

領域略称名：J P h y s i c s

領域番号：2704

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「J-Physics：多極子伝導系の物理」

(領域設定期間)

平成27年度～平成31年度

平成29年6月

領域代表者 (神戸大学・理学研究科・教授・播磨 尚朝)

目 次

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究の進展状況	8
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	11
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	20
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	22
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	23
9. 総括班評価者による評価	24
10. 今後の研究領域の推進方策	25

研究組織 (総括：総括班, 支援：国際活動支援班, 計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	15H05882 J-Physics：多極子伝導系の物理の研究総括	平成27年度 ～ 平成31年度	播磨 尚朝	神戸大学・理学研究科・教授	9
Y00 支援	15K21732 J-Physics：多極子伝導系の物理の国際展開	平成27年度 ～ 平成31年度	播磨 尚朝	神戸大学・理学研究科・教授	8
A01 計画	15H05883 局在多極子と伝導電子の相関効果	平成27年度 ～ 平成31年度	中辻 知	東京大学・物性研究所・教授	7
B01 計画	15H05884 遍歴多極子による新奇量子伝導相	平成27年度 ～ 平成31年度	青木 大	東北大学・金属材料研究所・教授	6
C01 計画	15H05885 拡張多極子による動的応答	平成27年度 ～ 平成31年度	網塚 浩	北海道大学・理学研究院・教授	6
D01 計画	15H05886 強相関多極子物質の開発	平成27年度 ～ 平成31年度	野原 実	岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授	5
総括・支援・計画研究 計6件					
A01 公募	16H01059 電子の遍歴・局在双対性を考慮した重い電子超伝導の微視的理論	平成28年度 ～ 平成29年度	大槻 純也	東北大学・理学研究科・助教	1
A01 公募	16H01066 準周期構造を持つ重い電子系における価数転移	平成28年度 ～ 平成29年度	古賀 昌久	東京工業大学・理学院・准教授	1
A01 公募	16H01069 軌道依存型混成によるf電子の秩序化と価数揺らぎの理論的研究	平成28年度 ～ 平成29年度	椎名 亮輔	琉球大学・理学部・教授	1

A01 公募	16H01071 クラスター構造をもつ準結晶における多極子伝導系の研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	出口 和彦	名古屋大学・理学研究院・講師	3
A01 公募	16H01074 内殻電子分光線二色性による多極子活性基底状態および励起状態の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	関山 明	大阪大学・基礎工学研究科・教授	3
A01 公募	16H01077 周期系・準周期系重い電子系に普遍的な新しい量子臨界物性の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	渡辺 真仁	九州工業大学・工学研究院・准教授	1
A01 公募	16H01080 フラストレーション系におけるスピン多極子秩序と新奇伝導の理論的・数値的研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	坂井 徹	兵庫県立大学・物質理学研究科・教授	1
A01 公募	16H01082 熱流およびスピン流における多極子輸送現象の理論	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	森 道康	日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・主任研究員	2
B01 公募	16H01060 URu ₂ Si ₂ の強磁場磁気秩序と磁気相関の起源の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	野尻 浩之	東北大学・金属材料研究所・教授	1
B01 公募	16H01061 スピン軌道相互作用によって保護される電場誘起伝導界面の新奇超伝導物性	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	野島 勉	東北大学・金属材料研究所・准教授	1
B01 公募	16H01078 立方晶化合物の特異なフェルミ面	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	大貫 惇睦	琉球大学・理学部・客員教授	4
B01 公募	16H01079 強磁性三重臨界点と強磁性超伝導に関する微視的理論	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	服部 一匡	首都大学東京・理工学研究科・准教授	2

B01 公募	16H01081 遍歴多極子と多極子 超伝導体	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	池田 浩章	立命館大学・理工学部・教授	1
B01 公募	16H01084 3次元ARPESに よる強相関ウラン化 合物の電子状態の解 明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	藤森 伸一	日本原子力研究開発機構・主任 研究員	1
C01 公募	16H01062 奇パリティ多極子秩 序系における新奇量 子伝導	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	大串 研也	東北大学・理学研究科・教授	2
C01 公募	16H01064 多極子遍歴系に対す る計算物理学手法の 開発：多軌道クラス ター型動的平均場近 似	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	品岡 寛	埼玉大学・大学院理工学研究 科・助教	1
C01 公募	16H01070 多重量子ドット系の 幾何学的対称性を利用 したナノスケール 多極子物性の創出	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	古賀 幹人	静岡大学・教育学部・教授	1
C01 公募	16H01073 二次元ハニカム磁性 体における特異な電 流誘起磁気効果の検 証	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	大原 繁男	名古屋工業大学・工学研究科・ 教授	3
C01 公募	16H01076 ジグザグ鎖近藤半導 体における反対称ス ピン軌道相互作用の 効果	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	高島 敏郎	広島大学・先端物質科学研究 科・教授	6
D01 公募	16H01063 Hybrid f-/p-electron molecular materials	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	プラシデス コスマス	東北大学・原子分子材料科学高 等研究機構・教授	4
D01 公募	16H01065 3d 電子系における高 次多極子に由来する 非対角応答の観測	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	阿部 伸行	東京大学・新領域創成科学研究 科・助教	2

D01 公募	16H01072 多軌道強相関係としてのイリジウム化合物の新物質開拓	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	岡本 佳比 古	名古屋大学・工学研究科・准教授	3
D01 公募	16H01075 遷移金属硫化物、砒化物の電子相関とスピナー軌道相互作用の制御による異常物性の探索	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	宮坂 茂樹	大阪大学・理学研究科・准教授	5
公募研究 計 23 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

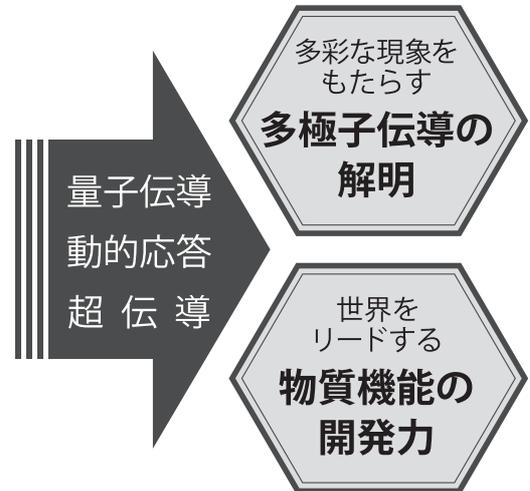
研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

【研究の学術的背景】

遷移金属や希土類元素を含む化合物には、電子間に働く強い相互作用により、種々の興味深い性質を示すものがある。このような電子系は、量子多体問題の舞台というだけではなく、将来の固体デバイス開発における微細化や省電力・高効率化の鍵を握るものとして大きな注目を集めている。とりわけ近年では、従来の常識を覆す**強磁性と超伝導の共存現象**、**電気・磁気の非対角応答**を示すマルチフェロイクス、量子ホール効果やスピンホール効果といった**特異な量子伝導現象**などの研究が盛んである。このよ

新学術領域開拓
多極子
×
伝導

新研究人財開発
人財の越境
+
若手の育成



領域の全体構想と研究目的

うな非従来型の電子系では、電子の持つ**スピンと軌道の結合**が重要な役割を果たしていると考えられているが、ミクロな視点からの包括的な研究も新物質機能開拓も行われていないのが現状である。

原子レベルでは電子自由度は**スピンと軌道が結合して全角運動量「J」**が良い量子数となるが、Jによる物性を理解するための鍵は「**多極子**」である。多極子は電荷やスピンの空間分布の偏りを記述するミクロな自由度であり、固体中などではJと局所構造により決定される。日本は、希土類化合物において多様な多極子の秩序配列状態を見出すなどの先駆的な研究を行ってきた。近年では、多極子の揺らぎが鉄系超伝導体などで超伝導発現機構を担っている可能性が指摘されている。さらに、先に述べた非従来型の電子系では、**多極子が顕在化して物性を支配している**と考えられる。したがって、従来の原子サイズの静的な局在多極子の概念を拡張して、多様な電子系へと適用することで、非従来型電子系の理解が格段に進むことが期待できる。

このような背景を受けて、「J」が産み出す「多極子」を切り口に非従来型電子系の諸問題を解決し、さらなる新物質機能の開拓を進めていくためには、日本（Japan）が先導する局在多極子研究を**伝導する多極子の研究へとパラダイムシフト**することが必要不可欠であるという着想に至った。この共通認識のもと、d 電子系と f 電子系の研究者を結集し、拡張された多極子の概念を新機軸とした**多極子伝導の学理の構築と物質機能を開拓**する研究領域「**J-Physics：多極子伝導系の物理**」を提案する。さらに、この新しい学術領域の開拓を通じて、従来の研究組織の枠組みを越えて**若手人財を育成**する。

【対象とする学問分野】

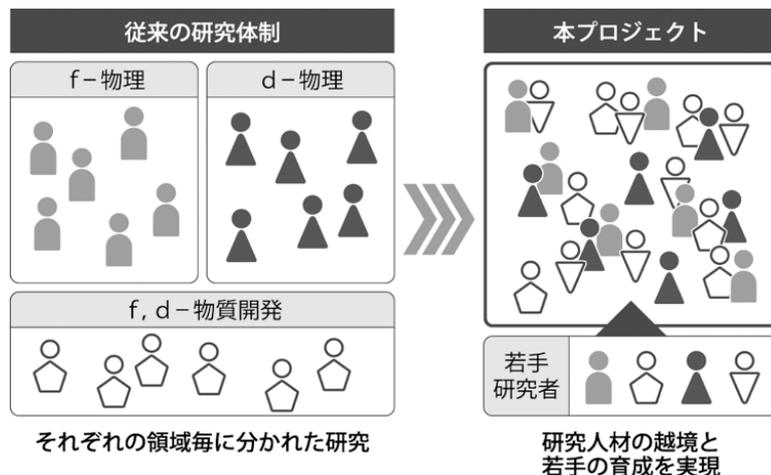
本領域は、ミクロな多極子の概念に注目し、それを拡張して捉えることにより、非従来型の伝導系に共通する諸問題を解決し、さらには新物質機能の開拓を進めていくものであり、応用も見据えた広い意味の物性物理学を対象としている。特に、**超伝導をはじめとする量子伝導、磁性、スピントロニクス、マルチフェロイクス**などの機能的性質に重点をおいているが、ミクロな電子自由度による物質機能の開拓という視点からは、無機化学や材料化学などとの関連性も深い。

基礎研究としての物性物理学あるいは物質科学が今日までの科学技術イノベーションに大きく貢献してきたことは、様々な超伝導物質、半導体トランジスタ、発光ダイオードなどに限らず、透明酸化半導体や巨大磁気抵抗効果を示す物質など多くの高機能物質を創出してきたことから明らかである。その中でも、2001年の秋光氏（研究項目 D01 研究分担者）の超伝導物質 MgB_2 の発見や2008年の細野氏の鉄系超伝導体の発見に代表されるように、日本の物質開発は世界的に見ても高い水準にある。強相関電子系の分野においても、多くの新機能性物質の発見や開発が進められてきた。

しかしながら、**新機能物質の開発**が共通したミクロな自由度の観点から組織的に行われた事はなく、特にここ20年近くは、スピンや軌道など個別の自由度に注目した物質開発が行われている。その中で、**スピン軌道相互作用の強い系や特徴的な結晶構造に特異な物質機能**が見られることが明らかになってきた。この背後には、ミクロな自由度としての拡張された多極子とその相互作用がある。そこで多極子の概念を念頭において、多彩な物質機能の解明と多様な機能物質の開発を共同して行うことで、**ミクロな視点から物質機能を開発する新しい学術分野の創成・発展**が可能となる。この概念と機能は、原子サイズより大きく広がった多極子にも適用することができ、電子論的な研究手法を用いている高分子などの化学材料や生体分子における研究分野への波及効果も期待できる。

【本領域の重要性・発展性】

本領域では、従来の局在多極子の枠を超えて拡張された多極子という新概念を構築することで、強相関電子系に共通した諸問題を解決するとともに、量子伝導・超伝導・動的応答などの新しい物質機能の開拓を行う。**長年、独立に進められてきた d、f 電子系研究を拡張多極子の概念の下に統合し、基礎学理の探求と新物質機能の開拓を両輪とする研究を推進することで、日本の物質研究の基盤的な学術水準を向上させる。**また、今後の物質科学の中核を担う**人財強化と若手育成**を行うことにより、**長期的な学術水準の向上と強化**につなげる。



本領域の研究体制の特徴

国外においてはスピン伝導やマルチフェロイクスの分野は、特に米国において活発に研究されているが、国内の関連プロジェクトと同様に、多極子という自由度は考慮されていない。超伝導研究は欧米や中国など世界的に盛んであるが、その発現機構における軌道の重要性は認識され始めてはいるものの、それを一歩進めた多極子揺らぎによる超伝導物質の開拓という発想はまだない。局在多極子については、特定領域研究「スクッテルダイト」(H15-H19)に代表される日本の取り組みが成果をあげたことを受けて、欧米においてもその重要性が認識されてきている。本領域計画が発足したことは、これを核として**世界を牽引する物質開発力をさらに大きく増強させる絶好の機会**である。

2. 研究の進展状況 [設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する] (3 ページ以内)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

領域発足時に研究期間終了後に期待される成果等として以下の事項を掲げている。

- (1) 強相関電子系を包括的に捉えた多極子伝導系の新たな学理を創出
- (2) 強磁性超伝導など非従来型伝導現象の多くを多極子の概念を基に解明
- (3) 奇パリティ多極子が伝導現象に支配的な系を重点的に研究・開発し、新規機能を開拓
- (4) 多極子に基づいた物質設計を通じて新しく多彩な非従来型伝導系を開発

その目的のために4つの研究項目を設定し、それぞれのテーマで研究を行っている。研究項目毎に研究の進展状況などについて述べる。

研究項目 A01 局在多極子と伝導電子の相関効果

本研究項目では、多極子と伝導電子の相関効果を明らかにし、さらに新奇伝導現象の開拓を行うことを目的としている。

多極子近藤系 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ においては高压化での実験から多極子秩序の量子臨界現象を世界に先駆けて実現し、近藤温度 3 K に比べて超伝導温度が 1 K にも上る「高温超伝導」の発現と、四極子近藤効果による顕著な非フェルミ液体性を明らかにした。 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ においては熱・磁気膨張、超音波、中性子散乱実験による反強多極子秩序の多重相図を確立したと同時に多極子と伝導電子の強い混成の効果が中性子非弾性散乱から確認された。価数揺動系においては価数揺らぎによる異常な金属相の出現が YbAlB_4 や Yb 系の準結晶において普遍的に現れることを明らかにした。その発現の背景に価数揺らぎが関わっている可能性が世界で初めて可能になった多重環境下での ^{174}Yb メスバウアー分光からわかりつつある。スピン軌道結合が本質的に重要なモット絶縁体 5d 電子系であるパイロクロアイリジウム酸化物において絶縁体状態を安定化させている拡張磁気八極子秩序を磁場により不安定化させることで、磁性体では非常に稀有な磁場誘起量子金属絶縁体転移を実現した。

19 世紀の発見以来、強磁性のみで知られていた異常ホール効果を反強磁性体 Mn_3Sn において初めて実現した。また、それが拡張磁気八極子の強的な秩序により発現していることを理論的に明らかにした。異常ホール効果が可能となる磁気秩序を拡張多極子の観点から群論的に分類し、物質開発につながる試みが行われており、この分野の理解が格段に進んでいる。さらに、この拡張多極子を 100 ガウスという低磁場かつ室温で制御することでスイッチングが可能となることを確認した。

強磁性超伝導体である UCoGe において磁化の異方性の測定から、量子相転移近傍の相図のウィング構造を決定することに成功した。反強磁性と共存する超伝導を示す重い電子系物質 UPd_2Al_3 の角度分解の比熱測定を行い、超伝導ギャップが水平線状ノードを有することの決定的証拠を得た。

さらに、準結晶における超伝導はこれまで報告はあったが、疑義が持たれていた。「準結晶は超伝導になりうるか」という問題意識のもと、Al-Mg-Zn 系で準結晶の超伝導を調べ、実験的に確定した。

研究項目 B01 遍歴多極子による新奇量子伝導相

本研究項目では、アクチノイド化合物を中心として、遍歴多極子をキーワードに研究を進めている。当初設定した目標は以下の4点である。1) ウラン化合物および d, p 電子が協奏した新物質探索; 2) 多自由度超伝導波動関数の同定と新現象探索; 3) 多極子秩序が絡んだ超伝導およびその発現機構; 4) 局所的な反転対称性が破れた超伝導と遍歴多極子による新奇量子伝導。1) に関しては、特徴的な結晶構造に着目して 20 種類以上のウラン化合物の単結晶育成に取り組んでいる。また D01 計画研究と共同研究することにより BiS_2 系ウラン化合物の育成が進展している。2) については、NMR 測定を中心に

URu₂Si₂、UCoGe、URhGe、U₆Co、UPd₂Al₃、UBe₁₃、UPt₃などについての超伝導の対称性についての実験が行われている。これらの結果については計画研究および公募研究の理論メンバーとの密接な議論が行われている。一部はA01 計画研究との共同研究である。3)については、D01 計画研究との共同研究により PrRh₂Zn₂₀の異方的な磁場温度相図などが明らかになっている。4)については UCoGe、URhGe の磁場誘起超伝導の実験が国際共同により進展した。

全体として研究は確実に進展しているが、強磁性超伝導体の伝導現象は極めて特徴的であることもあり、機構解明へは理論的に大きな進展が得られるか、あるいは類似物質を発見するかという展開を期待したい。

研究項目 C01 拡張多極子による動的応答

本計画研究では、複数の原子サイトにまたがって構成される「拡張された多極子」による秩序状態とダイナミクスを解明し、新たな物質機能を開拓することを目指している。

第一の達成目標は、トロイダル双極子をはじめとする奇パリティ多極子の秩序を中心に、拡張多極子の秩序配列の同定ならびにこれによって産み出される種々の非対角応答を実験と理論の密な連携のもとに解明することにある。これに関し、典型物質と目される UNi₄B について、電流誘起磁化の精密測定から、異なる条件下で合成した試料に対する再現性の確認も含め、確かに電流誘起磁化という非対角応答が発現していることを確認した。同時に、誘起磁化の電流方向に対する異方性が理論予想と単純には合致しないことが新たにわかり、本系の結晶構造、磁気構造の精密な検討の必要性という新たな課題を提起した。現在、放射光 X 線回折による精密構造解析を進めるとともに、日本では規制により実施不可能な中性子散乱実験を行うため、カレル大学（チェコ共和国）およびブラウンシュヴァイク工科大学（ドイツ）との国際共同研究を展開し、長期派遣された研究協力者（DC 学生）が大型単結晶の作成に成功している。また単結晶での NMR を初めて行い、本系の異常な磁気秩序を反映したスペクトルの顕著な異方性と特異な緩和の存在を見出した。同様の非対角応答の研究が、Ce(Ru,Rh)₂Al₁₀、CeRh₂Si₂、BaMn₂As₂、Cr_{1/3}NbS₂、YbNi₃Al₉、RRhPb、CePd₂Ga などにおいても精力的に進められている。これらに並行して、奇パリティ多極子の観測手法の確立を目指す試みも進展している。ウラン系の共鳴磁気散乱の研究では、中性子散乱並みの磁気散乱が観測され得る系があることがわかった。さらに共鳴軟 X 線散乱と X 線回折顕微鏡法を組合せたイメージング手法の開発も進めている。

第二の目標は、奇パリティ多極子が発生する舞台となる種々の物質系、すなわち、空間反転対称性がグローバルもしくは局所的に破れた系、カイラル磁性体、ならびに磁性元素を非磁性元素で部分置換したジグザグ構造磁性体などを開発することである。これに関し、本領域で整備したレーザー加熱浮遊帯溶融（LFZ）炉を用いて、カイラル磁性体(Fe,Co)Si の片手系大型単結晶の作製に成功し、中性子散乱実験が可能となり進行中である。また、同じくカイラル磁性体である Yb(Ni,Cu)₃Al₉ の片手系単結晶を育成し、中性子回折測定の結果から、Ni-Cu 置換によりらせん磁気構造の周期が拡がることを明らかにした。さらに ErNi₃Ga₉ を作製、磁気秩序構造を同定し、拡張磁気トロイダル 8 極子系であることを見出した。また、RBe₁₃、R₁M₃X₉、R₂M₃X₉ などの空間反転対称性がグローバルもしくは局所的に破れた系の単結晶、ならびに新規カイラル磁性体 RMSi（R=希土類, M=Ir, Rh）の不斉単結晶の合成を進めた。さらに磁気 4 極子秩序の発現が予想される RM₂Si₂（M=Mn, Ir）の単結晶育成にも着手している。

第三の目標は、拡張多極子秩序が産み出す磁気輸送や非線形・非対角応答現象を理論的に解明し、定量的な評価を可能にする、さらに、拡張多極子秩序状態からの種々の集団励起、あるいは秩序状態近傍における低エネルギー励起の性質を理論的に解明することである。これに関し、層状カルコゲナイド物質を念頭に置いた奇パリティ多極子系の光学応答選択則を導出、ハニカム構造 Co 化合物の特異な電気磁気応答の微視的モデルに基づく理解の構築、並びに D01 と共同で Pr1-2-20 系における四極子および磁気近藤効果の競合現象の起源を解明した。また、擬 2 次元および 3 次元系における p-波超伝導のうち、トポロジカルな状態に対してはそのトポロジー的構造を起源とするフィードバック機構

が存在することを示した。また、 MoS_2 のような単層チェッカーボード状三角格子系の s-波超伝導体で、対破壊効果の生じない横磁場印加によってトポロジカル超伝導状態を誘起できることを示した。さらにトロイダル秩序や磁気四極子秩序といった奇パリティ多極子秩序が引き起こす磁気輸送や非線形・非対角応答現象を記述するモデルの構築に着手し、トロイダル秩序特有の内因性ホール効果やその他の磁気光学現象の理論的解明、さらには奇パリティ多極子秩序のもとでの集団励起の予想に関する理論構築を進展させた。

研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

本研究項目では、遷移金属ニクタイト・カルコゲナイドの固相反応、希土類化合物の結晶育成、重金属化合物の結晶育成、遷移金属酸化物の固相反応、電子構造計算の専門家が、お互いの合成技術とこれまでの物質に関する幅広い知識に理論的な知見を融合し、元素横断的に強相関多極子物質の探索に取り組む。対象とする物質群は、スピン軌道相互作用の大きな希土類や 5d 遷移金属元素、重い典型金属を含むあらゆる種類の無機化合物である。これらの元素を局所的に空間反転対称性が破れたサイトに配置したとき、強いパリティ混成効果とスピン軌道相互作用が協奏し、スピンと軌道の自由度が一体となったパリティ混成複合自由度（強相関多極子）が産まれると考えられる。ここで期待される特異な奇パリティ多極子形成やエキゾチック超伝導、多極子秩序が示す新しい非対角応答などを示す典型的な多極子伝導物質の開発を進めてきた。これまで以下のような新物質の発見とスピン軌道結合に対する理解が進んだ。

特に顕著な進展があったのは、ハニカム構造をもつ新超伝導体 BaPtAs ($T_c = 2.8 \text{ K}$) と BaPtSb ($T_c = 1.5 \text{ K}$) の発見である。これらの系においてカイラル d 波超伝導の発現が理論的に予測されて、検証のためのミュオン実験が実施予定である。また BiS_2 系において超伝導転移温度が 10 K 以上になる構造条件を明らかにした。また異方的超伝導ギャップの存在が明らかになりつつあり、今後、強いスピン軌道結合をもつ 6p 電子系における超伝導の理解が進むことが期待される。四極子秩序と超伝導を示す Pr 1-2-20 型化合物における物質横断的な研究が進み、四極子近藤効果の全容が明らかになり招待論文として出版した。

モット絶縁体である層状イリジウム酸化物に高濃度に電子を注入すると $j = 1/2$ フェルミオンの超伝導発現が理論的に指摘されている。そこで、高圧合成、メカニカルアロイイング、熔融帯域法などの合成手法を駆使し、電子ドーピングの上限を従来の 8% から 15% まで引き上げた。光電子分光実験からドーピングにともなうギャップ内状態の発達を観測されて、この系の金属化（さらには超伝導化）が目前であることが確認できた。

理論計算においては、反転対称性のないウラン化合物においてバンド幅に対してスピン軌道分裂が典型例を見出した。非磁性のまま空間反転中心を失う $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の相転移の起源を明らかにした。

d-f 分野の融合の観点においては、全体会議やトピカルミーティング、理論討論会においてアイデアの共有と情報交換を図ったことにより、d 電子系における $j = 3/2$ フェルミオン物質の研究、特に $j = 3/2$ フェルミオンの対形成による特異な超伝導状態の研究が立ち上がった。これはウラン系における $j = 5/3$ フェルミオンが産み出す高次多極子秩序の研究に触発された結果である。このように分野融合による新物質開発が進みつつある。

3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項>

（略）その新規性は、豊富な実績と長い研究の歴史を持ちながら、個別に世界を牽引してきた我が国の2つの研究分野（d 電子系と f 電子系）を、多極子概念を新機軸とするパラダイムシフトによって統合し、新たな研究領域の創成を目指す点にある。これにより、多彩な物質開発や物性理解が格段に進み、幅広い産業分野への応用展開が期待できる。（略）

一方で、2つの研究分野の融合実現に向け、領域代表者や総括班が中心となり、複数の計画研究や公募研究が関与する連携研究を強化する必要がある。また、d 電子と f 電子の分野融合や多極子伝導系の研究からどのような新概念の創出が期待されるのか、具体的な展望が求められる。

(1) 分野融合へ向けた連携研究の強化

この点については、（審査結果の所見）とは別に（留意事項）として、「本研究領域の目的達成のためには、領域代表者の強いリーダーシップにより2つの分野の研究者間の相互連携と本研究の提案趣旨に対する共通理解を深めるための方策を更に工夫することが必要である。」とのご意見を頂いている。

領域全体会議やトピカルミーティングなどでの議論を通じて連携研究の強化を図っている。ニューズレターなどで領域の提案趣旨に沿った研究の紹介をしているが、これが相互の研究分野の理解に極めて有効に働いている。未知の研究領域への関心は若い研究者ほど高く、d 電子系と f 電子系の違いを意識せずに研究に取り組んでいる。しかしながら、長い研究の成果として明確な相違点もあり、シニアから指摘される問題点も含めて、有意義な議論が展開されている。実際の物質開発としては、d 電子系で見いだされたスキルミオン相を f 電子系で実現すべく、キラル構造の f 電子系磁性体の試料育成を強く働きかけた結果、EuPtSi で f 電子系スキルミオンの兆候が発見されるなど、2つの研究分野の融合に向けて確実に前進している。複数の計画研究や公募研究が関与する連携研究の研究成果は謝辞有り論文数で125件中24件となっている。

(2) 新概念の創出に向けた具体的展望へ向けての活動

理論討論会やその他のトピカルミーティングにおいて議論を重ねている。トロイダルモーメントや拡張多極子や奇パリティ多極子などの本領域特有の概念は、ニューズレターなどを通じて理解が進んでおり、これらのキーワードで整理された研究発表が数多く行われている。Mn₃Sn 系で発見された異常ホール効果の理論的解析などから、多極子の群論的な解析が進んでおり、群論による現象の分類や物質探索が行われている。群論による分類は d 電子系や f 電子系によらないので、2つの電子系に共通した新概念の創出に確実に進んでいると言える。また、スキルミオン類似の磁気相が希土類 EuPtSi で確認されれば、スキルミオン相の理解が進むばかりでなく、新たな磁気相の発見も期待される。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限ること**とします。

研究項目 A01 局在多極子と伝導電子の相関効果

A01 (計画・鈴木、有田)

・異常ホール効果の発現機構の解明

クラスター多極子による反強磁性体における異常ホール効果の発現機構を発見した。これによりすべての磁性体におけるホール効果の理論的な基礎が完成した。また、その応用例として Mn_3Sn , Mn_3Ge で発現する異常ホール効果の定量的な評価も行い、ホール効果を増強するための知見が得られた。

(Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017), Editors' Suggestion)

A01 (計画・榊原) B01 (計画・青木) 領域内共同研究

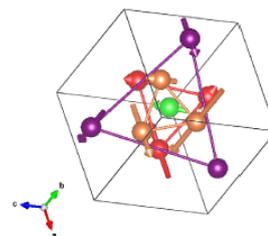
・ UPd_2Al_3 の超伝導ギャップの水平線状ノードの確認

反強磁性と共存する超伝導を示す重い電子系物質 UPd_2Al_3 の角度分解の比熱測定を行い、超伝導ギャップが水平線状ノードを有することを明らかにした。(Phys. Rev. Lett. **117**, 037001 (2017). Editors' Suggestion)

A01 (計画・佐藤)

・希土類カイラル磁性体の長周期構造の発見

反転心を持たないカイラル結晶磁性体である $Pr_5Ru_3Al_2$ (空間群: $I2_13$) の中性子散乱実験を行い、立方晶希土類磁性体では珍しい周期 90\AA の長周期磁気構造を確認した。(J. Phys. Soc. Jpn., **85**, 073705 (2016).)



カイラル磁性体の磁気構造

A01 (公募:大槻) C01 (公募・品岡) 領域内共同研究

・多体量子論の数値解法の飛躍的進展

松原グリーン関数に基づく多体量子論における数値計算上の問題を虚時間データの疎表現を与える新しい基底系の観点から、統一的に解決した。新しい基底は、任意の虚時間データを在来の方法よりも顕著にコンパクトに表現することができ、システム非依存で汎用的な、新しい直交基底系である。この基底と最新の情報理論「スパースモデリング」と組み合わせることで、ノイズに対して安定な新しい解析接続の方法を開発し、新しい直交基底系が実際に様々な虚時間グリーン関数を圧縮できることを典型的な多体模型の量子モンテカルロ法による計算から示した。(2017)

研究項目 B01 遍歴多極子による新奇量子伝導相

B01 (計画・青木) 国際共同研究

・強磁性超伝導体 $UCoGe$ の超伝導発現機構の解明

超伝導電子対の対の強さが磁場とともに大きく変化し、磁場を加える方向によって強められたり弱められたりすることが分かった。その結果、特定の方向では磁場によって超伝導が強化される現象が明らかになった。(Nat. Commun. **8**, 14480 (2017), プレス発表、科学新聞 2017.3.10 掲載)

B01 (計画・井澤) D01 (計画・鬼丸) 領域内共同研究、国際共同研究

・非クラマース系 $PrRh_2Zn_{20}$ の異方的な磁場温度相図の決定

$PrRh_2Zn_{20}$ の極低温高磁場下輸送係数測定により、四極子自由度と特異な遍歴電子状態が絡み合った新奇物性を生み出していることを明らかにした。(J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 04711(2017), Editors' Choice)

B01 (計画・神戸)

・ URu₂Si₂ の超伝導状態におけるナイトシフトの観測

URu₂Si₂ の純良単結晶を用いて a 軸方向に磁場を加えた時のナイトシフトが変化しないことを見出した。スピン帯磁率が異方的で a 軸方向では極めて小さいことを見出した。(J. Phys. Soc. Jpn. 85, 073711 (2016), Editors' Choice)

B01 (計画・柳瀬) 学生の渡邊との共同研究

・ 磁気十六極子秩序相の磁気圧電金属相の発見

磁気多極子秩序および電気多極子秩序の群論的分類を行ない、多極子秩序物質の探索を系統的に行うことを可能にした。その結果、系統的な探索により数十の奇パリティ磁気多極子物質を同定することに成功し、Ba_{1-x}K_xMn₂As₂ が磁気十六極子秩序相に分類されることを示し、そこは磁気圧電金属相と呼ばれる状態であることを示した。(論文投稿済み)

研究項目 C01 拡張多極子による動的応答

C01 (計画・楠瀬) 若手の柳との共同研究

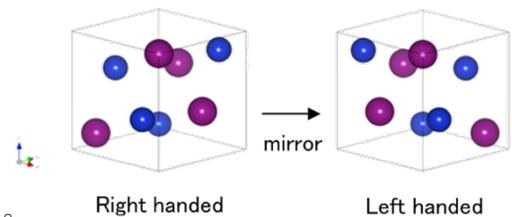
・ 拡張多極子の理論の進展

層状カルコゲナイド物質を念頭に置いたハニカム構造上のスピン軌道結合系に関して奇パリティ多極子の概念を基礎に光学応答選択則を導出し、ハニカム構造 Co 化合物の特異な電気磁気応答の微視的モデルに基づく理論を構築した。(投稿中)

C01 (計画・高阪)

・ カイラル磁性体の開発の進展

本領域で整備したレーザー加熱浮遊帯溶融 (LFZ) 炉を用いて、カイラル磁性体 (Fe, Co)Si の片手系大型単結晶の作製に成功した。中性散乱実験が可能となり、現在進行中である。



カイラル磁性体の片手系結晶の育成

C01 (計画・網塚) 国際共同研究

・ UNi₄B 大型単結晶の作製

電流誘起磁化異常が見出された UNi₄B の本質を理解するには、結晶構造および磁気構造の精密解析による再評価が重要であることが判明した。国内では規制により不可能な中性子実験を行うために、国際活動支援および C01 の経費にて研究協力者 (DC 学生) をカレル大学 (プラハ、チェコ共和国) に長期派遣し、セコフスキー教授らと国際共同研究を展開。大型単結晶の作製に成功した。

C01 (計画・藤)

・ UBe₁₃ の超伝導状態における磁気異常の観測

局所的に反転対称性が破れた広義のジグザグ系重い電子系超伝導 UBe₁₃ において、超伝導相内に微弱な磁気異常が生じることを NMR で初めて観測した。奇パリティ超伝導状態の内部変数の変化、あるいは磁気多極子秩序等の共存の可能性を示唆した。(J. Phys.: Conf. Ser. 807, 052105, (2017))

C01 (公募・大原)

・ 新規拡張磁気多極子系の開拓

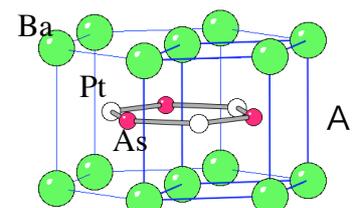
カイラル構造物質 ErNi₃Ga₉ の単結晶を作製し、6.4K 以下で生じる磁気秩序相の磁気構造を中性子散乱実験で同定した結果、拡張磁気トロイダル八極子に対応する反強磁性相が実現していることを見出した。(2017)

研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

D01 (計画・野原) **C01** (計画・御領) 領域内共同研究

・ 新しいハニカム構造超伝導体の発見

重元素 Pt を含み局所的に空間反転対称性が破れたハニカム構造をもつ新規超伝導体 BaPtAs と BaPtSb を発見した。超伝導転移温度は、それぞれ 2.8 K および 1.5 K であった。御領らは理論的にカイラル d 波超伝導などのエキゾチック電子対形成指摘した。(2017)



BaPtAs の結晶構造

・ AuTe₂における構造相転移抑制と強結合超伝導

重元素 Au と Te からなる層状化合物 AuTe₂ に Pd をドーピングすると Te₂ 二量体形成を伴う構造相転移が抑制され、T_c = 4.6 K の強結合超伝導が発現することを明らかにした。(Phys. Rev. **B 93**, 140505(R) (2016).)

D01 (計画・鬼丸) C01 (計画・楠瀬) 領域内共同研究

・ プラセオジウム化合物における特異な四極子状態の解明

プラセオジウムがダイヤモンド構造を形成する立方晶系 PrT₂X₂₀ (T = Ir, Rh, X = Zn; T = Ti, V, Z = Al) における物質横断的な研究から、プラセオジウムの非クラマース二重項基底状態に起因した活性な四極子が、四極子秩序、四極子揺らぎに媒介された超伝導、四極子揺らぎによる非フェルミ液体を産み出すことを示し、四極子近藤格子系が、エキゾチックな重い電子状態の舞台となることを立証した。この成果は Invited Review Paper としてまとめられた。(J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 082002 (2016).)

D01 (公募・岡本)

・ CsW₂O₆における3中心2電子結合形成による非磁性絶縁体転移

β-パイロクロア酸化物 CsW₂O₆ が 210 K において W₃ 三量体を形成し、非磁性絶縁体状態へ相転移することを明らかにした。W における強いスピン軌道結合に起因して化学結合の指向性を失った 5d 軌道が特異な 3 中心 2 電子結合を形成したものと考えられる。(2017:投稿準備中)

5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

<発表論文>

研究項目 A01 局在多極子と伝導電子の相関効果

A01(計画・中辻 知) 計 29 件、(査読有 29 件、査読無 0 件)

- ◎▲ “Large anomalous Nernst effect at room temperature in a chiral antiferromagnet”, M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and *S. Nakatsuji, Nat. Phys., 査読有, in press (2017).
- ▲ “Thermal stability and irreversibility of skyrmion-lattice phases in Cu_2OSeO_3 ”, K. Makino, *J. D. Reim, D. Higashi, D. Okuyama, T. J. Sato, Y. Nambu, E. P. Gilbert, N. Booth, S. Seki, and Y. Tokura, Phys. Rev. B, 査読有, 95134412-1-10 (2017).
- ◎▲ “Cluster multipole theory for anomalous Hall effect in antiferromagnets”, *M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, Phys. Rev. B, 査読有, 95, 094406-1-6 (2017).
- ▲ “Superconductivity on a quasiperiodic lattice: Extended-to-localized crossover of Cooper pairs”, S. Sakai, N. Takemori, A. Koga and R. Arita, Phys. Rev. B, 査読有, 95, 024509-1-5 (2017).
- ▲ “Thermal Hall Effect in a Phonon-Glass $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ ”, *K. Sugii, M. Shimozawa, D. Watanabe, Y. Suzuki, M. Halim, M. Kimata, Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, and M. Yamashita, Phys. Rev. Lett., 査読有, 118, 145902-1-5 (2017).
- ▲ “Disordered Route to the Coulomb Quantum Spin Liquid: Random Transverse Fields on Spin Ice in $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ”, *J.-J. Wen, S. M. Koohpayeh, K.A. Ross, B.A. Trump, T.M. McQueen, K. Kimura, S. Nakatsuji, Y. Qiu, D.M. Pajerowski, J.R.D. Copley and C.L. Broholm, Phys. Rev. Lett., 査読有, 118, 107206-1-5 (2017).
- ▲ “Orthogonal magnetization and symmetry breaking in pyrochlore iridate $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ ”, *Tian Liang, Timothy H. Hsieh, Jun J. Ishikawa, Satoru Nakatsuji, Liang Fu & N. P. Ong, Nat. Phys., 査読有, 13, 599-603, (2017).
- ◎▲ “Slater to Mott Crossover in the Metal to Insulator Transition of $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ ”, *M. Nakayama, *Takeshi Kondo, Z. Tian, J. J. Ishikawa, M. Halim, C. Bareille, W. Malaeb, K. Kuroda, T. Tomita, S. Ideta, K. Tanaka, M. Matsunami, S. Kimura, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, L. Balents, S. Nakatsuji, and S. Shin, Phys. Rev. Lett., 査読有, 117, 056403-1-6 (2016).
- ▲ “Giant Anomalous Hall Effect in the Chiral Antiferromagnet Mn_3Ge ”, Naoki Kiyohara, Takahiro Tomita, and *Satoru Nakatsuji, Phys. Rev. Applied, 査読有, 5, 064009-1-10 (2016).
- ▲ “Incommensurate Magnetic Structure in the Cubic Noncentrosymmetric Ternary Compound $\text{Pr}_5\text{Ru}_3\text{Al}_2$ ”, *Koya Makino, Daisuke Okuyama, Maxim Avdeev, and Taku J. Sato, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 85, 073705-1-5 (2016).
- ▲ “Thermodynamic study of gap structure and pair-breaking effect by magnetic field in the heavy-fermion superconductor CeCu_2Si_2 ”, *Shunichiro Kittaka, Yuya Aoki, Yasuyuki Shimura, Toshiro Sakakibara, Silvia Seiro, Christoph Geibel, Frank Steglich, Yasumasa Tsutsumi, Hiroaki Ikeda, and Kazushige Machida, Phys. Rev. B, 査読有, 94, 054514-1-9 (2016).
- ▲ “Angle-resolved heat capacity of heavy fermion superconductors”, *Toshiro Sakakibara, Shunichiro Kittaka and Kazushige Machida, Rep. Prog. Phys., 査読有, 79, 094002-1-19 (2016).

A01 (公募・大槻純也) 計 1 件、(査読有 1 件、査読無 0 件)

- ◎▲ “Distributed Hybridization Model for Quantum Critical Behavior in Magnetic Quasicrystals”, Junya Otsuki and Hiroaki Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 85, 073712-1-4 (2016).

A01 (公募・古賀昌久) 計 5 件、(査読有 5 件、査読無 0 件)

- ▲ “Spontaneously symmetry breaking states in the attractive $\text{SU}(N)$ Hubbard model”, *Akihisa Koga and Hiromasa Yanatori, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 86, 034702-1-7 (2017).

A01 (公募・出口和彦) 計 1 件、(査読有 1 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Observation of Systematic Variation in Yb Ion Valence as a Function of Interatomic Spacing in Icosahedral Approximant Crystals”, *Minami Hayashi, Kazuhiko Deguchi, Shuya Matsukawa, Keiichiro Imura, and Noriaki K. Sato, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 043702-1-4 (2017).

A01 (公募・関山 明) 計 3 件、(査読有 3 件、査読無 0 件)

1. ◎▲ “Linear dichroism in 3d core-level and 4f valence-band photoemission spectra of strongly correlated rare-earth compounds”, *Y. Kanai, T. Mori, S. Naimen, K. Yamagami, S. Kitayama, H. Fujiwara, A. Higashiya, T. Kadono, S. Imada, T. Kiss, A. Tanaka, T. Muro, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, F. Iga, T. Ebihara, F. Honda, Y. Ōnuki, and A. Sekiyama, J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom., 査読有, in press, (2017).

A01 (公募・渡辺真仁) 計 2 件、(査読有 2 件、査読無 0 件)

1. ▲ “New quantum criticality revealed under pressure”, *S. Watanabe and K. Miyake, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, **56**, 05FA01-1-7 (2017).

A01 (公募・坂井徹) 計 1 件、(査読有 1 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Gapless Quantum Spin Liquid of the Kagome-Lattice Antiferromagnet”, *T. Sakai and H. Nakano, POLYHEDRON, 査読有, **126**, 42-44 (2017).

研究項目 B01 遍歴多極子による新奇量子伝導相

B01 (計画・青木大) 計 36 件、(査読有 36 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Absence of Pauli-Paramagnetic Limit in Superconducting U_6Co ”, M. Manago, K. Ishida, and D. Aoki, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, in press (2017)
2. ◎▲ “Quasilinear quantum magnetoresistance in pressure-induced nonsymmorphic superconductor CrAs”, *Q. Niu, W. C. Yu, K. Y. Yip, Z. L. Lim, H. Kotegawa, E. Matsuoka, H. Sugawara, H. Tou, Y. Yanase, Swee K. Goh, Nat. Commun., 査読有, in press, (2017).
3. ◎▲ “Anisotropic B-T Phase Diagram of Non-Kramers System $PrRh_2Zn_{20}$ ”, *Taichi Yoshida, Yo Machida, *Koichi Izawa, Yuki Shimada, Naohiro Nagasawa, Takahiro Onimaru, Toshiro Takabatake, Adrien Gourgout, Alexandre Pourret, Georg Knebel, and Jean-Pascal Brison, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 044711-1-10 (2017).
4. ▲ “Effect of Pressure on Magnetism of $UIrGe$ ”, *Jiří Pospíšil, Jun Gouchi, Yoshinori Haga, Fuminori Honda, Yoshiya Uwatoko, Naoyuki Tateiwa, Shinsaku Kambe, Shoko Nagasaki, Yoshiya Homma, and Etsuji Yamamoto, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 044709-1-6 (2017).
5. “Pairing mechanism in the ferromagnetic superconductor $UCoGe$ ”, Beilun Wu, Gaël Bastien, Mathieu Taupin, Carley Paulsen, Ludovic Howald, Dai Aoki & Jean-Pascal Brison, Nat. Commun., 査読有, **8**, 14480-1-9 (2017).
6. ◎▲ “Field-induced spin-density wave beyond hidden order in URu_2Si_2 ”, *W. Knafo, F. Duc, F. Bourdarot, K. Kuwahara, H. Nojiri, D. Aoki, J. Billette, P. Frings, X. Tonon, E. Lelievre-Berna, J. Flouquet, L. P. Regnault, Nat. Commun., 査読有, **7**, 13075-1-7 (2016).
7. ▲ “No Detectable Change in In-Plane ^{29}Si Knight Shift in the Superconducting State of URu_2Si_2 ”, *Taisuke Hattori, Hironori Sakai, Yo Tokunaga, Shinsaku Kambe, Tatsuma D. Matsuda, Yoshinori Haga, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 073711-1-4 (2016).
8. ▲ “Nonsymmorphic Weyl superconductivity in UPt_3 based on E_{2u} representation”, *Youichi Yanase, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 174502-1-6 (2016).
9. ▲ “Large Upper Critical Field of Superconductivity in the Single Crystal U_6Co ”, *Dai Aoki, Ai Nakamura, Fuminori Honda, DeXin Li, and Yoshiya Homma, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 073713-1-4 (2016).
10. ◎▲ “Omnidirectional Measurements of Angle-Resolved Heat Capacity for Complete Detection of Superconducting Gap Structure in the Heavy-Fermion Antiferromagnet UPd_2Al_3 ”, *Yusei Shimizu, Shunichiro Kittaka, Toshiro Sakakibara, Yasumasa Tsutsumi, Takuya Nomoto, Hiroaki Ikeda, Kazushige Machida, Yoshiya Homma, and Dai Aoki, Phys. Rev. Lett., 査読有, **117**, 037001-1-5 (2016).
11. ▲ “Interplay between Quantum Fluctuations and Reentrant Superconductivity with a Highly Enhanced Upper Critical Field in $URhGe$ ”, *Y. Tokunaga, D. Aoki, H. Mayaffre, S. Krämer, M.-H. Julien, C. Berthier, M. Horvatić, H. Sakai, T. Hattori, S. Kambe and S. Araki, Phys. Rev. B, 査読有, **93**, 201112(R)-1-5 (2016).
12. ▲ “Lifshitz Transitions in the Ferromagnetic Superconductor $UCoGe$ ”, *Gaël Bastien, Adrien Gourgout, Dai Aoki, Alexandre Pourret, Ilya Sheikin, Gabriel Seyfarth, Jacques Flouquet, and Georg Knebel, Phys. Rev. Lett., 査読有, **117**, 206401-1-5 (2016).

B01 (公募・野尻浩之) 計 1 件、(査読有 1 件、査読無 0 件)

1. ◎▲ “Field-induced spin-density wave beyond hidden order in URu₂Si₂”, *W. Knafo, F. Duc, F. Bourdarot, K. Kuwahara, H. Nojiri, D. Aoki, J. Billette, P. Frings, X. Tonon, E. Lelievre-Berna, J. Flouquet, L. P. Regnault, Nat. Commun., 査読有, 7, 13075-1-7 (2016).

B01 (公募・大貫惇睦) 計 9 件、(査読有 9 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Divalent, trivalent, and heavy fermion states in Eu compounds”, *Y. Ōnuki, A. Nakamura, F. Honda, D. Aoki, T. Tekeuchi, M. Nakashima, Y. Amako, H. Harima, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, S. Kayama, T. Kagayama, K. Shimizu, S. Esakki Muthu, D. Braithwaite, B. Salce, H. Shiba, T. Yara, Y. Ashitomi, H. Akamine, K. Tomori, M. Hedo & T. Nakama, Philos. Mag., 査読有, in press, 14 pages (2017).

B01 (公募・服部一匡) 計 2 件、(査読有 2 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Classification of “multipole” superconductivity in multiorbital systems and its implications”, *T. Nomoto, K. Hattori, and H. Ikeda, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 174513-1-16 (2016).

B01 (公募・池田浩章) 計 4 件、(査読有 4 件、査読無 0 件)

1. ◎▲ “Nodal gap structure of the heavy-fermion superconductor URu₂Si₂ revealed by field-angle-dependent specific-heat measurements”, *Shunichiro Kittaka, Yusei Shimizu, *Toshiro Sakakibara, Yoshinori Haga, Etsuji Yamamoto, Yoshichika Ōnuki, Yasumasa Tsutsumi, Takuya Nomoto, Hiroaki Ikeda and Kazushige Machida, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **807**, 052001-1-6 (2017).

研究項目 C01 拡張多極子による動的応答

C01 (計画・網塚 浩) 計 20 件、(査読有 20 件、査読無 0 件)

1. ◎▲ “Quasilinear quantum magnetoresistance in pressure-induced nonsymmorphic superconductor CrAs”, *Q. Niu, W. C. Yu, K. Y. Yip, Z. L. Lim, H. Kotegawa, E. Matsuoka, H. Sugawara, H. Tou, Y. Yanase, Swee K. Goh, Nat. commun., 査読有, in press, (2017).
2. ▲ “Antisymmetric Spin–Orbit Coupling Effect on Kondo-Induced Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot”, *M. Koga, M. Matsumoto, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 054703-1-10 (2017).
3. ◎▲ “⁹Be-NMR studies on anomalous superconducting phase diagram in UBe₁₃”, *H. Matsuno, K. Morita, H. Kotegawa, H. Tou, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Ōnuki, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **807**, 052015-1-6 (2017).
4. ▲ “Growth and NMR evaluation of a single crystal CePd₂Ga”, *Yasuki Kishimoto, Hisashi Kotegawa, Eiichi Matsuoka, Hitoshi Sugawara, and *Hideki Tou, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **807**, 012005-1-5 (2017).
5. ▲ “Peculiar Magnetism of UAu₂Si₂”, *Chihiro Tabata, Naoyuki, Miura, Klára Uhlířová, Michal Vališka, Hiraku Saito, Hiroyuki Hidaka, Tatsuya Yanagisawa, Vladimír Sechovský, and *Hiroshi Amitsuka, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 214414-1-12 (2016).
6. ◎▲ “S = 1/2 Triangular-lattice antiferromagnets Ba₃CoSb₂O₉ and CsCuCl₃ — Role of Spin-orbit coupling, crystalline electric field effect and Dzyaloshinsky-Moriya interaction —”, *A. Sera, Y. Kousaka, J. Akimitsu, M. Sera, T. Kawamata, Y. Koike, and K. Inoue, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 214408-1-14 (2016).
7. ▲ “Mass-Imbalanced Superconductivity in Effective Two-Channel Kondo Lattice”, *H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読, **85**, 113701-1-5 (2016).
8. ▲ “Cooperon condensation and intravalley pairing states in honeycomb Dirac systems”, *Shunji Tsuchiya, Jun Goryo, Emiko Arahata, and Manfred Sgrist, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 104508-1-12 (2016).
9. ▲ “Study of Localized Character of 4f Electrons and Ultrasonic Dispersions in SmOs₄Sb₁₂ by High-Pressure High-Frequency Ultrasonic Measurements”, *S. Mombetsu, T. Murazumi, H. Hidaka, *T. Yanagisawa, H. Amitsuka, P.-C. Ho, and M. B. Maple, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 084152-1-7 (2016).
10. ◎▲ “Emergent spin-valley-orbital physics by spontaneous parity breaking”, *Satoru Hayami, Hiroaki Kusunose and Yukitoshi Motome, J. Phys.: Condens. Matter, 査読有, **28**, 395601-1-21 (2016).
11. ◎▲ “Exotic Quadrupolar Phenomena in Non-Kramers Doublet Systems – A Case of PrT₂Zn₂₀ (T = Ir, Rh) and PrT₂Al₂₀ (T = V, Ti)–”, *Takahiro Onimaru, and *Hiroaki Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 082002-1-22 (2016).
12. ◎▲ “Asymmetric Magnon Excitation by Spontaneous Toroidal Ordering”, *Satoru Hayami, Hiroaki Kusunose, and Yukitoshi Motome, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 053705-1-5 (2016).

C01 (公募・大串研也) 計 1 件、(査読有 1 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Post-perovskite Transition in Anti-structure”, *Bosen Wang & *Kenya Ohgushi, Sci. Rep., 査読有, **6**, 37896-1-7 (2016).

C01 (公募・古賀幹人) 計 3 件、(査読有 3 件、査読無 0 件)

1. ▲ “SU(2)-SU(4) Kondo Crossover and Emergent Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot”, *Mikito Koga, Masashige Matsumoto, and Hiroaki Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 063702-1-5 (2016).

C01 (公募・高島敏郎) 計 9 件、(査読有 14 件、査読無 0 件)

1. ◎▲ “Anisotropic B–T Phase Diagram of Non-Kramers System PrRh₂Zn₂₀”, *Taichi Yoshida, Yo Machida, *Koichi Izawa, Yuki Shimada, Naohiro Nagasawa, Takahiro Onimaru, Toshiro Takabatake, Adrien Gourgout, Alexandre Pourret, Georg Knebel, and Jean-Pascal Brison, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 044711-1-10 (2017).

研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

D01 (計画・野原 実) 計 30 件、(査読有 10 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Strong-Coupling Superconductivity in BaPd₂As₂ Induced by Soft Phonons in the ThCr₂Si₂-Type Polymorph”, *K. Kudo, Y. Yamada, T. Takeuchi, T. Kimura, S. Ioka, G. Matsuo, Y. Kitahama, *M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 86063704-1-4 (2017).
2. ◎▲ “Anisotropic B–T Phase Diagram of Non-Kramers System PrRh₂Zn₂₀”, *Taichi Yoshida, Yo Machida, *Koichi Izawa, Yuki Shimada, Naohiro Nagasawa, Takahiro Onimaru, Toshiro Takabatake, Adrien Gourgout, Alexandre Pourret, Georg Knebel, and Jean-Pascal Brison, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 044711-1-10 (2017).
3. ▲ “Discovery of BiS₂-Based Superconductor and Material Design Concept”, *Yoshikazu Mizuguchi, Condens. Matter, 査読有, 2, 6-1-10 (2017).
4. ◎▲ “Drastic change of the Fermi surface across the metamagnetic transition in CeRh₂Si₂”, K. Götze, D. Aoki, F. Lévy-Bertrand, H. Harima, and *I. Sheikin, Phys. Rev. B, 査読有, **95**, 161107(R)-1-5 (2017).
5. ▲ “Enhanced Superconductivity in Close Proximity to the Structural Phase Transition of Sr_{1-x}Ba_xNi₂P₂”, *Kazutaka Kudo, Yutaka Kitahama, Keita Iba, Masaya Takasuga, and *Minoru Nohara, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 035001-1-2 (2017).
6. ▲ “Evolution of Eu valence and superconductivity in layered Eu_{0.5}La_{0.5}FBiS_{2-x}Se_x system”, *Y. Mizuguchi, E. Paris, T. Wakita, G. Jinno, A. Puri, K. Terashima, B. Joseph, O. Miura, T. Yokoyama, and N. L. Saini, Phys. Rev. B, 査読有, **95**, 064515-1-6 (2017).
7. ◎▲ “Specific Heat and Electrical Transport Properties of Sn_{0.8}Ag_{0.2}Te Superconductor”, *Yoshikazu Mizuguchi, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Osuke Miura, Masanori Nagao, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 103701-1-4 (2016).
8. ◎▲ “Exotic Quadrupolar Phenomena in Non-Kramers Doublet Systems – A Case of PrT₂Zn₂₀ (T = Ir, Rh) and PrT₂Al₂₀ (T = V, Ti)–”, *Takahiro Onimaru, and *Hiroaki Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 082002-1-22 (2016).
9. ◎▲ “Large Cyclotron Mass and Large Ordered Moment in Ferromagnet CoS₂ Compared with Paramagnet CoSe₂”, *Atsushi Teruya, Fuminori Suzuki, Dai Aoki, Fuminori Honda, Ai Nakamura, Miho Nakashima, Yasushi Amako, Hisatomo Harima, Masato Hedo, *Takao Nakama, and Yoshichika Ōnuki, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 064716-1-10 (2016).
10. ◎▲ “Quadrupole-Driven Non-Fermi Liquid and Magnetic-Field Induced Heavy Fermion States in a Non-Kramers Doublet System”, *T. Onimaru, K. Izawa, K. T. Matsumoto, T. Yoshida, Y. Machida, T. Ikeura, K. Wakiya, K. Umeo, S. Kittaka, K. Araki, T. Sakakibara, T. Takabatake, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 075134-1-8 (2016).
11. ▲ “Superconductivity in Carbide Compounds”, Takahiro Muranaka and *Jun Akimitsu, Chem. Sci. J., 査読有, **7**, 135-1-10 (2016).
12. ◎▲ “Bulk Superconductivity Induced by In-Plane Chemical Pressure Effect in Eu_{0.5}La_{0.5}FBiS_{2-x}Se_x”, *Gen Jinno, Rajveer Jha, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Masanori Nagao, Osuke Miura, and Yoshikazu Mizuguchi, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 124708-1-6 (2016).

D01 (公募・Kosmas Prassides) 計 3 件、(査読有 3 件、査読無 0 件)

1. ◎▲ “π-electron S = 1/2 quantum-spin-liquid state in an ionic polyaromatic hydrocarbon”, *Yasuhiro Takabayashi, Melita Menčlaou, Hiroyuki Tamura, Nayuta Takemori, Takashi Koretsune, Aleš Štefančič, Gyöngyi Klupp, A. Johan C. Buurma, Yusuke Nomura, Ryotaro Arita, Denis Arčon, Matthew J. Rosseinsky, and *Kosmas Prassides, Nat. Chem., 査読有, **9**, in press (online publication) (2017).

D01 (公募・岡本佳比古) 計 1 件、(査読有 1 件、査読無 0 件)

1. ▲ “Synthesis and Superconducting Properties of a Hexagonal Phosphide ScRhP”, *T. Inohara, Y. Okamoto, Y. Yamakawa, and K. Takenaka, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 094706-1-5 (2016).

<国際学会発表>

1. “Strategy for new superconductors”, M. Nohara, Lorentz Center Workshop “Common Threads in the Electronic Phase Diagram of Unconventional Superconductors”, Feb. 27-Mar. 3. 2017, Leiden, The Netherlands (招待講演)
2. “NMR Studies on Heavy-Fermion Compounds near Quantum Critical Point”, K. Ishida, Progress and New Directions on 4f Electron Material, December 9, 2016, Houston, USA (招待講演)
3. “The origin of the parity-violation splitting in Fermi surfaces”, H. Harima, Fermi-Surface Topology and Emergence of Novel Electronic States in Strongly Correlated Systems, July 19, 2016, Natal, Brazil (招待講演)
4. “Fermi surface instabilities and quantum critical phenomena in uranium ferromagnetic superconductors”, D. Aoki, IWDN2016, June 6-11, 2016, Idaho, USA (招待講演)
5. “Large anomalous Hall effect in chiral antiferromagnets at room temperature”, S. Nakatsuji, International Conference on Strongly Correlated Electrons 2016 (SCES 2016), May 12, 2016, Hangzhou, China (招待講演)
6. “Ferromagnetic superconductivity and Fermi surface instabilities in uranium compounds”, D. Aoki, International Conference on Strongly Correlated Electrons 2016 (SCES 2016), May 12, 2016, Hangzhou, China (招待講演)
7. “A New Magnetoelectric Effect in a Toroidal Ordered State of UNi₄B”, Hiroshi Amitsuka, International Workshop on Anomalous Transport in Multipolar and Topological Materials, March 11-12, 2016, Baltimore, USA (招待講演)

<Web、マスメディア等による情報発信>

1. 「東北大など、炭化水素から特異な磁気状態「スピン液体」の発現に成功」 Kosmas Prassides、日本経済新聞(2017.4.25日)
2. 「～電子の対を自在に制御～ 磁場と相性の良い超伝導のメカニズムを解明」 青木大、科学新聞(2017.3.10)
3. 「東大など、量子スピン液体を実現するための新たな道筋を提示」 中辻知、マイナビニュース(2017.3.6)
4. 「ウラン化合物の強磁場スピン密度波相を発見-30年来の謎に強磁場中性子回折が回答をもたらす-」 青木大、科学新聞(2016.11.18)
5. 「革新的磁気メモリ材料の発見～世界で初めて反強磁性体での異常ホール効果を観測～」 中辻知、日経産業新聞(2016.10.29)

<アウトリーチ活動>

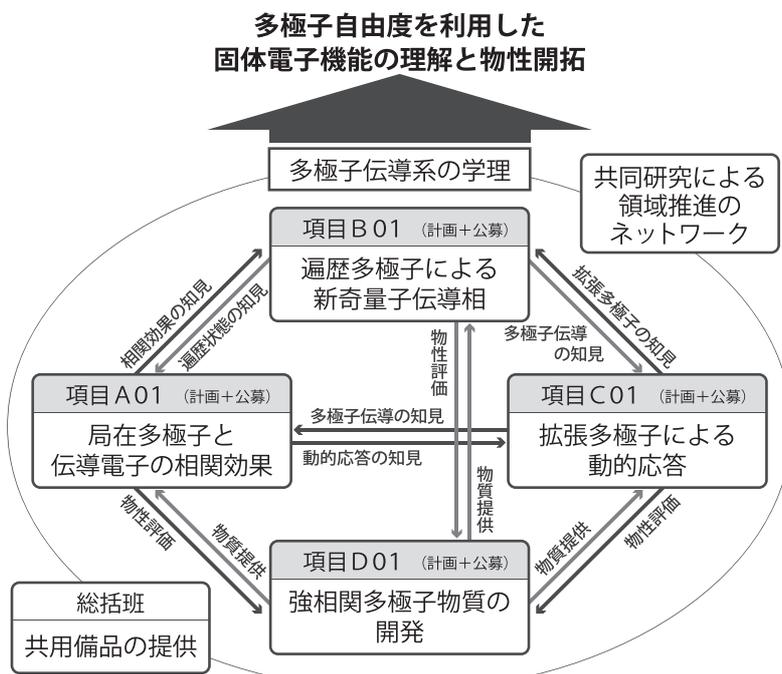
1. 高校出張授業「姿を変える物質 ～ 相転移は世の中に溢れている～」 井澤公一、吉祥女子高等学校(東京都武蔵野)(2016.12.3)
2. 高校出張講義「磁性と超伝導の物質科学」 坂井徹、兵庫県立大学付属高校(兵庫県赤穂郡上郡町)(2016.11.22)
3. 高校出張授業「絶対零度の世界 — J-Physics」 網塚 浩、札幌東高等学校(北海道札幌市)(2016.11.7)
4. 高校出張講義「右と左がある物質の磁石としての性質」 大原繁男、愛知県立豊丘高校(愛知県豊橋市)(2016.10.26)
5. オープンキャンパス「超伝導デモ実験」 池田浩章、立命館大学BKCキャンパス(滋賀県草津市)(2016.8.7)
6. 公開講座「室温超電導への挑戦」 野原 実、岡山大学(岡山県岡山市)(2016.6.18)

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

領域内研究項目

領域推進にあたり、多極子の空間的な大きさや基本的性質に分類した研究項目を設定し、強い協力関係を持って、焦点を絞った個別の問題解決にあたるのが効果的である。ここでは、従来の多極子研究の延長に位置する項目 A01（局在多極子と伝導電子の相関効果）、多彩な伝導現象を産み出している 5f 電子系を多極子伝導系として捉える研究を中心とした項目 B01（遍歴多極子による新奇量子伝導相）、特徴的な構造由来の拡張された多極子の動的な応答を開発する項目 C01（拡張多極子による動的応答）である。また、多極子の概念に普遍性を持たせるには多種多様な物質の発見が欠かせないので、ジグザグ構造やスピン軌道相互作用の強い系に特化した物質を開発する項目 D01（強相関多極子物質の開発）も設けている。



研究項目間の連携と領域として目指すもの

連携研究の準備状況

研究項目・計画研究間の有機的な連携を図るために、各研究項目に配置する計画研究は1つとして、さらに実験と理論がかみ合っって新概念が熟成されるように、各計画研究に理論研究者を配置している。平成28年度開始の公募研究では、計18件を目安として公募し、13件の実験的研究と10件の理論的研究が採択された。物質開発に重点を置くという領域戦略の結果、実験13件の内9件が物質開発を中心とした研究である。

公募研究が開始した平成28年5月に領域会議を開催して、トピカルセッションと公募研究の紹介を行い、共通の問題点などを議論して研究連携の素地を作った。さらに、6月には計画・公募研究の理論研究者を集めてブレインストーミング的な討論を通じて現状の整理と今後の展望を見据えた「理論検討会」を開催した。理論研究はd電子系とf電子系の境界の敷居が低く、連携研究を組みやすい。領域の連携研究は、理論研究と物質開発・物質提供を基軸として展開している。

領域発足以前から計画研究の研究者は共同研究を模索していたこともあって、主な研究成果の多くが領域内共同研究となっている。既に出版済みの謝辞有り論文数で連携研究は125件中24件となっている。さらに、連携研究を加速するために、平成29年度始めには、3つのトピカルミーティングを行なった。特に、研究項目B01とD01は合同で、「強相関多極子系の超伝導：fとdの共通項を探る」と題した研究会を開催して、相互理解と連携強化に努めた。

実際の連携研究課題

領域内の連携状況としては、50近い共同研究のテーマが上がっている（ただし重複を含む）。その多くは物質提供と理論研究者間の共同研究である。主な連携研究テーマを示す。

○試料提供による連携研究

- ・多極子近藤系における圧力下ゼーベック効果の解明 (B01 計画・井澤+A01 計画・中辻)
- ・共同研究 (PrIr₂Zn₂₀ の内殻光電子線二色性) (A01 公募・関山+D01 計画・鬼丸)
- ・SmCu₂Si₂, Yb₁₋₂₋₂₀ 系試料の内殻光電子線二色性 (A01 公募・関山+B01 公募・大貫)
- ・Au-Al-Yb 準結晶における中間価数状態の Yb のメスバウアー分光 (A01 公募・出口+A01 計画・小林)
- ・中性子散乱による Au-Al-Yb 準結晶の磁気励起スペクトルの観測 (A01 公募・出口+A01 計画・佐藤)
- ・Au-Al-Yb 準結晶の量子臨界現象に関する NMR・uSR 実験 (A01 公募・出口+B01 計画・石田)
- ・反強磁性超伝導体六方晶 UPd₂Al₃ や (U, Th)Be₁₃ などの超伝導ギャップの対称性 (A01 計画・榊原+B01 計画・青木/井澤)
- ・EuPtSi の極低温の磁化測定による磁場誘起相の研究 (A01 計画・榊原+B01 公募・大貫)
- ・SmTa₂Al₂₀ および SmPt₂Cd₂ の低温秩序相と四重極モーメント (A01 計画・中西+B01 計画・松田)
- ・EuX₄ (X: Ga, Al) における電子-格子相互作用の増強 (A01 計画・中西+B01 公募・大貫)
- ・鉄系超伝導体 SrFe₂(As_{1-x}P_x)₂ の構造相転移と超伝導転移 (A01 計画・中西+D01 公募・宮坂)
- ・UPd₂Al₃, UBe₁₃, UCoGe の極低温磁化と比熱測定 (B01 計画・青木+A01 計画・榊原)
- ・UPd₂Al₃, UBe₁₃, UCoGe の NMR 測定 (B01 計画・青木+C01 計画・藤)
- ・URu₂Si₂ の X 線構造解析 (B01 計画・青木+C01 計画・網塚)
- ・URu₂Si₂ の高磁場 SDW 相の研究 (B01 計画・青木+B01 公募・野尻)
- ・立方晶系 PrT₂X₂₀ の単結晶育成と低温物性測定 (D01 計画・鬼丸+B01 計画・井澤)

○実験的研究と理論的研究の連携研究 (実験+理論)

- ・多極子近藤系における多極子の多重秩序の解明 (A01 計画・中辻+B01 公募・服部)
- ・準結晶の量子臨界現象/磁性/電子状態/超伝導現象への理論的アプローチ (A01 公募・出口+A01 公募・渡辺/A01 公募・古賀/A01 計画・有田/C01 計画・楠瀬)
- ・反転対称性のない物質のフェルミ面の研究 (B01 計画・青木/B01 公募・大貫+D01 計画・播磨)
- ・Pr₁₋₂₋₂₀ 系における四極子および磁気近藤効果の競合現象の起源 (D01 計画・鬼丸+C01 計画・楠瀬)
- ・ハニカム構造磁性体 Co₄Nb₂O₉ にの磁場方位回転による電気分極の回転と制御-拡張奇パリティ多極子による理論的基礎付け (D01 公募連携・有馬+C01 計画・楠瀬/C01 計画 PD・柳)
- ・d 電子による強制的奇パリティ磁気多極子秩序の非対角応答の理論とその検証 (C01 公募・大串+B01 計画・柳瀬/B01 計画 M2/渡邊) 非線形光学伝導度測定
- ・ハニカム構造の新超伝導体 BaPtAs と BaPtSb とカイラル d 波超伝導 (D01 計画・野原+C01 計画・御領)
- ・金属・非金属転移する CsW₂O₆ の電子状態 (D01 公募・岡本+D01 計画・播磨)

○理論的研究者同士の連携研究

- ・第一原理電子状態計算に基づく多体量子論の新しい解法 (A01 公募・大槻+C01 公募・品岡)

今後の連携研究への展望

トピカルミーティングでは、d 電子系や f 電子系の物質にかかわらず「拡張多極子」「クラスター多極子」「奇パリティ多極子」と言った本領域特有のキーワードで物理現象が整理されることが多く、今後も連携研究がより一層進むと考えられる。

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

若手育成について以下の様な取組みを行っている。

・ ものづくり学校「戦略的物質開発入門」（平成28年1月）の開催

将来の物質開発の担い手を育成する目的で、ものづくり学校「戦略的物質開発入門」を2日間開催した。大学院生を中心に領域の内外から85名の参加があり、その内38名の旅費を援助した。

・ 若手研究者（ポスドク）の雇用と育成

領域全体で7名（平成29年度開始が1名）の若手研究者を雇用している。雇用形態は機関によって異なるが、原則的として公募による採用である。2名の外国人を雇用したが、1名は既に成果をあげて帰国した。研究会やニュースレターで雇用している研究者の研究内容などの紹介を行っている。

・ J-Physics 若手夏の学校（平成28年8月）の開催

若手夏の学校では、若手研究者による講義と著名研究者のトピックス講演を行い、研究交流とともに世代交流も図った。さらに、アイオワ州立大の古川裕次氏による英語による特別講義を行い国際交流も図った。学生41名を含む82名が参加し、その内31名の旅費を援助した。熱心な学生2名を表彰して、参加者全員には修了証を授与した。期間中に、海外派遣を希望する学生がおり、10月から実際に派遣され、その後も共同研究を継続している。用意したテキストは、その後増補改訂し印刷と電子出版を行い、他の若手研究者の学習に役立てている。

・ 領域全体会議において若手ポスター賞の選考と表彰

領域会議（平成28年5月：北大）のポスターセッションでは若手29名を対象にポスター賞の選考を行い、5名を表彰した。さらに、この5名の研究内容をニュースレターに掲載した。若手ポスター賞については、今後の国際シンポジウムなど領域主催の研究集会では引き続き取り組んでいく。

・ 国際活動支援班による若手の海外派遣や招へい制度など

これまで7名の派遣と2名の招へいを行った。多くの若手研究者がこれを機会に成長している。アメリカに派遣した東大の学生とチェコに派遣した北大の学生は、引き続き別経費で共同研究を継続している。ドイツに派遣した2名の学生は実験を引き継いで行うことで難しい実験を完了した。（この成果は最近 Phys. Rev Lett. 誌への掲載が決定した）派遣研究者は、派遣前に原則的に英語によるセミナー面接を課し、帰国後は報告書の提出を義務づけている。ほとんどが滞在先で英語でセミナーを行うなど、充実した滞在を終えている。この他、海外のサマースクールなどへ派遣を行っている。

・ 物性科学領域横断研究会への積極的な参加

平成28年12月に神戸大で開催された物性科学領域横断研究会（7つの新学術領域が参加）への参加を呼びかけた。研究会には163名が参加し、若手参加者が多い活発な研究会であったと評判であった。6件のポスター賞のうち2件が我々の新学術領域から参加した学生であった。

・ 国際シンポジウムなどへの運営参加

平成30年度以降の国際サマースクールなどの会合では、海外派遣を経験した若手研究者を中心に会議運営にも参加してもらい、国際感覚をさらに身に付けてもらう。

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

【総括班で購入した共用機器】は以下の3つであり、ホームページとニュースレターを用いて共用機器の紹介を行い、共同研究と共用機器の利用を促進している。

- ・16/18 テスラマグネット（総括班・中辻、東大物性研）

同時に導入したヘリウム3冷凍機とともに順調に稼働し、たとえば、多極子近藤系である $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の磁場誘起量子臨界点における磁歪異常の解明に成功した。さらに、共同利用を受け付けており、その使用計画も WEB にて公開して運用している。

- ・低温物性測定装置（総括班・青木、東北大）

無冷媒型で装置の効率的な運用ができています。共同利用施設の利点と標準化された測定システムにより、90%以上の高い稼働率である。計画・公募研究を初め、領域外からの利用に使用されている。

- ・角度分解機能付希釈冷凍機システム（総括班・藤、神戸大学）

導入後 11mK までの冷却を確認し、国際活動支援班と合同で研究会を開催し、近隣の研究者からの共同利用の促進に努めている。利用実績は準備も含め 23 日/月程度であり、共用機器を利用する領域外からの共同利用の実績は 6 件（学内 4 件、琉球大、島根大）あり、順調に稼働している。より広範囲な実験に利用できるように発熱を抑える工夫を行っている。

【計画研究で購入した設備】の主なものは以下の通りであり、それぞれ有効に利用されている。

- ・希釈冷凍機システム（D01 計画・鬼丸、広島大学）

四極子希薄近藤効果が発現している Pr 系の物質横断的研究を加速するため H28 年度に広島大学に専用冷凍機を導入した。現在までに整備が完了し希薄四極子系の実験を開始している。岡山大学と共用し、岡山大で開発中の $j = 3/2$ 化合物の実験にも用いるが、ヘリウム供給単価がより安価な広島大学に設置することで、運転経費の削減を図っている。

- ・レーザー加熱浮遊帯溶融（LFZ）炉（D01 計画・高阪、広島大学）

無機化合物の結晶構造のカイラリティを制御できる不斉合成手法を開発するために、非常に鋭い温度勾配のもとで結晶を成長させる必要があり、光の集光性が格段によいレーザー式の本設備が有効であった。本設備の導入によりカイラル磁性体(Fe,Co)Si の片手系大型単結晶の作製の成功を初めとして、効果的に結晶育成が進められている。

- ・超伝導マグネット（B01 計画・井澤、東工大）

16T の高磁場と既存の希釈冷凍機と精密輸送現象測定システムを組み合わせることにより、多極子の磁場応答を調べる世界的にもユニークな実験設備として稼働中である。

【研究費の効果的使用】について

国際共同研究を実行する際に、国際活動支援班による若手研究者の派遣と招へいと組み合わせて、共同研究を効率良く進めている。アメリカにおける YAlB_4 の中性子実験やチェコにおける UNi_4B の大型単結晶育成など、比較的長期間を必要とする実験については、予備的に国際活動支援班による若手派遣などを行い、その後、本格的な共同研究に進展している。

また、平成 30 年度には総括班で国際サマースクールの開催を計画している。これと連続して国際活動支援班による試料育成の国際シンポジウムを開催することで、海外からの招へい研究者にかかる旅費などが効果的に利用される。

9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

北岡良雄（大阪大学・データビリティフロンティア機構・特任教授）

本新学術領域研究が発足し、①局在多極子と伝導電子の相関効果、②遍歴多極子による新奇量子伝導相、③拡張多極子による動的応答、④強相関多極子物質の開発という4つの計画研究が設定されたのは、まことに今後の新学術の展開に向けて機が熟している所以でもあり、「これまでの懸案課題（在庫？）が解明、一掃されて、真に「新しい芽」が出ることを期待したい」と本領域の発足後の最初のニュースレターで記した。この2年間の研究を通じて、長年の懸案であった「異方的な超伝導」の起源は、J-自由度（多極子自由度）とバンド構造と相関効果によって統一的に理解される「この芽」が出てきた。強磁性超伝導体 UCoGe の発現機構の解明【Nature Communications 8, 14480 (2017)】および、長年の謎であった UPt₃ の超伝導ギャップ構造を第一原理計算の手法を適用して得た理論予想が、実験と整合することを見出した研究は【Phys. Rev. Lett. 117, 217002 (2016)】、この2年間の特筆すべき成果と高く評価できる。

また、多極子が関わる磁気現象は、多極子が秩序化する系から、電子が比較的自由に振る舞う系まで多様である。それぞれの系の専門の研究者が協力して創発的・共創的な研究を行うことで、多極子伝導系の学理を創出し、多彩な伝導現象を理解しようというのが、本領域の目的であろう。この観点からは、本学術領域メンバーの成果として、昨年度の物理学論文賞①【Superconductivity in Novel BiS₂-Based Layered Superconductor LaO_{1-x}F_xBiS₂ J. Phys. Soc. Jpn. 81, 114725 (2012)】では、新超伝導体 LaO_{1-x}F_xBiS₂ の発見、および②【Observation of Magnetic Monopoles in Spin Ice, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 103706 (2009)】ではスピナイス系で予言されたエキゾチックな素励起磁気モノポールの観測により、この分野にインパクトを与えた。まさにこのような研究の積み重ねとしての今後の本学術領域のさらなる発展を期待したい。

この2年間の発表論文の量的な成果指標は、①総論文数（31+33+28+22=114）、②領域内連携論文数（18+6+12+10=46）、③国際共著論文数（8+17+6+8=39）、④大学院生筆頭著者論文数（12+11+10+7=40）となっており、着実に成果を挙げていると評価できる。特に、全論文数の35%は領域内連携、国際共著、大学院生筆頭著者論文となっており、新学術領域研究としてのミッションを果たしているとは評価できるのではないかと。

最後に学生や若手研究者の創造性を育むこと、若手研究者の支援、とくに課題設定の無い自由な発想で主体的、自律的に行う基礎研究の支援すること期待されるが、この2年間で多数の院生を海外へ派遣している実績は、評価できる。

（注：論文数については、集計途中の数が記載されています）

鹿野田一司（東京大学・大学院工学系研究科・教授）

長い歴史を持つ強相関電子系の研究の流れの中で、本領域研究は、単極子（電荷）、双極子（電気分極、スピン）、そして多極子へと一般化された概念を基軸に、電子の持つ遍歴性と局在性に焦点を当て、d 電子系と f 電子系を分け隔てなく研究対象とすることで、強相関電子系の物理学に新たな領域を開拓することを目指している。本領域のこれまでの活動について、以下に評したい。

まず、研究成果については着実な進展がみられる。遍歴電子と四極子自由度との絡み合いによる新奇な電子状態の発現、群論的考察による奇パリティ磁気多極子物質群の同定と磁気圧電金属相の示唆、様々なウラン系超伝導体における非従来型の超伝導状態と特異な磁場応答の発見、超伝導の四極子揺らぎ機構の示唆などの成果が得られている。物質開発、純良結晶の育成は物質科学を底辺から支える課題であるが、多極子物質やカイラル磁性体の大型単結晶育成の成功、新奇超伝導体の発見は、波及効果のある貴重な成果と言える。また、本報告書に記されているように、全研究成果に対する領域内外の共同研究、および海外共同研究の割合が顕著であることも、新学術領域研究という組織が有効に機能していることを裏付けている。

本領域は、特に若手の育成を目標の一つに掲げている。若手目線からは、夏の学校やものづくり学校で足腰を鍛え、トピカルミーティングと領域会議で実践経験を積む”カリキュラム”となっている。領域会議におけるポスターセッションでの学生の熱気には圧倒されるものを感じた。ポスター賞を受賞し瞳を輝かせる学生や、Max Planck 研究所での共同研究を経験し遅くなって帰国した学生に触れる機会もあり、大学の枠を越えて若手がのびのびと活躍できるフォーラムが形成されていると強く感じた。

他にも、大型設備の共同利用化、海外でのトピカルミーティングの開催、アウトリーチの意義とノウハウに関するレクチャー等、領域運営全般において創意工夫がみられ、その立案に対する領域代表者のリーダーシップがうまく発揮されているように思う。今後、d 電子系と f 電子系の物理学をさらに統合的に発展させ、この新学術領域研究のプレゼンスを世界に強く発信することを期待したい。

10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

領域研究を推進していくために、いくつかの事項別に推進方策などを記載する。

【領域全体】

領域設定する初期の目標として、5年後に以下の成果を出すことを掲げている。

- (1) 強相関電子系を包括的に捉えた多極子伝導系の新たな学理を創出
- (2) 強磁性超伝導など非従来型伝導現象の多くを多極子の概念を基に解明
- (3) 奇パリティ多極子が伝導現象に支配的な系を重点的に研究・開発し、新規機能を開拓
- (4) 多極子に基づいた物質設計を通じて新しく多彩な非従来型伝導系を開発

Mn_3Sn の異常ホール効果の発見とその発現機構の理論的な解明の研究や $Ba_{1-x}K_xMn_2As_2$ の磁気十六極子秩序の新奇金属相の議論に端を発して、(3) と (4) に関しては予想以上の成果が期待できる状況にある。加えて、その強相関効果についても理論的な取組みを行っており (1) の目標に向かって順調に研究が進展している。一方で、(2) については、実験的には進展は見られるものの長年未解決な問題でもあり、多極子の概念で整理されるまで少し時間を要する。今後は、(3) (4) の成果に向けて大きく進んで行くと同時に、その強相関効果の理解を深めて、強磁性超伝導など強相関電子系を含んだ新奇な多極子伝導系の包括的な理解を目指す。

【研究項目ごと】

研究項目 A01 局在多極子と伝導電子の相関効果

トピカルミーティングでの取り上げた Pr の 1-2-20 系の系統的な研究や $YbAlB_4$ の複合環境下での微視的な実験を通じて、「多極子と伝導電子の混成効果」、「量子相転移点近傍の多極子揺らぎ」に焦点を絞り研究を進める。異常ホール効果を示す拡張多極子系の探索なども引き続き行う。

研究項目 B01 遍歴多極子による新奇量子伝導相

多極子伝導系の包括的な理解には典型的な系を見いだすことも肝要である。ウランおよび d, p 電子系が協奏した新物質開発に向けて、さらに探索を進めていく。強磁性超伝導の研究と並行してこれにつながる新物質を発見する。また、新しい切り口での物質開発として、微細加工や薄膜などの技術も組み合わせた新技術の導入を図る。

研究項目 C01 拡張多極子による動的応答

拡張多極子秩序が産み出す磁気輸送や非線形・非対角応答現象を理論的に解明し、定量的な評価を可能にする。熱による温度上昇など実験を実施する上での問題点を解決し、非対角応答現象が期待されている系の多くで、磁気構造解析と精密な電流誘起磁化の測定を行う。

研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

j フェルミオンを念頭においた物質開発を重点化する。ウラン系では、j フェルミオンが形成するフェルミ面のネスティングに起因して高次多極子が秩序化することが議論されており、p-電子系や d-電子系において同様の秩序やそれに起因する超伝導などの発見を目指す。

【領域内連携研究】

トロイダルモーメントや拡張多極子や奇パリティ多極子というキーワードで共通した議論ができる土台が形成されており、今後もトピカルミーティングなどを通じて、連携研究の強化を図る。磁気秩序した系を磁気多極子という概念で整理した場合は d 電子系と f 電子系の違いを意識しないが、実際の系では相違点もあり、その点についても有意義な議論が展開されている。また、強相関系として

の取り扱いの困難さもあるが、公募による理論研究者の共同研究を推進することで大きな展開が期待できる。また、新物質の発見と試料提供の機会を産むためにも各種研究会を有効に利用する。

【領域外との共同研究】

多極子という概念で整理されていなくても、スピン軌道結合に起因した新奇伝導現象を対象としている研究者は多く、興味ある対象物質や現象が同じである場合も少なくない。それらの研究者を研究会に招へいするなどして、共同研究を行う機会を積極的に設ける。

【国際共同研究】

国際活動支援班が行う若手研究者の派遣や招へいを基軸として、国際共同研究・試料育成・ウラン系化合物のネットワークの形成を図り、そのネットワークを利用して国際共同研究を推進する。特に、フランスのグルノーブルを中心とした共同研究として、純良単結晶育成、大型研究施設（ILL、ESRF、LNCMI）を利用した実験、一軸圧力など独自性の高い実験を推進して、強磁性超伝導などの研究を強力に推進する。

【若手育成】

ものづくりや若手の学校の活動に刺激された学生が海外派遣を希望するなど、若手育成の成果はあがっている。今後は国際サマースクールなどの開催の運営にも参加・協力してもらうなどして、強相関グローバル若手研究者の育成を行う。さらに、第2回のものづくり学校などを企画してより若い学生に関心を持たれるような活動も行う。

【問題点とその対応】

全体的に、領域としてのアウトリーチ活動が低調である。学問分野としての特徴もあるように思うので、今後もアウトリーチ講座を開催して、アウトリーチ活動を後押しする。若手のキャリアパス形成への取組みとして、企業研究者との接点の必要性を認識しているが、実際には企画されていない。今後、企業とも連携して若手の多様なキャリアパス形成を援助する。

領域としてではないが、特に年配の常勤研究者が事務的な作業の増加にともない研究時間ばかりでなく、研究会に参加する時間の確保も難しいという指摘がある。領域として根本的な解決策はないが、利用可能な遠隔地会議システムなどがあれば利用したいという声がある。

【公募研究への期待】

今後も公募研究においては物質開発と多様な測定方法の提案と理論的な取組みを期待したい。特にd電子系のフェルミ面観測に広く用いられている角度分解光電子分光実験の技術を有する研究者を補充したい。