

領域略称名：J P h y s i c s  
領域番号：2704

令和2年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「J-Physics：多極子伝導系の物理」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2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

## **研究組織**

- 1 総括班・総括班以外の計画研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
- 2 公募研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

## **研究領域全体に係る事項**

- 3 交付決定額・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
- 4 研究領域の目的及び概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
- 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況・・・・・・・・・・ 11
- 6 研究目的の達成度及び主な成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
- 7 研究発表の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
- 8 研究組織の連携体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
- 9 研究費の使用状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
- 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
- 11 若手研究者の育成に関する取組実績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
- 12 総括班評価者による評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28

**研究組織**

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	15H05882 J-Physics：多極子伝導系の物理の 研究総括	平成27年度 ～ 令和元年度	播磨 尚朝	神戸大学・理学研究科・教授	7
Y00 国	15K21732 J-Physics：多極子伝導系の物理の 国際展開	平成27年度 ～ 令和元年度	播磨 尚朝	神戸大学・理学研究科・教授	6
A01 計	15H05883 局在多極子と伝導電子の相関効果	平成27年度 ～ 令和元年度	中辻 知	東京大学・物性研究所・特任 教授	5
B01 計	15H05884 遍歴多極子による新奇量子伝導相	平成27年度 ～ 令和元年度	青木 大	東北大学・金属材料研究所・ 教授	6
C01 計	15H05885 拡張多極子による動的応答	平成27年度 ～ 令和元年度	網塚 浩	北海道大学・理学研究院・教 授	6
D01 計	15H05886 強相関多極子物質の開発	平成27年度 ～ 令和元年度	野原 実	岡山大学・異分野基礎科学 研究所・教授	5
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 6 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	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	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	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	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・理学研究科・講師	1
A01 公	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	1
A01 公	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	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	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・研究主幹	1
B01 公	16H01060 URu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> 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	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	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	1
B01 公	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	1

B01 公	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	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・ 物質科学研究センター・研 究主幹	1
C01 公	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	1
C01 公	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・理工学研究科・助 教	1
C01 公	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	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	1
C01 公	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	高畠 敏郎	広島大学・先端物質科学研 究科・教授	1
D01 公	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・材料科学高等研 究所・教授	1
D01 公	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	1
D01 公	16H01072 多軌道強相関系としてのイリジウ 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	1
D01 公	16H01075 遷移金属硫化物、砒化物の電子相 関とスピン-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	1
A01 公	18H04298 強相関有機 $\pi$ -d 電子結合系の電 荷-スピン複合物性の解明と探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	井口 敏	東北大学・金属材料研究所・ 准教授	1

A01 公	18H04305 電子面とホール面を持つ相関電子系の近藤効果と超伝導	平成 30 年度 ～ 令和元年度	星野 晋太郎	埼玉大学・理工学研究科・助教	1
A01 公	18H04312 高圧力で拓く多極子と伝導電子の混成効果による新奇物性	平成 30 年度 ～ 令和元年度	松林 和幸	電気通信大学・情報理工学研究科・准教授	1
A01 公	18H04317 内殻角度分解光電子線二色性による多極子活性局在 4 f 電子構造の温度依存性解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	関山 明	大阪大学・基礎工学研究科・教授	1
A01 公	18H04320 多極子伝導物質の高品質単結晶化と量子振動効果によるフェルミ面の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	菅原 仁	神戸大学・理学研究科・教授	1
A01 公	18H04326 価数転移由来の新規量子現象の理論研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	渡辺 真仁	九州工業大学・工学研究院・准教授	1
A01 公	18H04328 希土類化合物における軌道依存型混成による電荷秩序と重い電子	平成 30 年度 ～ 令和元年度	椎名 亮輔	琉球大学・理学部・教授	1
A01 公	18H04330 フラストレーション系の量子スピンネマティック相と新奇伝導の理論的・計算科学的研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	坂井 徹	兵庫県立大学・物質理学研究科・教授	1
A01 公	18H04331 多極子が示す局在一遍歴二重性と秩序の観測	平成 30 年度 ～ 令和元年度	水戸 毅	兵庫県立大学・物質理学研究科・教授	1
A01 公	18H04313 構造不安定性の制御による非クラマース系多極子物質の開発とその圧力効果の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	脇倉 和平	室蘭工業大学・工学研究科・助教	1
B01 公	18H04300 URu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> の強磁場磁気秩序と磁気相関－磁気相図の確定と対称性破れの検証	平成 30 年度 ～ 令和元年度	野尻 浩之	東北大学・金属材料研究所・教授	1
B01 公	18H04306 磁場角度分解比熱・エントロピー測定からアプローチする多極子伝導系の新奇量子相	平成 30 年度 ～ 令和元年度	橘高 俊一郎	東京大学・物性研究所・助教	1

B01 公	18H04308 スピン軌道相互作用による不安定性で形成される遍歴多極子秩序	平成 30 年度 ～ 令和元年度	平井 大悟郎	東京大学・物性研究所・助教	1
B01 公	18H04318 ウラン化合物における多重超伝導相の解明と多極子クーパー対の動的電磁応答	平成 30 年度 ～ 令和元年度	藤本 聡	大阪大学・基礎工学研究科・教授	1
B01 公	18H04321 非共型ジグザグ構造における特異な量子相の解明と探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	小手川 恒	神戸大学・理学研究科・准教授	1
B01 公	18H04323 Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の高圧下における奇パリティ多極子秩序とパリティゆらぎ超伝導	平成 30 年度 ～ 令和元年度	小林 達生	岡山大学・自然科学研究科・教授	1
B01 公	18H04329 立方晶化合物の特異な電子状態	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大貫 惇睦	琉球大学・理学部・客員教授	1
B01 公	18H04332 遍歴多極子と多極子超伝導体の発展	平成 30 年度 ～ 令和元年度	池田 浩章	立命館大学・理工学部・教授	1
C01 公	18H04296 局所的な軌道混成に由来するトロイダル多極子がもたらす新奇マルチフェロイクスの開拓	平成 30 年度 ～ 令和元年度	速水 賢	東京大学・工学系研究科・講師	1
C01 公	18H04297 電流と格子回転・歪みによる複合共役場を用いた拡張多極子検出の試み	平成 30 年度 ～ 令和元年度	柳澤 達也	北海道大学・理学研究院・准教授	1
C01 公	18H04301 動的平均場法に基づく多極子秩序の微視的理論	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大槻 純也	岡山大学・異分野基礎科学研究科・准教授	1
C01 公	18H04302 奇パリティ多極子秩序系におけるドメイン観察手法の開発と新奇量子伝導の開拓	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大串 研也	東北大学・理学研究科・教授	1
C01 公	18H04309 3 d 電子系における奇パリティ磁気多極子秩序に由来する電気磁気応答と量子伝導現象	平成 30 年度 ～ 令和元年度	阿部 伸行	東京大学・新領域創成科学研究科・助教	1
C01 公	18H04310 核磁気共鳴によるスピン軌道結合系における新奇な秩序の探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	瀧川 仁	東京大学・物性研究所・教授	1

C01 公	18H04311 熱流により誘起された反強磁性マ グノンスピン流における奇パリティ 多極子効果の開拓	平成 30 年度 ～ 令和元年度	塩見 雄毅	東京大学・総合文化研究科・ 准教授	1
C01 公	18H04315 ハニカムおよびジグザグ構造を持 つ物質における拡張多極子の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大原 繁男	名古屋工業大学・工学研究 科・教授	1
C01 公	18H04316 Magnetotransport in strongly correlated non-centrosymmetric f-electron materials	平成 30 年度 ～ 令和元年度	Peters Robert	京都大学・理学研究科・講師	1
C01 公	18H04322 C e ジグザグ鎖構造を持つ新しい 重い電子系化合物における電流誘 起磁化現象の探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	本山 岳	島根大学・学術研究院理工 学系・准教授	1
C01 公	18H04324 希土類キラル磁性体の圧力によっ て誘起された量子臨界現象とキラ ルソリトン格子相	平成 30 年度 ～ 令和元年度	梅尾 和則	広島大学・自然科学研究支 援開発センター・准教授	1
D01 公	18H04303 Emergent electronic phenomena in hybrid f/p-electron molecular materials	平成 30 年度 ～ 令和元年度	プラシデス コス マス	大阪府立大学・工学研究科・ 教授	1
D01 公	18H04304 遍歴反強磁性物質 BaMn2Pn2 におけ る電気磁気効果	平成 30 年度 ～ 令和元年度	谷垣 勝己	東北大学・材料科学高等研 究所・教授	1
D01 公	18H04314 空間反転対称性を「破る」5 d 電子 系の新物質開拓	平成 30 年度 ～ 令和元年度	岡本 佳比古	名古屋大学・工学研究科・准 教授	1
D01 公	18H04319 層状・3次元遷移金属化合物のス ピン軌道相互作用由来の異常電子 相制御と新規物性探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	宮坂 茂樹	大阪大学・理学研究科・准教 授	1
D01 公	18H04327 幾何学的フラストレート系イリジウム 酸化物における新奇物性の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	松平 和之	九州工業大学・工学研究院・ 教授	1
公募研究 計 57 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）



## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	363,350,000 円	279,500,000 円	83,850,000 円
平成 28 年度	311,220,000 円	239,400,000 円	71,820,000 円
平成 29 年度	335,140,000 円	257,800,000 円	77,340,000 円
平成 30 年度	307,320,000 円	236,400,000 円	70,920,000 円
令和元年度	306,280,000 円	235,600,000 円	70,680,000 円
合計	1,623,310,000 円	1,248,700,000 円	374,610,000 円

## 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

### 【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。この様な電子系は、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ックス、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

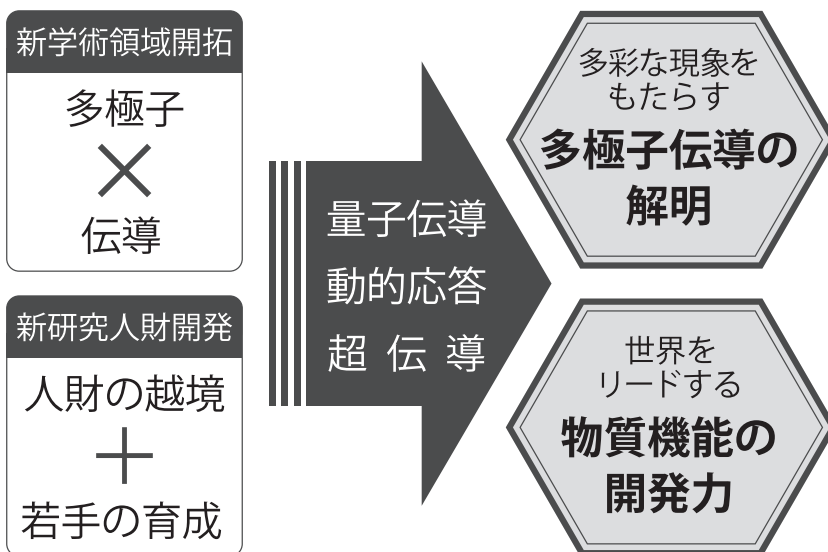
来型の電子系では、電子の持つスピンと軌道の結合が重要な役割を果たしていると考えられているが、ミクロな視点からの包括的な研究も新物質機能開拓も行われていないのが現状である。

原子レベルでは電子自由度はスピンと軌道が結合した全角運動量「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いだ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、マルチフェロイッ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。



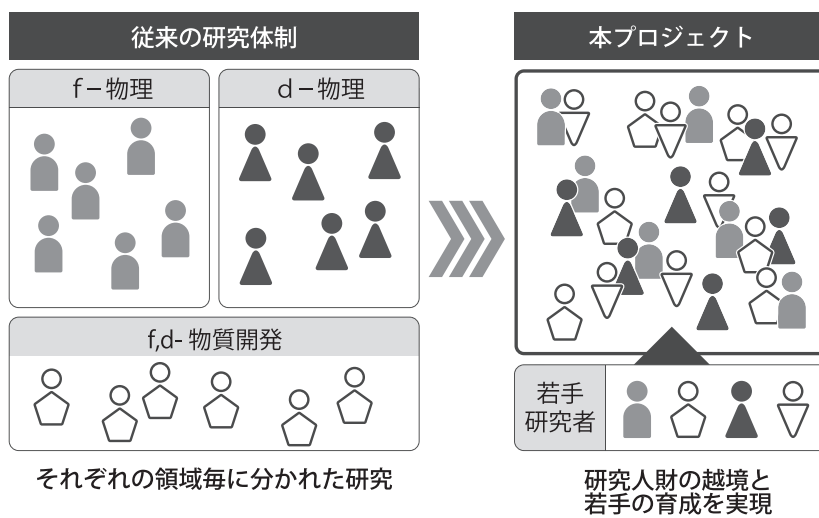
領域の全体構想と研究目的

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、透明酸化物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、スピン軌道結合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ックスの分野は、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。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価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、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(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)

### <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

(中間評価時の対応) 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。

(中間評価時の所見) 採択時の所見において指摘された「分野融合に向けた連携研究の促進」について、領域会議やトピカルミーティングを積極的に実施し、また領域内の共同研究を促進するための共用機器を購入するとともにその効果的な運用を図るなど、適切な対応がなされている。

(中間評価以降の対応) 地域研究会を含むトピカルミーティングをより多く開催して、分野融合に向けて領域内の共同研究をより一層推進した。謝辞有り論文数で、複数の計画研究が関与する論文数は483篇のうち46篇で、公募研究が関与する論文341篇中88篇が計画研究との共同研究である。

### (2) 新概念の創出に向けた具体的展望へ向けての活動

(中間評価時の対応) 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。Mn<sub>3</sub>Sn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。

(中間評価時の所見) これまでに、反強磁性体における異常ホール効果の観測、ウラン系化合物における電流誘起磁化異常に関する研究展開、ハチの単格子の新規超電導の発見、ダイヤモンド構造の四極子系の開発など、多くの重要な研究成果が着実に生まれており、順調に進展しているものと認められる。

(中間評価以降の対応) 拡張多極子(クラスター多極子とハイブリッド多極子)の概念を用いて、*d, f*電子系を俯瞰できるようになってきた。Cd<sub>2</sub>Re<sub>2</sub>O<sub>7</sub>も多極子秩序系とした研究が進み、磁気トロイダル磁気秩序における電流磁気応答が観測される物質も増えている。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

#### <中間評価結果の所見において指摘を受けた事項>

(略) また、国際共同研究ネットワーク、試料育成ネットワーク及びウラン系化合物研究の国際連携ネットワークの構築に向けた拠点づくりも進められており、国際的な研究者コミュニティの形成に向けた今後の展開が期待される。

一方で、アウトリーチ活動については、現段階で十分に機能しているとは言い難く、研究領域として計画している「研究成果を一般向けに分かりやすく公表する」、「企業と連携を図りながら、若手キャリアパス形成の取組を推進する」という観点に基づいた今後の積極的な取り組みが強く求められる。

### (3) 国際的な研究者コミュニティの形成に向けた今後の展開

本領域の国際活動支援班は、領域設定後に採択されたために、計画研究は国際活動支援班とは独立に国際共同研究をする計画を立てている。それに加えて、国際活動支援班として、若手研究者の短期滞在の交流を通じて、計画研究における国際共同研究の強化や、新たな国際共同研究の開拓に取り組んでいる。

ウラン系化合物ネットワーク：グルノーブルとプラハにそれぞれ派遣 2 名が行われた。ウラン化合物を用いた研究拠点は限られているが、協力関係が若い世代にも浸透している。招へいもグルノーブルから 1 名、プラハから 2 名があった。

試料育成ネットワーク：ドイツ、アメリカ、イタリアとの交流があった。特にトリノ大学から招へいた学生は帰国後に学位を取得したが、ホストの野原(岡山大)は学位審査委員を務めるなど、関係が強化された。

国際共同研究ネットワーク：ドイツのマックスプランク研に 4 名の派遣、アメリカのエイムズ研に 3 名の派遣と 1 名の招へい、スイスの ETH チューリッヒに 2 名の派遣と 2 名の招へいを行った。若手が滞在中にシニアの研究者が訪問もして、それぞれの研究所などとの関係強化を図ることができた。

### (4) アウトリーチ活動への取り組み

H30 年より総括班にアウトリーチ担当を配置して、より一層のアウトリーチ活動に取り組んだ。H30 の全体研究会において、「物性若手のためのキャリアデザイン—企業で活躍する先輩からのメッセージ」という特別セッションを設けて博士学位取得者として企業で活躍する 2 名に講演をお願いした。大学院生を中心とした活発な質問がありキャリアパス形成に資することとなった。

領域としてのアウトリーチ活動として、講義と実験を組み合わせた特別講義を高校生に開講した。単発で終わるアウトリーチ活動が多い中で、自身で育成した試料を実験する機会を得た高校生に好評であった。この活動の中で、周期表同好会が行なっている「元素検定」を神戸に誘致して欲しいと言う要望があり、国際周期表年 2019 とともに協力して、R1 年 7 月に「国際周期表年 2019 をお祝いする元素と周期表を学ぶ会 (元素検定スペシャル@神戸と講演会)」を開催した。7 歳から 74 歳までの幅広い年齢層の 90 名程度が元素検定を受検し、その後の講演会には 130 名程度が参加した。9 月の国際会議には、国際周期表年 2019 の行事として特別パネル展を開催して、会議参加者を始め多くの一般参加者を得た。

また、神戸大学理学部のサイエンスセミナー 2019 (R1 年 7 月開催) で一般向けに「空間反転対称性の破れと電子の運動」という題目で講演を行った。

H30 年の特別講義の成果を受けて、R1 年度は「物理トレセン兵庫」での 3 連続特別講義 (最終回は感染拡大防止のため中止) を行なった。また、ニューズレター巻頭言に触発され「日本語からはじめる科学・技術英文の書き方」という文理融合の特別講義の依頼を受けて、愛知県の高校で講演を行なった。

アグネ出版の「固体物理」特集号の提案を行なったところ、特集号「拡張多極子が拓くスピン軌道物性の新展開」を R2 年 11 月号として発行することになった。また、放送大学の生涯学習支援企画として「電気と磁気の不思議な相関：鏡の国のサッカーゲーム」の番組制作を提案したところ採択され、R2 年末には放映される予定である。

R2 年度も引き続き高校からの講演依頼があるが、実施は感染症拡大の状況次第である。

## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### (1) 研究目的の達成度

#### 概要

磁気八極子由来の  $Mn_3Sn$  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、 $UNi_4B$  や  $Ce_3TiB$  における磁気トロイダル双極子秩序による電流磁気応答を発見した。これらの成果を含めて、拡張多極子の概念が広く浸透して、多極子が伝導現象に支配的な系の系統的な研究が進み、新規機能の開発につながっている。

$4f$ 電子系としては初めてとなるスキルミオン状態を  $EuPtSi$  で発見し、その性質が大きく異なることを示した。これは、スキルミオン状態が磁気的な相互作用の起源によらない普遍的な現象である一方で、多様な状態を持つことを示している。

30 テスラ以上の強磁場でも超伝導を示す  $UTe_2$  が多重超伝導相を示すことを発見した。多重超伝導相は  $UPt_3$  について30年ぶりの発見となる2例目である。多くのウラン超伝導体がいわゆるジグザグ構造を示すが、その中の2次元ジグザグの2つが多重超伝導相を示すことがわかった。ジグザグ由来の多極子にもとに超伝導機構解明が今後大きく進展すると思われる。

以上のように、拡張多極子の概念を  $d, f$ 電子系を含む広い物質系に適用して、新規な伝導現象を開発・解明することで、多極子伝導の学理を構築して新物質機能を開拓した。これは、スピントロニクスやスキルミオンなど既存の研究分野に大きな波及効果をもたらす一方で、RKKY相互作用のジャロシンスキー・守谷項やジグザグ構造と多重相伝導相の関係など、物性物理学の分野に新しい問題を提起している。

#### 研究項目 A01 局在多極子と伝導電子の相関効果

局在多極子と伝導電子の相関効果の基礎学理を深め、新たな量子機能を開拓することを目的に、領域内及び他領域との緊密な協力関係のもとで研究を進めた。原子に局在した多極子と伝導電子の相互作用による多彩な現象、価数自由度の量子臨界現象、スピン軌道相互作用が本質的なモット絶縁体など、領域発足時に掲げていた具体的な課題に関する理解を飛躍的に高め、研究目的を十分に達成することができた。さらに、新物質の発見を契機に、 $f$ 電子スカーミオンの発見、ベリー曲率による新しい諸物性の発見、クラスター多極子による新規物性機能の発見など、当初予期していなかった成果も得られた。特に、C01との連携により理解が大きく進んだ「拡張クラスター多極子」の新概念は、磁気構造に隠れた機能性への理解を深め、物理現象の予言に有用であると同時に、第一原理計算の自動化にも貢献した。これらの新機能・新概念はスピントロニクスを始め様々な分野にも波及しており、次の飛躍への重要な一歩となることが期待される。

#### 研究項目 B01 遍歴多極子による新奇量子伝導相

多極子が遍歴性を獲得して引き起こす多彩な伝導現象や量子相の解明を目的に、スピン軌道結合が強く多様な多極子自由度を有するウラン化合物を中心とした実験研究および理論的考察を展開し、研究目的を十分に達成する成果を得た。重要な成果として、①強磁性超伝導体や新奇スピン三重項超伝導体  $UTe_2$  における磁場誘起超伝導並びに多重超伝導の観測と、NNR および熱伝導測定による超伝導対称性の決定、②隠れた秩序物質  $URu_2Si_2$  における対称性の精密測定による奇パリティハイブリッド多極子秩序の提案、③Smあるいは  $p$ 電子を含む物質の新規開発、④トポロジカル超伝導・多極子秩序の理論構築などが挙げられる。これらの興味深い物理現象は、領域発足時には個別に研究されてきた課題であるが、本研究を通じて遍歴多極子の概念を用いて包括的に理解できることを示した。これにより従来の枠にとらわれない分野横断的な視点からの研究を進展させ、将来に向けての新たな潮流を生み出すことができた。プレス発表やアウトリーチ活動を通じて成果を社会に還元する活動にも力を入れた。

#### 研究項目 C01 拡張多極子による動的応答

1 原子上の電子が持つ電荷・スピン・軌道の結合自由度である電気・磁気多極子、さらにこれらが複数

原子上に跨がって形成する電気・磁気クラスターや結合ボンドクラスターを含めた「拡張多極子 (Augmented Multipoles)」に基礎を置く新しい物質観の構築を目的に、領域内外との柔軟な連携研究を展開した。固体中電子の任意の自由度を記述する理論を実・波数空間において定式化するとともに、系の対称性に応じて活性化し得る拡張多極子およびそれらの秩序や外場応答を整理した。実験では、ハニカム構造やジグザグ構造上の反強磁性体金属における電気磁気効果や磁気圧電効果などの観測に成功した。領域全体の目標でもある *d* 電子系分野と *f* 電子系分野の融合研究の醸成に貢献するとともに、既存の様々な物性研究プロジェクトにも波及しつつ、今後更に発展する可能性を示している。領域設定期間においては理論、実験ともに基礎固めを主眼に研究を進めたが、幅広い物質系への理論展開や新規実験手法の開拓、新たな物質設計指針などの着実な萌芽がみられ、当初目標を上回る成果が得られた。

## 研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

多極子の秩序化や量子ゆらぎ、多極子の遍歴化に起因した現象の観測に最適なモデル物質の開発を精力的に進め、①空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用に起因したフェルミ面のスピン分裂を研究するための物質系の開発と理論的理解、②スピン分裂したフェルミ面における軌道交差現象の理論的理解、③遍歴する *j*-フェルミオンを有する物質系の開発、④秩序ハニカム構造をもつ超伝導物質群の発見とカイラル超伝導状態の観測、⑤Pr 系における希薄四極子近藤効果の観測、⑥イリジウムを含む超伝導物質群の発見、⑦重元素 Bi を含む層状物質群の開発と物質設計指針の確立、といった成果を得た。特に、30 年以上前に理論的に予測されていた単サイトの四極子近藤効果の実験的検証に初めて成功したことや、フェルミ面のスピン分裂や軌道交差が生じる典型物質を開発し、非従来型の超伝導や熱電現象が生じることを明らかにしたことは、固体物性の普遍的原理の理解と構築に貢献する重要な成果といえる。物質開発及び新物性開拓において当初目標を十分達成することができた。本研究によって創出された新概念、「*j*-フェルミオン」は、遍歴多極子に関する研究の更なる発展を促すものと期待できる。

### (2) 主な成果(中間評価以降)

#### 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、鈴木、有田)

##### ・ワイル磁性体の発見

巨大な異常ホール効果を観測した  $Mn_3Sn$  の第一原理計算を用いた理論研究から、時間反転対称性を破ることで現れるワイル半金属 (磁気ワイルフェルミオン) が実現していると予測されている。この磁気ワイルフェルミオンの存在を実証するため、バンド計算と光電子分光の比較から ワイル分散の直接的観測に成功した。また、2つのワイル点に、磁場と電場の向きが平行に印可されるとワイル点間での電荷移動にともない電気抵抗が下がり、負の磁気抵抗を示すカイラル異常 (Adler -Bell -Jackiw 異常) の観測に成功した。更にバルク効果としてフェルミ面近傍の寄与から与えられる大きなベリー曲率由来の巨大な異常ネルンスト効果も同時に発見した。(Nat. Mater. **16**, 1090 (2017), Nat. phys. **13**, 1085 (2017).)

A01 (計画・中辻、鈴木、有田)

##### ・反強磁性金属での磁気光学カー効果の観測：室温での磁気八極子の可視化に成功

室温にて異常ホール効果や異常ネルンスト効果が自発的に現れる金属間化合物  $Mn_3Sn$  は「クラスター磁気八極子」というスピン秩序構造を持つ反強磁性体である。従来ゼロ磁場または磁化を持たない反強磁性状態では、磁気光学カー効果は現れないと考えられていたが、磁場や磁化がゼロの状態においても磁気光学カー効果が現れることを見出し、磁気八極子が作る磁気ドメインの直接観測に成功した。今回確立した磁気光学カー効果を用いた非破壊・非接触な反強磁性ドメインの直接観察手法は、反強磁性ドメインの制御が重要となる 次世代の磁気デバイス研究への広範囲な応用展開が期待できる。(Nat. Photon. **12**, 73 (2018).)

A01 (計画・鈴木、有田) C01 (計画・楠瀬、公募・速水) 領域内共同研究

##### ・クラスター多極子理論と反強磁性体の異常ホール効果

磁気構造をその磁気点群対称性を反映した多極子モーメント (クラスター多極子) によって特徴付ける方法論を示し、与えられた結晶構造のもとで多極子モーメントによって分類された独立な磁気構造を生成する手法を構築した。従来、異常ホール効果は強磁性体に特有の物性現象と考えられてきたが、この

手法により一部の磁化のない反強磁性体  $Mn_3Sn$  と  $Mn_3Ge$  でも発現する異常ホール効果が、磁気双極子と同じ対称性を持つ磁気八極子によって誘起されていることを明らかにし、第一原理計算による解析を併用して、強磁性体と反強磁性体における異常ホール効果の発現がクラスター多極子によって統一的に理解できることを示した。 (Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019).)

#### A01 (公募・出口)

##### ・準結晶と近似結晶の超伝導

準結晶・近似結晶における強相関電子系の磁性・量子臨界現象の実験が進展しており、中でも、希土類元素 Yb を含む Tsai 型の多重殻クラスター構造をもつ Au-Ge-Yb 合金の研究を進め、準結晶と結晶をつなぐ物質である「近似結晶」が超伝導 (非磁性物質では 0.68 K と磁性物質では 0.36 K) になることを初めて発見した。準結晶の超伝導については、Bergman 型クラスターを持つ Al-Zn-Mg 準結晶において準結晶中の電子にも引力が働くことによりバルクの超伝導 (0.05 K) が発現することが明らかになった。これらクーパー対の状態については明らかになっていないが、理論研究によれば、準結晶の超伝導は従来の超伝導とは異なるタイプの電子対を持っている可能性が期待されている。(Nat. Commun. **9**, 154 (2018).)

#### A01 (公募・松林)

##### ・高圧力により誘起される多極子と電子伝導の混成効果の観測

四極子自由度を有する非磁性 Pr 系化合物  $PrT_2Al_{20}$  ( $T = Ti, V$ ) では Pr イオンの結晶既定状態である  $\Gamma_3$  非磁性二重項状態に起因した四極子秩序と多極子自由度と伝導電子との混成効果による超伝導や四極子近藤効果などの多彩な現象が観測される。本成果では、強四極子秩序を示す  $PrTi_2Al_{20}$  のみならず、反強四極子秩序  $PrV_2Al_{20}$  でも高圧下で四極子秩序が抑制されるにともない超伝導が出現することが分かり、また四極子秩序が消失する高磁場下では四極子近藤効果を示唆する非フェルミ液体的挙動が 10 GPa を超えた領域で観測され、広範囲な圧力・磁場においてスケールリング則が成り立つことを見出した。

### 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、石田、神戸) D01 (計画・播磨) 領域内共同研究、国際共同研究

##### ・ $UTe_2$ の多重超伝導相の発見

2018 年末に発見された新奇スピン三重項超伝導体  $UTe_2$  について、日仏間の国際協力のもと純良単結晶育成、極低温、強磁場、圧力実験などを精力的に進め、磁場と温度に対して多重相構造をとる超伝導状態の相図の全貌と基礎物性の詳細を明らかにした。本領域研究の成果として出版された論文はすでに 15 編を数えている。このうち、 $H_m = 35$  T で発現するメタ磁性と  $H_m$  以下の高磁場で実現している磁場誘起超伝導の発見、NMR 測定から得られたナイトシフトによる スピン三重項超伝導の同定と強磁性スピンゆらぎの観測などは顕著な成果である。(J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 043702 (2019) (Editors' Choice), J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 073701 (2019). など)

#### B01 (計画・神戸、松田) D01 (計画・播磨) 領域内共同研究

##### ・ $URu_2Si_2$ の隠れた秩序相における対称性の精密観測

$URu_2Si_2$  の「隠れた秩序」の対称性を決定するため、詳細な NMR/NQR の研究を行い、隠れた秩序状態において U、Ru、Si サイトの 4 回対称性が保存されていることを結論した。さらに群論的考察により、ランク 5 の反強電氣的奇パリティ秩序であることを明らかにした。この状態は U の  $5f$  軌道だけでは構成できず、U  $6d$  軌道の寄与が必要であり、いわゆるハイブリッド型の拡張多極子になっていることを示す。これは、固体中電子の新たな秩序状態であり、直接観測による検証実験の進展が期待される。(Phys. Rev. B **97**, 234152 (2018).)

#### B01 (計画・柳瀬)

##### ・トポロジカル超伝導を含む理論的考察

$UPt_3$  の非共型超伝導を記述するモデルを構築し、B 相が新奇な ワイル超伝導であることを示した。また、 $UPt_3$  の A 相および強磁性 UCoGe がそれぞれ  $Z_2, Z_4$  メビウス型トポロジカル超伝導であることを明らかにした。(Phys. Rev. Lett. **122**, 227001 (2019).) さらに、 $UTe_2$  においてクーロン相互作用由来の絶縁体金属転移が起こることを GGA+U 計算により示し、トポロジカル超伝導の可能性および磁場中の多重相図のモデルを提案した。(Phys. Rev. Lett. **123**, 217001 (2019).) 対称性とトポロジーにより超伝導ギャップ構



造を包括的に分類し、 $UTe_2$ ,  $UPt_3$ ,  $UBe_{13}$ ,  $SrPtAs$ ,  $MoS_2$  などのギャップ構造を示した。(Phys. Rev. Research **1**, 013012 (2019).)

**B01 (公募・大貫、橘高、計画・青木) A01 (計画・榊原) C01 (計画・中尾)** 領域内共同研究

・ **4f 電子系初のスキルミオン状態の発見**

カイラル構造を持つ EuPtSi はゼロ磁場では結晶構造を反映しませんが磁性を示す。単結晶 EuPtSi の 3 回軸 ([111]) 方向の低温磁化を温度 0.3 K まで精密測定し、磁気スキルミオンの典型物質である MnSi の振る舞いと酷似した磁化の振る舞いおよび磁気相図を明かにした。(J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 093701 (2019).) また、中性子散乱による実験結果からは、磁場中の A 相と呼ばれる相で周期長は保ちながら印加磁場に垂直散乱面にピークが移動し、6 回対称の磁気散乱パターンへと変化することが確認された。(J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 013702 (2019) (Editors' Choice).) さらに A 相内での巨大ホール抵抗も観測されたこと (J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 094705 (2019).) などから、EuPtSi が f 電子系で初となる磁気スキルミオン格子を持つ物質 であることが明らかとなった。スキルミオンサイズ  $\xi = 2\pi/|q|$  が 18 Å と小さいがゆえに、それに伴う創発磁場は MnSi に比べて 100 倍大きく、スキルミオン由来のホール抵抗は極めて大きいものとなることがわかった。

**B01 (公募・野島)**

・ **電場誘起超伝導界面の新奇超伝導特性**

特徴的なスピン軌道相互作用が働く表面 d 電子系において、スピンロッキングを起源とする新奇超伝導現象を電気二重層トランジスタ(EDLT)等の手法を用いて探索した。 $SrTiO_3$ 、 $MoS_2$ 、 $NbSe_2$  単原子層膜を調べた。その結果、臨界磁場の磁場方位依存性が特異な振る舞いを示すことがわかった。これは、スピン軌道相互作用が強 2 次元超伝導体特有の新奇現象 であり、スピンロッキング機構が常磁性臨界磁場を決めていることがわかった。また、 $MoS_2$  において、量子グリフィス転移と呼ばれる新たな量子相転移を見出した。(Nat. Commun. **9**, 778 (2018).)

**研究項目 C01 拡張多極子による動的応答**

**C01 (計画・中尾)**

本新学術領域から拡張磁気八極子が起源となる巨大異常ホール効果や巨大異常ネルンスト効果などが、 $Mn_3Sn$  において発見され注目されている。 $Q=0$  での共鳴 X 線散乱と言える X 線磁気円二色性 (XMCD) の手法を本系に適用したところ、拡張磁気八極子を反映していると期待される XMCD 信号の観測に成功した。さらに、XMCD 理論を再考することにより観測された信号が拡張磁気八極子を反映していることが明らかとなった。この結果は、これまで難しかった高次多極子状態の観測の可能性を広げるものであり、重要な結果と言える。(投稿中: arXiv:1909.08179)

**C01 (計画・楠瀬、公募・速水)** 若手・柳との共同研究

結晶中の電子がもつ任意の自由度を表現できる拡張多極子理論の整備を行い、時間反転と空間反転の偶奇性の組み合わせによって異なる 4 種の多極子について量子力学的演算子表現を導出し(J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033709 (2018).)、32 結晶点群に基づいて拡張多極子とそれに関係する交差相関応答を分類した(Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).)。これらの理論的枠組みを用いて、磁気トロイダル双極子秩序による電流磁気応答 ( $UNi_4B$ )や電気トロイダル四極子秩序 ( $Cd_2Re_2O_7$ ) 等の提唱を行った。また、多軌道ハニカムハバード模型に対して、可能な多極子秩序を分析し、特異な光学選択則を導出した。(J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083703(2018) など) さらに、スピン軌道相互作用によらないバンドの非対称スピン分裂や多様な交差相関応答の新しい機構を提唱し、副格子ホッピング変調を表す**ボンダ多極子**と**クラスター多極子**による解釈を与え、有機反強磁性体を用いたスピン流生成の実現可能性を指摘した。(Nat. Commun. **10**, 4305 (2019).)

**C01 (公募・塩見、阿部) B01 (計画・柳瀬)** 領域内共同研究

・ **自発的時間・空間反転対称性の破れに付随した新規交差相関応答の観測**

磁気圧電効果は、空間反転対称性と時間反転対称性が両方破れた磁性金属において、AC 電流を印加すると AC 歪みが生じる現象である。低温で駆動するレーザードップラー振動計を用いた動的歪み計測システムを構築し、反強磁性金属  $EuMnBi_2$  において、電荷液晶秩序の発現に伴って電流印加により歪みが生じる磁気圧電効果を世界に先駆けて実証した。(Phys. Rev. Lett. **122**, 127207 (2019).) さらに  $CaMn_2Bi_2$  においても明瞭な磁気圧電効果の信号を観測し、その大きさが  $EuMnBi_2$  と同程度であることを明らかにし

た。(Phys. Rev. B **100** 054424 (2019).)

#### C01 (公募・本山)

##### ・反強磁性金属磁性体における電流誘起磁化現象の検証

Ce ジグザグ鎖構造を持つ重い電子系新物質  $\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$ を開発し、電流下で精密磁化測定を行った。その結果、反強磁性 ( $T_N = 5 \text{ K}$ ) より高温では電流印加に影響を受けることなく、転移温度以下においてのみ電流に比例する磁化の増大を観測した。また、誘起磁化は磁場には全く影響されず、 $4f$  電子を持たない  $\text{La}_3\text{TiBi}_5$  においては観測されないことを確認した。これらの結果から  $\text{UNi}_4\text{B}$  に続き、金属反強磁性体における電流誘起磁化現象の紛れのない例を見出すことに成功した。(J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 033703 (2020).)

#### 研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

#### D01 (計画・鬼丸) C01 (公募・柳澤、梅尾、高島、計画・網塚) A01 (公募・脇谷) 領域内共同研究

##### ・プラセオジム系における希薄四極子近藤効果の発見

電気四極子を有する  $\text{Pr}^{3+}$  を僅かに含有する  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ir}_2\text{Zn}_{20}$  において、希薄四極子近藤効果が現れ、そこでの非フェルミ液体挙動が約 30 年前に理論的に予測されていた単サイトの電気四極子による 2 チャンネル近藤効果により説明できることを解明した。(Phys. Rev. Lett. **121**, 077206 (2018)) さらに、超音波音速測定によって、希薄系における電気四極子の存在を実証した。(Phys. Rev. Lett. **123**, 067201 (2019)) また、新物質の単結晶育成にも取り組み、 $\text{PrMgNi}_4$  において四極子のガラス状態を発見した。(JPS Conf. Proc. **30**, 011160 (2020))

#### D01 (計画・播磨) B01 (計画・青木、公募・大貫) 領域内共同研究

##### ・フェルミ面のスピン分裂と軌道交差現象の理論的解明

化学的に極めて似通った性質を示すウルマナイト型化合物とパイライト型化合物が、空間反転対称性の破れの有無に起因して、物理的には著しく異なった性質を示すことを明らかにした。理論と実験が協力して、dHvA 効果の実験とバンド計算を行い、パイライト  $\text{CoSe}_2$ 、 $\text{AuSb}_2$  にはフェルミ面のスピン分裂が存在しないこと、一方でウルマナイト  $\text{NiSbS}$ 、 $\text{PdBiSe}$  には分裂が存在し、 $\text{PdBiSe}$  のほうが大きなスピン分裂を示すことを突き止めた(Physica B **536**, 643 (2018).)。これは Bi 6p と Sb 5p 軌道のスピン軌道結合の大きさの違いに起因する。さらに  $\text{Yb}_4\text{Sb}_3$  においてスピン分裂したフェルミ面が特殊な位置で交差し、サイクロトロン運動する電子が一方のフェルミ面から他方へ飛び移る軌道交差現象を理論的に説明した。(J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 114708 (2018).)

#### D01 (計画・野原、公募・岡本)

##### ・ $j$ -フェルミオン伝導物質の開発

映進面やらせん軸などの部分並進対称性を含む非共型空間群に属する系では、バンドの多重縮退に起因して  $j = 1/2$  ワイルフェルミオンや  $j = 3/2$  RSW (Rarita-Schwinger-Weyl) フェルミオンが現れると考えられる。これらのモデル物質の開発を進め、 $\text{BaPtP}$  が約 0.20 K で、 $\text{PtSbS}$  が約 0.15 K で超伝導を示すことを明らかにした。さらに、 $\text{RhBiSe}$  がバンドの多重縮退 (すなわち高エントロピー状態) に起因して、金属的な電気伝導を示すにも関わらず  $-100 \mu\text{V/K}$  を超える巨大熱起電力を示すことを発見した。(JPS Conf. Proc. **29**, 011001 (2019).)

#### D01 (公募・Kosmas Prassides)

##### ・希土類金属 $\text{C}_{60}$ バイブリッド物質における価数転移の観測と化学的制御

希土類カチオンと  $\text{C}_{60}$  アニオンからなる無機・有機複合化合物 ( $\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x$ ) $_2.75\text{C}_{60}$  を開発し、Sm の価数転移とそれに伴う格子コラプス (体積の巨大収縮) が生じることを明らかにした。この現象は、超高压下で近藤絶縁体  $\text{SmS}$  が示す Black-Golden 相転移と類似するが、( $\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x$ ) $_2.75\text{C}_{60}$  では常圧でも価数転移が起こり、しかも Ca 置換によって化学的に制御可能である。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### <発表論文・書籍>

#### 研究項目 A01 局在多極子と伝導電子の相関効果

計画研究 [代表・中辻 知] 計 118 件（査読有 116 件、査読無 2 件）

1. “Room-temperature terahertz anomalous Hall effect in Weyl antiferromagnet  $Mn_3Sn$  thin films”, T. Matsuda, N. Kanda, T. Higo, N.P. Armitage, S. Nakatsuji, and \*R. Matsunaga, Nat. Commun., 査読有, **11**, 909-1-8 (2019).
2. “Magnetic and magnetic inverse spin Hall effects in a non-collinear antiferromagnet”, M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P-K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, A-H. MacDonald, S. Nakatsuji, and \*Y. Otani, Nature, 査読有, **565**, 627-630 (2019).
3. “Fluctuation-Induced First-Order Transition and Tricritical Point in  $EuPtSi$ ”, \*T. Sakakibara, S. Nakamura, S. Kittaka, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Onuki, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 093701-1-5 (2019).
4. “Multipole expansion for magnetic structures: A generation scheme for symmetry-adapted orthonormal basis set in crystallographic point group”, \*M.-T. Suzuki, T. Nomoto, R. Arita, Y. Yanagi, S. Hayami, H. Kusunose, Phys. Rev. B, 査読有, **99**, 174407-1-11 (2019) [Editors’ Suggestion].
5. “Quantitative evaluation of Dirac physics in  $PbTe$ ”, \*K. Akiba, A. Miyake, H. Sakai, K. Katayama, H. Murakawa, N. Hanasaki, S. Takaoka, Y. Nakanishi, M. Yoshizawa, and M. Tokunaga, Phys. Rev. B, 査読有, **98**, 115144-1-11 (2018). [Editors’ Suggestion]
6. “Large magneto-optical Kerr effect and imaging of magnetic octupole domains in an antiferromagnetic metal”, T. Higo, H. Man, D.B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O.M. J. van ’t Erve, Y.P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M.-T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C.L. Chien, R. Arita, R D. Shull, J. Orenstein, and \*S. Nakatsuji, Nat. Photonics, 査読有, **12**, 73-78 (2018).
7. “Crystal Structure in Quadrupolar Kondo Candidate  $PrTr_2Al_{20}$  (Tr = Ti and V)”, \*D. Okuyama, M. Tsujimoto, H. Sagayama, Y. Shimura, A. Sakai, A. Magata, S. Nakatsuji, and T. J. Sato, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 015001-1-2 (2018).
8. “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, **13**, 1085-1090 (2017).
9. “Cluster multipole theory for anomalous Hall effect in antiferromagnets”, \*M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, R. Arita, Phys. Rev. B, 査読有, **95** 094406-1-11, (2017).
10. “Angle-resolved heat capacity of heavy fermion superconductors”, \*T. Sakakibara, S. Kittaka, and K. Machida, Rep. Prog. Phys., 査読有, **79**, 094002-1-19 (2016).

公募研究 計 116 件（査読有 116 件、査読無 0 件）

1. “Pressure-induced evolution of band structure in black phosphorus studied by  $^{31}P$  NMR”, T. Fujii, Y. Nakai, Y. Akahama, K. Ueda, and \*T. Mito, Phys. Rev. B: Rapid Communications, 査読有, **101**, 161408-1-5 (2020).
2. “de Haas-van Alphen Effect in  $SmTi_2Al_{20}$ ”, \*K. Omasa, E. Matsuoka, D. Aoki, and H. Sugawara, JPS Conf. Proc., 査読有, **29**, 015007-1-5 (2020).
3. “High-pressure Hall effect measurement on  $Ta_2NiSe_5$  as a candidate for excitonic insulator”, \*H. Arima, Y. Naito, K. Kudo, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, Y. Lu, K. Kitagawa, H. Takagi, Y. Uwatoko, and K. Matsubayashi, JPS Conf. Proc., 査読有, **30**, 011031-1-6 (2020).
4. “Lattice Dynamics Coupled to Charge and Spin Degrees of Freedom in the Molecular Dimer-Mott Insulator  $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu[N(CN) $_2$ ]Cl”, \*M. Matsuura, T. Sasaki, S. Iguchi, E. Gati, J. Müller, O. Stockert, A. Piovano, M. Böhm, J.T. Park, S. Biswas, S.M. Winter, R. Valentí, A. Nakao, and M. Lang, Phys. Rev. Lett., 査読有, **123**, 027601-1-6 (2019).
5. “Intermediate valence state of Ce in the novel quaternary compound  $CeRu_2Sn_2Zn_{18}$ ”, \*K. Wakiya, Y. Sugiyama, T. Komagata, M. Uehara, H. Sato, J. Gouchi, Y. Uwatoko, and I. Umehara, J. Alloys Compounds, 査読有, **797**, 309-313 (2019).
6. “Charge Transfer Effect under Odd-Parity Crystalline Electric Field: Divergence of Magnetic Toroidal Fluctuation in  $\beta$ - $YbAlB_4$ ”, \*S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 033701-1-5 (2019).
7. “Effect of Anisotropic Hybridization in  $YbAlB_4$  Probed by Linear Dichroism in Core-Level Hard X-ray Photoemission Spectroscopy”, \*K. Kuga, Y. Kanai, H. Fujiwara, K. Yamagami, S. Hamamoto, Y. Aoyama, A. Sekiyama, A. Higashiya, T. Kadono, S. Imada, A. Yamasaki, A. Tanaka, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, S. Nakatsuji, and T. Kiss, Phys. Rev. Lett., 査読有, **123**, 036404-1-5 (2019).
8. “Unconventional full-gap superconductivity in Kondo lattice with semimetallic conduction bands”, \*S. Iimura, M. Hirayama, and S. Hoshino, Phys. Rev. B, 査読有, **100**, 094532-1-10 (2019).
9. “Ground-State Phase Diagram of an Anisotropic  $S = 1/2$  Ladder with Different Leg Interactions”, \*T. Tonegawa, T. Hikihara, K. Okamoto, S. Furuya, and T. Sakai, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **87**, 104002-1-11 (2018).
10. “Properties of Heavy Fermion in an Impurity Anderson Model with  $f^2$  Local Singlet Ground State”, \*R. Shiina, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **87**, 014702-1-7 (2018).
11. “Discovery of superconductivity in quasicrystal”, K. Kamiya, T. Takeuchi, N. Kabeya, N. Wada, T. Ishimasa, A. Ochiai,

K. Deguchi, K. Imura, and \*N. K. Sato, Nat. Commun., 査読有, **9**, 154-1-8 (2018).

12. “Spontaneously symmetry breaking states in the attractive SU(N) Hubbard model”, \*A. Koga, and H. Yanatori, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 034702-1-7 (2017).
13. “Distributed Hybridization Model for Quantum Critical Behavior in Magnetic Quasicrystals”, J. Otsuki, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 073712-1-4 (2016).

### 研究項目 B01 遍歴多極子による新奇量子伝導相

計画研究 [代表・青木 大] 計 203 件 (査読有 199 件、査読無 4 件)

1. “Unconventional Superconductivity in Heavy Fermion UTe<sub>2</sub>”, \*D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, D. Li, Y. Homma, Y. Shimizu, Yoshiki J Sato, G. Knebel, J.-P. Brison, A. Pourret, D. Braithwaite, G. Lapertot, Q. Niu, M. Vališka, H. Harima, and J. Flouquet, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 043702-1-5 (2019). [Editors' Choice]
2. “Superconducting Properties of Heavy Fermion UTe<sub>2</sub> Revealed by <sup>125</sup>Te-nuclear Magnetic Resonance”, \*G. Nakamine, S. Kitagawa, K. Ishida, Y. Tokunaga, H. Sakai, S. Kambe, A. Nakamura, Y. Shimizu, Y. Homma, D. Li, F. Honda, and D. Aoki, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 113703-1-4 (2019). [Editors' Choice]
3. “Observation of Magnetopiezoelectric Effect in Antiferromagnetic Metal EuMnBi<sub>2</sub>”, \*Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, and S. Ishiwata, Phys. Rev. Lett., 査読有, **122**, 127207-1-5 (2019).
4. “Evidence for Spin Singlet Pairing with Strong Uniaxial Anisotropy in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> Using Nuclear Magnetic Resonance”, \*T. Hattori, H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe, T. D. Matsuda, and Y. Haga, Phys. Rev. Lett., 査読有, **120**, 027001-1-5 (2018).
5. “Pairing mechanism in the ferromagnetic superconductor UCoGe”, B. Wu, G. Bastien, M. Taupin, C. Paulsen, L. Howald, D. Aoki, and \*J.-P. Brison, Nat. Commun., 査読有, **8**, 14480-1-9 (2017).
6. “Anisotropic B–T Phase Diagram of Non-Kramers System PrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>”, \*T. Yoshida, Y. Machida, K. Izawa, Y. Shimada, N. Nagasawa, T. Onimaru, T. Takabatake, A. Gourgout, A. Pourret, G. Knebel, and J.-P. Brison, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 044711-1-10 (2017). [Editors' Choice]
7. “Low Curie-temperature ferromagnetic phase in SmPt<sub>2</sub>Cd<sub>20</sub> possibly accompanied by strong quantum fluctuations”, \*A. Yamada, S. Oike, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki, Phys. Rev. B, 査読有, **96**, 85102-1-5 (2017).
8. “Magnetic hexadecapole order and magnetopiezoelectric metal state in Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>Mn<sub>2</sub>As<sub>2</sub>”, \*H. Watanabe, and Y. Yanase, Phys. Rev. B, 査読有, **96**, 064432-1-18 (2017). [Editors' Suggestion]
9. “No detectable change in in-plane <sup>29</sup>Si Knight shift in the superconducting state of URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>”, \*T. Hattori, H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe, T. D. Matsuda and Y. Haga: J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, **85**, 073711-1-4 (2016). [Editors' Choice]
10. “Superconductivity in magnetic multipole states”, \*S. Sumita and Y. Yanase, Phys. Rev. B, 査読有, **93**, 224507-1-12 (2016)

公募研究 計 106 件 (査読有 106 件、査読無 0 件)

1. “Electronic Structure and Superconducting Gap Structure in BiS<sub>2</sub>-based Layered Superconductors”, \*K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Nomoto, K. Hattori, and H. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 041008-1-13 (2019).
2. “Unique Helical Magnetic Order and Field-Induced Phase in Trillium Lattice Antiferromagnet EuPtSi”, \*K. Kaneko, M. D. Frontzek, M. Matsuda, A. Nakao, K. Munakata, T. Ohhara, M. Kakihana, Y. Haga, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Ōnuki, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 013702-1-5 (2019). [Editors' Choice]
3. “Successive Symmetry Breaking in a  $J_{\text{eff}} = 3/2$  Quartet in the Spin–Orbit Coupled Insulator Ba<sub>2</sub>MgReO<sub>6</sub>”, \*D. Hirai, and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 064712-1-8 (2019).
4. “Chiral Higgs Mode in Nematic Superconductors”, \*H. Uematsu, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, and J. A. Sauls, Phys. Rev. Lett., 査読有, **123**, 237001-1-7 (2019).
5. “Quasi-particle evidence for the nematic state above T<sub>c</sub> in Sr<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>”, \*Y. Sun, S. Kittaka, T. Sakakibara, K. Machida, J. Wang, J. Wen, X. Xing, Z. Shi, and T. Tamegai, Phys. Rev. Lett., 査読有, **123**, 27002-1-6 (2019).
6. “Magnetic correlations in the pressure-induced superconductor CrAs investigated by <sup>75</sup>As nuclear magnetic resonance”, \*K. Matsushima, H. Kotegawa, Y. Kuwata, H. Tou, J. Kaneyoshi, E. Matsuoka, H. Sugawara, T. Sakurai, H. Ohta, and H. Harima, Phys. Rev. B: Rapid Communications, 査読有, **100**, 100501-1-5 (2019).
7. “Quantum phase transitions in highly crystalline two-dimensional superconductors”, \*Y. Saito, T. Nojima, and Y. Iwasa, Nat. Commun., 査読有, **9**, 778-1-7 (2018).
8. “Field-induced spin-density wave beyond hidden order in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>”, \*W. Knafo, F. Duc, F. Bourdarot, K. Kuwahara, H. Nojiri, D. Aoki, J. Billette, P. Frings, X. Tonon, E. Lelievre-Berna, J. Flouquet, and L. P. Regnault, Nat. Commun., 査読有, **7**, 13075-1-7 (2016).
9. “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).

### 研究項目 C01 拡張多極子による動的応答

計画研究 [代表・網塚 浩] 計 99 件 (査読有件 98、査読無 1 件)

1. 「スピンと軌道の電子論」 \*楠瀬博明, 2019 年 8 月 31 日, 講談社 (ISBN-13:978-4065169971).
2. “Electric Toroidal Quadrupoles in Spin-Orbit Coupled Metal Cd<sub>2</sub>Re<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”, \*S. Hayami, Y. Yanagi, H. Kusunose, Y. Motome, Phys. Rev. Lett., 査読有, **122**, 147602-1-6 (2019) [Cover Image].
3. “Order and disorder in the magnetization of the chiral crystal CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub>”, \*G. W. Paterson, T. Koyama, M. Shinozaki, Y. Masaki, F. J. T. Goncalves, Y. Shimamoto, T. Sogo, M. Nord, Y. Kousaka, Y. Kato, S. McVitie, and Y. Togawa, Phys. Rev. B, 査読有, **99**, 224429-1-11 (2019) [Editors' Suggestion].
4. “Quasilinear quantum magnetoresistance in pressure-induced nonsymmorphic superconductor CrAs”, \*M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo, Nat. Commun., 査読有, **10**, 4305-1-8 (2019).

5. “Evidence of a New Magnetoelectric Effect of Current-Induced Magnetization in a Toroidal Magnetic Ordered State of UNi<sub>4</sub>B”, \*H. Saito, K. Uenishi, N. Miura, C. Tabata, H. Hidaka, T. Yanagisawa, and H. Amitsuka, J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, **87**, 033702-1-5 (2018). [**Editors’ Choice**]
6. “Classification of atomic-scale multipoles under crystallographic point groups and application to linear response tensors”, \*S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi, and H. Kusunose, Phys. Rev. B, 査読有, **98**, 165110-1-35 (2018) [**Editors’ Suggestion**].
7. “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, **8**, 15358-1-8, (2017).
8. “Peculiar Magnetism of UAu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>”, \*C. Tabata, N. Miura, K. Uhlířová, M. Vališka, H. Saito, H. Hidaka, T. Yanagisawa, V. Sechovský, and \*H. Amitsuka, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 214414-1-12 (2016).
9. “ $S = 1/2$  Triangular-lattice antiferromagnets Ba<sub>3</sub>CoSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub> and CsCuCl<sub>3</sub> — 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).
10. “Cooperon condensation and intravalley pairing states in honeycomb Dirac systems”, \*S. Tsuchiya, J. Goryo, E. Arahata, and M. Sigrist, Phys. Rev. B, 査読有, **94**, 104508-1-12 (2016).

公募研究 計 116 件 (査読有 116 件、査読無 0 件)

1. “Pressure Effect on the Chiral Helimagnetic Order in YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub>”, \*Y. Ota, K. Umeo, T. Otaki, Y. Arai, T. Onimaru, S. Nakamura, and S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **89**, 044715-1-5 (2020).
2. “Magnetoelectric Effect in the Antiferromagnetic Ordered State of Ce<sub>3</sub>TiBi<sub>5</sub> with Ce Zig-Zag Chains”, \*M. Shinozaki, G. Motoyama, M. Tsubouchi, M. Sezaki, J. Gouchi, S. Nishigori, T. Mutou, A. Yamaguchi, K. Fujiwara, K. Miyoshi, and Y. Uwatoko, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **89**, 033703-1-5 (2020).
3. “Magnetic phase diagram enriched by chemical substitution in a noncentrosymmetric helimagnet”, \*T. Sato, Y. Araki, A. Miyake, A. Nakao, N. Abe, M. Tokunaga, S. Kimura, Y. Tokunaga, and T. Arima, Phys. Rev. B, 査読有, **101**, 054414-1-6 (2020) [**Editor’s Suggestion**].
4. “Large magnon contributions to thermal conductance in quasi-one-dimensional Fe-based ladder compounds BaFe<sub>2</sub>(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub>”, \*F. Du, Y. Ueda, and K. Ohgushi, Phys. Rev. Lett. 査読有, **123**, 086601-1-5 (2019).
5. “Strong-coupling formula for momentum-dependent susceptibilities in dynamical mean-field theory”, \*J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, and Y. Nomura, Phys. Rev. B, 査読有, **99d**, 165134-1-17 (2019).
6. “<sup>51</sup>V-NMR study on the  $S=1/2$  square lattice antiferromagnet K<sub>2</sub>V<sub>3</sub>O<sub>8</sub>”, \*H. Takeda, H. Yasuoka, M. Yoshida, M. Takigawa, N. J. Ghimire, D. Mandrus, and B. C. Sales, Phys. Rev. B, 査読有, **100**, 054406-1-12 (2019).
7. “Observation of a Magnetopiezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal EuMnBi<sub>2</sub>”, \*Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, and S. Ishiwata, Phys. Rev. Lett., 査読有, **122**, 127207-1-5 (2019).
8. “Impact of the Rashba spin-orbit coupling on f-electron materials”, \*Y. Michishita, and R. Peters, Phys. Rev. B, 査読有, **99**, 155141-1-11 (2019).
9. “Evidence for the Single-Site Quadrupolar Kondo Effect in the Dilute non-Kramers System Y<sub>1-x</sub>Pr<sub>x</sub>Ir<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>”, \*T. Yanagisawa, H. Hidaka, H. Amitsuka, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, Y. Yamane, and T. Onimaru, Phys. Rev. Lett., 査読有, **123**, 165110-1-6 (2019).
10. “Spin current generation in organic antiferromagnets”, \*M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo, Nat. Commun., 査読有, **10**, 4305-1-8 (2019).
11. “Pressure-induced quantum critical behavior and magnetic order in YbNi<sub>3</sub>Ga<sub>9</sub> with a chiral crystal structure: ac-calorimetric measurements up to 12 GPa”, \*K. Umeo, T. Otaki, Y. Arai, S. Ohara, and T. Takabatake, Phys. Rev. B, 査読有, **98**, 024420-1-7 (2018).
12. “SU(2)-SU(4) Kondo Crossover and Emergent Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot”, \*M. Koga, M. Matsumoto, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 063702-1-5 (2016).

## 研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

計画研究 [代表・野原 実] 計 150 件、(査読有 149 件、査読無 1 件)

1. “Superconductivity of Carbides”, \*K. Kobayashi, K. Horigane, R. Horie, and J. Akimitsu, 2019 年 3 月 27 日, *Physics and Chemistry of Carbon-Based Materials* (Ed. Y. Kubozono), Chapter 6, 149-209, Springer Singapore (ISBN-13: 9789811334160).
2. “Metastable superconductivity in two-dimensional IrTe<sub>2</sub> crystals”, \*M. Yoshida, K. Kudo, M. Nohara, and Y. Iwasa, Nano Lett., 査読有, **18**, 3113-3117 (2018).
3. “Single-site non-Fermi liquid behaviors in a diluted 4f<sup>2</sup> system Y<sub>1-x</sub>Pr<sub>x</sub>Ir<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>”, \*Y. Yamane, T. Onimaru, K. Wakiya, K. T. Matsumoto, K. Umeo, and T. Takabatake, Phys. Rev. Lett., 査読有, **121**, 077206-1-5 (2018).
4. “SnAs-Based Layered Superconductor NaSn<sub>2</sub>As<sub>2</sub>”, \*Y. Goto, A. Yamada, T.D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **86**, 123701-1-4 (2017) [**Editors’ Choice**].
5. “Orbital Crossing on Split Fermi Surfaces in Noncentrosymmetric Yb<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>”, \*N. Kimura, H. Sano, M. Shirakawa, A. Ochiai, H. Funashima, H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **87**, 114708-1-7 (2018) [**Editors’ Choice**].
6. “Strong-Coupling Superconductivity in BaPd<sub>2</sub>As<sub>2</sub> Induced by Soft Phonons in the ThCr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>-Type Polymorph”, \*K. Kudo, Y. Yamada, T. Takeuchi, T. Kimura, S. Ioka, G. Matsuo, Y. Kitahama, and \*M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 査読有, 86063704-1-4 (2017).
7. “Drastic change of the Fermi surface across the metamagnetic transition in CeRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>”, K. Götze, D. Aoki, F. Lévy-Bertrand, H. Harima, and \*I. Sheikin, Phys. Rev. B, 査読有, **95**, 161107(R)-1-5 (2017).

- “Evolution of Eu valence and superconductivity in layered  $\text{Eu}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{FBiS}_{2-x}\text{Se}_x$  system”, \*Y. Mizuguchi, E. Paris, T. Wakita, G. Jinno, A. Puri, K. Terashima, B. Joseph, O. Miura, T. Yokoya, and N. L. Saini, Phys. Rev. B, 査読有, **95**, 064515-1-6 (2017).
- “Exotic Quadrupolar Phenomena in Non-Kramers Doublet Systems – A Case of  $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$  ( $T = \text{Ir, Rh}$ ) and  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  ( $T = \text{V, Ti}$ ) –”, \*T. Onimaru, and \*H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 082002-1-22 (2016).
- “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).

公募研究 計 31 件 (査読有 31 件、査読無 0 件)

- “Raman Scattering Investigation of Structural Transition in  $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ ”, \*T. Hasegawa, W. Yoshida, K. Nakamura, N. Ogita, and K. Matsuhira, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **89**, 054602-1-11 (2020).
- “Itinerant antiferromagnetic  $\text{BaMn}_2\text{Pn}_2$ ’s showing both negative and positive magnetoresistances”, \*K-K. Huynh, T. Ogasawara, K. Kitahara, Y. Tanabe, S. Y. Matsushita, T. Tahara, T. Kida, M. Hagiwara, D. Arçon, and K. Tanigaki, Phys. Rev. B, 査読有, **99**, 195111-1-9 (2019).
- “ $\pi$ -electron  $S = 1/2$  quantum-spin-liquid state in an ionic polyaromatic hydrocarbon”, \*Y. Takabayashi, M. Menelaou, H. Tamura, N. Takemori, T. Koretsune, A. Štefančič, G. Klupp, A. J.C. Buurma, Y. Nomura, R. Arita, D. Arçon, M.J. Rosseinsky, and \*K. Prassides, Nat. Chem., 査読有, **9**, 635-643 (2017).
- “Synthesis and Superconducting Properties of a Hexagonal Phosphide  $\text{ScRhP}$ ”, \*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>

- “Multipole control of electric and magnetic responses in Weyl magnets”, S. Nakatsuji, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES 2019), September 23-28, 2019, Okayama, Japan (招待講演)
- “Fermi surfaces of cubic chiral ullmannite-type compounds”, H. Harima, V International Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures (DMI2019), July 8-12, 2019, Petrozavodsk, Russia (招待講演)
- “Topological Weyl Semimetal: from multipole to room temperature functions”, S. Nakatsuji, 21st International Conference on Magnetism (ICM 2018), July 16-20, 2018, San Francisco, USA (基調講演)
- “Tests for Magnetoelectric Effects on Antiferromagnetic Metals”, H. Amitsuka, 21st International Conference on Magnetism (ICM 2018), July 16-20, 2018, San Francisco, USA (招待講演)
- “Structural Phase Diagram and Anomalous Magnetic Properties in Superconductor of  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$  (Ln: rare earth elements)”, T.D. Matsuda, 30th International Symposium on Superconductivity, December 13-15, 2017, Hong Kong, China (招待講演)
- “NMR Study of Superconducting and rotational symmetry in  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ ”, S. Kambe, 28th International Conference on Low-Temperature Physics (LT28), August 9-16, 2017, Gothenburg, Sweden (招待講演)
- “Quantum Spin Fluid Behaviors of the Kagome- and Triangular-Lattice Antiferromagnets”, T. Sakai, 28th International Conference on Low-Temperature Physics (LT28), August 9-16, 2017, Gothenburg, Sweden (招待講演)
- “Fermi surface instabilities and field induced phenomena in ferromagnetic superconductors”, D. Aoki, 28th International Conference on Low-Temperature Physics (LT28), August 9-16, 2017, Gothenburg, Sweden (基調講演)
- “Möbius Topological Superconductivity in  $\text{UPt}_3$  and  $\text{UCoGe}$ ”, Y. Yanase, International Conference on Strongly Correlated Electrons 2017 (SCES 2017), July 17-21, 2017, Prague, Czech Republic (招待講演)
- “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)
- “NMR Studies on Heavy-Fermion Compounds near Quantum Critical Point”, K. Ishida, Progress and New Directions on 4f Electron Material, December 8-9, 2016, Houston, USA (招待講演)
- “Ferromagnetic superconductivity and Fermi surface instabilities in uranium compounds”, D. Aoki, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2016 (SCES 2016), May 8-12, 2016, Hangzhou, China (招待講演)

#### <Web、マスメディア等による情報発信>

- 「東北大、ウラン化合物  $\text{UTe}_2$  で「入れ子」構造になった多重超伝導を発見」青木大、科学新聞 (2020.6.12)、日本経済新聞 (2020.5.29)
- 早大・北大・明大・東北大・東大など、「水素や炭素などのありふれた原子からなる有機化合物を使った新しいスピンドル生成機構を発見」中惇、速水賢、楠瀬博明、柳有起、求幸年、妹尾仁嗣、日本経済新聞、EE Times Japan、News Picks、OPTRONICS ONLINE (2019.9.20)
- 「エキゾチック超伝導体の振る舞い「世界初」東北大金研が解明」青木大、科学新聞 (2019.3.22)
- 「磁気スキルミオン格子 磁気散乱パターン解明」大貫惇睦、科学新聞 (2019.2.8)
- 「送電ロスゼロへ 室温超電導を追求」野原実、山陽新聞 (2019.1.27)
- 「スピントロニクスにおける新現象「磁気スピンホール効果」の発見 –磁化で制御するスピンドル-電流相互変換を確立–」中辻知、日経産業新聞など 2 報 (2019.1.17)
- 「拡張多極子の新たな電気磁気効果を検証 –北大 理論の正しさ示す」網塚浩、齋藤開、科学新聞 (2018.4.6)
- 「Physics World 2018 Breakthrough of the Year - Superconductivity spotted in a quasicrystal」出口和彦、Physics World (2018.12.13)
- 「東大と東北大、量子ゆらぎが支配する 2 次元超伝導体の新規電子相を発見」野島勉、日本経済新聞 (2018.2.22)
- 「フォースで目覚める超伝導～磁場誘起超伝導を力で制御～」青木大、科学新聞 (2018.2.19)

11. 「東大など、磁性物質「ワイル磁性体」を発見」中辻知、日経産業新聞・マイナビニュース他 7 報 (2017.9.26)
12. 「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)
13. 「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)

### <主催シンポジウム>

1. 令和元年度領域全体会議 (令和 2 年 1 月 6 日～8 日：神戸大学・百年記念館 六甲ホール)
  2. 国際会議 J-Physics 2019 & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics (令和元年 9 月 17 日～21 日：神戸大学・百年記念館 六甲ホール)
  3. J-Physics ものづくり学校第 4 回「対称性・群論トレーニングコース in 高野山」(令和元年 8 月 5 日～9 日：高野山大学・天徳院)
  4. 国際ワークショップ j-fermion Physics and Materials (平成 30 年 12 月 4 日～6 日：Otago Business School, University of Otago, Dunedin, New Zealand)
  5. J-Physics ものづくり学校 第 3 回「物質探索最前線」(平成 30 年 8 月 6 日：首都大学東京・国際交流会館)
  6. 国際サマースクール&新物質と結晶育成に関する国際ワークショップ J-Physics2018 (ものづくり学校 第 2 回) (平成 30 年 6 月 27 日～30 日：兵庫県淡路市・淡路夢舞台国際会議場)
  7. 平成 30 年度領域全体会議 (後半キックオフ) (平成 30 年 5 月 24 日～26 日：東北大学・片平さくらホール)
  8. 国際ワークショップ “Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology” (平成 30 年 4 月 9 日～10 日：東京大学柏キャンパス 柏図書館一階メディアホール)
  9. 平成 29 年度領域全体会議 (平成 30 年 3 月 15 日～17 日：東京大学物性研究所・6F 大会議室)
  10. 国際ワークショップ J-Physics 2017 (平成 28 年 9 月 24 日～28 日：岩手県八幡平市・八幡平ロイヤルホテル)
  11. J-Physics 若手夏の学校 (平成 28 年 8 月 8 日～12 日：高野山大学・天徳院)
  12. 平成 28 年度領域全体会議 (平成 28 年 5 月 26 日～28 日：北海道大学・フロンティア応用化学研究棟)
  13. 国際ワークショップ “Anomalous Transport in Multipolar and Topological Materials” (平成 28 年 3 月 11 日～12 日：Mt. Washington Conference Center, Baltimore, USA)
  14. J-Physics ものづくり学校 第 1 回「戦略的物質開発入門」(平成 28 年 1 月 8 日～9 日：岡山大学・理学部)
  15. 領域キックオフミーティング (平成 27 年 9 月 14 日～15 日：神戸大学・総合研究拠点コンベンションホール)
- この他、国内トピカルミーティング 10 件、地域研究会 5 件、領域横断研究会 5 件、国際ワークショップ 1 件を開催。

<ホームページ> <https://www.jphysics.jp/>

### <アウトリーチ活動>

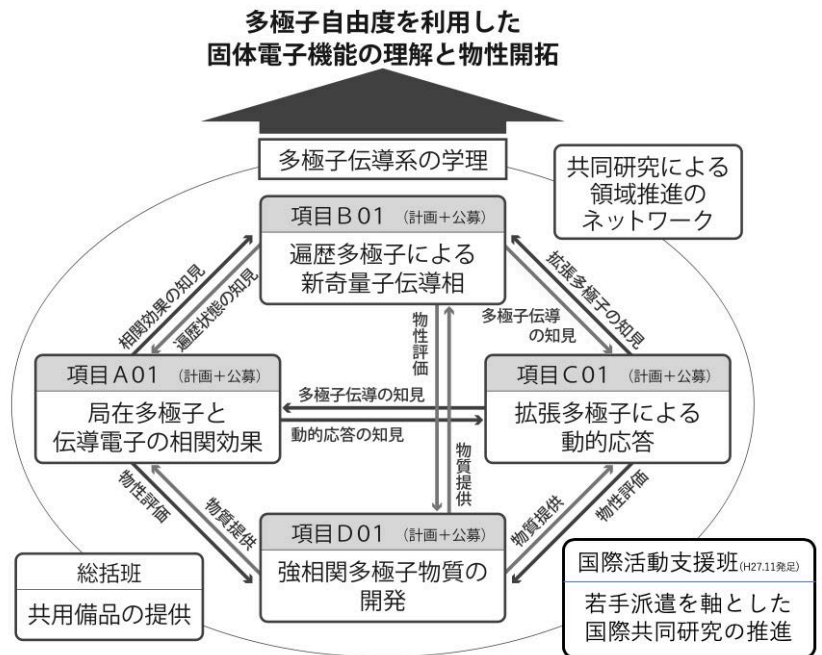
1. 高校出張授業「日本語からはじめよう」大原繁男、播磨尚朝、愛知県立一宮高校 (2020.1.15)
2. 特別講義「元素と周期表 (元素の成立ちとニホニウムの誕生)」播磨尚朝、兵庫県立神戸高校 (2019.12.21)
3. 基礎工学部公開講座「超伝導電子の“形”を捉える～電子の形から探る超伝導メカニズム～」井澤公一、大阪大学大学院基礎工学研究科 (大阪府豊中市) (2019.8.1)
4. 夢ナビライブ講義「廃熱を活かせ～熱電発電の物理学～」野原実、インテック大阪 (大阪市) (2019.7.24) <https://talk.yumenavi.info/archives/2579> [動画配信中]
5. 公開講座「国際周期表年 2019 をお祝いする元素と周期表を学ぶ会 (元素検定スペシャル@神戸と講演会)-はじめに」播磨尚朝、神戸大学理学部 (2019.7.20)
6. UHB 大学講演「絶対零度の世界」網塚浩、道新ホール (北海道札幌市) (2019.2.16)
7. 高校出張講義 SSH Science Career Lecture 「研究者になるには」松田達磨、私立玉川学園高等部 (東京都町田市) (2018.11.15)
8. 公開講演会「超伝導：リニアモーターカーから中性子星まで」楠瀬博明、秋光純、明治大学科学技術研究所 (2018.10.20)
9. 大阪大学基礎工学部 Web Lecture Series 「量子論入門から初歩の固体電子論まで」藤本聡、Youtube 上で一般公開した web 講義 (公開日 2018.9.26)
10. 公開講座「未来を創るスーパーマテリアル ～超伝導と熱電変換材料～」中辻知、東京大学物性研究所 (千葉県柏市) (2017.10.27-28)
11. 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)
12. 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)

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 【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4つの研究項目を設定した。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)、ジグザグ構造やスピン軌道結合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) を設定した。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。総括班と国際活動支援班を含めた連携体制を図に示している。



研究項目間の連携と領域として目指すもの

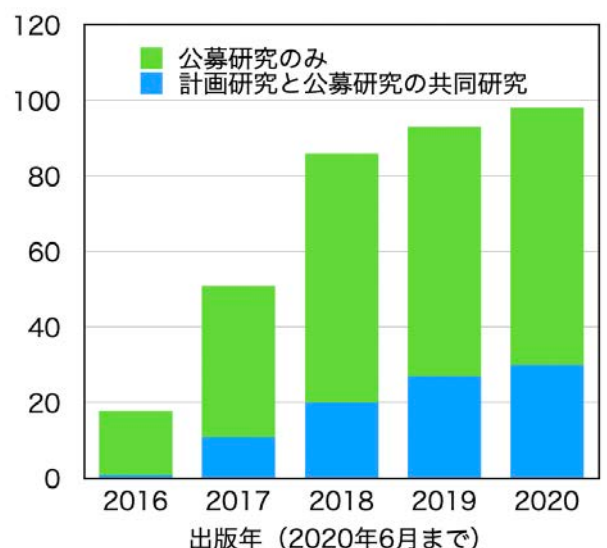
### 【公募研究】

公募研究は、第一期 (H28-H29) は実験 13 件、理論 10 件、第二期 (H30-R1) は実験 25 件、理論 9 件が採択された。全体の交流と連携を促し成果を共有するために、2 回の公募研究開始後と終了前に計 4 回の全体研究会を開催した。その他、テーマを決めて集中的に討論するためのトピカルミーティングを公募研究発足前に 2 回、第一期には 6 回、第二期には 8 回開催した。特定のテーマだけに集中するだけでなく、地域の研究者が出席して幅広い話題について討論できるように、第二期の 8 回のうち 5 回は地域研究会として、北九州、仙台、本郷、大阪、札幌で開催した。全体会議の出席者は 100~130 名程度であるが、5 回の地域研究会の延べ出席者は 163 名と参加者が多く、効果的であった。

### 【連携状況】

連携の状況を見るために、2020 年 6 月までの出版論文から共同研究の件数を調べた。計画研究のみによる論文は 483 篇のうち 9.5% の 46 篇が複数の研究項目に関わる共同研究であるが、その割合は年によって大きな増減はみられない。公募研究が関わった論文は 341 篇であるが、その内 25.8% にあたる 88 篇が計画研究との共同研究である。公募研究論文の出版年ごとの論文数の推移を計画研究との共同研究を内数としてグラフに示す。共同研究数の増加から、年とともに領域内の連携が促進されていることがうかがえる。

この他、総括班と国際活動支援班に謝辞が入る論文はそれぞれ全体の 24.6% と 12.9% であり、領域の研究推進に大きな貢献をしている。



公募研究の論文数の推移：  
計画研究との共同研究数も示す



## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・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、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### 【研究費の使用状況】

計画研究の研究費の中で41%が備品、19%が消耗品に充てられた。研究を推進するポスドクなどの研究支援員の雇用費は16%であった。総括班の研究費は59%を共用備品の購入に用い、それらは以下で示す様に領域内外に利用され、国際共同研究にも活用された。国際活動支援班の研究費は77%を海外旅費に充て、計画研究の国際活動を支援するとともに、若手研究者の相互派遣を軸とした国際的な共同研究のネットワークの形成に利用された。

### 【総括班で購入した共用機器】

領域設定の初年度に導入し、ホームページやニュースレターを用いて機器の紹介を行い、共同研究と共用機器の利用を促進した。

#### ・汎用18テスラ高磁場マグネット（総括班：中辻・東大物性研）

同時に導入したヘリウム3冷凍機と希釈冷凍機を用いた低温強磁場下での電気抵抗率、磁気抵抗、ホール効果、AC磁化率、熱膨張率、磁歪、磁気トルク測定ができるようになった。これにより、四極子応答やクラスター磁気八極子由来の異常ホール効果の起源等を明らかにする実験に有効に利用されている。さらに、物性研内の領域公募研究者との共同研究を始めとして、物性研内や国内他大学の領域外研究者にも共用機器を利用することで共同研究を行っている。さらに、試料提供を受けて、インドやドイツの研究者と国際共同研究が進行中である。

#### ・低温物性測定装置（総括班：青木・東北大）

液体ヘリウムを必要としない無冷媒型で装置の効率的な運用ができています。室温から低温まで、さらには自作断熱消磁冷凍機を組合せることで0.1Kの極低温までの幅広い温度領域に対応している。単結晶育成により得られた試料を素早く評価して、次の単結晶育成にフィードバックをかけることができる。東北大学金研は全国共同利用施設であるため多くの共同利用があり、計画・公募研究だけでなく領域外からの利用も含めて約40件の利用があった。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。

#### ・角度分解機能付希釈冷凍機システム（総括班：藤・神戸大）

装置のお披露目を兼ねて国際活動支援班と合同で研究会を開催し、これを通じて近隣の研究者からの共同利用の促進に努めた。既存の17テスラ超伝導磁石、核磁気共鳴装置、dHvA実験装置、電気抵抗測定装置と組合せて利用するための調整作業の後、H28年10月より本格稼働した。領域内の計画研究の研究者との共同研究の他に領域外との共同研究も進行している。この他にも学内からの利用に加えて、領域外からも活発に利用されている。さらに、ドイツ、チェコ、アメリカとの共同研究も行われた。これらの国際共同研究は、国際活動支援班による若手研究者相互派遣の支援も受けた人的交流とも連携して行われている。

### 【計画研究で購入した設備】

主なものについて説明する。既存の設備と組み合わせるなどして効果的に利用されて成果をあげている。

#### ・ヘリウム3冷凍機システム（A01計画：中西・岩手大）

四重極モーメントと伝導電子が織り成す新規量子臨界性の研究を加速するため、極低温下で長時間安定的に運転可能な本装置を導入した。近年の急激なヘリウム価格高騰により、極低温研究が世界的に困窮している中、既存の希釈冷凍機と相補的に利用することで運用・維持費の大幅軽減に繋がっている。

#### ・超伝導マグネット（B01計画：井澤・東工大→阪大）

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合せることにより、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している。（分担者の異動により阪大に移管）

#### ・PPMS用オプションヘリウム3冷凍機（B01計画：松田・都立大）

新物質開発のための試料評価を素早く行うために3ヘリウム冷凍機を導入した。ヘリウム再凝縮装置

付きのPPMSと組合せて、寒剤を購入することなく常に極低温までの基礎物性測定が可能になった。

・**アクチノイド物性解析装置用安定化システム** (B01 計画：神戸・原子力機構)

冷凍技術の向上により、当初計画していた無冷媒マグネットではなく、既存の超伝導マグネットに上記の安定化システムを導入したほうが安価に高磁場の実験環境を整うことがわかったので導入した。URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の角度回転を含む長時間のNMR測定に有効活用している。

・**レーザー加熱浮遊帯溶融 (LFZ) 炉** (C01 計画：高阪・広島大→大阪府立大)

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必要であった。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に初めて成功するなど成果をあげてきた。(分担者の異動により2019年度に大阪府立大学に移設)

・**希釈冷凍機システム** (D01 計画：鬼丸・広島大)

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に広島大学に専用冷凍機を導入した。岡山大学と共用し、岡山大で開発したカイラル超伝導候補物質の実験にも活用したが、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を削減することができた。

・**180 トン高圧合成装置** (D01 計画：秋光・岡山大)

$j=1/2$  モット絶縁体であるイリジウム酸化物に高濃度のキャリア注入を行うために導入した高圧合成装置を新物質探索にも活用して、新しい層状イリジウム化合物超伝導体 Li<sub>2</sub>IrSi<sub>2</sub> や重金属元素を含む超伝導体 (In, Sn)Te を発見した。

【総括班】

総括班は合計29回の主催会議や若手の学校を開催した。研究費の16%はこれら領域主催の会議などへの参加旅費に使用されたが、そのほとんどは領域外からの参加者への補助である。会場使用料などの会議費には9%を使用した。2019年9月に開催した国際会議の議事録は総括班が費用を負担することで、オープンアクセス誌として発行し研究成果の効果的な発信を可能にした。ニュースレターは計9回で総計710ページ(平均79ページ)発行したが、この印刷費と郵送費を負担することで、領域内外への効果的な情報発信を行うことができた。ホームページの整備による情報発信も効果的であった。

また、物性関係の新学術領域が合同で開催する「物性科学領域横断研究会」にも主催者として毎年参加して、研究成果の発信をするとともに応分の負担をした。

【国際活動支援班】

本領域の国際活動支援班は、領域発足後に設定された。領域の研究推進には国際共同研究が必要であるが、それらはすでに領域発足時の計画研究に含まれている。国際活動支援班は、若手育成と国際的な共同研究のネットワークの形成を主目的としている。若手派遣は延べ20名で1341日、若手招へいは延べ8名で460日であった。可能な範囲で海外での実験に必要な経費を負担した。学生の派遣については、指導教員の短期滞在を組合せて、共同研究とネットワーク形成の効果的な推進に努めた。この他、国際的なネットワークの形成のために、海外でのトピカルミーティングを3回企画した(うち1回は感染症拡大のために中止になった)。

【備品以外の研究費の効果的使用】

総括班で開催した国際若手学校については、国際活動支援班の国際会議と連続して開催することで、開催費と旅費を効果的に使用した。この他の国際会議についても、若手招へいと時期を合わせることで、効果的に旅費を使用した。東北大金研の国際若手学校と主催国際会議を連続して開催することで、旅費などが効果的に使用された。アウトリーチ活動の国際周期表年2019関連行事への支出は宣伝効果が大きく、費用対効果が高かった。

・**領域最終年度の繰越し：国際活動支援班**

新型コロナウイルス感染症拡大防止のために、令和2年3月に予定されていた国内外の多くの会議が中止された。本領域でも、取りやめになった国際活動を改めて行うために、国際活動支援班の補助事業期間延長が認められた。国際活動としては人的交流を基本として考えているが、社会情勢の推移に注視して、人的交流を伴わない活動の可能性も模索する。

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各段階発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域は、公募時の研究対象として「②当該領域の各段階の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択している。当該学問分野の背景と研究成果と波及効果の順に述べる。

### 【当該学問分野の背景と目指すもの】

固体内の電子の電荷を制御することで半導体や誘電体などの機能材料が産れ、電子のスピンや軌道角運動量に注目することで磁性材料や光機能素子が開発されてきた。近年では、これらの自由度を組合せた磁性半導体、マルチフェロイクス、スピントロニクスなどが応用面で盛んに研究されている。

結晶内の電子の遍歴性と磁性を担うスピン自由度の相関に関する基礎研究は70年以上の歴史があり、日本は世界的な研究をリードしてきた歴史がある。絶縁体磁性の超交換相互作用についての「グッドイナフ-金森則」、遍歴電子についての「長岡の強磁性」、希土類磁性を議論した「RKKY (ルーダーマン・キッテル・糟谷・芳田) 相互作用」、金属中の磁性不純物による抵抗極小現象を解明した「近藤効果」、弱強磁性を議論した「ジャロシンスキー・守谷相互作用」など、1970年までのこの分野の研究成果には多くの日本人の名前が残っており、この分野における日本の研究能力が高いことを示している。

一方で、1980年頃から、電子の遍歴性と磁気的自由度の相関による超伝導の研究が盛んになった。重い電子系超伝導体、酸化物高温超伝導体、強磁性超伝導体、鉄系超伝導体などであり、新たな応用も視野に入れて機構解明の研究も盛んに行われている。さらに、近藤効果に端を発して研究されている重い電子系は、高性能熱電材料としても期待されている。

以上のように、広い意味での電子の遍歴性とスピン自由度の研究は固体物理の大きな幹をなすものであり、それは特定の自由度に注目した多くの枝に分かれ、それぞれに機能材料の果実を実らせてきた。本研究領域は、この大きな幹に新しい「多極子自由度」の枝を育てようという革新的なものである。そのためには、近年、独立に進められてきた  $d$ 、 $f$  電子系研究を「拡張多極子」の概念の下に統合する必要がある。さらに、反転対称性のない「奇パリティ多極子」を導入することで、新しい電気と磁気の相関効果を創造する。結果として、日本の物質研究の基盤的な学術水準が大きく向上することを目指している。

### 【本研究領域の成果】

以下にあげる主な研究成果に象徴されるように、多極子自由度の研究は大きく進展している。

- ・**磁気八極子の巨大な異常ホール効果**：反強磁性的な  $d$  電子系  $Mn_3Sn$  に巨大な異常ホール効果が、複数の原子に拡がった拡張多極子である磁気クラスター八極子の応答であることを明らかにし、直接観測にも成功した。これは、従来の局在  $4f$  電子の多極子自由度が  $3d$  電子系に現れた例である。
- ・ **$4f$  電子系におけるスキルミオンの発見**： $MnSi$  で発見された磁気スキルミオン状態は、新しい磁気秩序状態として盛んに研究されている。 $MnSi$  と同じ空間群の  $EuPtSi$  でスキルミオン状態が発現することを発見した。スキルミオンが  $d, f$  電子系に共通に現れる磁気秩序であることを示した。
- ・**磁気トロイダル双極子秩序による電流磁気応答の発見**：理論的に予言されていた  $UNi_4B$  において電流印可磁気応答の検証に成功した。さらに、 $Ce_3TiBi_5$  などでも同様の応答が観測された。
- ・ **$UTe_2$  における多重超伝導相図の発見**：重い電子系超伝導体  $UTe_2$  が多重超伝導相図を示すことを発見した。超伝導が多重相図を示す報告は、 $UPt_3$  以来、約30年ぶりの2例目である。

### 【関連学問分野に与えたインパクトや波及効果】

拡張多極子の概念を導入し  $Mn_3Sn$  に磁気クラスター八極子の自由度を見いだしたことは、 $f$  電子系で議論されてきた多極子自由度の普遍性を示したことでインパクトが大きい。 $EuPtSi$  におけるスキルミオンの発見は、スキルミオン状態の普遍性と多様性を示した。さらに、そこでは  $f$  電子系で議論されてこなかった「ジャロシンスキー・守谷相互作用」が RKKY 型であるとして微視的に議論されている。これは、RKKY 相互作用の提唱から 60年経過しての新展開 である。磁気トロイダル秩序による電流磁気応答現象を含めて、応用面でマルチフェロイクスやスピントロニクスの分野への波及効果が見られる。

本領域の成果である準結晶の超伝導は、昨年度発足の新学術領域「ハイパー物質」につながっている。多重超伝導相の研究は、新学術領域「量子液体」等の縮退の強い量子相の研究への波及効果も大きい。

領域外に与えたインパクトや波及効果を検証するために、“Web of Science”で論文の被引用数を調べた。本領域の科研費番号が登録されている論文は合計で664篇(重複無し)であるが、総被引用数は4355回で平均が6.56回である。4355回のうち、自己引用を除く(領域外からの)被引用数は3011回であり、領域外からの関心も高いことがわかる。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域は、人材越境・世代交流・国際交流を通じて、強相関グローバル若手の育成を目指している。若手研究者を対象とした会合としては、講義形式の「J-Physics 若手夏の学校」(5日間)を1回、「サマースクール」を2回(ものづくり学校として3日、国際会議の前に1日)、「ものづくり学校」を4回(1回は前出のサマースクールと同時)開催し、参加者に修了証を発行した。

### 【人材越境の取組】

- ・計画研究での博士研究員の雇用で、従来の研究経歴にこだわらずに採用し、研究に取り組んだ。
- ・「ものづくり合宿」を主催し、広く領域外からも参加を呼びかけ本領域への参加を呼びかけた。(領域外から学生50名を含む85名の参加があり、38名に旅費を補助)
- ・他分野との交流のある物性科学領域横断研究会に積極的に若手の参加を呼びかけた。
- ・通常の研究として、*d, f*電子系の研究者が一同に会することで、研究領域の境界を感じさせなかった。

### 【世代交流の取組】

- ・「J-Physics 若手夏の学校」では、シニアと若手を取り混ぜた講師陣を編成して、世代交流を通じて若手育成に努めた。(講師を入れて81名の内、学生は41名で31名について旅費を支援)テキストは印刷し、さらに電子出版もした。
- ・全体研究会などの主催研究会では、若手研究者の研究発表を「研究内容のインパクト」「説明のわかりやすさ」「ポスターのまとめ方の見やすさ」の観点から審査して、計7回の会合で、優秀ポスター賞として延べ31名を表彰した。シニアが審査員となることで、世代交流を促進することができた。ポスター賞受賞者には、ニューズレターで自身の研究紹介をして貰っている。

### 【国際交流の取組】

- ・国際活動支援班の活動として、若手研究者の海外派遣(20名)と海外からの招へい(8名)をおこなった。海外派遣の場合は、渡航前に英語でのセミナー面接を実施した。帰国後は報告書を提出して、ニューズレターにも滞在の様子を紹介した。また、学生を派遣する場合は、指導教員の短期派遣も行うことで学生の研究が円滑に行われるように配慮した。
- ・「J-Physics 若手夏の学校」に米国在住の日本人研究者を講師として招き、英語での講義と米国での研究の紹介をしていただいた。これを機に、この研究者の処に3名の若手が派遣されて、先方の学生1名を日本に招へいした。
- ・2回の英語による講義形式のスクール(国際若手サマースクールとKINKEN WAKATE)を開催した。
- ・国際若手サマースクールでは、若手研究者が校長・副校長と実行委員を構成して運営を行うことで、運営能力だけでなく国際感覚も身に付けた。

### 【育成の実績】

以上の取組みの結果として、学生については以下の実績をあげた。

- ・学位取得：16名(内イタリア人1名)・学振特別研究員採用：10名・研究員採用：4名(KEK2名、理研、産総研)・助教採用：8名(岡山理科大、京大、愛媛大、分子研、東北大、横国大、兵庫県立大、徳山高専)

この他、学生は第10回日本学術振興会育志賞を1名が受賞し、日本物理学会学生優秀発表賞を3名が受賞した。在学中に海外に派遣された学生(16名)で既に学位を取得したのは7名であるが、このうち5名が助教として、1名が研究員として研究を続けている。

また、学位取得後に本領域に関わった若手研究者は以下の実績をあげた。

- ・教員採用：19名(東大物性研3名、広島大2名、東北大4名、北大、京大、埼玉大、室蘭工大、KEK、分子研、阪府大、首都大、東京理科大2名、北海道科学大、華中科技大、チャールズ大)・研究員：4名(ノースウエスタン大、産総研、理研、JAEA)・昇進5名：(東大講師2名、東北大准教授、都立大准教授、岡山大准教授)

このうち、海外派遣を受けた博士研究員1名は帰国後に講師として採用されている。文部科学大臣表彰若手科学者賞2名(2018と2020)、凝縮系科学賞2名(2018と2019)、日本物理学会若手奨励賞5名(2017、2018:2名、2019:2名)の受賞がある。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域は当初は、評価者としては北岡良雄先生（大阪大学・データビリティフロンティア機構・特任教授：所属と肩書きは中間評価時）と鹿野田一司先生（東京大学・大学院工学系研究科・教授）にお願いしていた。その後、北岡先生がご自身の仕事の都合で評価者を続けられることを固辞されたので、H29年度から上田寛先生（豊田理化学研究所常勤フェロー：所属と肩書きは当時）に評価者をお願いした。

お二人の評価者より、以下の評価コメントをいただいた。

鹿野田 一司（東京大学 大学院工学系研究科）

本評価者は、本研究領域の5年間の活動を、「固体中の電子構造の高次構造である多極子という概念が如何に強相関電子系の物性の理解や新規物性の開拓に有効であるかを示し、さらに多極子の概念を拡張し、電子物性科学の前線を切り拓いた」と評したい。

本領域は発足時に大きな2つの目標を掲げていた。ひとつは、電子物性研究における多極子概念を局在多極子、遍歴多極子、拡張多極子と一般化・体系化することで、広範な強相関電子系の理解に新機軸を与えること。もう一つは、強相関電子系として互いに独立な道を歩んできたd電子系とf電子系の研究を俯瞰する学融合を実現することであった。本領域は、この2つの柱を活動指針として活発な研究を展開し、多くの成果を得た。例えば、局在多極子と遍歴電子の相互作用系については、近藤系の物理学を益々豊かにする種々の秩序相や量子臨界状態が見出され、また、これまでd電子系が舞台となっていたスカーミオンが、f電子系において発見された。特に興味深いのは、スカーミオンのスピン変調の機構や、変調の空間スケールがd電子系のそれとは大きく異なる点である。物性研究の発展に欠かせない普遍性の発見と多様性の発現がd電子系とf電子系繋ぐ形で具体化された。遍歴電子系では、新奇で多様な超伝導状態が次々と明らかにされ、超伝導の常識が刷新されていく様は圧巻であった。拡張多極子関連では、新しい交差相関物性の理論的な予言や実験的な検証が注意深くなされた。その研究対象はp電子系である分子性物質にまで及び、ある種の強相関分子性物質に電場を印加することでスピン軌道相互作用を介さずにスピン流が生成するという全く新しい現象が予言され、そこに拡張多極子の概念が見事な形で導入された。本研究領域の成果がd電子、f電子の枠を越えて波及していることを示している。

本領域の活気ある研究活動は、総括班を中心とした領域運営の工夫と努力によって支えられていたことも指摘しておきたい。新学術領域研究には、単なる個々の研究の集合体ではない研究者間の連携が強く求められているが、この5年間で30回を超える国内外のイベントが企画されたことは特筆に値する。通常の研究会に加え、夏の学校やものづくり学校での若手研究者の育成、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、大型設備の共同利用化等、領域運営全般において創意工夫がみられた。私もその中の数回の集會に参加したが、若手からシニアの幅広い世代の研究者集団が熱くフランクに語り合える連携促進の場がうまく作られていることに感銘を受けた。

本領域参画者全員に残された課題は、本領域の研究成果を物性物理の枠を越えて“科学の成果”として、広く国内外のコミュニティーに伝えることであろう。昨今、Society 5.0 や科学技術イノベーションなど、刻々と変わる社会を反映した言葉が躍っている中で、それらを根幹から支える“物質”の中身を虚心坦懐に問う学問には時代を越えた普遍的な意義があると私は信じている。本研究領域の5年間の活動はこの任に十分に応え、その成果を糧にまた新しい始まりが起こることを切に願う程に実り有るものであったと言える。

北岡氏に代わり後半3年間の評価者を務めました。それまで3d遷移金属化合物を中心に物質開発をしてきた身でf電子系にはなじみがなくためらいましたが、物質開発を中心にということであり、また、本領域研究がd-f融合をうたっていて、これは勉強させていただく良い機会と思ってお引き受けした次第である。途中体調を崩し、全体会議を含めて3、4回ほどしか報告会に出席できませんでしたが、それでも、それまで持っていた“細かい”、“マニアック”といったf電子系に対する先入観が一掃され、これは誠に物性物理の王道を行く奥深い世界であると感銘を受けています。まず、印象に残った具体的な成果をいくつか取り上げ評価の一端とさせていただき、そのあと全体的な評価を記します。

一つはEuPtSiで、良質の単結晶育成により研究がさらに進展し、d電子系のMnSiと似たf電子系のスキルミオン秩序が明らかになった。d電子が伝導性と磁性の両方を担うMnSiに対し、EuPtSiではPtのd電子が伝導性を、Euのf電子が磁性を担っていて、同様のスキルミオン磁気相図を示すことは、d電子系とf電子系を俯瞰して把握するという本領域研究の目的にかなった成果であろう。d電子系の多極子系として注目されるMn<sub>3</sub>Snでは、さらに外場応答の成果報告もあり、有望な材料としてのポテンシャルを感じさせた。他にMnのニクタイトなどd電子系における拡張多極子の話題や四極子近藤格子系PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>における特異な輸送現象と多極子秩序による理解など、本領域研究の目的の一端が達成されつつある。

超伝導では何といてもトリプレット超伝導のUTe<sub>2</sub>であろう。U系超伝導体は本領域研究の目玉的な物質系であるが、強磁性相と超伝導相が近接してリエンラント超伝導を示すUCoGeやURhGeと違って2成分系のUTe<sub>2</sub>でトリプレット超伝導が出現することは同じく2成分系の強磁性UGe<sub>2</sub>において加圧により超伝導相が出現することと合わせて、U自身の強磁性と超伝導へのかかわりを示していて興味深い。Uの特徴は5f電子と6d電子が接近していることで、そこに新たな超伝導の物理を感じさせる成果である。超伝導では、色々なBiS<sub>2</sub>系超伝導体の開発も本領域研究の重要な成果である。一方、目玉の一つになると期待されたSr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub>の超伝導化はならなかったが、そもそも超伝導を示さないのかドーピング量の不足によるのか宿題である。他に、物質開発については、純良な単結晶育成をはじめ、私のような固体化学者が思いもつかないような層状物質の合成や対称性を考慮した物質の開発、キラル物質の右手系・左手系の作り分けなど、非常に印象に残っている成果である。

全体として、本領域研究ではこれまで数多くの研究成果を出していて、スピン軌道相互作用の強いf電子系と弱いd電子系をつなぐ領域における伝導性と磁性を「多極子」の概念に基づいて俯瞰的に把握し、多極子伝導系の学理を確立するという本領域研究の目的はほぼ達成されつつあると感じました。もともと本領域研究の特質は、新分野の開拓というより日本が長年培ってきた強相関電子系研究の深化にあると思います。その意味で、本領域研究は十分にしておかつ将来への布石ともなる成果を得ていて高く評価できます。他に特筆すべきは研究活動における理論と実験の連携で、特に若い理論家が多く、実験結果を解析するというのみならず理論に触発された実験も数多く見られ、素晴らしい連携がなされていると感じました。また、サッカーボールなどを例にとり対称性をもとに物質を理解させるといった子供たち向けアウトリーチ活動にも感銘を受けました。発足時にうたっている高効率デバイスや室温超伝導などの戦略的物質開発によるエネルギー問題、環境問題解決への貢献という点については、これらの成果を基に今後の発展に期待したい。