
J-Physics : 多極子伝導系の物理

領域番号 : 2704

平成27年度～令和元年度
科学研究費助成事業（科学研究費補助金）
（新学術領域研究（研究領域提案型））
研究成果報告書

令和4年6月

領域代表者 播磨 尚朝

神戸大学・理学研究科・教授

はしがき

19 世紀の電磁気学の完成から、その後の量子力学による素粒子としての電子の性質の理解を経て、固体中の電子の運動への理解は格段に深まってきた。20 世紀に入ると、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。これらの応用面でだけでなく、超伝導現象、量子ホール効果、近藤効果などのマクロな量子現象の発見やそれらのミクロな理解は、将来的な応用の研究へと繋がっていくものと期待されている。

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、世界の研究を日本はリードしてきた。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。この研究の流れを受けて、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、近藤効果に端を発する重い電子系は、高性能熱電材料としても期待されている。

一方で、ピエール・キュリーが 1894 年に結晶に関して述べた「線形な物理学的現象において、原因となる事象が持っていた空間対称性は、それによる結果にも現れなければならない」というキュリーの原理は、物質開発や物性研究にはこれまで十分に活かされてこなかった。それは、これまでの物性研究が主に自由電子モデルに基づいて行われてきたからにはほかならない。近年になって、結晶内原子に属する電子に固有のスピン軌道結合に起因する物性が結晶の対称性に強く関係することが分かってきた。スピン軌道結合による量子数は全角運動量 J であり、これが空間対称性により「多極子」という自由度に変わる。結晶の示す伝導現象を含む物理的現象は空間対称性に関連するミクロな「多極子」自由度に依存する。また、対称性由来の物理現象は、電子間相互作用が強い場合に、顕著に現れることが期待される。

最近の物性科学では、特異な量子伝導の研究が盛んに行われている。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、スピンホール効果などである。これらの現象を「 J 」が産み出す「多極子」を切り口に研究を展開して、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) が先導してきた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った。その共通認識のもと、従来の 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」の研究を推進することに至ったのが、本領域発足の背景である。

広い意味での電子の遍歴性と局所自由度との相関の研究は固体物理の大きな幹をなすものであり、それは多様な自由度に注目した多くの枝に分かれ、様々な機能材料の果実を实らせてきた。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った。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た。

研究組織は、総括班、国際活動支援班、4件の計画研究のほかに、公募研究として、前半（平成28～29年）が23件、後半（平成30～令和元年）が34件の計57件であった。基金である国際活動支援班を除き令和元年度で研究を終了した。世界的な感染症拡大の影響で、国際活動支援班は2年の活動延長を行い、令和3年度に研究を終了した。令和2年度には「成果取りまとめ」を行い、事後評価を受けた。事後評価区分は「A: 研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があった」である。

研究組織

計画研究

領域代表者 播磨尚朝 (神戸大学・理学研究科・教授)

(総括班)

研究代表者 播磨尚朝 (神戸大学・理学研究科・教授)
研究分担者 網塚 浩 (北海道大学・理学研究院・教授)
研究分担者 中辻 知 (東京大学・物性研究所・特任教授)
研究分担者 青木 大 (東北大学・金属材料研究所・教授)
研究分担者 野原 実 (岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授)
研究分担者 石田憲二 (京都大学・理学研究科・教授)
研究分担者 藤 秀樹 (神戸大学・理学研究科・教授)
連携研究者 秋光 純 (岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授)
連携研究者 鈴木博之 (東京大学・物性研究所・高度学術専門職員)

(国際活動支援班)

研究代表者 播磨尚朝 (神戸大学・理学研究科・教授)
研究分担者 網塚 浩 (北海道大学・理学研究院・教授)
研究分担者 中辻 知 (東京大学・理学系研究科・教授)
研究分担者 青木 大 (東北大学・金属材料研究所・教授)
研究分担者 野原 実 (広島大学・先進理工系科学研究科・教授)
研究分担者 石田憲二 (京都大学・理学研究科・教授)
連携研究者 藤 秀樹 (神戸大学・理学研究科・教授)
連携研究者 鈴木博之 (東京大学・物性研究所・高度学術専門職員)

(成果取りまとめ)

研究代表者 播磨尚朝 (神戸大学・理学研究科・教授)
研究分担者 網塚 浩 (北海道大学・理学研究院・教授)

(A01班)

研究代表者 中辻 知 (東京大学・物性研究所・特任教授)

研究分担者	榑原俊郎	(東京大学・物性研究所・教授)
研究分担者	小林寿夫	(兵庫県立大学・物質理学研究科・教授)
研究分担者	中西良樹	(岩手大学・理工学部・教授)
研究分担者	鈴木通人	(東北大学・金属材料研究所・准教授)
研究協力者	佐藤 卓	(東北大学・多元物質科学研究所・教授)
研究協力者	有田亮太郎	(理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー)

(B01 班)

研究代表者	青木 大	(東北大学・金属材料研究所・教授)
研究分担者	石田憲二	(京都大学・理学研究科・教授)
研究分担者	神戸振作	(日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・上級研究主席)
研究分担者	井澤公一	(大阪大学・基礎工学研究科・教授)
研究分担者	松田達磨	(首都大学東京・理学研究科・准教授)
研究分担者	柳瀬陽一	(京都大学・理学研究科・教授)

(C01 班)

研究代表者	網塚 浩	(北海道大学・理学研究院・教授)
研究分担者	藤 秀樹	(神戸大学・理学研究科・教授)
研究分担者	中尾裕則	(高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授)
研究分担者	高阪勇輔	(大阪府立大学・工学研究科・助教)
研究分担者	楠瀬博明	(明治大学・理工学部・専任教授)
研究分担者	御領 潤	(弘前大学・理工学研究科・教授)
研究協力者	柳 有起	(東北大学・金属材料研究所・助教)
研究協力者	飛田 豊	(弘前大学・理工学研究科・研究員)
研究協力者	植木 輝	(弘前大学・理工学研究科・研究員)
研究協力者	田端千紘	(京都大学・複合原子力科学研究所・助教)

(D01 班)

研究代表者	野原 実	(岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授)
研究分担者	鬼丸孝博	(広島大学・先端物質科学研究科・教授)
研究分担者	水口佳一	(首都大学東京・理学研究科・准教授)
研究分担者	秋光 純	(岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授)
研究分担者	播磨尚朝	(神戸大学・理学研究科・教授)

公募研究

研究代表者	大槻純也	(東北大学・理学研究科・助教)
研究代表者	古賀昌久	(東京工業大学・理学院・准教授)

研究代表者	椎名亮輔	(琉球大学・理学部・教授)
研究代表者	出口和彦	(名古屋大学・理学研究科・講師)
連携研究者	佐藤憲昭	(名古屋大学・理学研究科・教授)
連携研究者	石政 勉	(北海道大学・工学研究院・教授)
研究代表者	関山 明	(大阪大学・基礎工学研究科・教授)
連携研究者	木須孝幸	(大阪大学・基礎工学研究科・准教授)
連携研究者	藤原秀紀	(大阪大学・基礎工学研究科・助教)
研究代表者	渡辺真仁	(九州工業大学・工学研究院・准教授)
研究代表者	坂井 徹	(兵庫県立大学・物質理学研究科・教授)
研究代表者	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)
連携研究者	徐 卓	(日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・博士研究員)
研究代表者	野尻浩之	(東北大学・金属材料研究所・教授)
研究代表者	野島 勉	(東北大学・金属材料研究所・准教授)
研究代表者	大貫惇睦	(琉球大学・理学部・客員教授)
連携研究者	仲間隆男	(琉球大学・理学部・教授)
連携研究者	辺土正人	(琉球大学・理学部・教授)
連携研究者	竹内徹也	(大阪大学・低温センター・助教)
研究代表者	服部一匡	(首都大学東京・理工学研究科・准教授)
連携研究者	堀田貴嗣	(首都大学東京・理工学研究科・教授)
研究代表者	池田浩章	(立命館大学・理工学部・教授)
研究代表者	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)
研究代表者	大串研也	(東北大学・理学研究科・教授)
連携研究者	松原正和	(東北大学・理学研究科・准教授)
研究代表者	品岡 寛	(埼玉大学・理工学研究科・助教)
研究代表者	古賀幹人	(静岡大学・教育学部・教授)
研究代表者	大原繁男	(名古屋工業大学・工学研究科・教授)
連携研究者	岸根順一郎	(放送大学・教養学部・教授)
連携研究者	戸川欣彦	(大阪府立大学・工学研究科・教授)
連携研究者	松本裕司	(名古屋工業大学・工学部・助教)
研究代表者	高島敏郎	(広島大学・先端物質科学研究科・教授)
連携研究者	半澤克郎	(東京理科大学・理工学部・教授)
連携研究者	浴野稔一	(広島大学・総合科学研究科・教授)
連携研究者	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)
連携研究者	木村真一	(大阪大学・生命機能研究科・教授)
連携研究者	横谷尚睦	(岡山大学・自然科学研究科・教授)
研究代表者	Kosmas Prassides	(東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授)
連携研究者	高林康裕	(東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教)

連携研究者	中川剛志	(東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助手)
連携研究者	Melita Menelaou	(東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助手)
連携研究者	Robert Sobota	(東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助手)
研究代表者	阿部伸行	(東京大学・新領域創成科学研究科・助教)
連携研究者	有馬孝尚	(東京大学・新領域創成科学研究科・教授)
研究代表者	岡本佳比古	(名古屋大学・工学研究科・准教授)
連携研究者	山川洋一	(名古屋大学・理学研究科・助教)
連携研究者	山影 相	(名古屋大学・工学研究科・特任助教)
研究代表者	宮坂茂樹	(大阪大学・理学研究科・准教授)
連携研究者	田島節子	(大阪大学・理学研究科・教授)
連携研究者	中島正道	(大阪大学・理学研究科・助教)
連携研究者	田中清尚	(分子科学研究所・極端紫外光研究施設 (UVSOR)・准教授)
連携研究者	熊井玲児	(高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授)
研究代表者	井口 敏	(東北大学・金属材料研究所・准教授)
研究代表者	星野晋太郎	(埼玉大学・理工学研究科・助教)
研究代表者	松林和幸	(電気通信大学・情報理工学研究科・准教授)
研究協力者	上床美也	(東京大学・物性研究所・教授)
研究代表者	関山 明	(大阪大学・基礎工学研究科・教授)
研究代表者	菅原 仁	(神戸大学・理学研究科・教授)
研究代表者	渡辺真仁	(九州工業大学・工学研究院・准教授)
研究代表者	椎名亮輔	(琉球大学・理学部・教授)
研究代表者	坂井 徹	(兵庫県立大学・物質理学研究科・教授)
研究代表者	水戸 毅	(兵庫県立大学・物質理学研究科・教授)
研究協力者	中井祐介	(兵庫県立大学・物質理学研究科・准教授)
研究代表者	脇舎和平	(室蘭工業大学・工学研究科・助教)
研究代表者	野尻浩之	(東北大学・金属材料研究所・教授)
研究代表者	橘高俊一郎	(東京大学・物性研究所・助教)
研究代表者	平井大悟郎	(東京大学・物性研究所・助教)
研究協力者	廣井善二	(東京大学・物性研究所・教授)
研究代表者	藤本 聡	(大阪大学・基礎工学研究科・教授)
研究協力者	水島 健	(大阪大学・基礎工学研究科・准教授)
研究協力者	多田靖啓	(東京大学・物性研究所・助教)
研究代表者	小手川恒	(神戸大学・理学研究科・准教授)
研究代表者	小林達生	(岡山大学・自然科学研究科・教授)
研究協力者	荒木新吾	(岡山大学・自然科学研究科・准教授)
研究代表者	大貫惇睦	(琉球大学・理学部・客員教授)
研究協力者	仲間隆男	(琉球大学・理学部・教授)

研究協力者	辺土正人	(琉球大学・理学部・教授)
研究協力者	竹内徹也	(大阪大学・低温センター・助教)
研究代表者	池田浩章	(立命館大学・理工学部・教授)
研究代表者	速水 賢	(東京大学・工学系研究科・講師)
研究代表者	柳澤達也	(北海道大学・理学研究院・准教授)
研究代表者	大槻純也	(岡山大学・異分野基礎研究所・准教授)
研究代表者	大串研也	(東北大学・理学研究科・教授)
研究協力者	松原正和	(東北大学・理学研究科・准教授)
研究協力者	青山拓也	(東北大学・理学研究科・助教)
研究代表者	阿部伸行	(東京大学・新領域創成科学研究科・助教)
研究協力者	有馬孝尚	(東京大学・新領域創成科学研究科・教授)
研究協力者	徳永祐介	(東京大学・新領域創成科学研究科・准教授)
研究代表者	瀧川 仁	(東京大学・物性研究所・教授)
研究協力者	廣井善二	(東京大学・物性研究所・教授)
研究協力者	武田 晃	(東京大学・物性研究所・博士研究員)
研究代表者	塩見雄毅	(東京大学・総合文化研究科・准教授)
研究代表者	大原繁男	(名古屋工業大学・工学研究科・教授)
研究協力者	戸川欣彦	(大阪府立大学・工学研究科・教授)
研究協力者	中村翔太	(名古屋工業大学・工学研究科・助教)
研究協力者	穴戸寛明	(大阪府立大学・工学研究科・准教授)
研究代表者	Robert Peters	(京都大学・理学研究科・講師)
研究代表者	本山 岳	(島根大学・学術研究院理工学系・准教授)
研究協力者	藤原賢二	(島根大学・学術研究院理工学系・教授)
研究代表者	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)
研究代表者	Kosmas Prassides	(東北大学・材料科学高等研究所・教授)
研究協力者	高林康裕	(東北大学・材料科学高等研究所・助教)
研究協力者	中川剛志	(東北大学・材料科学高等研究所・助手)
研究協力者	Zhanqiang Xu	(東北大学・材料科学高等研究所・助手)
研究代表者	谷垣勝己	(東北大学・理学研究科・教授)
研究代表者	岡本佳比古	(名古屋大学・工学研究科・准教授)
研究協力者	山川洋一	(名古屋大学・理学研究科・助教)
研究協力者	山影 相	(名古屋大学・理学研究科・助教)
研究代表者	宮坂茂樹	(大阪大学・理学研究科・准教授)
研究代表者	松平和之	(九州工業大学・工学研究院・教授)
研究協力者	中村和磨	(九州工業大学・工学研究院・准教授)
研究協力者	求 幸年	(東京大学・工学系研究科・教授)
研究協力者	長谷川巧	(広島大学・総合科学研究科・助教)

研究協力者 筒井智嗣 (SPring-8・主幹研究員)
 研究協力者 水牧仁一朗 (SPring-8・副主幹研究員)
 研究協力者 矢島 健 (東京大学・物性研究所・助教)

交付決定額 (配分額) (令和2年度「成果取りまとめ」を含む)

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
令和2年度	3,900,000円	3,000,000円	900,000円
総計	1,627,210,000円	1,251,700,000円	375,510,000円

研究発表

研究発表については、科研費データベースなどで既に公開されていることもあり、ここでは主要なものを記載することにとどめる。

雑誌論文

研究項目 A01

計画研究 計 145 件 (査読有 144 件、国際共著 32 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 累計 147 件 (査読有 144 件、国際共著 19 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 $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ ”, *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 TaNiSe_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 κ -(BEDT-TTF) $_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2\text{Cl}]$ ”, *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 $\text{CeRu}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$ ”, *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 β - 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 $\text{SU}(N)$ 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

計画研究 計 246 件 (査読有 242 件、国際共著 119 件)

1. “Unconventional Superconductivity in Heavy Fermion UTe_2 ”, *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_2 Revealed by ^{125}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_2 ”, *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_2Si_2 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 $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ ”, *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 $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ 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 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Mn}_2\text{As}_2$ ”, *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 ^{29}Si Knight shift in the superconducting state of URu_2Si_2 ”, *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 累計 96 件 (査読有 95 件、国際共著 21 件)

1. “Electronic Structure and Superconducting Gap Structure in BiS_2 -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]

- “Successive Symmetry Breaking in a $J_{\text{eff}} = 3/2$ Quartet in the Spin–Orbit Coupled Insulator $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ ”, *D. Hirai, and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **88**, 064712-1-8 (2019).
- “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).
- “Quasi-particle evidence for the nematic state above T_c in $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”, *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).
- “Magnetic correlations in the pressure-induced superconductor CrAs investigated by ^{75}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).
- “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).
- “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, and L. P. Regnault, Nat. Commun., 査読有, **7**, 13075-1-7 (2016).
- “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

計画研究 計 108 件 (査読有 107 件、国際共著 28 件)

- 「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).
- “Electric Toroidal Quadrupoles in Spin-Orbit Coupled Metal $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ ”, *S. Hayami, Y. Yanagi, H. Kusunose, Y. Motome, Phys. Rev. Lett., 査読有, **122**, 147602-1-6 (2019) [Cover Image].
- “Order and disorder in the magnetization of the chiral crystal CrNb_3S_6 ”, *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].
- “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).
- “Evidence of a New Magnetoelectric Effect of Current-Induced Magnetization in a Toroidal Magnetic Ordered State of UNi_4B ”, *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]
- “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].
- “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).
- “Peculiar Magnetism of UAu_2Si_2 ”, *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).
- “ $S = 1/2$ Triangular-lattice antiferromagnets $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ and CsCuCl_3 — 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).
- “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 累計 145 件 (査読有 144 件、国際共著 34 件)

- “Pressure Effect on the Chiral Helimagnetic Order in YbNi_3Al_9 ”, *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).
- “Magnetoelectric Effect in the Antiferromagnetic Ordered State of Ce_3TiBi_5 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).
- “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].
- “Large magnon contributions to thermal conductance in quasi-one-dimensional Fe-based ladder compounds $\text{BaFe}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ ”, *F. Du, Y. Ueda, and K. Ohgushi, Phys. Rev. Lett. 査読有, **123**, 086601-1-5 (2019).
- “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, **99**, 165134-1-17 (2019).
- “ ^{51}V -NMR study on the $S=1/2$ square lattice antiferromagnet $\text{K}_2\text{V}_3\text{O}_8$ ”, *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).
- “Observation of a Magnetopiezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal EuMnBi_2 ”, *Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, and S. Ishiwata, Phys. Rev. Lett., 査読有, **122**, 127207-1-5 (2019).
- “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).
- “Evidence for the Single-Site Quadrupolar Kondo Effect in the Dilute non-Kramers System $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ir}_2\text{Zn}_{20}$ ”, *T.

- Yanagisawa, H. Hidaka, H. Amitsuka, S. Zherlitsyn, J. Wosnitzer, 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 YbNi₃Ga₉ 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

計画研究 計 173 件、(査読有 172 件、国際共著 59 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 IrTe₂ 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 4f² system Y_{1-x}Pr_xIr₂Zn₂₀", *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 NaSn₂As₂", *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 Yb₄Sb₃", *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 BaPd₂As₂ Induced by Soft Phonons in the ThCr₂Si₂-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 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).
8. "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. Yokoya, and N. L. Saini, Phys. Rev. B, 査読有, **95**, 064515-1-6 (2017).
9. "Exotic Quadrupolar Phenomena in Non-Kramers Doublet Systems – A Case of PrT₂Zn₂₀ (T = Ir, Rh) and PrT₂Al₂₀ (T = V, Ti) –", *T. Onimaru, and *H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **85**, 082002-1-22 (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).

公募研究 累計 39 件 (査読有 36 件、国際共著 19 件)

1. "Raman Scattering Investigation of Structural Transition in Ca₅Ir₃O₁₂", *T. Hasegawa, W. Yoshida, K. Nakamura, N. Ogita, and K. Matsuhira, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **89**, 054602-1-11 (2020).
2. "Itinerant antiferromagnetic BaMn₂Pn₂'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. Arčon, and K. Tanigaki, Phys. Rev. B, 査読有, **99**, 195111-1-9 (2019).
3. "π-electron S = 1/2 quantum-spin-liquid state in an ionic polyaromatic hydrocarbon", *Y. Takabayashi, M. Menelaou, H. Tamura, N. Takemori, T. Koretsune, A. Štefaničič, G. Klupp, A. J.C. Buurma, Y. Nomura, R. Arita, D. Arčon, M.J. Rosseinsky, and *K. Prassides, Nat. Chem., 査読有, **9**, 635-643 (2017).
4. "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).

学会発表

累計 2566 件、(国際学会 877 件、招待 592 件)

<国際学会発表>

1. "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)
2. "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)
3. "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)
4. "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)
5. "Structural Phase Diagram and Anomalous Magnetic Properties in Superconductor of LaO_{1-x}F_xBiS₂ (Ln: rare earth elements)", T.D. Matsuda, 30th International Symposium on Superconductivity, December 13-15, 2017, Hong Kong, China (招待講演)

6. “NMR Study of Superconducting and rotational symmetry in URu₂Si₂”, S. Kambe, 28th International Conference on Low-Temperature Physics (LT28), August 9-16, 2017, Gothenburg, Sweden (招待講演)
7. “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)
8. “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)
9. “Möbius Topological Superconductivity in UPT₃ and UCoGe”, Y. Yanase, International Conference on Strongly Correlated Electrons 2017 (SCES 2017), July 17-21, 2017, Prague, Czech Republic (招待講演)
10. “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)
11. “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)
12. “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)

図書

計 14 件

1. "Compendium of Surface and Interface Analysis", A. Skiyama (共著), Springer (2018).
2. "Physics of Heavy Fermions: Heavy Fermions and Strongly Correlated Electrons Systems", Yoshichika Onuki, World Scientific Publishing Company, (2018).
3. "Crystal Growth of Intermetallics", Yoshichika Onuki (共著), De Gruyter (2018).
4. "Proceedings of J-Physics 2019: International Conference on Multipole Physics and Related Phenomena" as JPS Conference Proceedings Vol. 29, Shinsaku Kambe (Editor-in-Chief), The Physical Society of Japan (2020).
5. "スピンと軌道の電子論 (KS 物理専門書)", 楠瀬 博明, 講談社、(2019) .
6. "Resonant X-Ray Scattering in Correlated Systems", Hironori Nakao (共著), Springer (2017).
7. "Physics and chemistry of carbon-based materials : basics and applications", K. Kobayashi, K. Horigane, R. Horie, J. Akimitsu (共著), Springer (2018).
8. "拡張多極子が拓くスピン軌道物性の新展開", 編集委員：秋光 純・網塚 浩・神戸振作・岸根順一郎・野原 実・播磨尚朝, 固体物理特集号、Vol. 55 No.11(通巻 657 号)、アグネ技術センター (2020).

研究成果による産業財産権の出願・取得状況

出願 (計 2 件)

名称：超伝導体、発明者：水口佳一、曾我部遼太、権利者：公立大学法人首都大学東京、種類：特許、番号：特願 2018-074414、出願年 2018 年、国内外の別：国内

名称：熱電変換素子及び熱電変換装置、発明者：中辻知、酒井明人、種類：特許、番号：特願 2019-086716、出願年 2019 年

その他

<Web、マスメディア等による情報発信>

1. 「東北大、ウラン化合物 UTe₂ 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)
2. 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流生成機構を発見」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)
3. 「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)
4. 「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)
5. 「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)
6. 「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流-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)
7. 「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)
8. 「Physics World 2018 Breakthrough of the Year - Superconductivity spotted in a quasicrystal」出口和彦、Physics World (2018.12.13)
9. 「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)
10. 「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. 「電気と磁気の不思議な相関：鏡の国のサッカーゲーム」、講師:播磨尚朝、網塚 浩、岸根 順一郎、柳澤 達也、“科学”からの招待状、放送大学、2020年12月初放映以降BS231で随時放映中
<https://bangumi.ouj.ac.jp/v4/bslife/detail/01A00002.html>
2. 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)
3. 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)
4. 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)
5. 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]
6. 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)
7. 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)
8. 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)
9. 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)
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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)

研究成果

【概要】

本領域の推進によって、多極子自由度を軸にした物性研究は大きく進展している。個別の具体的な研究成果は研究項目ごとに記載するが、全体を通じて、電子の局所自由度を決める局所対称性や物理的性質を決定する結晶の対称性に応じた議論が広く行われるようになってきたことは、今後の物質開発や物理現象の解明がミクロな視点から格段に進むことが期待できる。個別の現象に関する研究では、欧米を中心とする諸外国でも盛んに行われているが、多極子や関連する対称性に関する認識が広く研究者に浸透したことは、この先、日本が物性研究で大きく先んじる礎になった成果と言える。

また、若手の人財育成についても、多くの学生が学位を取得し研究職に就くなど大きな成果があった。これら若手を中心に国際活動を牽引することによって、多くの国際共著論文（累計 526 件）を出版した。

【主な研究成果】

得られた研究成果のうち、特に重要なものは以下の 4 つである。

- ・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、複数の原子に広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ックスやスピントロニクス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、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。

【今後の研究の展開】

多極子という局所的な電子自由度の研究は、その自由度を産み出す局所対称性と結晶全体の対称性に支配される物理的性質の研究へと展開してきた。中でも、軌道自由度が大きな d 電子系や f 電子系ではより多くの自由度を産み出すことが知られ、多極子の概念も、複数サイトにまたがるクラスター多極子や複数軌道にまたがるハイブリッド多極子という拡張された多極子へと広がった。今後は、これらの多様な多極子自由度に注目して物質開発や物性研究、さらには新機能物質の創出などが広範囲に行われることが期待される。

【項目ごとの研究成果の概要】

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步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。

【項目ごとの主な研究成果】

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

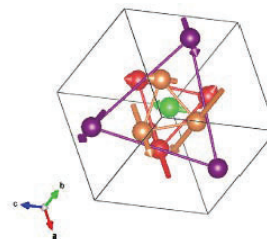
・UPd₂Al₃の超伝導ギャップの水平線状ノードの確認

反強磁性と共存する超伝導を示す重い電子系物質 UPd₂Al₃ 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 Pr₅Ru₃Al₂ (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 90Å 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。(J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 012001 (2020) Invited Review Paper)

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 Mn₃Sn 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 Mn₃Sn 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 Mn₃Sn と Mn₃Ge 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 $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ($T = \text{Ti, V}$) では Pr イオンの結晶既定状態である Γ_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 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ のみならず、反強四極子秩序 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ 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リング則が成り立つことを見出した。(日本物理学会誌 **73**, 292 (2018).)

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 $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ の異方的な磁場温度相図の決定

$\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ 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)

・ URu_2Si_2 の超伝導状態におけるナイトシフトの観測

URu_2Si_2 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、 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Mn}_2\text{As}_2$ 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。(Phys. Rev. B, **96**, 064432 (2017), Editors' Suggestion)

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

・URu₂Si₂の隠れた秩序相における対称性の精密観測

URu₂Si₂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

UPt₃ 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、UPt₃ の A 相および強磁性 UCoGe がそれぞれ Z₂, Z₄ 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、UTe₂ 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、UTe₂, UPt₃, UBe₁₃, SrPtAs, MoS₂ などのギャップ構造を示した。(Phys. Rev. Research **1**, 013012 (2019).)

B01 (公募・大貫、橋高、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らかにした。(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。SrTiO₃、MoS₂、NbSe₂ 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、MoS₂ 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・楠瀬) 若手の柳との共同研究

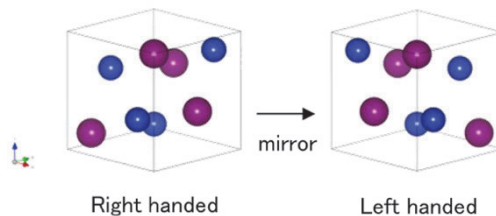
・拡張多極子の理論の進展

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模型に基づく理論を構築した。(J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083703 (2017).)

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った。(Jpn. J. Appl. Phys. **61** 045501 (2022).)



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。(Phys. Rev. B **103**, 184426 (2021).)

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。(Physica B: Condensed Matter **536**, 392 (2018).)

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、Mn₃Sn 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 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。(J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 083703 (2020).)

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 (UNi₄B)や電気トロイダル四極子秩序 (Cd₂Re₂O₇)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

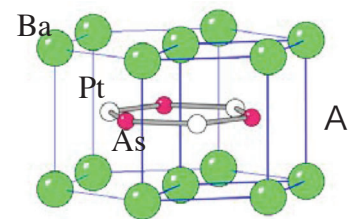
Ce ジグザグ鎖構造を持つ重い電子系新物質 Ce_3TiBi_5 を開発し、電流下で精密磁化測定を行った。その結果、反強磁性 ($T_N = 5 \text{ K}$) より高温では電流印加に影響を受けることなく、転移温度以下においてのみ電流に比例する磁化の増大を観測した。また、誘起磁化は磁場には全く影響されず、 $4f$ 電子を持たない La_3TiBi_5 においては観測されないことを確認した。これらの結果から UNi_4B に続き、金属反強磁性体における電流誘起磁化現象の紛れのない例を見出すことに成功した。(J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 033703 (2020).)

研究項目 D01 強相関多極子物質の開発

D01 (計画・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。(J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 063702 (2018), J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073708 (2018), JPS Conf. Proc. **30**, 011044 (2020).)



BaPtAs の結晶構造

・ AuTe_2 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 AuTe_2 に Pd をドーピングすると Te_2 二量体形成を伴う構造相転移が抑制され、 $T_c = 4.6 \text{ K}$ 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

・プラセオジム化合物における特異な四極子状態の解明

プラセオジムがダイヤモンド構造を形成する立方晶系 $\text{PrT}_2\text{X}_{20}$ ($T = \text{Ir, Rh}$, $X = \text{Zn}$; $T = \text{Ti, V}$, $Z = \text{Al}$) における物質横断的な研究から、プラセオジ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) 領域内共同研究

・ CsW_2O_6 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 CsW_2O_6 が 210 K において W_3 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。(Nat. Commun. **11** 3144 (2020).)

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 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、 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説明

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 CoSe_2 、 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 NiSbS 、 PdBiSe には分裂が存在し、 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 $\text{Bi } 6p$ と $\text{Sb } 5p$ 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 Yb_4Sb_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、 BaPtP が約 0.20 K で、 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、 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 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 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 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。(Materials Chemistry Frontiers **4**, 3521 (2020).)