棟には、オープンスペースの交流ラウンジを設け、異分野の融合と知恵の交流を促すミーティングや非公式な議論ための環境を提供する。さらに、広島大学は、国立の重要な共同利用施設である広島大学放射光科学研究センター（HiSOR）および周辺地域の理化学研究所や産総研のラボなどの施設を含む、中国地方の5つの大学の研究施設を共同利用できるネットワー

図3.15 WPIメンバーが無料でアクセスできる広島大学の共同研究施設と機能

クを構築している。これらの共用施設はすべて設備が整っている。2025年度までに新研究棟（5,000m^2）が完成し、約150人が一堂に会して研究できる物理的環境を提供する。拠点の中核となる新しい研究棟には、会議スペースとラウンジがあり、会議やオープンな議論のための環境を提供し、学際的な共同研究を促進する。広島大学にはフェニックス国際センターMIRAI CREAが最近建設され、客員研究員とその家族を収容する設備の他、多くの会議室が完備している。

また、パンデミック発生時など人的交流が制限された状況下での研究活動を維持し強化するため、以下の外国人研究者向けシステムの確立を目指す。

1) Google Glass などの最新のプラットフォームを利用するリモートトレーニングとコミュニケーションを開発し採用し、そうしたツールを本拠点のすべての海外連携先と国内連携先に配布する。
2) Slack や同様のツールを使用した研究のアイデアと成果に関するコミュニケーションのデジタル化
3) 装置のリモート操作および自動操作への対応の強化
4) VR ベースの教育とアウトリーチプラットフォームにより教育活動を改革し、広島大学と東京プラットフォーム間だけでなく全国の共同研究者の間のシームレスなコミュニケーションを目指す。
5) 家族への支援：学長の裁量でリソースを割り当てることにより、外国人研究者の配偶者を研究者、URA、事務職スタッフなど希望する職種に採用する。
6) 東広島市などの地方自治体と連携し、学校教育や住居など、研究者と同伴者の日常生活に対し英語によるサポートを提供する。
7) 外国人研究者対応のできるスタッフを配置することにより、すべての事務手続きを英語のみで完結できる環境を整備する。海外研究者への支援方法を学ぶため、事務職員と URA を、サポート体制を強化するためのトレーニングのための海外連携先へ派遣し、また、スタッフ 20%は海外から採用する。

本拠点は、学生がWPI関連の研究に携わる場合、リサーチアシスタントとしての学生の給与を全面的に支援する。各学生は、学術的バックグラウンドの異なる3人のPIによって共同指導され、1人のPIが主要メンターになる。拠点は、WPI研究所を構成するさまざまな海外連携先のPIによって共同開発される、新しい大学院の学習課程と個別指導の創出を監督する。

研究および教育関連のプロセスを合理化し、効率を高めることは、本拠点の主要な目的の1つである。広島大学には、大学の特徴的な研究上の取組を示す24のユニークなインキュベーション研究拠点と独立した研究拠点がある。本拠点の設立に際し、これらの既存の拠点群は見直され、再組織化され、統合および再編成され、恒久的な研究機関として機能する5つの新しい学際的拠点を形成する。これは、管理上の負担を軽減し、運営コストを節減し、研究/教育事業の成果を全体的に向上するのに役立つ。本拠点は、これらの拠点の重要なテストベッドの役割を果たす。したがって、本提案の配分計画に示されているように、本拠点を長期的にサポートするために、予算、人的資源、施設、設備などのリソースが集中的に割り当てられる。このことは、全学が一丸となって、本拠点の設立を推進することを意味する。

海外のPIメンバーは、中長期の滞在/訪問では、キャンパス内の広島大学フェニックス国際センターMIRAI CREA（全家具付き）に滞在する。MIRAI CREAには、学術会議や同行家族のニーズを満たすための部屋と施設があり、滞在中のPIが生産的に新しいアイデアを生み出し、安心して研究に集中できる。佐々木は、事務スタッフの協力を得て、外国人PIの家族に対して、長期訪問のスケジュールを監督し、外国人PIの生産的な研究活動だけでなく、彼らの子供が学校や保育園に入学でき家族が必要なサポートが受けられるように調整する。

４）次代を先導する価値創造

４）-1. 基礎研究の社会的意義・価値の創出・発信

SKCM^{2}拠点は、これまでに資金提供されたすべてのWPI拠点の中で最も生産的なWPI拠点になることを目指している。影響力のある国際的なトップジャーナルに毎年何百もの高品質の論文を発表し、他の研究者およびこれらの成果が発信されるより広範なコミュニティの大きな関心を引き付けることを目指す。これらの取組は、研究者自身に加えて、専任の科学コミュニケーターとイラストレーターにより支援され管理される。***SKCM^2***の全体的なアウトリーチ活動は、小鳥居が主導し、地球規模の問題を解決するためのWPIの基礎研究の力を伝える（図3.16）。

図 3.16 スマリュクが実施した米国オハイオ州の高校でのアウトリーチデモ（左）小鳥居とスマリュクが実施した広島でのアウトリーチデモ(2つの中央の画像）右: ***KCM²***の小学生へのアウトリーチ活動

インパクトの大きい出版物とアウトリーチ活動を通して、我々は科学コミュニティと一般人に我々の基礎研究が、増大するエネルギー需要とその気候変動への影響のような、日本および全世界が直面する多くの複雑に絡み合った問題の解決にどのように役立つかを伝える。たとえば、建物は全生成エネルギーの40%を冷暖房に消費し、その内の20%は、建物の外壁の最も効率の悪い部分である窓から失われる。魔法瓶のように、エネルギーを消費せずに建物の内部で望ましい環境を維持することが可能だろうか？佐藤とスマリュクは、分子のノット/リンクによる新しいエアロゲルの費用対効果の高い製造により、そうした透明な超断熱材料を協力して開発している。彼らはまた、Vignoliniと共同で、多孔質キラル構造を用いて温度調整を行う金色・銀色スカラベカブトムシにヒントを得た建物の外壁用素材も開発する（銀色/金色の反射は魔法瓶の銀メッキのような役割を果たす。ただし、金色・銀色カブトムシは、銀メッキの代わりにキチン繊維のキラル自己集合から生成される力を利用する）。

自然界に学ぶことにより、ナノセルロースから低コストでエネルギー効率の高い材料を開発する。金や銀のように見える素材の建築的な魅力は、この技術の将来の展開に役立つ可能性がある。さらに別の観点から見ると、エレクトロニクスの発展のためには、さらなる小型化が必要であるが、それは微小スケールでの量子効果によって制限される。この限界は、キラル磁気スピン系とトポロジカル絶縁体によって克服できる。たとえば、優れたレーストラックメモリは、ホップフィオンのようなトポロジカルに保護された多次元ソリトンを情報媒体として利用する。場の結び目のようなトポロジカルオブジェクトが情報媒体となる、全く新しい原理の未来の電子デバイスを設計することが可能である。生物医学的応用の観点から、タンパク質のノットの変化は、アルツハイマー病などのタンパク質変成症を引き起こす可能性があるため、これらのプロセスを検出および制御できれば、生物医学的治療の開発に役立つ可能性がある。結び目はコロナウイルスのRNAゲノムにも見られるが、コロナウイルスの変異によって変化するスパイクタンパク質の被膜は、ワクチン効果の低下の原因である可能性がある。これは、我々のPIのHsuが研究したもので、我々の研究が、Society5.0のミッションを達成しながら、世界が直面している差し迫った問題に対処するのにいかに役立つかを示している。我々は、アウトリーチ担当の副拠点長の小鳥居の監督の下、***KCM²***研究パラダイムを可能にする持続可能性に対する一般の意識を高め、才能のある若者を科学のキャリアに引き付けるように設計された、多種多様なアウトリーチ活動を推進する。WPIのサマースクールには、持続可能性のための科学に日本の一般人が関心を持つように設計された公開講座とアウトリーチ活動がある。

研究成果を一般に公開するための米国のNSF（全米科学財団）のガイダンスを模倣して、各PIは、WPI関連活動の独自のアウトリーチ要素を開発し、研究に関するわくわく感を広く共有する。ノーベル平和賞受賞者による公開講義は、WPIスクールの科学プログラムを補完し、世界平和を維持するために科学者が果たす重要な役割を訴える。本拠点は、改革の種をまき、評判を高め、広島大学を日本のハーバード大学のようにし、新世代のグローバルな研究者を教育し、エネルギー需要の削減、気候変動の緩和、日本のSociety 5.0の目標と経済成長に貢献する。

４）-2. 高等教育とも連動した次代の人材育成

本拠点の主要な目標は、キラルノット超物質の学際的な分野で深い専門知識を持つ、次世代の有能な研究者と教育者を育成することである。本拠点は、大学院生からポスドクフェロー、テニュアトラックの教授陣またはテニュアのある教授陣までの各段階で、トレーニングとキャリア開発のサポートを提供する。本拠点では若手研究者のサポートを最優先をとする。WPI補助金の50%以上は、博士課程の学生を含む若手研究者の支援に充てられる。学際性の高い研究を推進するため、優秀な若手研究者、博士課程の学生およびポスドクがバックグラウンドの異なる3人の共同アドバイザーを持つ、共同メンタリング制度を導入する。たとえば、広島大学の物理学の博士課程の学生は、化学または数学の広島大学のPIおよび海外連携先の別のPIから共同のアドバイスを受けられる。大学院の専門課程は、本拠点のPIによって共同設計

され教えられる。

我々の戦略は、この分野でトップクラスの国際研究拠点を活用し、広島大学、東京工業大学、理化学研究所-東京大学の学生やポスドクが、MIT、ケンブリッジ大学、コロラド大学ボルダー校などの他の海外連携先で長期間過ごすことができるようにすることである。逆に日本の機関は、海外連携先からの若手研究者やPIを受け入れる。特別な取り決めにより、博士課程の学生は連携先の機関で専門コースを受講できる。さらに、大学院教育と分野横断的なトレーニングの改革を支援するために、国際的な研究交流、スクール、会議やフォーラムとともに、新しい学習課程を導入し、幅広い学際的なコミュニティをまとめる。本拠点は、米国の大学院プログラムのように、博士課程の学生に給与を支払い、さらに国内連携先と海外連携先間の学生/ポスドク交換を後援する。マッチングファンドを活用し、実施期間中に5～10名の若手PIを新たに採用し、最も才能のある若手研究者を引き付け、かつジェンダーバランスと多様性を達成するように努める。本拠点は、広島大学および日本中の教育と研究の改革の種をまき、学会における国際化とジェンダーバランスを推進し、持続可能で平和な未来に向けた世界的な研究の取組を結集し強化する。女性のPI、学生、ポスドクおよび職員の採用に努める。海外連携先に対応する機関およびバーミンガム大学のトポロジカルデザインに関するEPSRC（工学物理研究会議）センターと協力し、世界中の好事例を取り入れつつ、新しく構築された博士課程を運営する。5～10名の採用教員のうち、男/女および日本人/外国人を50：50で採用し、ジェンダーバランスを高め、刺激的な多文化環境を促進する。若手研究者は、MITやケンブリッジ大学などのトップグローバル拠点と広島大学を結びつけ、数学から物理学、化学、生物学、および惑星科学に至る分野間の専門分野の垣根を解消する。

４）-3. 自立化を見据えた拠点運営、拠点形成後の持続的発展

本拠点の執行部は、（給与ボーナスによるものを含め）PI を動機付け、政府および民間/慈善団体の両方からさらなる資金を求めるようにする。若手研究者、ポスドクおよび学生は、さまざまなフェローシップや奨学金を申請することを奨励され支援される。文部科学省からの WPI 補助金に加えて、PI は日本および他の地域でいくつもの個別申請を行う予定である（図3.17）。そうした資金を獲得する力は、共同研究のネットワークと ***SKCM²*** の研究成果の認知度によりさらに強化される。これらの従来の資金源に加えて、民間財団（米国のサイモンズ財団、テンプルトン財団、ムーア財団など）にも着目し、慈善家、広島/日本/世界の産業界、および広島県/市の地方自治体と共同で寄付講座と学生-ポスドクのフェローシップを設置する。WPI 補助金支給の開始とともに、数人の若手 PI が広島大学-WPI に参画する予定で、当初は同補助金でサポートされる。これらの WPI のポジションは、実施期間内で本プロジェクトの終了前に、テニュアのポジションまたはテニュアトラックのポジションに転換される。広島大学からの支援は、10 年後も維持されるが、各成功とともに補助的な資金提供は増加し、***SKCM²*** は、実施期間後には自立して、広島大学の完全に独立した恒久的な中核研究拠点となる。新しく建設された建物は、10 年の実施期間内およびそれ以降の本拠点の本部となる。

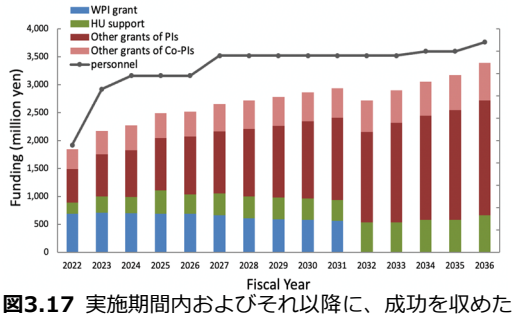

図3.17 実施期間内およびそれ以降に、成功を収めた持続可能な拠点になるための研究予算と人員予測

拠点長のビジョン

Prof. Ivan Smalyukh

我々の周囲の万物は，分子と原子で形成され，それらは電子，陽子，中性子から構成され，さらにクォークとレプトンから成っています．研究者は，これまで，物質を構成する極めて小さい要素を特定していき，それらを分類し，そして，それらの存在を示す特徴的な信号を観測してきました．普段から自然の摂理の下で科学を嗜んでいますが，その大発見の度に，奥深い自然の先端に触れることを実感し，広大な未知の世界のほんの断片を発見してきたに過ぎないことに気づかされます．Feynman (1965年，朝永振一郎とともにノーベル物理学賞を受賞)の「創造できないものは，理解できない」という言葉は，自然界のクォーク，陽子，原子，分子に対応する新しい物質構成要素を開発して自然界の仕組みを理解し，物質を新たにデザインすることを可能にするという私のビジョンと共鳴します．私は，これまでに，自然界に顕な類例のない物質構成要素 [Nature 2013, Science 2019, Nature 2019] や物質相 [Science 2018, Science 2019, Nature 2021]を見出してきました．その基盤研究をもとに，分野や時空間を超えてトポロジーとキラリティの知識を融合し，最も困難とされるグローバルな問題を解決するための技術革新を促進する，結び目（ノット）のある構成要素からなるキラル超物質（***KCM²***）の研究パラダイム全体を確立したいと強く思っています．文部科学省のWPIプログラムはこれらの挑戦的な目標を達成することを可能にする世界で唯一のプログラムであり，その研究目標を達成するために必要十分な研究環境を広島大学は提供することを約束しています．

私は，日本から帰国するたびに，家族や友人に水引を土産として持ち帰ります．和紙から作った紐自体は大変質素であるにも関わらず，それを構成要素として創られた水引は極めて美しい作品になります．公開講演の際には，水引との類似性を示すことで，私の研究のモットーを説明しています．水引作家の手によって，あらゆる形の水引を創ることができるように，物理的な場，分子，コロイドを結び，編むことによって自然界に無いものを創ることもできます．タンパク質やRNAなど生体分子におけるもつれを理解・制御することによって，時空間の構造を探り，観測可能な物理場に再現することで，素粒子から宇宙まであらゆる時空間スケールにおける自然界の仕組みを理解したいと強く思っています．水引作家は，思い描いたほとんどすべてのものを作ることができます．物質の構成要素のデザインにおいて，物理場やポリマー鎖におけるノットの安定性を可能にする「ノットキラリティ」は，水引作家の手の役割を果たすことができます．例えば，CP対称性の破れが反物質に対して物質の存在を優勢にし，分子キラリティが生命に不可欠な生体高分子鎖のコンフォメーションを制御しているように，自然界が時空間の全階層で異なる種類の広義のキラリティをどのように用いているかを理解するのに役立つかもしれません．このような自然界の摂理を学び，修得することで，私たちは新素材の創造，病気の治療，自然界の仕組みを理解する能力を身につけることができます．

水引の伝統は，何千年もの歴史の中で人々を結びつけてきたと言われています．新しい学際的な科学分野を確立するという大きな目標のために，主任研究者のチームが私のもとに結集し，数学的ノット理論及び素粒子・宇宙物理学と，磁石・液晶・コロイドのノット場の創造，タンパク質のノット鎖，コロナウイルスゲノムのRNAなどに関する研究を融合した学際研究を推進します．本拠点は，基礎科学と日本の大学院教育の国際化を誘導する改革を結びつけ，学際的な知識の幅を広げ，持続可能な未来を実現するために貢献します．私たちは，***KCM²***の創発的な現象を理解する原理を明らかにすることを主な使命とする大規模な国際的科学ネットワークを形成することを約束します．

素粒子から生物・宇宙系までの時空間の階層全体にわたる現象において，粒子状ソリトンやノットを安定化することができる創発的で共創力を誘発するキラリティに深い興味を持っています．すなわち，ノットキラリティは，化学分野での定義のように，単純なキラリティの定義とは異なり，時空間のスケールの階層を超えた全く新しい概念，法則，一般化を創り出すことができ，大きな発見へ繋がる可能性を秘めています．この「ノットキラリティ」は，多様な研究分野を掛け合わせ，融合させる動機付けとなり，本拠点のアイデンティティを形成する創発の象徴です．本***SKCM²***拠点では，数学，物理学，化学，生物学，材料科学，工学の一分野の科学ではなく，真の意味でそれらを学際的に融合し，それらすべての分野が相補的に進展できることを目指しています．我々のWPIは，卓越した分厚い基礎研究を中心に，素粒子から宇宙規模におけるノットキラリティの役割を総合的に探求し，新たな分野である創発的な***KCM²***の科学につなげたいと考えています．

結び目やホモトピー理論のような数学的概念は，得られた発見を一般化するのに有効です．本拠点研究では，液晶，コロイド，磁石，（バイオ）ポリマーなどの凝縮系を研究しますが，そこでの発見は，ブラックホール，素粒子，

生命の起源など，実験的にアクセスしにくい系にも深い理解をもたらします．逆に，素粒子物理学や宇宙論の理論は，非常にアクセスしやすい凝縮系における関連現象の理解を深めるための素敵なアイデアをもたらすでしょう．例えば，数学的ソリトンは，キラル液晶に埋め込まれたヘリノトンの超格子や，黄金スカラベカブトムシのクチクラの中に形成される生物由来のナノ結晶をセルロースなどで具現化することが可能です．分子が絡み合い，高い反射率を持つ多孔質断熱材を，全発電エネルギーロスの40%を占める建築物の外壁に使用することで，エネルギー需要を低減することができます．また，医療分野では，アルツハイマー病などの疾患の原因となるタンパク質のミスノットを制御し，疾患の治療に役立つと考えられます．本拠点で実施する基礎科学研究は，エネルギー需要を削減する技術革新を可能にし，大きな脅威である気候変動という地球上最も困難な問題の解決に貢献することができます．従来，分野を超えた知識が浸透するのに数十年かかっていましたが，柔軟な組織改革を推進する広島大学の強みを活かした本拠点では，学問の境界を取り払い，分野融合の新しい物質科学のパラダイムを構築することで，この時間を100分の1に短縮することができます．

本拠点では，主任研究者が所属する国内外の研究機関の学生やポスドクの流動を支援し，グローバルなネットワークでの若い才能の多様性あふれる頭脳循環を推進します．例えば，私が毎年開催している大陸間フォトニクス先端材料スクール（iCAMP）の経験を生かし，若手研究者の参加費を補助する年次ミーティングをリクルート活動も兼ねて開催します．また，博士課程学生へのトレーニングとして，分野融合を促進し，個々の科学者としての成長を促し，国際的視野を広げるための活動を積極的に実施するために，大学院生会の設置を行います．つまり，本拠点は，オムニバス形式の授業や異なる分野を専門とする学生を集めることで，学際的な教育を行う中心的な役割を果たし，学生が協働・切磋琢磨できる環境を提供し，博士課程学生がそれぞれの研究活動を通じて新たな科学に挑戦できるようにします．また，広島大学の既存のプログラムと連携し，学生から教員を含めた若手研究者を支援します．この新しい研究拠点は，世界中から多くの若い才能を引きつけ融合する磁石の役割を果たします．そして，国内外における研究型教育改革の実践的検証の場となることでしょう．若い研究者は研究者としてのキャリアの初期段階で，いくつかは日本特有のものですが，大きな課題に直面しています．本拠点では，他機関のWPI出身の主任研究者や米国国立科学財団の大学院生育成プログラム出身者の協力を得て，米国や英国の博士課程教育の良いところを取り入れながら，日本向けに改良してより良いものにすることで，日本の教育研究システムを大々的かつ迅速に改革していきます．

これまで採択されているWPI拠点の多くは，すでに十分な資金を持つ日本のエリート研究機関に設置されているようにうかがえます．国内外のトップレベルの研究機関と協働する本拠点は，研究交流を促進することで日本に新たな世界的な国際研究拠点が設置され，広島大学にとって，多くの優れた国際研究者を惹きつける”ゲーム・チェンジャー”となることでしょう．多様性を重んじる本拠点の設置によって，広島大学は，世界的に非常に高い評価と知名度を持つ有能な第一線の研究者や，他の国や世界の一流の研究所から，多様性をもった優秀な主任研究者，ポスドク，学生を採用することができるでしょう．文部科学省にとって，これは単に既存の研究拠点を選択するのではなく，優れた研究拠点を新たに創造する良い機会です．WPIプログラムによって，新しい***KCM²***分野/パラダイムにおける国際的なトップリーダーが広島大学のWPI新研究棟にアンダーワンルーフで結集し，学際的な共同研究を行うことで優れた研究を促進し，例えば，広島大学で行われた基礎科学研究に将来ノーベル賞やフィールズ賞が授与される可能性があります．

本拠点長を拝命するにあたり，米国に居住する他のWPI拠点長たちと面談して，私は，広島大学で本研究拠点を指揮し，掲げた研究成果と教育改革のミッションを成し遂げることができると確信しています．研究と同様に，教育と教育研究の組織の改革にクリエイティブに取り組むには，大学からの積極的なサポートが必要です．その点において，越智学長のサポートは素晴らしいものです．本国際拠点研究を推進する新しい教育研究棟と，大学院改革や研究環境改善を実行するキーパーソンである理事・副学長を本拠点運営に加えてくださいました．さらに重要なことは，科学的知識の裾野を広げるだけでなく，持続可能な未来を実現するために本拠点のビジョンを共有する，本拠点に参画する科学者の仲間たちのサポートです．私たちは，本拠点での基礎科学研究を通じて，多様な若手研究者の育成を行い，女性研究者の学術界へのさらなる進出をサポートします．また，産官学ならびに地域との連携と社会へのアウトリーチを通じて，自然科学と社会科学を結びつけ，持続可能性と地球平和を促進する科学に対する社会からのさらなる支持を得たいと思っています．美しいキラルオブジェクトであるキョウチクトウの花は，広島の原爆投下からの再生のシンボルであり，新しい本拠点と***KCM²***のパラダイムを創造する私たちの情熱のシンボルです．必ず，花開くと信じています．

ホスト機関のコミットメント

令和４年6月１日

文部科学省　宛

広島大学学長

越智 光夫

「世界トップレベル研究拠点プログラム」に申請した「持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点」に関し、同申請が採択された際は、以下の事項について責任をもって以下のとおり具体的に措置していくことを確認する。

＜具体的措置＞

※　以下のそれぞれの事項について、具体的措置を記載すること。

1) 当該拠点が真に「世界トップレベル研究拠点」となり、支援終了後に自立化するよう、当該拠点がホスト機関のミッション等の実現に資することを示すとともに、当該拠点をホスト機関の中長期的な計画に明確に位置づけた上で、補助期間中から機関を挙げて全面的な支援を行うこと。

※当該拠点が、ホスト機関におけるミッション、建学の精神・理念、業務運営に関する目標等の実現に資することを示すこと。
また、ホスト機関の中長期的な計画における当該拠点の位置づけについて記載すること。

「新たなる知の創造」「地域社会・国際社会との共存」「絶えざる自己変革」などを理念とする本学は、第4期中期目標（2022～2028年度）において、世界トップクラスに比肩する研究大学を目指し、最先端の教育研究設備や国際的なネットワーク・ハブ機能等の知的資産が集積する世界最高水準の研究拠点を構築することを目標としている。これにより、我が国の国際競争力を強化することを約束した。今回申請する持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点の構築は、まさに本学の最重要課題に合致する。そのため、**WPIプログラムからの支援額と同程度以上を確保して、全学を挙げて世界の優秀な研究者、学生が集まり躍動する本拠点の自立化を支援する**ことを決定した。

2) ホスト機関は、当該拠点をホスト機関内の恒久的な組織として位置付け、自立的に運営していくために必要となる既存組織の再編等を含むホスト機関の中長期的な組織運営の方向性に係る基本方針の表明及び今後の具体的な計画・スケジュールの策定を行い、それを着実に実行すること。

※ホスト機関の中長期的な組織運営の方向性に係る基本方針と今後の具体的な計画・スケジュールの両方について記載すること。

基本方針

本学では、第3期中にインキュベーション研究拠点や自立して活動する研究拠点を24拠点創出し、本学の特色ある研究分野として成長させてきた。本拠点設立にあたり、これらの研究拠点群を見直し、整理・統合・再編し、5つの異分野融合拠点として発展させ、恒久的な研究組織としてスタートさせる。本拠点を5つの異分野融合拠点の1つの象徴と位置付けており、予算、人的資源や施設・設備等の整備など長期間にわたり拠点を支えるようリソースを重点配分し、全学が一体となり世界的拠点構築を推進する。

計画・スケジュール

学長の直下に、本学の研究力強化の戦略と推進を担う司令塔として、2022年度に未来共創科学研究本部を新たに設置した。この研究本部は、第3期中に本学が独自に創出してきた研究拠点などを統廃合・再編し、持続可能な社会の構築を先導する異分野融合研究拠点を創出することをミッションとしている。**本拠点は、まさしく本学の異分野融合拠点の象徴であり、既存組織の統廃合と学内再配分をその研究本部で議論して、本拠点に、予算、人的資源や施設・設備等の整備など長期間にリソースを重点配分**する。また、**本拠点を恒久的な教育研究組織とするための学則改正を2022年度中に実行**し、これにより、全学が一体となり本拠点の構築と自立的運営への支援を行うことを表明する。本拠点発足後の2022年度中に、大学院教育研究プログラムの改革のために必要な手続きを開始するとともに、2023年からの本格始動に向けて、外部からのPIを迎えるための研究室整備と研究支援体制を整える。**異分野融合を加速するために、世界トップクラスの研究環境整備を有する新研究棟を2025年度に建設するが、自己資金で設営する準備を2022年度から開始するとともに、国立大学法人等施設整備概算要求も行う。**

3) ホスト機関の基盤的経費等の配分の考え方を示した上で、当該拠点の運営及び研究活動の実施に必要な人的、財政的及び制度的支援を行うこと。また、ホスト機関のミッション等の実現に向けて、当該拠点の運営及び研究活動にWPI以外の外部資金等を活用する場合、当該拠点と他の外部資金との関係性を示すこと。

※当該拠点の運営及び研究活動にWPI以外の外部資金等を活用する見込みがある場合、該当する外部資金等の申請・獲得状況及び当該拠点との関係性を示すこと（該当する外部資金等に以下を含む場合は必ず記載すること。関係性は必要に応じて図示も可。）
・卓越大学院プログラム、・地域活性化人材育成事業（SPARC）、・共創の場形成支援プログラム（COI-NEXT）、
・センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム、・地（知）の拠点大学による地方創生推進事業（COC+）

人的、財政的、制度的支援

恒久的に本拠点を形成し維持していくため、全学人事委員会において策定する第4期中期目標・中期計画期間中の長期人事配置計画に本拠点への優先的な人員配置を決定している。また、人的、財政的及び制度的支援として、事務職員を含む学内の人事配置を調整し、本事業開始時から、本拠点の運営を支援する英語対応可能な事務員を5人程度配置する。拠点活動6年目以降は、本拠点の自立に向けて、本拠点で新規に雇用する5人程度のPIの雇用経費確保のため、本学拠出分人件費を増額させる。**本学は2024年の創立75周年を迎えるにあたり「本学が躍動し広島の地を活性化させる基金」を立ち上げており、学内外から100億円を目標とする寄付金を募っている。既に株式会社サタケからは２０億円の寄付を受けている。拠点長特命ファンドマネージャーを雇用し、本拠点の持続的運営のための様々な寄付金獲得活動を展開**する。

本プログラムの支援額に加え、大学からは同程度以上のリソースを確保し、以下の措置を行う。この措置は、プログラム期間終了後も継続する。

① 本学所属の PI が使用しているスペース（約 1,800 m^2）に加え、VBL 棟（1,510 m^2）改修と 5,000 m^2 程度の研究棟を新築し、研究スペース、オフィス、及び国内外の研究者との研究交流スペースを提供する。新たな分野融合と頭脳循環を加速するウェブ会議システムを配置し世界と繋がる空間を創出する。
② 優秀な研究者が世界から集まるように、年間 1 億円程度の拠点長裁量経費を配分して、拠点運営の独立性を担保し、成果に応じた報酬などで研究者の業績を認定する。
③ 毎年 2 億円の人件費及び 1 億円の施設維持費（建物維持費・水光熱料等）を措置する。
④ 本拠点専属の URA を配置し、大型研究プロジェクト獲得のための全面支援を行う。また、英語能力に優れた支援職員を配置し、多様性が生むトラブルに対応できる体制を整える。
⑤ クロスアポイントメント等の柔軟な人事制度を活用し、優れた国内外の研究者を配置する。
⑥ 拠点で採用する教員は、特に優れた研究を行う教授職または若手教員に認定し、希望により WPI 事業期間中の教務・学務・管理運営業務等を免除し、研究に専念できる環境を提供するが、その間、当

該教育研究プログラムに人員を補填する。
⑦ 海外からでも決裁、決済できるウェブ認証システムを導入する。

外部資金獲得計画

本学は、学長が先頭に立って近隣地域の企業や自治体との連携を推進し、これまでに、(株)サタケからの20億円を超える寄付や東広島市からの寄付5億円などによって、国際会議が行えるホールや国際交流拠点を建設してきた。今年度は、広島市からの10億円、(株)サタケから5億円の寄付を受けており、さらに教育研究力を強める取組を行う。本拠点設置後も外部資金の獲得に大学を挙げて積極的に取り組む。また、既に、学内施設にネーミングライツ制度や、企業との共同研究間接経費を30%に増額する制度を導入している。これらの取組で得た外部資金の増額分を本拠点に重点補充していき、本拠点が恒久的に活動できる基盤を構築する。各PIは、「結び目(ノット)のある構成要素からなるキラル超物質(***KCM*^{2}**)」をテーマとする新しい研究領域に寄与し、国内の大型研究費に積極的に応募する。海外ファンドでは、欧州Horizon Europe、米国NIH、 NSF、 NASAなどを、獲得実績のある外国人PIとの共同申請に努める。政府機関からの従来の資金に加えて、私立財団(米国のサイモンズ財団、テンプルトン財団、ムーア財団など)と共同で、寄付講座の設置やフェローシップ制度を立ち上げる。本拠点へのJSPSからの支援がなくなる10年後に向けて、それらの追加資金が獲得できるように鋭意に活動し、本拠点が自立できるようにする。

また、URAの池上と島原は、学長や安倍事務部門長の協力を仰ぎつつ、広島県や東広島市、主要な産業界パートナーとの緊密な関係を維持するための支援も行う。一方、知財管理・企業との共同研究に関しては、本学のオープンイノベーション事業本部が支援する。

4) 支援期間終了後も、当該拠点が自立的な運営を行い「世界トップレベル研究拠点」であり続けるため、拠点に対して人的・財政的な資源や施設・設備等の整備などの長期間にわたる資源配分などの必要な支援を行うこと。また、拠点の活動に必要となるインフラ(土地、研究施設・設備、研究スペース等)は、支援期間終了後も継続した確保を前提として、拠点形成の早期から確保、提供すること。

施設・設備等の整備

本拠点は、研究の生産性を上げられる環境を提供するため、採択時～2023年度は本学所属の9人のPIが保有している研究スペース(1,800 m^2)及びベンチャー・ビジネス・ラボラトリー(VBL、 1,510 m^2)で実施する。2024年度以降はVBL棟に加えて新研究棟(5,000 m^2、2025年度竣工予定)を確保し、総勢150人程度が**アンダーワンルーフで研究できる物理的な環境を実現する。新たに建設する本拠点の中核となる新研究棟には、交流ラウンジを設け、ミーティングやざっくばらんな議論を行える環境を整備し、異分野融合及び頭脳循環の推進**を図る。このような研究環境は、本プログラムの支援終了後も継続して確保する。

また、本学は中国地方5大学と共同利用できる設備ネットワークを構築しているほか、周辺には全国共同利用施設である放射光科学研究センターをはじめ、理研、酒総研、産総研があり、共用で利用可能な設備が充実している。スマリュク拠点長を含む海外メンバーは、東広島市の寄付5億円を得て建てた広島大学・国際交流拠点施設(家具家電完備)に中長期に滞在する。当該施設は、科学的な議論を行える会議室や家族同伴者滞在用居室も完備している。海外PIとその家族の長期滞在を容易にするため、広島大学は拠点長と協力して、広島大学での長期滞在中により良い暮らしが提供できるよう努める。

5) 拠点運営に一定の独立性を確保するため、「拠点構想」実施にあたって必要な人事や予算執行等に関し、拠点長が実質的に判断できる体制を整えること。

拠点における意思決定機構

本拠点は、学則に定める独立した教育研究組織として設置することから、教育研究活動や予算執行等において拠点長が最終判断・決定を行う体制を担保している。人事については、第4期中期計画

において、研究力を自律的に強化できる柔軟な人事計画が可能となっており、拠点長が決定する人事計画に基づく人員配置を行う。

拠点長は、研究の進捗状況、資金獲得状況、メンバーの状況を把握し、設備費や人件費の配分を決定するとともに、各メンバーに対して適時アドバイスを行う。拠点長は、PIとの定期的な面談やプロジェクト管理用のウェブツールを通じてこれらの情報を入手し、拠点全体の研究力を継続的に向上させる仕組みを導入する予定である。 研究力向上のために有効であった施策は、各研究科にフィードバックされ、大学全体の研究力を向上させる組織改革につながる。

安倍は、WPIを利用した意欲的な改革を全学展開するため、採択当初、理事・副学長と事務部門長を兼任する。その後できるだけすみやかに、理事・副学長は交代し、安倍は事務部門長専従となる。

また、拠点の運営を助ける「キラルノット運営委員会」を設置し、事務部門長と副拠点長がファシリテートする。

この委員会は、研究・教育に関することだけでなく、海外のPI・共同PIの広島大学での長期滞在、広島大学と海外機関の若手研究者の研究に関する相互交流、外国人PIの子供の広島市内の英語で学べる学校への入学、住居・交通に関する支援など、その他の業務についても効率よく実施できるよう、事務面で拠点長を補佐する。事務部門長と副拠点長3名（図5.1）の助けを借りて、拠点長は、研究、教育、アウトリーチ、成果の広報、資金管理、研究資金申請の支援、PIや若手研究者の採用などに関する主たる方針を、この委員会を用いて実施する。例えば、人事/ダイバーシティを担当する相田は、ジェンダーバランスや国際化の必要性を考慮しながら、新しいPIや若手研究者の採用について拠点長を支援する。薮田副拠点長は、学際的な共同研究を指導・推進するため拠点長を助け、井上副拠点長は、拠点長と協力して新しい教育課程を開発し、広島大学と海外機関のPIによる学生の共同指導の仕組みを確立する。小鳥居副拠点長は、拠点長やスタッフと共に、様々なアウトリーチのためのフォーラムや公開講座を企画・実施し、本拠点の研究およびその他の活動が、高度な基礎研究を通じて持続可能な未来の実現に貢献するものであることを国内外の人々に伝え、発信する。安倍事務部門長が率いる事務部門スタッフは、資金管理、各種報告書の作成、研究者の支援を担当するスタッフの統括を行う。本委員会とスタッフは、例えば、共同利用実験機器の購入、設備の改修計画、建設予定の新棟の共同研究スペースの計画・設計などに関して、外国人PIを支援する。サイエンスライター/イラストレーターやその他のスタッフとともに、運営委員会と担当スタッフは、アウトリーチと広報を担当する小鳥居副拠点長を補佐し、アウトリーチ活動や公開講座の企画、必要なVR機器の購入を行う。拠点構想の書類にあるように、運営委員会の活動は、拠点の研究、教育、その他のミッションを含め、費用対効果の高い効率的な運営を保証するために、拠点長、副拠点長、事務部門長、事務担当者の努力を結集するものである。一方、4名の研究推進担当者は、拠点スタッフの助けを借りながら、共同指導や研究交流を含むPI間の協働を支援する（図5.1）。大規模なセンター、部局、その他の機関の運営経験を持つ外部の専門家やアドバイザーが、拠点長や運営委員会全体に対し、大規模な研究拠点運営のベストプラクティスを助言する。委員会を組織したり改組したりする際には、ジェンダーバランスを確保する（図5.2）。

拠点は大学全体の運営と並列した、独立した人事・資金で運営する。WPIの事業費を補い、研究資金、国内外の寄付金等による資金源を最大限にするため、その支援を担当するURAを拠点支援グループ内に配置する。

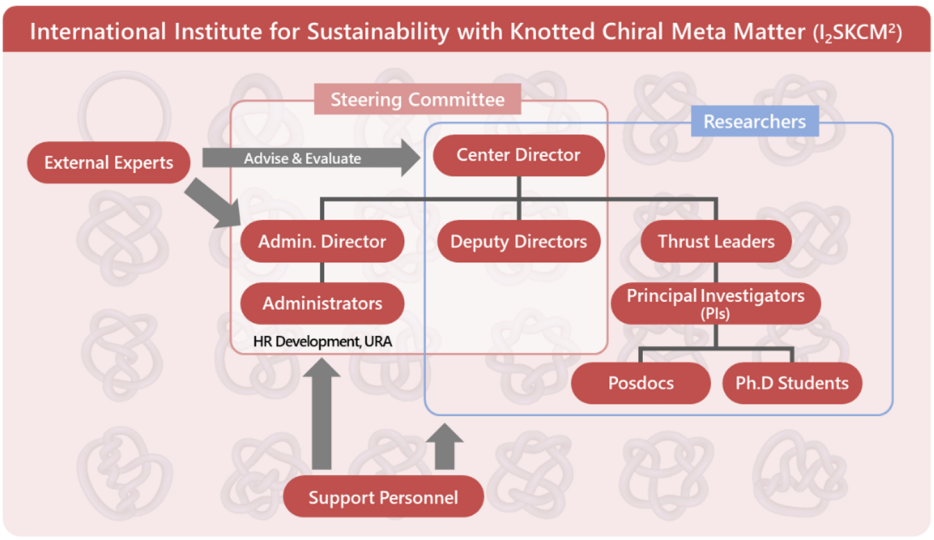

Fig. 5.1

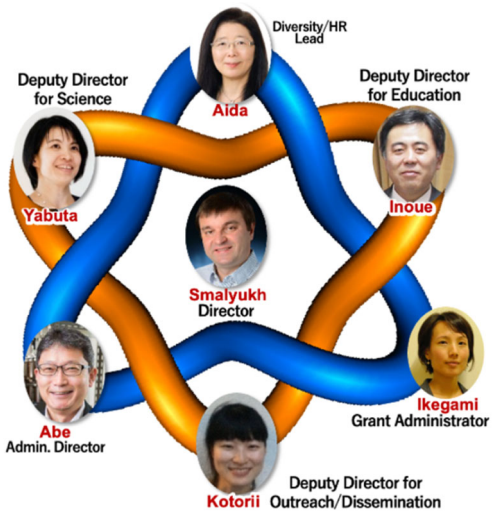

Fig. 5.2

6) 機関内研究者を集結させ、必要な環境整備を実現するにあたり、ホスト機関内の他の部局における教育研究活動にも配慮しつつ、調整を積極的に行い、拠点長を支援すること。

大学院改革

広島大学において、研究分野の融合と大学院教育の国際化を推進するため、大学院の組織を改編する。広島大学初の学際的な「**未来共創科学国際プログラム**」を設置し、現在の4研究科のいずれからでも博士課程の学生を受け入れる(図5.3)。

具体的には、現状では、数学、物理、化学、生物など分野別に大学院プログラムが設置され、教育と研究が行われているが、それらの**分野の垣根を打破してサステイナブルな社会を先導する人材育成に正面から向き合う大学院教育改革を実施**する。

これまで**本学が実施してきた大学院組織再編に加えて、MITやケンブリッジ大学などのグローバル拠点との新たなパートナーシップも活用して、大学院教育の国際化と分野融合を推進**する。

拠点長の強力なリーダーシップのもと、博士課程学生の教育改革、数学・物理学・化学・生物学の融合研

究、国際共同研究を推進する。広島大学は、学問の融合から生まれる科学と技術によって、持続可能な社会を先導する科学者を育成する教育を推進する。これにより、拠点長が開拓してきた新しい学術分野の創出を強力にサポートする。

若手研究者支援、国際交流・共同研究の推進を効果的に行うため、拠点の予算の50％以上を若手研究者支援に充てる。 共同研究先での滞在費など、必要な経済的支援は拠点長が決定する。これらの取り組みは、拠点長、拠点の中心メンバー（安倍、井上、小鳥居、薮田、セニュック）、越智学長の強力なサポートにより計画・実施される。拠点長は、学長と月1回以上の頻度で定期的に意見交換を行い、拠点の現状や運営に必要な資源について議論する。

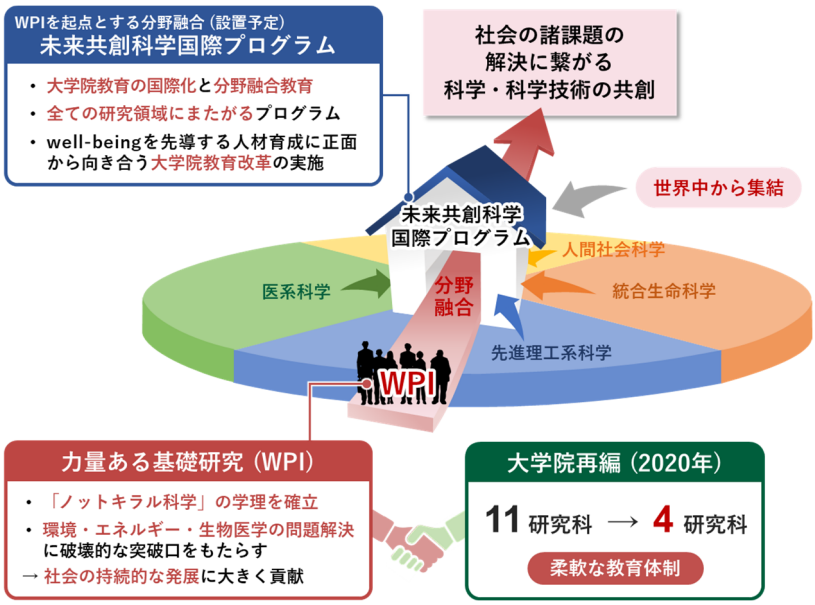

図5.3

拠点長、副拠点長、事務部門長は、広島大学の各部局の長や事務部門のリーダーと定期的に打ち合わせをし、効果的で生産的な拠点運営を確実に行う。拠点長のリーダーシップのもと、拠点と広島大学のリーダーおよび事務担当者による運営会議を定期的に開催し、拠点長、副拠点長、事務部門長、PIの代表者が参加して、人事、予算、運営方針に関する重要事項を議論する。さらに、拠点長は、定期的に5名程度の外部アドバイザー、著名な研究者、他拠点の拠点長から助言と提案を求め、広い視野で拠点を運営し、なおかつ独自の拠点評価を行うための支援を受ける。

7) 機関内の従来の運営方法にとらわれない手法（英語環境、能力に応じた俸給システム、トップダウン的な意志決定システム、大学院教育との連携等）を導入できるように機関内の制度の柔軟な運用、改正、整備等に協力すること。

既存制度の改善や慣習の撤廃について

本学は、2016年に、独自のKPIを設定し、人事配置から選考まで全て学長が決定できる「全学人事委員会」を発足させている。研究者の評価基準を独自で開発したKPIの下で一元化し年俸制の業績に反映させるための、研究成果に関する厳格な人事評価制度を整備している。本拠点が立ち上がると、拠点内で研究・教育活動を迅速に評価し、**拠点長がリーダーシップを発揮して、「能力主義」のコンセプトを導入**する。トップクラスの国際誌に掲載されるような画期的な研究を推進するため、PIの個々の全論文の年間累積引用数などを算出し、拠点長がリソースと給与補助を配分する際の評価基準とする（材料科学と純粋数学間の分野特有の差異を考慮する）。同様に、広島大学と海外機関のPIによる、民間財団を含む国際的な研究資金の申請を促進するために、資金獲得に成功した場合、拠点長による能力主義に基づく評価を行い、報酬を与える。広島大学や海外PIによる、国際的な賞の受賞、拠点ミッションへの優れた貢献、その他様々な優れた業績も、拠点長主導の能力主義に基づく評価が行われ、それに応じたボーナスが支給される。

WPIプロジェクト実施期間の初期段階において、PI、アドミニストレーター、スタッフの評価に対し、新しい能力主義の評価制度を導入し、拠点長裁量の予算（1億円）から、ボーナスとして反映させる。国際的なPIへの広島大学滞在中の支援額は、欧米の優秀な研究者に与えられるものと同等とする。新たに採用したPIとポスドクには、十分な給与、機器・施設の割り当て、研究スタートアップ資金を提供する。

このシステムは、教員の採用や教育環境の改善に資する新しい取り組みの可能性を示すものである。このシステムは、組織面、運用面ともに、最終的には全学に適用できるよう整えていく。また、海外参画機関の事務運営の好事例を収集し、広島大学の事務関連業務を改善する。

8) その他、当該拠点が「拠点構想」を着実に実施し、名実ともに「世界トップレベル研究拠点」となるために最大限の支援をすること。

本拠点が「拠点構想」を着実に実施し、自立した世界トップレベル研究拠点となるために、学長直下の学術・社会連携推進機構が全学的な組織体制、産学連携部門が企業からの研究資金の獲得、知的財産部が知財関係、URA部門が研究者サポートと競争的資金獲得、技術センターによる研究設備サポート、その他にも基金室、国際部、人事部、広報部など、法人本部の各部門が最大限支援を行うことを確約する。

新規採用された研究者に支給されるスタートアップ研究費は、米国などの競争相手となる機関に比較して劣ることが多いため、プロジェクト開始時または実施期間中に新たに本拠点に加わる海外研究者は、機器購入や施設利用について優先的に取り扱う。これは、新しい研究グループを迅速かつ効果的に立ち上げるためである。能力あるスタッフが、海外からのPIの迅速な備品購入、研究活動や日本での生活を支援する。広島大学と本拠点は、広島大学専任で雇用する外国人PIや若手研究者（新規採用のPIのように）、あるいは、海外PIや共同PIで2ヶ月から1年の長期滞在となる研究者の家族のために、英語で学べる学校、保育所、現地での交通手段、その他の必要なものへのアクセスを確保する予定である。英語で教える学校や保育所の設置、広島市や近郊に既にある私立学校や保育所にPIの子供を通わせる費用の負担の、いずれかまたは両方を、資金やその他の資源の中から確保する予定である。来日中のPIの配偶者及び広島大学に採用された外国人PIに対し、近隣での仕事の斡旋や就職の支援に努める。ビザの申請、日本での銀行口座の開設、旅費やその他の経費の払い戻しなど、外国人PIのニーズに迅速に対応するために、事務手続きを合理化する。ピクニック、レセプション、ハイキングなど、本拠点と広島大学、広島市や広島県の指導者、地元の産業界の指導者が一堂に会する機会を設ける。これらの会合を通じて、本拠点のサステイナビリティを目指した研究への寄付、優れたPIのための寄付講座の教授職の設置、若手研究者のための奨学金や賞の創設などの可能性を議論することができる。

アウトリーチや成果の広報のため、公開講座やアウトリーチ・フォーラム、拠点の一般公開などを実施するが、それに必要な講義室やその他の施設を広島大学が提供する。また、情報技術（IT）およびその他のニーズについても、広島大学が拠点を支援する。拠点の研究・教育ミッションを広島大学が支援し、反対に、拠点のベストプラクティスや改革の成果を広島大学の運営に取り入れることを支援するため、拠点長と事務部門長は、毎月、学長および大学運営のリーダーと面談する。

9) ホスト機関は、当該拠点が達成した成果を自己評価し、ホスト機関自らが優れた取組として評価したものについて、ホスト機関全体への展開・波及を図ること。

広島大学所属のPIは、学内の複数の部署を兼任しており、WPI実施期間中・後も、それを継続する。さらに、本拠点に新規採用されたPIは、その経歴に応じて、学部等の所属を選択したり、割り当てられたりする予定である。さらに、プロジェクト実施期間中または終了後すぐに、新規採用されたPIのうち、広島大学が主な所属先となる者には、そこでのテニュアトラックまたはテニュアポジションを与える。

海外からの研究者や学生が研究に専念できる環境を整えるため、英語で完結する教育・研究支援体制を構築する。この取り組みは、広く広島大学内に展開する予定である。さらに、本拠点SKCM^{2}では、能力主義、ジェンダーバランスと多様性の向上、アウトリーチの強化に関する新しい取り組みが確立する予定で、これらは大学における同様の取り組みの指針となる。これらは、研究環境の改善、国際化の推進、ひいては日本の国際競争力強化に貢献するものである。

10) WPI拠点やWPIアカデミー拠点を持つホスト機関については、既存の拠点を世界トップレベル研究拠点として維持・発展させるための十分な支援を行い、また、新たな拠点への十分な支援と、既存の拠点への支援の継続を両立させること。

※WPI拠点やWPIアカデミー拠点を有するホスト機関のみ記載すること。

11) WPI拠点やWPIアカデミー拠点を持つホスト機関については、既存の拠点の優れた成果を、自主的かつ積極的にホスト機関全体に波及させ、機関自らの改革につなげること。

※WPI拠点やWPIアカデミー拠点を有するホスト機関のみ記載すること。

世界トップレベル研究拠点プログラム
主任研究者リスト

※ 主任研究者が10名を超える場合は、適宜行を追加してよい。
※ 「世界トップレベル」と考えられる研究者については、その氏名の右側に「＊」印を付すこと。
※ 年齢は、2022年4月1日時点とすること。
※ プログラム開始時点で、当該構想に参加できないものについては、備考欄に、参加予定時期を明記すること。
※ 外国人の氏名は英語で記載すること。
※ サテライト所属PIの場合は備考欄に「サテライト」と記載すること。

拠点名（仮称も可。20字以内）		持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点（SKCM^2）				
ホスト機関名		国立大学法人広島大学				
	氏　名	年齢	現在の所属、役職 （機関、部局、専攻等）	専　門	エフォート† (%)	備　考
1	Ivan I. Smalyukh*	49	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）基礎化学プログラム 特任教授／コロラド大学ボルダー校 物理学科 教授	トポロジカルソリトン，結び目物質，プレデザインされた物質のビルディングブロック	80%	拠点長
2	小鳥居　祐香	37	(1) 広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）数学プログラム 准教授 (2) 理化学研究所 数理創造プログラム	数学(トポロジー, 結び目理論)	70%	副拠点長
3	井上　克也*	57	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）基礎化学プログラム 教授	実験材料科学，化学	70%	副拠点長
4	薮田　ひかる*	47	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）地球惑星システム学プログラム 教授	宇宙化学，地球化学	70%	副拠点長
5	Claire Donnelly*	30	マックス・プランク固体化学物理学研究所 Lise Meitnerグループリーダー	磁性体の3Dトポロジー，ナノスケールイメージング	30%	
6	黒田　健太*	35	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）物理学プログラム 准教授	固体物理学，量子物質における運動量空間トポロジー	70%	
7	Elisabetta Matsumoto	36	ジョージア工科大学 物理学科 助教	ソフトマターの幾何学・トポロジー	25%	
8	佐藤　弘志*	41	(1)理化学研究所 創発物性科学研究センター 統合物性科学研究プログラム 創発分子集積研究ユニット ユニットリーダー (2)東京大学大学院工学系研究科 客員研究員	化学，材料科学	50%	
9	Silvia Vignolini*	41	ケンブリッジ大学 化学科 教授	キラルバイオマテリアル，自己組織化	30%	
10	Andrey Leonov	42	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）基礎化学プログラム 准教授	キラル磁性体を中心とした物性理論	70%	
11	佐々木　千尋*	44	ヴロツワフ大学 理論物理学科 教授	高エネルギー素粒子・原子核物理 (理論)	70%	
12	Jörn Dunkel*	45	マサチューセッツ工科大学 数学科 准教授	応用数学，トポロジー	25%	

13	Shang-Te Danny Hsu*	46	中央研究院 生物化学研究所 Associate Research Fellow	生物物理化学，構造生物学，結び目タンパク質，COVID-19	30%	
14	Tamas Kalman	47	東京工業大学 理学院 准教授	低次元トポロジー，組合せ論	40%	
15	Bohdan Senyuk*	50	コロラド大学ボルダー校　物理学科 シニアリサーチアソシエイト	化学物理，ソフトマター，液晶結晶物理	70%	
16	志垣　賢太*	54	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）物理学プログラム 教授	高エネルギー原子核物理 (実験)	70%	
17	Marjolein Dijkstra*	54	ユトレヒト大学 物理学・天文学科 デバイ・ナノ材料化学研究所 教授	物性理論，トポロジー	30%	
18	灰野　岳晴*	57	広島大学学術院（大学院先進理工系科学研究科）基礎化学プログラム 教授	キラル超分子化学	70%	
19	楯　真一*	60	広島大学学術院（大学院統合生命科学研究科）数理生命科学プログラム 教授	生物物理数学，応用数学	70%	

† 研究者の年間の全仕事時間（研究活動の時間のみならず教育・医療活動や兼業部分等、全ての業務等を含む）を100%としたとき、本WPI拠点の研究活動等を実施する時間の配分率