

A S Y M M E T R Y

NewsLetter

#06

2026.03

Unveiling, Design, and Development of Asymmetric Quantum Matters

CONTENTS

巻頭言

News Letter第6号 巻頭言	鬼丸 孝博	02
--------------------------	-------	----

今号の研究成果

ジャイロイド金属有機構造体における圧電転移	鬼頭 俊介 / 石川 孟	03
らせん磁性半金属 α -EuP ₃ における p波型スピン分裂バンド由来の非相反電気伝導現象	メイヨー アレックス浩 / 小野瀬 佳文	06

公募班成果報告

A01

ARPESによるアシンメトリ量子物質のバンド構造の可視化	木村 昭夫	12
軟X線吸収・散乱による拡張磁気多極子観測手法の開拓	山崎 裕一	14
放射光X線回折を用いたアシンメトリ量子物質の構造と電子軌道の研究	鬼頭 俊介	15

A02

非対称な熱流とその交差相関の開拓	水上 雄太	16
バルク超伝導体を用いた巨大超伝導交差応答の研究	石原 滉大	17
ベクトル圧力：一軸圧力回転装置の開発と実証	池田 敦俊	18
量子アシンメトリ物質における熱・弾性交差相関現象の開拓	小野瀬 佳文	19
アシンメトリ量子の検出・可視化手法の開発と人工アシンメトロンクスへの展開	松原 正和	20
アシンメトリ磁性体の示す非自明な時間反転対称性破れの 光測定技術を用いた探索	米澤 進吾	21

B01

準結晶と近似結晶における奇パリティ結晶場と奇パリティ多極子の開拓	渡辺 真仁	22
ミクロな非対称性が誘起する超伝導非相反現象	大同 暁人	23
Anomalous Hall conductivity in a van der Waals ferromagnet under pressure	Harald O. Jeschke	24

D01

電子自由度のアシンメトリによるトポロジカル相制御	上田 健太郎	25
軸性アニーリングによる強相関非対称物質の創製	志村 恭通	26
局所的に空間反転対称性の破れたウラン化合物の物質探索と超伝導	青木 大	27
ハニカム格子超伝導体における軌道転移の発見	石川 孟	28
原子レベルで制御された空間アシンメトリに起因する磁気相互作用	松野 丈夫	29
表面非対称電子軌道の制御による非相反伝導特性の最大化	金澤 直也	30
RuO ₂ 薄膜における超伝導と磁性	打田 正輝	31



研究会・滞在報告

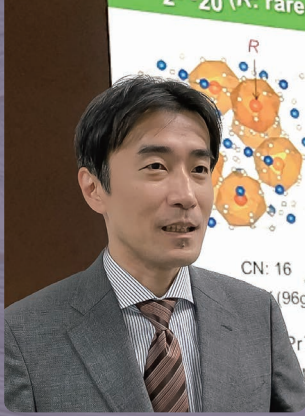
アシンメトリ量子研究の現在地	大原 繁男	32
クロアチア研究会・国際会議参加報告	沼 昂輝	35
第19回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」参加報告	川又 雅広	36
トピカルミーティング「Workshop on theory of cross correlations, multipoles, and computational material design 2025 Winter」@御殿場	佐藤 匠	37
国際会議参加報告 REXS2025, Spain	松村 武	38
討論会「アシンメトリ量子物質の機能物性に関する現状の把握と展望」	山根 悠	39

コラム・報告

日本学術会議公開シンポジウム共催報告 「量子が世界を変える — 科学の100年と未来への挑戦」	網塚 浩	41
茨城大学 岩佐研究室&研究紹介	熊田 隆伸	42
MultiPie・QtDrawで学ぶ多極子表現と群論	大槻 純也	45
アシメ★通信		52

事務局からのお知らせ

2026年4月からの関連行事		54
事務局からのお知らせ		55



News Letter第6号 巻頭言

領域代表

鬼丸 孝博

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

本研究領域の第Ⅰ期公募研究の研究期間が終了となるのを機に、1月6-8日に名古屋工業大学で領域全体会議・成果報告会を開催しました。本号の記事にもあるように、計画研究メンバーの成果報告に加えて、公募研究の方々からは華々しい研究成果の数々が報告されました。公募研究が加わったことによる研究計画とのシナジー効果は絶大で、アシンメトリ量子物質を対象とした新たな研究テーマが、領域内の強い連携から次々に創出されています。第Ⅰ期の公募研究の皆さんには、本研究領域の研究活動に積極的に参加していただき、深く感謝いたします。

令和7年10月に、国際ワークショップ Research Exchange between Croatia and Japanをクロアチア・ザグレブの物理学研究所で開催しました。本研究領域から大学院生を含む6名が参加し、アシンメトリ量子物質に関わる研究の成果や展望について講演を行い、国際的な研究交流のよい機会となりました。続けて、アドリア海に浮かぶHvar島で開催されたInternational Conference on Strongly Correlated Quantum Materials (アシンメトリ量子 共催)では、本研究領域から3名が招待講演を行い、本研究領域の研究内容について紹介し、またそれぞれの最新の研究成果について講演を行いました。世界各国から著名な研究者が多く参加しており、またきれいなアドリア海を見下ろせるホテルに滞在しての会議だったということもあり、研究に関する意見交換や議論も活発で、本研究領域の成果を国際的に発信する貴重な機会となりました。(詳細については、本号の別記事を参照。) 国際交流に関しては、今年9月24-26日に大阪大学にて、International Conference on Asymmetric Quantum Matters, “Asymmetry 2026”を主催します。国際的な研究交流はもちろんですが、次世代を担う若手研究者の国際的な交流が広がることも期待しつつ、準備を進めてまいります。一般講演とポスター講演も募集していますので、多くの皆様のご参加をお待ちしております。

本領域で設置された共用機器も本格的に稼働し、新しいデータも出始めてきています。総括班で設置した無冷媒低温物性評価システム(広島大学に設置)では、これまでの磁場中での電気伝導やホール伝導、比熱の測定に加えて、非相反電気伝導の測定ができるようになりました。また、集束イオンビーム加工装置(日本原子力研究開発機構に設置)を活用した領域内の共同研究も、いよいよ活発になってきています。他にも多くの共用装置が全国各地に設置されていますので、皆さんの積極的なご利用をお願いします。また、テーマを絞った討論会やトピカルミーティングを開催しますので、皆さんからのご提案をお待ちしております。

令和8年度から第Ⅱ期の公募研究が加わり、新たな体制となって残り2年間の研究活動がスタートします。5月26-28日には、那須で領域全体会議・公募研究キックオフ会議を開催します。また、上記の通り、9月24-26日には、大阪で国際会議Asymmetry 2026を開催します。国内にとどまらず、国際的な研究交流と連携をさらに進めて、アシンメトリ量子のコンセプトを広げる挑戦的な研究へと展開したいと考えております。

本領域の活動に関するご意見やご提案は、secretariat@asymmetry.hiroshima-u.ac.jpまでお寄せください。



ジャイロイド金属有機構造体における圧電転移

鬼頭 俊介

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

石川 孟

東京理科大学理学部第一部応用化学科 講師

結晶性固体において原子や分子の配列に注目すると、実に多様な幾何学構造を見いだすことができます。どのような幾何学構造の上に、どのような自由度が配置されているかを考えることは、物性を理解するうえで最も重要なプロセスの一つです。

数ある幾何学構造の中でも、1970年に数学的に定義された三次元の周期極小曲面である「ジャイロイド」(図1a)は、多くの研究者を魅了してきました。ジャイロイド曲面は空間を二分し、それぞれの空間に「ジャイロイド格子」とよばれる三次元ネットワークを収容することができます。このとき、単位胞に逆向きのカイラリティをもつジャイロイド格子を入れ子状に配置することが出来る珍しい構造をとります。局所的には、原子が三方向に120°の角度を持って結合しているため、三次元ハニカム格子やハイパーオクタゴン格子とも呼ばれています。自然科学分野では1960年代から認識され、これまでに生体、ポリマー、液晶、プラスチックなどの幅広い系においてジャイロイド構造が確認されており、力学的性質、光学的性質、イオン伝導性が研究されてきました。ナノメートルからマイクロメートルに至る様々なスケールでジャイロイド構造が実現しており、近年では3Dプリンターで作ったジャイロイド構造体が高強度材料としても注目を集めています。

一方で、最小のジャイロイド構造として、電荷やスピンといった電子がもつ自由度をジャイロイド格子に並べた系を考えることができます。これらは物性物理学の分野で理論的に研究されており、量子スピン液体[1]やフラットバンドをもつ金属[2]など(図2b)、基礎科学から電子機能開拓まで幅広い興味を集める電子状態の実現が予測されています。さらに、ジャイロイドは立方晶の空間群 $I4_32$ (点群: 432, 図1c)に属するカイラルな構造であるため、非相反物性やらせん型スピン構造と関連した興味深い現象の発現も期待されます。しかし、構成単位の高いポリマーや液晶物質においては、ジャイロイド構造に並んだ電子自由度間の相互作用が物性に現れた例は知られておらず、新たな物質系を開拓する必要がありました。

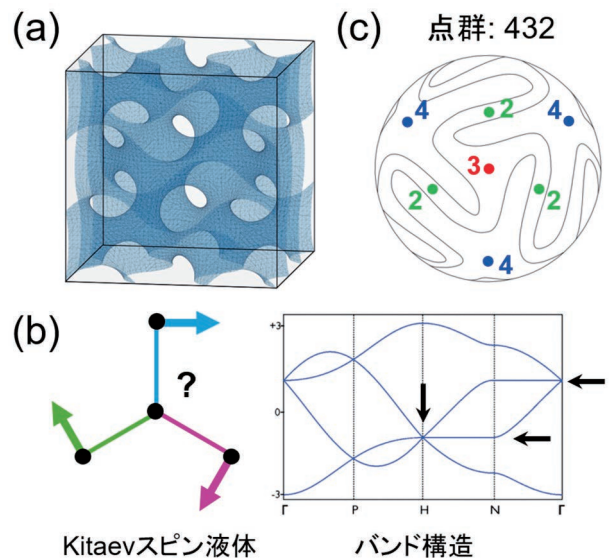


図1 (a) ジャイロイドと呼ばれる三次元周期極小曲面。三角関数を用いて、 $\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0$ のように表すことができる。(b) ジャイロイド格子で予測される興味深い物性。ハニカム格子の一種のため、キタエフ相互作用によって量子スピン液体が実現すると考えられている。また、バンド構造にはディラック点やフラットバンドの形成が期待される。(c) 2014年のFIFAワールドカップの公式サッカーボールの模様。ボール上の各点に付された数字($n = 2, 3, 4$)は、その点の周りに $(360^\circ)/(n^\circ)$ 回転させると元の模様と重なる回転対称操作を意味する。ジャイロイドと同様に点群432と同じ対称性を有する。

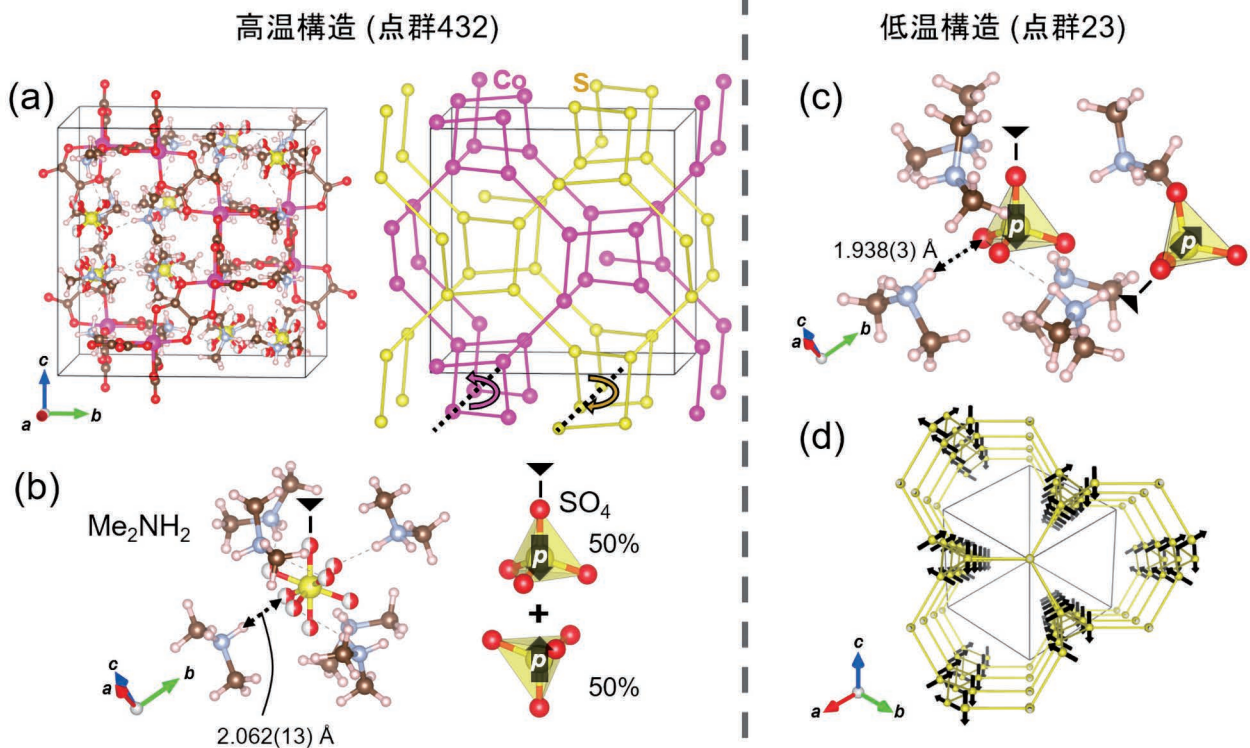


図2 (a) 点群432に属する高温構造。CoイオンとSイオンのネットワークに注目するとそれぞれ逆向きのカイラリティをもつジャイロイド格子を形成している。(b) SO_4 分子の周りに6つの Me_2NH_2 分子が存在。高温では上向きと下向きの SO_4 分子が等確率で存在する。(c) 低温では SO_4 分子が秩序化し、電気双極子モーメント(\boldsymbol{p})が出現。(d) ジャイロイドネットワーク上で電気双極子モーメントが三次元的な螺旋構造を形成する。

私たちは、過去にプロトン伝導体として注目を集めた、シュウ酸配位子によって遷移金属イオンが架橋され三次元ネットワークを組む金属有機構造体(Metal Organic Framework, MOF)の $[(\text{Me}_2\text{NH}_2)_3(\text{SO}_4)]_2[\text{Co}_2(\text{ox})_3]$ [3]に注目しました。このMOFの結晶構造を図2aに示します。一見すると複雑な構造ですが、CoイオンとSイオンに注目すると、それぞれが互いに逆向きのカイラリティをもつジャイロイド格子を形成していることがわかります。Coイオンからなるジャイロイド格子は、「キタエフ量子スピン液体」と呼ばれる磁性体の研究にも適した系ですが[4]、ここではSイオンが形成する歪んだ四面体型の硫酸イオン(SO_4)分子に着目します。

室温では、 SO_4 分子は6つのジメチルアンモニウム(Me_2NH_2)分子に囲まれており(図2b)、互いに逆向きの二種類の分子配向が等確率で存在しています。そのため、各 SO_4 分子がもつ電気双極子モーメント(\boldsymbol{p})は平均的に打ち消され、全体としては電気分極を示しません。このような無秩序な分子は、温度低下に伴い規則的に秩序化し、結晶の対称性が低下する可能性があります。

そこで、私たちは低温相の結晶構造を明らかにするため、大型放射光施設SPring-8において、単結晶X線回折実験を行いました。その結果、120 K以下の低温で SO_4 分子の秩序化に伴う構造相転移を観測しました(図2c) [5]。特筆すべきは、この相転移が空間群 $I4_32$ (点群432)から、空間群 $I2_13$ (点群23)への転移である点です。一般に、構造相転移は格子対称性の低下を伴うため、立方晶系を保ったままの相転移は非常に珍しいです。特に、私たちが知る限り、非圧電群「432」から、焦電群ではない圧電群「23」への相転移はこれまで報告例がありませんでした。さらに、低温相では秩序化した SO_4 分子が持つ電気双極子モーメントが三次元的な螺旋構造を形成しており(図2d)、この特異な構造が格子の歪みを最小化しつつ立方晶対称性を保持していることがわかりました。

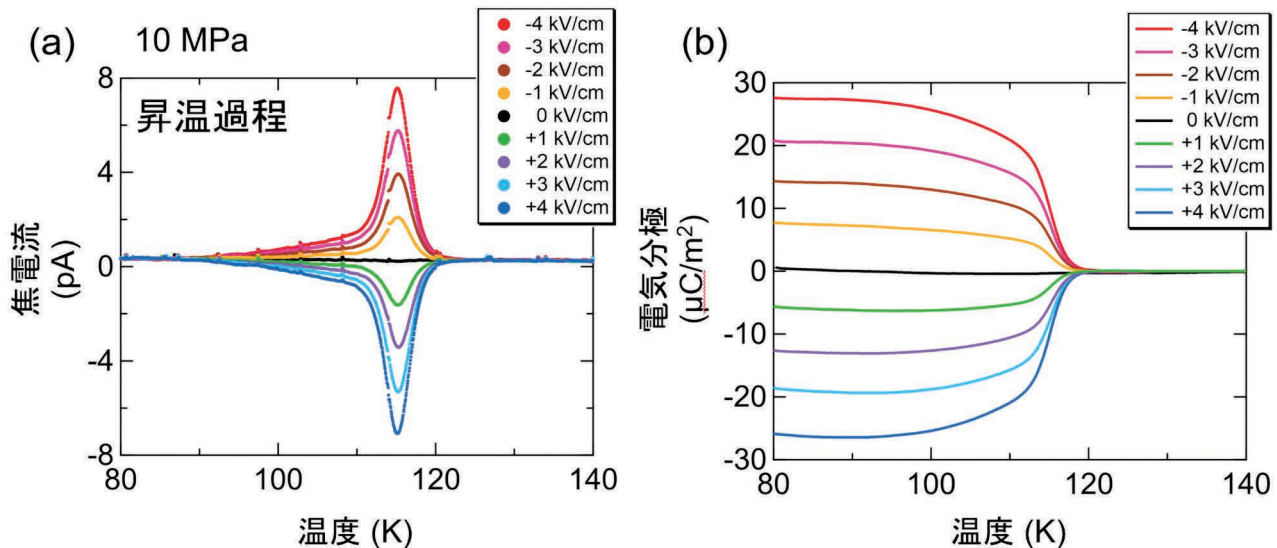


図3 (a),(b) 焦電流と電気分極の温度依存性。粉末状の多結晶試料を約10 MPaの圧力でペレット状に成形し、その試料を用いて測定を行った。

この系の圧電転移を直接的に検証するため、私たちは多結晶ペレット試料を用いて焦電流測定を行いました。その結果、120 K以下でマクロな電気分極の発現が確認され、さらに電場方向の反転によって電気分極方向を制御できることが分かりました(図3)。ただし、低温相の点群23は焦電群に属さない圧電群に分類されるため、本来は応力を加えない限り電気分極は現れないはずですが、今回の分極測定ではペレット試料に応力を加えていません。この観測結果は、MOFの柔軟な構造により、多結晶のペレタイズ過程で残留応力が導入され、その影響で電気分極が出現した可能性を示唆しています。以上の結果から、私たちはこのジャイロイドMOFにおいて、二種類の分極ドメインを温度、応力、および電場によって制御可能であることを実証しました。今後、大きな単結晶試料を得ることができれば、詳細な圧電応答の評価が可能となり、より顕著な応答の観測が期待されます。

私たちは、ジャイロイド構造上に分子配向に由来する電気双極子モーメントの自由度をもつMOFに着目することで、非焦電圧電転移という興味深い物性を見いだすことができました。このジャイロイドMOF系では、元素置換や圧力によって、電子自由度や分子自由度を制御することにより、多彩な物性や機能を設計できる可能性があります。ジャイロイドという特異な幾何学構造の特徴を活かすことで、磁性や電気伝導性といった多様な量子物性、さらにはそれらを組み合わせた複合機能材料の創出が期待されます。

謝辞

本研究の内容は、徳永祐介、上野正人、澤博、中村唯我、木下雄斗、宮本辰也、岡本博、有馬孝尚各氏らとの共同研究に基づくものです。本研究は、日本学術振興会科学研究費助成金(JP21H04988, JP22H04467, JP22K13996, JP22K14010, JP23H01116, JP23H01120, JP24H01644, JP24H01650)の支援によって行われました。

[1] M. Hermanns, and S. Trebst, Phys. Rev. B **89**, 235102 (2014).

[2] J. L. Manes, Phys. Rev. B **85**, 155118 (2012).

[3] S. S. Nagarkar, S. M. Unni, A. Sharma, S. Kurungot, and S. K. Ghosh, Angew. Chem. Int. Ed. **53**, 2638 (2014).

[4] H. Ishikawa, S. Imajo, H. Takeda, M. Kakegawa, M. Yamashita, J. Yamaura, and K. Kindo, Phys. Rev. Lett. **132**, 156702 (2024).

[5] S. Kitou, H. Ishikawa, Y. Tokunaga, M. Ueno, H. Sawa, Y. Nakamura, Y. Kinoshita, T. Miyamoto, H. Okamoto, K. Kindo, and T. Arima, J. Am. Chem. Soc. **147**, 13642 (2025).



らせん磁性半金属 α -EuP₃における p 波型スピン分裂バンド由来の 非相反電気伝導現象

メイヨー アレックス浩

東北大学金属材料研究所 日本学術振興会特別研究員PD (*研究当時)

小野瀬 佳文

東北大学金属材料研究所 教授

1. はじめに

らせん磁性体は、らせんの右巻き/左巻きの自由度 (カイラリティ) をもつ。これを二値状態として利用すれば安定な情報担体として応用できると期待されることから、カイラリティを自在に制御・検出する機能が開拓されれば将来のスピン트로ニクス応用へ貢献できる可能性がある。我々のグループはこれまでに、空間反転対称な結晶構造をもつMn系らせん磁性金属を中心に、カイラリティ・ドメインの制御や読み出し手法を実証・開発してきた[1-5]。その読み出し手段の一つとして有望視されてきたのが、磁場と電流の正負の向きに依存して電気伝導が変化する非相反電気伝導 (整流効果)、すなわち電気磁気カイラル異方性 (electric magnetochiral anisotropy: eMChA) である[6,7]。ところが、非相反性がどのような電子状態の変化によって生じるのか、その微視的機構は十分に理解されていなかった。

これまで我々が対象としてきた、空間反転対称な結晶構造をもつらせん磁性金属では、金属的な複雑なフェルミ面のために、電子構造と非相反伝導の関係を詳細に検証するのが困難であるという課題があった。加えて、観測される非相反応答 (eMChA) の大きさも、接合系や空間反転対称性の破れた結晶構造をもつ物質系と比べると小さく、整流特性向上のための物質設計指針を得るうえでも発現機構の解明が重要である。

本研究で我々は、らせん磁性ジントル半金属 α -EuP₃ の物質開発を行い、非相反電気伝導の精密測定と第一原理計算を相互に組み合わせることで、非相反性の発現機構を詳細に検証した。その結果、らせん磁性体ではフェルミ面が p 波型の特徴的なスピン分裂を生じ、そこに磁場誘起の非対称性が導入されることで非相反伝導が発現することを見出した[8]。この成果はA02:「精密物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓」とC02:「アシンメトリ量子物質の開拓」(石渡氏)との協働的成果といえる。そこで本稿では、物質開拓・機能開拓の両視点を交えながら成果内容を報告する。

2. らせん磁性ジントル半金属 α -EuP₃

本研究で対象とした、らせん磁性ジントル半金属 α -EuP₃ (= Eu²⁺[P₃]²⁻) の結晶構造を図1Aに示す[8, 9]。 α -EuP₃は圧力下ディラック半金属候補の黒リンによく似た擬2次元リン骨格[P₃]²⁻の層間に磁性イオンEu²⁺を内包した構造を有する。これは、固体化学的には一般に「ジントル化合物」描像として理解される構造であり、伝導を担うポリアニオンクラスターがカチオンから電子を受け取り閉殻構造を取りやすいため、半金属などの低キャリア電子構造を作りやすい[10, 11]。 α -EuP₃の場合、[P₃]²⁻クラスターは母物質の黒リンと類似した電子配置を取り、そこへEuの6s軌道や4f軌道が作用することが期待できる (図1B)。実際、第一原理計算で得られるバンド構造を見ると、P-3p由来の黒リン的な擬2次元バンドとEu-6s由来の3次元バンドがフェルミ面を構成し、 E_F 下約

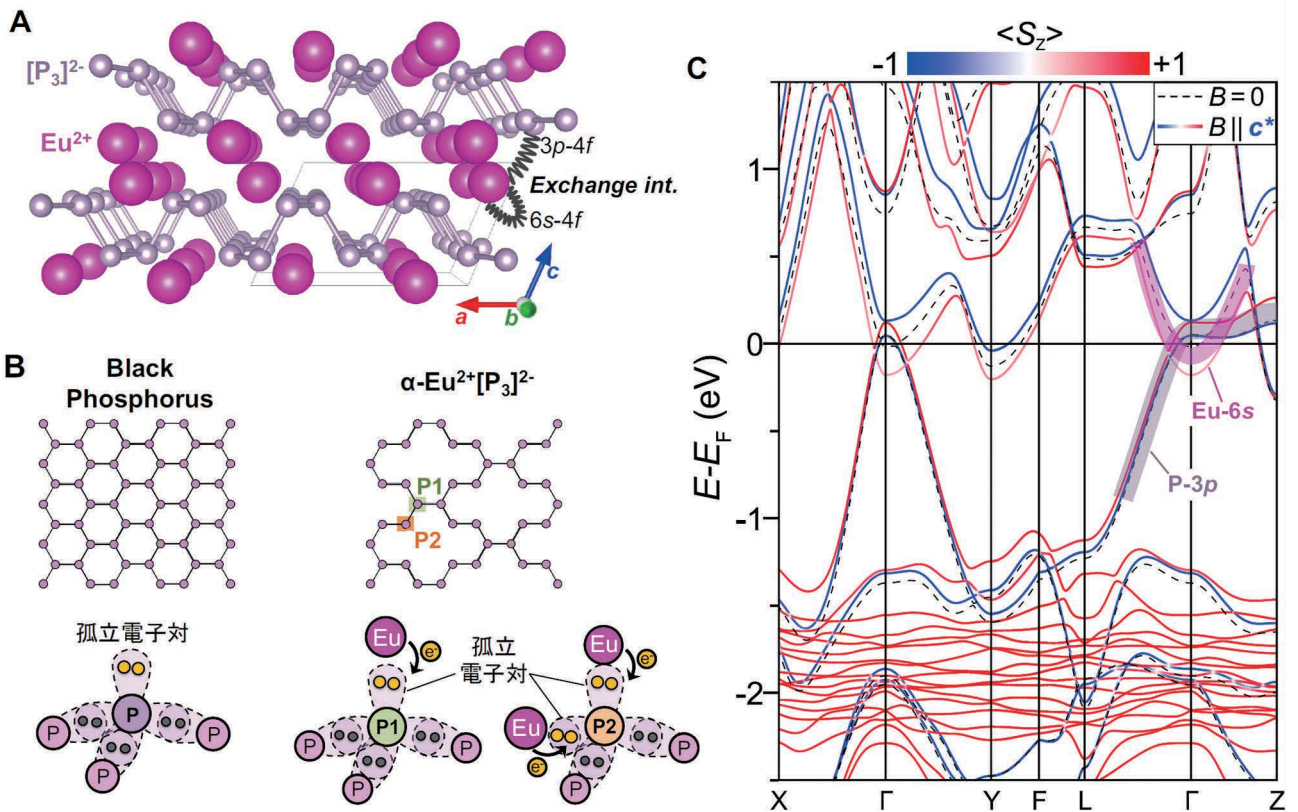


図1. (A) α -EuP₃の結晶構造。文献[8]の図を改変。(B) ジントル描像に基づく黒リンと α -EuP₃の電子構造の比較。 α -EuP₃では、黒リンから一部のPサイトを取り除いたようなポリアニオン・P骨格が、カチオンEuから電子を受け取ることによって母物質の黒リンと類似した電子構造を実現する。(C) 第一原理計算による α -EuP₃の電子構造。黒点線が常磁性($B=0$)、色付き線が強制強磁性($B \parallel c^*$)のスピンの偏極バンドに対応する。擬2次元的なP-3p由来のバンドとカチオンEu-6s由来のバンドがフェルミ面に寄与し、 E_F 下約1.5 eVにEu-4fバンドが位置する「磁性黒リン」的な電子構造が実現している。文献[9]の図を改変。

1.5 eVには磁性を担うEu-4fバンドが位置し、近接効果的に磁性と伝導が結合する系が実現している(図1C)。このように、 α -EuP₃は実空間・波数空間の双方において「磁性黒リン」と呼ぶにふさわしい物質であるといえる。フェルミエネルギー ϵ_F が小さくシンプルな半金属的電子構造をもつ系では、eMChA応答の増大やその波数空間における微視的起源の検証を行いやすいことが期待できる。

通常の溶融法では α -EuP₃単結晶は得られず、代わりに同組成の多形である β -EuP₃(反強磁性半導体)が安定化してしまう[12]。そのため、4万気圧・1050℃の極限環境を用いる高压合成法によってらせん磁性半金属の α 型構造の単結晶が得られる[9]。

3. α -EuP₃における非相反電気伝導の観測

eMChAを示す系の電気抵抗率 ρ は非線形領域まで考慮して

$$\rho = \rho_0 [1 + \gamma(\mathbf{B} \cdot \mathbf{j}) + \dots]$$

と表され(ρ_0 : ゼロ磁場線形抵抗率、 γ : eMChA係数、 \mathbf{B} : 磁束密度ベクトル、 \mathbf{j} : 電流密度ベクトル)、交流電流密度 $j = j_0 \sin \omega t$ 下の第2高調波抵抗率 $\rho^{2\omega}$ として検出することができる[6, 7]。

$$\begin{aligned} E^{2\omega} &= \rho_0 \gamma B j_0^2 (1 - \cos 2\omega t) / 2 \\ &= \rho^{2\omega} j_0 (1 - \cos 2\omega t) \end{aligned}$$

現実には、電極端子の非対称性などから来る外的な効果によって $\rho^{2\omega}$ の磁場対称成分が現れるので、磁場反対称成分を $\rho^{2\omega}_{\text{asym}} = [\rho^{2\omega}(+B) - \rho^{2\omega}(-B)]/2$ のように抽出して非相反抵抗率を導出する。また $\rho^{2\omega} \propto j_0$ であるこ

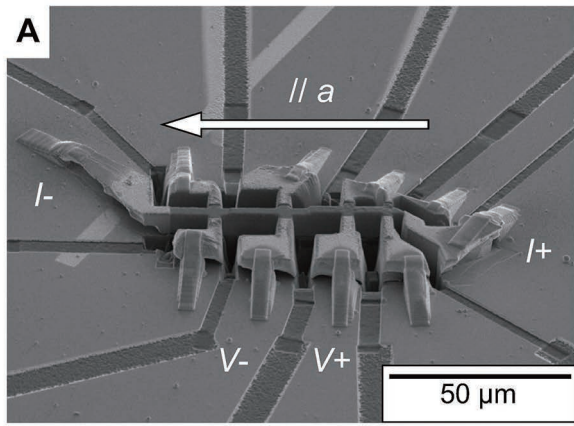
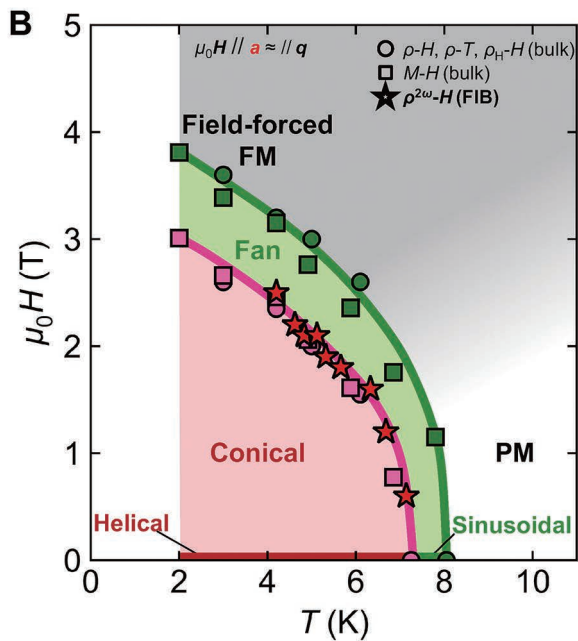


図2. α -EuP₃の (A) FIB微細加工デバイス写真 ($j // a$)、(B) $B // a$ 下の温度-磁場磁気相図。文献[8]より引用。



とから、非相反伝導の高精度検出には電流密度を大きくすることが望ましい。そこで我々は、 α -EuP₃バルク単結晶試料に対して集束イオンビーム (FIB) 加工を施した微細加工デバイスを作製した (図2A)。図2Bに、 $B // a$ 下における α -EuP₃の温度-磁場磁気相図を示す。ゼロ磁場では約8.2 Kにおいて、伝搬ベクトル $q \sim (-0.726, 0, 0.255)$ をもつ正弦波的 (共線的な長周期反強磁性) 磁気秩序が生じる。そして約7.4 K以下では、ほぼ同じ伝搬ベクトル $q \sim (-0.726, 0, 0.222)$ をもつらせん磁気秩序を示す[13]。結晶構造は空間反転対称であることから、 α -EuP₃では先述のMn系と同様、カイラルならせん磁気構造が系の空間反転対称性の破れを担う。

そこで、らせん磁性の磁気伝搬ベクトルに近い方向の磁場配置 ($B // a$) において、磁化 M 、(線形) 抵抗率

ρ_{xx} 、ホール抵抗率 ρ_{yx} (以上、バルク試料で測定)、および非相反抵抗率 $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ (FIB試料で測定) の磁場依存性を測定した (図3)。 $B // a$ の磁場下では、磁場増大に伴い磁気モーメントがキャントされることで、らせん磁性、コニカル磁気構造を経たのちに、扇状磁気構造 ($B_2 \sim 2.5$ T)、強制強磁性 ($B_3 \sim 3.1$ T) というような転移を辿る (図3A)。このとき、図3Dに示す $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ では、低磁場のコニカル磁気構造において有限な非相反成分が明瞭に観測された。一方で、扇状磁気構造や強制強磁性では $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ は完全に消失した。他の温度での測定においても同様な、磁気構造と $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ の有無との対応関係が得られる。これは、らせん磁気構造やコニカル磁気構造においては空間反転対称性が破れているが、扇状磁気構造や強制強磁性磁気構造では空間反転対称性があることと対応しており、eMChAの対称性要件と非常に良い一致を示した (図2B、★印)。また、eMChA係数についても $|\gamma| \sim 6 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ T}^{-1} \text{ A}^{-1}$ という、空間反転対称性の破れた結晶構造をもつ代表物質群に匹敵する大きな値が得られた[8]。

ここで特筆すべき振る舞いは、 $B_1 \sim 0.7$ Tにおいて見られる $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ の急峻なピーク構造と、符号反転である。対称性の観点のみから考えれば、 $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ の符号 (±) は、らせん磁気構造のカイラリティ (右巻き/左巻き) の一方に対応する[1-5]。しかし、今回観測されている符号変化は、磁気モーメントがらせん→コニカルへと単調にキャントされる過程で生じており、また、磁場依存性にヒステリシスも見られていない。したがって、この符号変化は磁気構造の対称性やカイラリティ・ドメインの変化に起因した振る舞いとは考え難い。そこで、図3A-Dにお

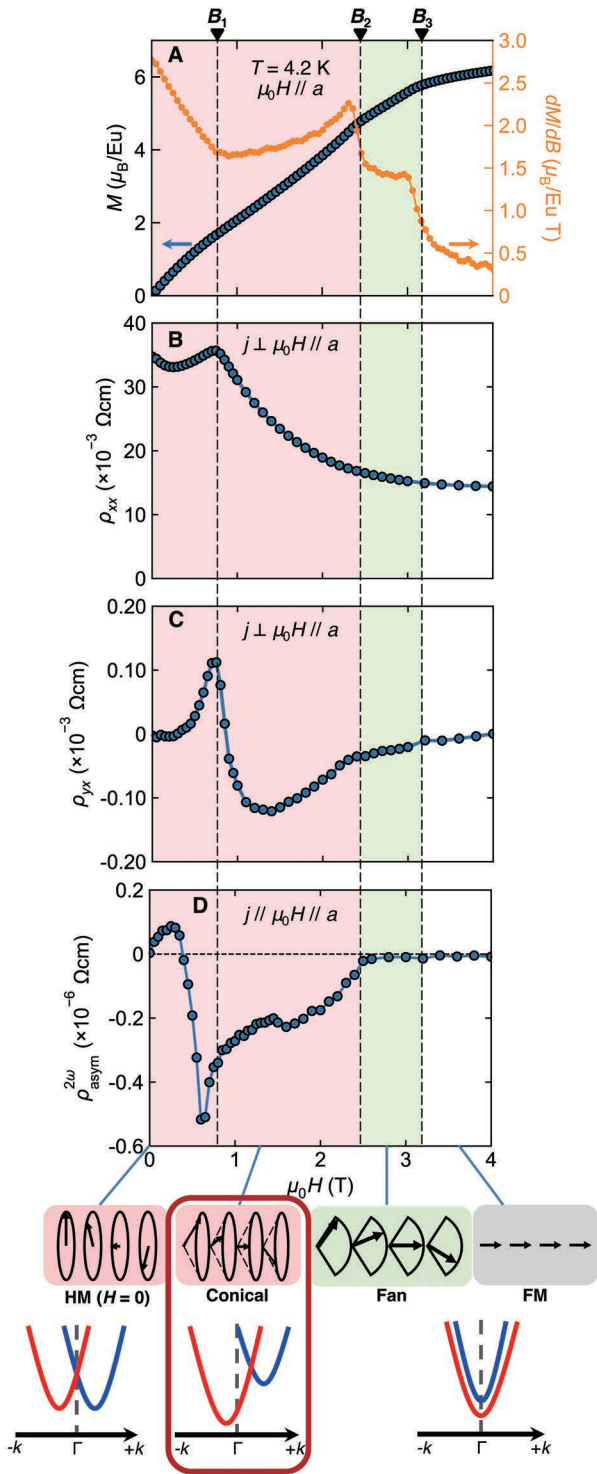


図3. $B // a$ 下における (A) 磁化 M 、(B) 抵抗率 ρ_{xx} 、(C) ホール抵抗率 ρ_{yx} 、(D) 非相反抵抗率 $\rho^{2\omega}_{asym}$ の磁場依存性。低磁場のカイラル磁気相における p 波型スピン分裂バンドが非対称に変形することで非相反性を生じる。アキラルな磁気構造への転移とともに電子構造の対称性が回復し、非相反性が消失する。文献[8]の図を改変。

ける B_1 の異常の現れ方に目を向けると、磁化 M の異常はその磁場微分に微かなキックが見受けられる程度であるのに対し、 ρ_{xx} 、 ρ_{yx} 、 $\rho^{2\omega}_{asym}$ ではいずれも明瞭なピーク構造が現れている。磁化に比べ、輸送物性において特に際立った異常が見られるこの観測結果は、フェルミ面形状が $\rho^{2\omega}_{asym}$ の特異な磁場依存性に寄与していることを強く示唆するものである。

4. コニカル磁気構造における非対称電子構造

そこで、各磁気構造に対応した電子構造の第一原理計算を行い、非相反伝導へのフェルミ面変化の寄与を検証した (図4)。 α -EuP₃ の低温磁気構造はいずれも incommensurate 変調であるため、計算を行うにあたり、代わりに $q = (-0.75, 0, 0)$ の commensurate な超単位胞を採用する近似を行った。この超構造の Eu サイトに磁気モーメントを配置し、各磁気構造を構築した。特にコニカル構造においては、磁気モーメントをらせん状態から一様に a 軸方向に傾けた傾斜角 (キャント角度) をパラメタとして $B // a$ 下の磁場発展を検証した。

図4Aに、らせん、コニカル、扇状、強制強磁性の各磁気構造について、 a^* 軸方向 ($\approx q$ -ベクトル方向)

の k 点経路に対応する $-Y-\Gamma-+Y$ の電子構造を示す。最左のパネル中に点線で強調したバンド (FS) に注目すると、らせん状態 ($M_a^* = 0 \mu_B/\text{Eu}$) において、ゼーマン型の分裂とは異なり、 $\pm Y$ 方向にスピン縮退が解けるような特徴的な波数依存バンド分裂が見られた。さらに、スピンのキャントしたコニカル磁気相 ($M_a^* = 1.0 \mu_B/\text{Eu}$) において、 $-Y-\Gamma-+Y$ の電子構造に顕著な非対称性が誘起されることがわかった。この波数方向の非対称性は扇状磁気構造 ($M_a^* = 5.0 \mu_B/\text{Eu}$)、強制強磁性構造 ($M_a^* = 7.0 \mu_B/\text{Eu}$) では解消され、電子構造の対称性が回復される。この過程における、FS ポケットのコニカル変調依存性を図4Bに模式的に示す。対称な FS 形状を有するらせん磁性、強制強磁性では $\pm k_{a^*}$ 方向の状態数に差がなく、電気伝導の非相反性が現れない一方で、コニカル磁性で誘起される非対称性が $\pm k_{a^*}$ 方向の状態密度の差を生じ、非相反性をもたらしていることが理解できる。

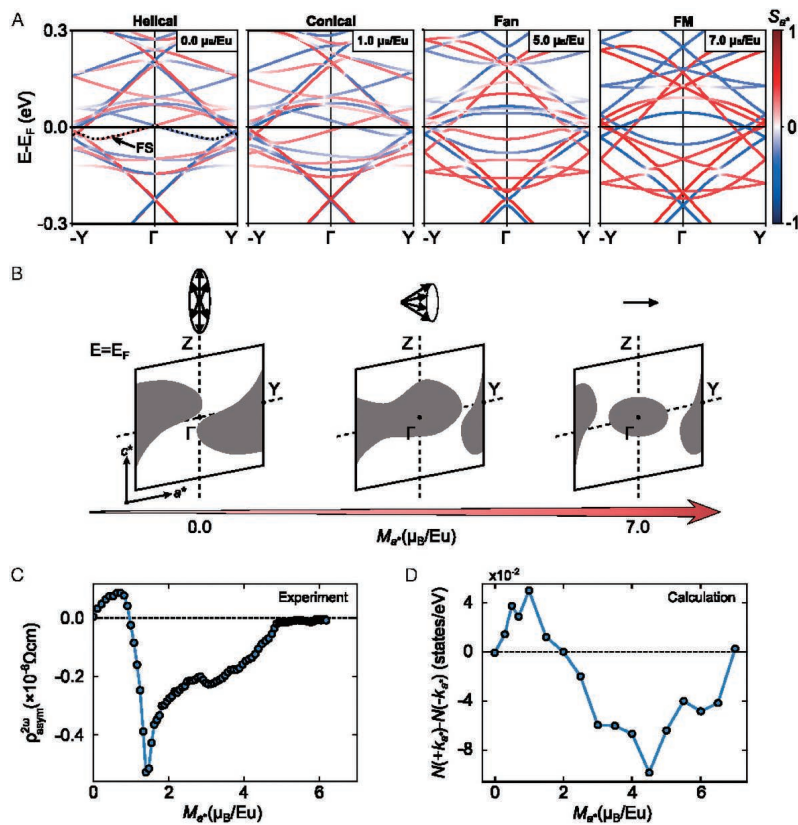


図4. 各磁気相における α -EuP₃の電子構造の第一原理計算。(A) 左から、らせん、コニカル、扇状、強制強磁性における電子構造。(B) モーメントのキャント角をらせん、コニカル、強制強磁性へと連続的に増大させることで得られる、パネルAで示したフェルミポケット (FS) の磁化依存性の模式図。(C) 実験的に観測された非相反抵抗率 $\rho^{2\omega}_{\text{asym}}$ および (D) 第一原理計算で得られた残留状態密度の磁化依存性。文献 [8]より引用。

つまり、非対称な電子状態において正に電場を印加した状態と負に印加した状態で電流の大きさが異なることが非相反性の起源であると考えられる。

実験で観測されたもう一つの特徴的な振る舞いは、低磁場の急峻なピーク構造と符号変化である (図4C)。電子構造の非対称性の指標として、 $+k_a^*$ と $-k_a^*$ の状態密度差 (残留状態密度) を図4Dに示す。残留状態密度は、はじめ正の値に増大するが、キャント角が増すにつれて大きく符号変化を起し、ピークを取った後に減衰する振る舞いが見られ、実験で観測された極めて特異な磁場依存性と定性的に非常に良い一致を示した。

5. まとめと展望

以上、本研究ではらせん磁性体における非相反電気伝導の発現機構を解明することに成功した。

本発見を可能にした物質開拓側の要点としては、ジントル描像に着目することで、詳細な検証が行い易いシンプルな電子構造を有するらせん磁性半金属を開拓できた点大きい。このシンプルさ故に、第一原理計算において大胆に単純化したモデルを用いたにも関わらず、詳細な磁場依存性まで定性的に再現できたといえる。さらに最近、物質固有の特徴をさらに捨象した、らせん磁気秩序の1次元鎖における非相反伝導のミニマムモデルの構築にも繋がった [14]。

また、精密測定の観点では、FIB加工技術が不可欠な役割を演じた。FIB加工により、これまで薄膜や原子層物質が主戦場であったメゾスコピック・スケールのデバイス作製が、バルク物質を用いて可能となった。FIB加工技術の量子輸送物性測定への応用は近年急速に注目を集めているが、今後も重要性を増していくと考えられる。

最後に、本成果は最近、*p*波磁性体[15]の観点からも注目をされている。*p*波磁性では上述したように波数方向にスピン依存分裂が生じる特徴的なバンド構造が実現するが、これが特にスピン軌道相互作用フリーに実現することが要諦の一つである。その点、 α -EuP₃の*p*波型スピン分裂を担うフェルミ面は主にP-3*p*、Eu-6*s*軌道からなり、確かにスピン軌道相互作用の効果は比較的小さい物質系といえる。今後の展望として、*p*波磁性体の良いモデル物質である点に着目して機能探索を進める方向での発展にも期待したい。

謝辞

本研究は東北大学の増田英俊氏、新居陽一氏（現・慶應義塾大学）、Rodion Vladimirovich Belosludov氏、大阪大学の高橋英史氏、石渡晋太郎氏、マンチェスター大学のDarius-Alexandru Deaconu氏、Mohammad Saeed Bahramy氏との共同研究です。本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業、及び金属材料研究所スーパーコンピュータMASAMUNE-2の支援を受けて行われました。集束イオンビーム加工については、東北大学金属材料研究所 材料分析研究コア ARIM事業班の兒玉裕美子氏、今野豊彦氏に技術的支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。

-
- [1] N. Jiang *et al.*, Nat. Commun. **11**, 1601 (2020)
 - [2] N. Jiang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 177205 (2021).
 - [3] H. Masuda *et al.*, Nat. Commun. **15**, 1999 (2024)
 - [4] H. Masuda *et al.*, Phys. Rev. Research **7**, 033019 (2025)
 - [5] H. Masuda *et al.*, arXiv:2512.05436 (2025)
 - [6] G. L. J. A. Rikken *et al.*, PRL **87**, 236602 (2001)
 - [7] Y. Tokura and N. Nagaosa, Nat. Commun. **9**, 3740 (2018).
 - [8] A. H. Mayo *et al.*, PNAS **122**, e2405839122 (2025)
 - [9] A. H. Mayo *et al.*, Phys. Rev. X **12**, 011033 (2022)
 - [10] R. Hoffman, Angew. Chem. Int. Ed Engl. **26**, 846 (1987)
 - [11] L. M. Schoop *et al.*, Chem. Mater. **30**, 3155 (2018).
 - [12] J.-A. Dolyniuk *et al.*, Materials **12**, 251 (2019).
 - [13] P. J. Brown and T. Chattopadhyay, J. Phys. Condens. Matter **9**, 9167 (1997)
 - [14] D.-A. Deaconu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **135** (9), 096701 (2025)
 - [15] R. Yamada *et al.*, Nature **646**, 837 (2025)



ARPESによるアシンメトリ量子物質のバンド構造の可視化

木村 昭夫

広島大学大学院先進理工系科学研究科・WPI-SKCM² 教授

本公募研究では、空間反転・時間反転対称性の破れにより発現する「アシンメトリ量子物質」を対象として、量子ビームを用いた角度分解光電子分光(ARPES)を基盤とした電子状態の可視化を目的に研究を進めてきた。スピン分解ARPES、軟X線ARPES、第二高調波発生(SHG)を相補的に用い、電子状態・スピン構造・対称性の破れを直接観測し、機能物性との関係を明らかにすることを目指した。ホイスラー型化合物 Co_2MnGa 、 Fe_3Ga 、 Rh_2MnGa 薄膜に対しては、真空スーツケースを用いた表面保持型試料輸送と放射光ARPES/Spin-ARPESを組み合わせ、フェルミ準位近傍のスピン分解バンド構造および線ノードを直接観測した [1-3]。その結果、ベリー曲率が集中するバンド交差が巨大異常ネルンスト効果(ANE)の起源であることを実験的に示し、キャリア数制御による機能最適化の設計指針を提示した。また最近、軟X線ARPESを用いて Co_2FeSi バルク単結晶の電子構造を高いバルク感度で可視化することに成功した [Fig.1]。観測され

たバンド構造は、オンサイトクーロン相互作用を考慮しない ($U=0$ eV) 第一原理計算と概ね一致し、フェルミ準位に少数スピンバンドが存在することが明確となり、これまで信じられていた同物質のハーフメタル性は破綻していることを実証した。さらに、Co サイトにのみ比較的小さなオンサイト相関 U を導入することで、実験結果との一致が向上することが分かった。この結果は、これまでに報告した共鳴光電子分光および異常ネルンスト効果の解析とも整合的であり、 Co_2FeSi における電子相関の大きさを実験的に制約できることを示している [4,5]。

一方、非中心対称反強磁性体 GdAlSi に関しては、放射光ARPESと第一原理計算を組み合わせることで、反強磁性秩序下におけるワイル半金属相特有の表面フェルミアークを観測した。理論解析からはコリニア反強磁性が最安定であり、d波スピントクスチャーを持つAltermagnetであり、このスピン分裂の起源として、磁気八極子が本質的役割を果たしていることが示唆された[6]。磁気八極子は実空間では直接観測が困難な秩序変数であるが、その存在は電子状態の非対称性として顕在化する。本成果は、「見えない秩序」を量子ビームにより可視化するという本学術変革領域の理念に強く合致する。このような高次多極子や対称性の破れに起因する電子状態の理解をさらに一般化する試みとして、 CeAlSi や $\text{LaRu}_2\text{Al}_{10}$ 等に対する研究も進めた [7,8]。 CeAlSi では、非中心対称磁性体に特有の磁気秩序と電子構造の結びつきに着目し多極子的秩序変数の関係が議論されている。一方、非磁性金属間化合物 $\text{LaRu}_2\text{Al}_{10}$ においては、ノンシンボル

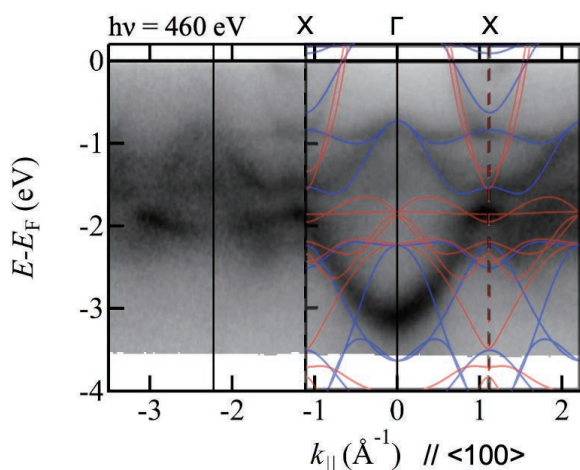


Fig.1: SX-ARPES result of Co_2FeSi

フィック対称性に由来するディラック電子状態が巨大かつ異方的な反磁性帯磁率の起源であることが示唆されており、本研究では軟X線ARPESを用いてバルク敏感にディラック分散を直接捉えた。これらの成果は、磁性・非磁性を問わず、アシンメトリと結晶対称性が電子状態に与える普遍的役割を示す好例である。以上の研究を通じて、本公募研究で構築した方法論は、今後の量子物質の設計・創出に向けた基盤として、さらなる展開が期待される。

-
- [1] K. Sumida, Y. Sakuraba, K. Masuda, A. Kimura *et al.*, Commun. Phys. **8**, 12 (2025).
 - [2] K. Ohwada, K. Nakanishi, K. Kuroda, K. Masuda, Y. Sakuraba, A. Kimura, *et al.*, submitted.
 - [3] K. Sumida, Y. Sakuraba, K. Masuda, A. Kimura *et al.*, Commun. Phys. **8**, 12 (2025).
 - [4] W. Zhou, K. Masuda, K. Sumida, Y. Fujita, A. Kimura, Y. Sakuraba, Sci. Tech, Adv. Mater. **26**, 2564061 (2025).
 - [5] K. Sumida, K. Masuda, A. Kimura, Y. Sakuraba *et al.*, Phys. Rev. B. **108**, L241101 (2023).
 - [6] J. Nag, K. Kuroda, A. Kimura, K. G. Suresh, A. Alam *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 224436 (2024).
 - [7] Y. Morita, A. Kimura, T. Yamada, H. Tanida, K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **111**, 081116 (2024).
 - [8] R. Yamamoto, A. Kimura, T. Yamada, K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. Research **7**, L022005 (2025).



軟X線吸収・散乱による 拡張磁気多極子観測手法の開拓

山崎 裕一

物質・材料研究機構マテリアル基盤研究センター グループリーダー

近年、対称性に基づく拡張磁気多極子や完全磁気多極子基底の概念は、反強磁性体に潜在する強磁性的物性を統一的に理解する枠組みとして注目を集めている [1]。本研究では、軟X線吸収・散乱を用いて拡張磁気多極子を実験的に検出する新たな手法の開拓を目的とし、その基礎検証および応用可能性を調べた。軟X線領域 (数百 eV~2 keV) には、3d 遷移金属の L 吸収端や 4f 電子系の M 吸収端が存在し、微視的な電子状態や磁気構造を元素選択的かつ高感度に観測することができる。本研究では、軟X線吸収と拡張磁気多極子、ならびに完全多極子基底との相関を明らかにし、目的とする多極子の期待値を計測するための測定方法論の確立を目指した。

まず、X線吸収理論を再考し、吸収の偏光依存性と多極子との関係を体系的に整理した。X線磁気円二色性 (XMCD) は左右円偏光による吸収差から磁気双極子を検出する手法であり、完全磁気多極子基底に基づくと、多極子はスピンレス多極子とスピントル多極子に分類される。XMCD スペクトルを詳細に理論解析することで、スピンレスおよびスピントルの磁気双極子を区別して測定できることを示した [2]。この区別は、スピン軌道相互作用による内殻軌道分裂の有無と密接に関係している。分裂のない吸収端ではスピンレス多極子である軌道角運動量のみが観測される一方、分裂した吸収端ではスピンお

よび異方的磁気双極子といったスピントル多極子も検出可能となる。異方的磁気双極子はスピンと電気四極子の合成に由来し、磁気双極子の対称性を有する交代磁性体における XMCD 発現の起源となっている。

さらに、この枠組みを拡張することで、直交する直線偏光の吸収差である X 線磁気線二色性 (XMLD) についても統一的な理解が可能となった。スピンレスの場合には電気四極子が、スピントルの場合には磁気双極子および磁気八極子が検出されることを示し、これまで明確でなかった XMLD の総和則についても完全多極子基底に基づいて説明した [2]。これらの吸収理論を基礎として、NiAs 型交代磁性体における XMCD 応答の微視的機構説明 [3]、およびコンビナトリアル試料を用いた磁気多極子演算子の期待値マッピングを実証した [4]。さらに、軟X線散乱を用いた顕微分光装置を新たに開発し [5]、拡張磁気多極子の空間分布を検出するための実験基盤を構築した。現在は、完全多極子基底に基づく共鳴 X 線散乱スペクトルの解析手法の開発も進めており、今後も軟X線吸収・散乱による多極子検出の統一的理解を目指して研究を継続していく。

[1] H. Kusunose, R. Oiwa, and S. Hayami, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 104704 (2020)

[2] Y. Yamasaki *et al.*, *Science and Technology of Advanced Materials* **26** (1), 2513217 (2025)

[3] N. Sasabe, Y. Ishii, and Y. Yamasaki, *Phys. Rev. B* **112**, 224401 (2025)

[4] Y. Yamasaki *et al.*, *Science and Technology of Advanced Materials Method* **5**, 2544528 (2025)

[5] Y. Ishii *et al.*, *Science and Technology of Advanced Materials Method*, 2586300 (2025)



放射光X線回折を用いたアシンメトリ 量子物質の構造と電子軌道の研究

鬼頭 俊介

東京大学新領域創成科学研究科 助教

共同研究者

(i) 石川 孟 東京理科大学 講師 (ii) 上田 健太郎 東京大学 講師 (iii) 野村 悠祐 東北大学 教授
(iv) 金澤 直也 東京大学 准教授 (v) 速水 賢 北海道大学 教授 (vi) 山崎 裕一 物質・材料研究機構 グループリーダー

A01公募班として本領域に参画しております東京大学の鬼頭俊介と申します。本領域において様々な先生方と共同研究の機会を頂き、そこで得られた研究成果についてご紹介いたします。

放射光では、実験室系のX線回折装置に比べて1億倍以上明るい光を利用できるだけでなく、ビームサイズやエネルギー、さらにはコヒーレンスまで高い自由度で制御できるため、実験室系とは質的に異なる研究を展開することができます。例えば、D01班の石川孟先生(i)が合成されたジャイロイド金属有機構造体(MOF)の構造を放射光X線回折で調べると、キラル立方晶からキラル立方晶への珍しい構造相転移を示すことが分かりました。さらに、水素の原子位置も含めて結晶構造を精密に決定した結果、これまでに報告例がない「非圧電群」から「焦電群でない圧電群」への相転移であることが明らかになりました[1]。また、D01班の上田健太郎先生(ii)が合成されたパイロクロア型酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の単結晶X線回折データを基に、最近我々のグループが開発した価電子密度解析手法[2]を適用しました。実験で観測された全電子密度の情報から、B01班の野村悠祐先生(iii)に第一原理計算して頂いた内殻電子密度を差し引くことで、Prサイト周りで強いスピン-軌道相互作用を反映した4f電子の可視化に初めて成功しました[3]。さらに、D01班の金澤直也先生(iv)との共同研究として、キラル物質

におけるキラルな価電子密度の観測に成功しました[4]。現在はこの成果を基に、C01班の速水賢先生(v)にもご協力を頂き、キラルな価電子密度からキラリティを定量的に評価する手法開発を進めています。また、得られた価電子密度の精度評価については、A01班の山崎裕一先生(vi)のグループにご協力を頂き、ベイズ推論を用いた価電子密度の信頼度評価手法の開発にも取り組んでいます。

一方で、私たちは同世代の若手研究者が主体となり、「若手研究者分野横断交流会」を企画・運営しています。学術変革領域A「アシンメトリ量子」、「1000テスラ科学」、ならびに研究拠点形成事業「量子創発分子層エレクトロニクス」からの協賛を受け、第1回交流会を2025年3月27-28日に越後湯沢にて、総勢30名で開催することができました[5]。今年度は、さらに学術変革領域A「キメラ準粒子」からも協賛を頂き、第2回交流会を2026年3月5-6日に熱海にて開催をする予定です。すでに90名以上の方から参加申込を頂いており、本領域からも多くの学生や若手研究者が参加する予定です。また、アシンメトリ量子からC02班の石渡晋太郎先生およびD01班の金澤直也先生には、招待講演を行って頂く予定です。

今後も「アシンメトリ量子」に関連する独創性の高い研究に取り組んでいきたいと思っております。

[1] S. Kitou *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **147**, 13642 (2025).

[2] S. Kitou *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 065701 (2017).

[3] S. Kitou *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **122**, e2500251122 (2025).

[4] S. Aoyagi *et al.*, arXiv:2507.19900 (2025).

[5] <https://sites.google.com/view/wakate-kouryu/>



非対称な熱流とその交差相関の開拓

水上 雄太

東北大学大学院理学研究科 准教授

A02班「精密物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓」の公募研究班として、本領域に参画させて頂いております。私はここ最近、精密熱計測を基盤として超伝導体や磁性体における新規な量子状態や素励起の解明に取り組んできました。本研究期間においても磁場中における精密熱測定を通じ、スピン液体候補物質や超伝導体における素励起の性質や異方性を明らかにしてきました [1-3]。本研究ではさらに測定手法を発展させ、熱輸送現象における新規な非対称応答の探索を目的として研究を行いました。その一つとして非相対的な熱輸送を検出するための汎用的な手法の開発・拡張を行うとともに、空間反転対称性の破れた単結晶試料へ応用することを試みてきました。熱輸送においては、電荷を持たない系においても成立するため、電子系に限らず様々な準粒子系において非相対応答が現れる可能性があります [4,5]。私はこれまで、交流熱を用いた手法などを通じて、順方向および逆方向それぞれの熱流に対する熱輸送係数について、100 K 以上の比較的高温領域での計測を行ってまいりました。本研究ではこれをさらに低温・高磁場領域へと拡張し、超伝導体や磁性体において対称性の破れた興味深い量子相が多く現れる条件下での測定の実現を目指して、手法の開発と高精度化に取り組んできました。その結果、熱流条件を工夫することで約1 K 程度の低

温領域においても、順方向および逆方向の熱流に対する熱伝導度測定が可能となっています。特に、低温回転ステージ上に測定系を構築することで、結晶軸に対する磁場方向も低温で精密に制御できるようになっております。現在は、BaNiSn₃型構造を持つ物質群や、ヘテロ接合系をはじめとする空間反転対称性の破れた超伝導体・磁性体を対象として測定を進めています。なお、超伝導状態の理解にあたっては、電子構造の観点からの議論を行うため、B01班の是常先生にご協力頂いております。

さらに本研究では、上記の装置開発に加えて、通常的手法による新規な熱輸送現象の開拓にも取り組んでいます。具体的には、コリニア反強磁性体であるオリビン型化合物において、外部磁場を印加しないゼロ磁場極限においても有限の熱ホール効果が発現する結果を得ています。この結果は、結晶対称性に起因して発現する特異な熱ホール効果の可能性を示唆するものであり、現在議論を進めています [6]。

本研究は、東北大学の 大野綾太郎氏、木村憲彰氏、大串研也氏、是常隆氏、ならびに東京大学の 武田晃氏、山下穰氏との共同研究によるものです。この場をお借りして深く感謝申し上げます。また、本領域に参画する機会を頂きましたことに、関係者の皆様へ心より御礼申し上げます。

[1] S. Fang, K. Imamura, Y. Mizukami *et al.*, Phys. Rev. Lett. **134**, 106701 (2025).

[2] Y. Mizukami *et al.*, PNAS Nexus **4**, pgaf060 (2025).

[3] M. Roppongi *et al.*, Nat. Commun. **16**, 6573 (2025).

[4] R. Nakai, N. Nagaosa, Phys. Rev. B **99**, 115201 (2019).

[5] Y. Hirokane *et al.*, Sci. Adv. **6**, eabd3703 (2020).

[6] R. Ohno, Y. Mizukami *et al.*, in preparation.



バルク超伝導体を用いた 巨大超伝導交差応答の研究

石原 滉大

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

BCS理論では、等方的な電子格子相互作用に起因するs波対称性を持つ超伝導状態が議論されていますが、結晶がある種の対称性を破る「アシンメトリ超伝導体」においては、BCS理論を越えた非従来型超伝導の発現が期待されます。例えば、空間反転対称性を破る超伝導体ではクーパー対のパリティ混成が生じ、超伝導ギャップも異方的になります。また、時間反転対称性を破る強磁性超伝導体では、奇パリティのスピントリプレット超伝導が実現します。このように、アシンメトリ超伝導体では、非従来型超伝導や新奇超伝導物性を開拓するための非常に良いプラットフォームであると考えられます。

アシンメトリ量子では、参画されている多くの先生方と共同研究を行うことにより、アシンメトリ超伝導物性の開拓を行ってまいりました。例えばC01班の小林先生からはミスフィット超伝導体 $(\text{PbS})_{1.14}(\text{TaS}_2)_n$ ($n = 1, 2$)を提供していただき、磁場侵入長測定を用いた超伝導ギャップ構造の研究と、電子線照射を用いた不純物効果の測定を行いました。 $n = 1$ の1層系と $n = 2$ の2層系では空間反転対称性の有無が異なっているものの、超伝導ギャップ構造はほとんど同じであることがわかりました。一方で、不純物を導入した際には1層系は転移温度が低下し、2層系は上昇するという違いを観測することができました。この結果は、結晶の対称性よりも、超伝導状態と電荷密度波秩序の競合関係が、超伝導転移温度やギャップの異方性に大きく影響していることを示しています[1]。

さらに、D01公募班の打田先生からは、時間反転対称性を破る交替磁性秩序が議論されている RuO_2 薄膜超伝導体[2]を提供していただき、超伝導状態における不純物効果の測定を行いました。その結果、不純物の導入により系統的に超伝導転移温度が減少するという、BCS理論で期待されているs波超伝導とは異なる振る舞いを観測することに成功しました。現在、不純物による結晶構造や電子構造の変化を評価している段階ではありますが、交替磁性秩序や交替磁性揺らぎに起因する非従来型超伝導状態を議論できれば非常に興味深いと考えております。

また、C01班の松田先生からはキラル構造超伝導体 IrGe_4 [3]を提供していただき、FIB加工を用いた非相反伝導の測定を行ったところ、非常に巨大な非相反応を示唆する結果も得られており、非相反応の微視的起源に関しても今後より詳細に調べていく予定です。さらに、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ の微細加工ではA02班の木俣先生、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ の放射光X線散乱実験ではA01班の松村先生、中尾先生、A01公募班の鬼頭さん、ウラン化合物の研究ではC01班の清水さん、C02班の芳賀さんとも共同研究を進めさせていただいており、ここに挙げられなかった多くのアシンメトリ量子関係者の方にも支援していただいております。引き続き、アシンメトリ量子の先生方とも協力し、アシンメトリ超伝導物性の解明に邁進していく所存です。

[1] F. Chen, K. Ishihara, *et al.*, in preparation.

[2] M. Uchida *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 147001 (2020).

[3] N. Nakamura *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 034701 (2023).



ベクトル圧力： 一軸圧力回転装置の開発と実証

池田 敦俊

京都大学大学院工学研究科 助教

私達の研究では角度を変えることができる一軸圧力を「ベクトル圧力」と名付け、「ベクトル圧力」を実現できる装置の開発に取り組んできました。静水圧力は物体の大きさを変化させますが、形（対称性）は変えません。それに対して一軸圧力は例えば正方形を長方形に押しつぶすので、物体の対称性を変化させるアシンメトリックな制御パラメーターです。一軸圧力にはその大きさに加えて、方向という自由度もあります。たとえば正方形を横から押すと長方形になりますが、斜めから押すと平行四辺形になります。対称性の崩し方が変わるので、アシンメトリの観点では一軸圧力の方向は重要なパラメーターとなるはずですが、実際に Sr_2RuO_4 という超伝導体では、[100]方向の一軸圧力では試料を圧縮しても伸長しても転移温度が顕著に上昇するのに対し、[110]方向では圧縮で転移温度がわずかに低下して伸長でわずかに上昇します[1]。

一軸圧力の方向は重要なパラメーターですが、物性の詳細な一軸圧力角度依存性を調べるのは困難です。現状の一軸圧力印加装置では、角度依存性を調べるためには異なる方向の試料を何個も用意しなければならず、現実的には[100]と[110]方向などの特別な方向のみ実験するのが精一杯です。そのような状況を打開し、特別な方向ではない「もっとアシンメトリックな」一軸圧力を可能とするために、私達は試料を固定したあとに電気的に一軸圧力の方向を回転できる装置を開発しました。

開発した装置が動作している様子を図1に示します。

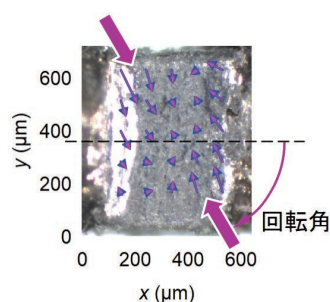


図1: せん断ピエゾ素子に「ベクトルひずみ」が誘起されている様子。小さい矢印が各点の変位を表しており、全体として大きい矢印の方向から圧縮されているように見える。

写真に写っているのは、電圧を印加すると平行四辺形に変形するせん断ピエゾ素子です。写真の外側では電圧を印加すると伸長するピエゾ素子を用いてせん断ピエゾ素子を左右から圧縮しています。矢印は各点の変位ベクトルを表しており、左右からではなく斜めから圧縮されているように見えます。つまり2種類のピエゾ素子を組み合わせることで「ベクトルひずみ」を生み出すことに成功しました。この装置のアイデアは特許を出願中です。現在はこの装置に試料を載せて物性変化を調べています。左右から圧縮しない状態のせん断ピエゾ素子に試料を貼り付けることで、試料にせん断ひずみを誘起できることはわかりました[2]。次は試料が載った状態のせん断ピエゾ素子を圧縮する予定です。

最後になりますが、私の学生時代の専門は物質合成だったので、動作原理から自分で考えて新しい装置を作るという実験は新鮮でした。「ベクトルひずみ」が実現したときは心が踊りました。また、特許の出願も初めての経験で、出願まで成果を秘密にすることと基礎研究として成果を公表することのバランスに難しさを感じました。新しいことに挑戦する機会をくださったアシンメトリ量子の皆様にも深く感謝いたします。

[1] C. W. Hicks *et al.*, *Science* **344**, 283 (2014).

[2] G. Mattoni, *A. Ikeda et al.*, *Nat. Commun.* (2025); <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67307-1>



量子アシンメトリ物質における熱・弾性交差 相関現象の開拓

小野瀬 佳文

東北大学金属材料研究所 教授

対称性の破れたアシンメトリ量子物質においては、電気伝導や磁気応答のみならず格子の自由度にも非自明な応答が現れることが明らかになりつつあります。我々は、このような格子自由度に由来する弾性応答などの非自明な応答を開拓しています。ここでは、公募研究期間に得られた成果を紹介します。

一つ目の成果は、表面弾性波の非相反回折現象です[1]。表面弾性波とは文字通り表面を伝搬する弾性波のことです。我々は、強磁性Niによって表面弾性波が回折されるときに回折方向によって強度が異なるようになる非相反回折現象を発見しました(図1)。

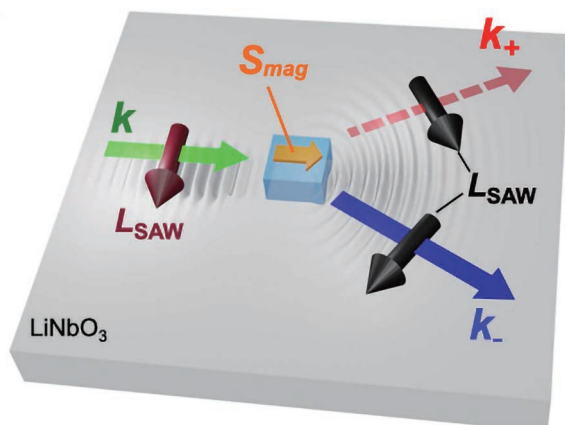


図1: 表面弾性波における非相反回折現象の概念図。[1]より引用。

二つ目の成果は、磁性強誘電強弾性体 $Tb_2(MoO_4)_3$ の発見です[2]。この物質は、432 Kで自発的に分極と歪みが発生する強誘電強弾性転移が432 Kで起こります。また、この物質はTbが磁気モーメントを持つため磁性との結合も発生し、歪みと同様な分極制御が磁性を用いても可能になるなど、強誘電体、強弾性および磁性が結合したユニークな物質です。

上記の研究に加えて、らせん磁性体 EuP_3 における非相反伝導を観測しメカニズムを明らかにした、石渡グループとの領域内連携による成果も得られました[3]。

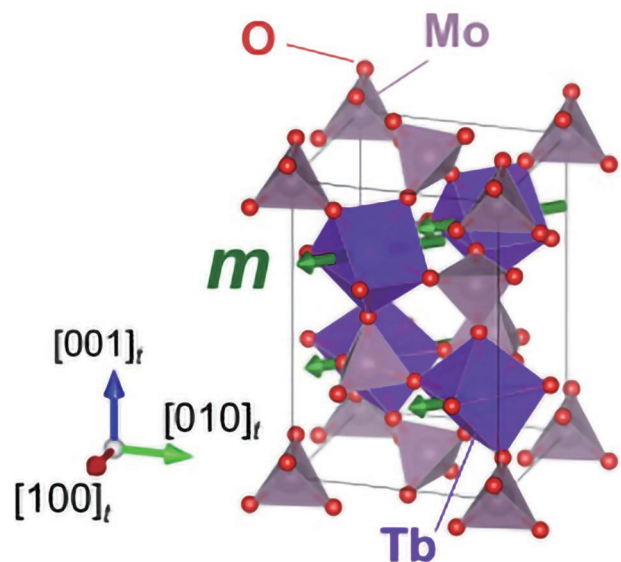


図2: $Tb_2(MoO_4)_3$ の結晶構造。[2]より引用。

[1] Y. Nii, K. Yamamoto, M. Kawano, S. Maekawa, Y. Onose, Observation of Nonreciprocal Diffraction of Surface Acoustic Wave, Phys. Rev. Lett. **134**, 027001 (2025).

[2] S. Tajima, H. Masuda, Y. Nii, S. Kimura, Y. Onose, A high-temperature multiferroic $Tb_2(MoO_4)_3$, Commun. Mater. **5**, 267 (2024).

[3] A. H. Mayo, D.-A. Deaconu, H. Masuda, Y. Nii, H. Takahashi, R. V. Belosludov, S. Ishiwata, M. S. Bahramy, and Y. Onose, Band asymmetry-driven nonreciprocal electronic transport in a helimagnetic semimetal α - EuP_3 , Proc. Natl. Acad. Sci. **122**, e2405839122 (2025).



アシンメトリ量子の検出・可視化手法の 開発と人工アシンメトロニクスへの展開

松原 正和

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

本研究は、学術変革領域研究 (A) 「アシンメトリ量子」が掲げる「非対称性を基軸とした新奇量子機能の創出」という理念のもと、物質に内在する対称性の破れを高感度に検出・可視化する研究と、人工的に対称性を設計・操作することによって新たな量子機能を創出・機能化する研究を相補的に進めました。公募研究採択時に提出した計画書では、(1)アシンメトリ量子秩序に対する高感度かつ空間分解能を有する検出手法の確立、(2)メゾスケールにおける人工的な対称性操作を通じた新奇量子機能の創成、の二点を研究の中核として位置付けました。本研究期間において、これらの目標に沿った成果を着実に積み重ねることができました。

前半の研究では、光第二高調波発生 (SHG) を用いた非線形光学プローブの高度化を通じて、フェロアキシャル秩序や反強磁性秩序など、従来の測定手法では捉えることが難しかった「隠れた非対称秩序」の検出および可視化を実現しました[1-4]。特に、SHGが有する高い対称性感受性と空間分解能を活かし、 MnTiO_3 [1]、 MnGeO_3 [2]、 PtBi_2 [3]、 Tb_2PdGe_6 [4] など多様なアシンメトリ量子物質において、磁気多極子秩序や軸性秩序、そのドメイン構造を空間分解して観測できることを示しました。これらの成果は、アシンメトリ量子を概念的な理解にとどめず、実験的

に検証可能な物理量として取り扱うための基盤を与えるものです。

後半の研究では、メゾスケールにおける人工的な対称性操作に着目し、物質が本来有していない応答を創出する「人工アシンメトロニクス」の概念を具体的な物質系において検証しました[5-7]。例えば、極性構造を導入した極性強磁性メタマテリアルにおける光誘起スピン流生成[5]、構造スケールに依存した応答の制御[6]、さらには磁気渦が本質的に持つ非対称性を活用した新原理の光電変換 (磁気光電変換) [7] など、人工構造による対称性設計が新奇量子機能の創成に有効であることを示しました。

これらの成果により、本研究は、アシンメトリ量子という概念を検出・操作可能な物質科学へと発展させる一助となったと考えています。また、公募研究期間を通じて、A02班内およびC02班との連携を通じた試料提供、測定手法の共有、学術的議論の深化が進み、領域全体の研究推進にも貢献することができました。今後は、本研究で培ったSHGを基軸とする検出手法と、人工的な対称性操作に関する知見を統合することにより、空間スケールを横断したアシンメトリ量子物質科学の体系的な理解へと展開していくことを目指します。

[1] D. Sekine, M. Matsubara *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **8**, 064406 (2024).

[2] N. Jiang, M. Matsubara *et al.*, Accepted for publication in *Phys. Rev. B*.

[3] I. Aoki, T. Matsumura, M. Matsubara *et al.*, Submitted.

[4] T. Matsumura, H. Kotegawa, H. Sugawara, K. Izawa, and M. Matsubara, In progress.

[5] H. Taketani, M. Matsubara *et al.*, In preparation.

[6] G. Cavanna*, H. Taketani*, M. Matsubara *et al.*, Accepted for publication in *Nanophotonics*.

[7] M. Matsubara, T. Kobayashi, H. Watanabe, In preparation.



アシンメトリ磁性体の示す 非自明な時間反転対称性破れの 光測定技術を用いた探索

米澤 進吾

京都大学大学院工学研究科 教授

「アシンメトリ量子」領域では、従来の強磁性体・反強磁性体というカテゴリでは分類できない「アシンメトリ磁性体」とも呼ぶべき新奇磁性体が研究の大きな柱の一つとなっています。それらは多極子によって統一的に記述・分類ができます[1]。そのような研究の中で、巨視的な磁化を持たないために従来は反強磁性体として取り扱われていたような物質の中に、様々な対称性破れを示す物質が含まれることが分かってきました。たとえば、磁性と結晶構造との協奏によって時間反転対称性 (Time-reversal symmetry; TRS) を破るコリニア反強磁性体は「交替磁性体」とも呼ばれ[2]、その物性・機能性が世界的にも注目されています。

近年、私たちのグループはTRSの破れを光技術で測定・検出する研究に取り組んできました。まず、TRSが破れると、その破れの符号に応じてその物質表面で光が反射した際に光の偏光状態が正負に変化するという磁気光学カー効果 (Magneto-optical Kerr effect; MOKE) が発現します。また、TRSが破れると、時間反転操作に対する応答の偶奇性が異なる外場の間の交差相関が許されるようになります。とくに磁場 (時間反転操作によって符号を変える = odd) とひずみ (時間反転操作によって符号を変えない = even) が線形な関係を示す piezomagnetic effect が現れます。

我々のグループではMOKEを1 μrad を切るような

超高感度で測定が可能な「ループレス・サニャック干渉計」[3]を走査型に拡張し、交替磁性体 MnTe の磁気ドメイン観察の研究を行っています。その結果、MnTe は磁化を持たないにもかかわらず、正負の MOKE を持つ明瞭な磁気ドメインを形成することを観測することができました。領域内共同研究によって岡山大の大槻・桐越グループに理論計算を行っていただき、MnTe で自発 MOKE が生じることは理論的にも確かめられました。また、光ファイバーベースのひずみゲージである fiber-Bragg grating (FBG) を用いた多軸ひずみ測定技術を開発し、piezomagnetic effect の研究も行ってきています。URhGe において強磁性体における初めての piezomagnetic effect の観測に成功[4]したのち、現在は領域内共同研究により神戸大の小手川グループで作製された f 電子交替磁性体 Ce_2CuGe_6 の piezomagnetic effect の研究を進めています。この物質は 15 K 以下で大きな異常ホール効果[5]を示す磁気秩序を生じますが、その温度以下で明瞭な piezomagnetic effect が観測できることを明らかにしました。交替磁性体をはじめ、巨視的な磁化を持たない TRS 破れ物質では TRS 破れを熱力学的に検出する有力な手法がほとんどありません。ひずみ応答である piezomagnetic effect は熱力学的な現象であり、このミッシング・ピースを埋める重要な役割をしてくれるのではないかと期待しています。

[1] H. Kusunose and S. Hayami *J. Phys.: Condens. Matter* **34**, 464002 (2022).

[2] L. Smejkal *et al.*, *Phys. Rev. X* **12**, 031042 (2022).

[3] J. Xia *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 062508 (2006).

[4] M. Tomikawa *et al.*, *Phys. Rev. B*, **110**, L100408 (2024); 米澤進吾 固体物理 2025年11月号.

[5] H. Kotegawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 106301 (2024).



準結晶と近似結晶における 奇パリティ結晶場と奇パリティ多極子の開拓

渡辺 真仁

九州工業大学大学院工学研究院基礎科学研究系 教授

非周期的かつ規則的な原子配列をもつ準結晶において、どのような電子状態が実現し、物性を発現するかは物性科学のフロンティアである。本研究では、希土類系準結晶および近似結晶において、偶パリティのみならず奇パリティの結晶場の理論を点電荷モデルに基づいて定式化した [1]。ここでは、低温で起源が未解明の相転移現象が観測されている Ce 系近似結晶と準結晶を念頭に、Au-SM-Ce 系 (SM=Al, Sn) の解析を行った結果を報告する。奇パリティ結晶場の計算を行う際に必要な、動径部分の波動関数の奇数次の期待値 $\langle r \rangle$, $\langle r^3 \rangle$, $\langle r^5 \rangle$ について、孤立 Ce 原子の密度汎関数計算を行うことにより得られた値を用いた。同様の計算を全ての希土類イオン (R=Ce, Nd, ..., Yb) においても 4f 状態と 5d 状態について偶数次と奇数次の $\langle r^n \rangle$ ($n \leq 6$) を計算したので、今後一般の希土類系物質における結晶場計算を点電荷モデルで行う際に活用できる。

理論計算の結果、遮蔽された Au イオンと SM イオンの価数の比に応じて結晶場基底状態の磁気容易軸が 3 段階に劇的に変化することを見出した。さらに、結晶場による磁気異方性の効果を取り入れた有効磁気モデルを 1/1 近似結晶に適用し、数値的厳密対角化法により基底状態の相図を決定した。その結果、vortex 状態や alternate-antialternate 状態などノンコリニア磁気構造が現れ、その中には whirling-antiwhirling 状態のように大きなトポジカル数 ($n = \pm 3$) で特徴づけられるトポジカル磁気構造も存在することを見出した [1]。

興味深いことに、vortex 状態では 20 面体の頂点の各磁気モーメントが $\vec{T}_{1C} = \sum_{i=1}^{12} \vec{r}_i \times \langle \vec{j}_i \rangle \propto (111)$ のように三軸方向に強的に揃う磁気トロイダルモーメントをもつことがわかった。そのため、vortex 相に電場をかけるとそれと垂直方向に磁化が誘起される電気磁気効果が発現することが期待される [1]。

また、圧力や元素置換により Ce の 4f 結晶場エネルギーと 5d 結晶場エネルギーの準位交差が起こる場合、奇パリティ結晶場の効果により Ce のオンサイトの 4f-5d 混成波動関数が形成され、電気双極子モーメントが各 Ce サイトで発生する。また、磁気トロイダル双極子モーメント $\vec{t}_1(\vec{r}_i)$ も各 Ce サイトで発生する。さらに、vortex 秩序が発生すると、20 面体の磁気トロイダル双極子モーメントの総和 $\vec{t}_{1C} = \sum_{i=1}^{12} \vec{t}_1(\vec{r}_i)$ が (111) 方向に強的に揃うことを見出した。この結果は、20 面体のクラスタ磁気トロイダルモーメント \vec{T}_{1C} と原子の磁気トロイダル双極子モーメントの和 \vec{t}_{1C} に共鳴現象が生じる ($\vec{T}_{1C} // \vec{t}_{1C}$) ことを意味している [1]。

また、準結晶の有効磁気モデルに 2-20 面体クラスター平均場近似法を適用して基底状態の相図を求めた。その結果、相図の広い領域でノンコリニア磁気構造が実現し、4f と 5d のエネルギー準位交差が起こった場合に全ての 20 面体の磁気トロイダル双極子モーメントの和 \vec{t}_{1C} が強的に揃う磁気構造となっていることを見出した [1]。

本研究は古屋駿太 (九州工業大学)、河村光晶 (横浜国立大学) 各氏との共同研究に基づいている。

[1] S. Watanabe, S. Furuya, and M. Kawamura, *Odd parity crystalline electric field and multipoles in Ce-based icosahedral quasicrystal and approximant*, in preparation.



ミクロな非対称性が誘起する 超伝導非相反現象

大同 暁人

京都大学大学院理学研究科 助教

超伝導体はゼロ抵抗を示しますが、これは電流の方向によらずに実現することが一般的です。しかし近年、電流の方向によって金属状態・超伝導状態が切り替わる「超伝導ダイオード効果 (SDE)」が注目を集めています。SDEは一般に時間・空間反転対称性が同時に破れることで実現し、その起源は様々ですが、本公募研究では特にミクロな対称性の破れを起源とするケースに注目しました。本稿では、特にゼロ磁場SDEに関連した成果についてご紹介します。

多くのSDE実験では外部磁場が時間反転対称性の破れの起源ですが、例外も存在します。その一例が WSe_2 捻り三層グラフェンです。この系では高効率のゼロ磁場SDEが実現されており、さらに特定の状況では(1)電流が小さい場合は有限抵抗、(2)電流が大きい場合は一方向にはゼロ抵抗、逆方向には有限抵抗、という興味深い現象が観測されています。この現象は(2)の点で効率100%のSDEと言えますが、(1)は他の系では見られない振る舞いであり、その機構はよくわかっていませんでした。

私たちはまずこの状況を実現する具体的なモデルを提案することを目的に研究を行い、系を非平衡状態に駆動するアプローチ[1]を提案しました。しかし、残念ながらこのモデルは物質との対応が不明瞭という問題がありました。そこで、より現実的な機構として、 WSe_2 捻り三層グラフェンで提案されていた「バレー偏極」と「有限運動量超伝導」に基づく機構を提案することができました[2]。詳細は割愛しますが、3回の

異方性により3つの等価なクーパ対運動量が安定となり、それらの縮退に注目すれば実験結果が説明できます。また、電流方向によっては相反的な電流誘起ゼロ抵抗の実現を予言しました。

研究[1]での「非平衡性が時間反転対称性を有効的に破る」というアイデアは、京大白石グループとの共同研究によっても実証することができました[3]。同グループではFeSeにおいてゼロ磁場SDEを観測していましたが、FeSeは時間反転・空間反転対称性を持つため、その起源は不明瞭でした。丁寧な対照実験によって、このSDEの起源が系に意図せず生じた温度勾配 (=非平衡性) であることが明らかになりました。具体的にはFeSeの大きな熱電係数と三角形型の試料形状、電極との接触抵抗に起因しており、外部ヒーターを用いてSDEの極性が制御可能であることに裏付けられています。

上記以外にも、二層系の相反・非相反ゆらぎ伝導度[4]などの成果を得ています。これらの成果および今後の研究を通して、超伝導非相反現象のより良い理解に貢献していきたいと考えています。

共同研究者の柳瀬陽一教授、松本亜己氏 (京都大学理)、白石誠司教授、大島諒准教授、永田歌寧氏 (京都大工)、青木基氏 (カタロニア科学ナノ技術研究所)、笠原成教授 (岡山大理)、笠原裕一教授 (九州大理)、松田祐司教授 (Los Alamos国立研究所)、安藤裕一郎教授 (大阪公立大工)、K. T. Law教授 (HKUST) にこの場をお借りして深く御礼申し上げます。

[1] A. Daido and Y. Yanase, Phys. Rev. B **111**, L020508 (2025).

[2] A. Daido, Y. Yanase, and K. T. Law, Phys. Rev. Lett. **135**, 236001 (2025).

[3] U. Nagata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **134**, 236703 (2025).

[4] T. Matsumoto, Y. Yanase, and A. Daido, Phys. Rev. B **111**, 064501 (2025).



Anomalous Hall conductivity in a van der Waals ferromagnet under pressure

Harald O. Jeschke

Professor, Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University

The ferromagnetic insulator CrGeTe_3 has been studied intensively because it still orders in the two-dimensional limit. This indicates that spin-orbit coupling is important in this material. Under pressure, the material undergoes an insulator to metal transition which is captured by our density functional theory (DFT+U) calculations. We use fully relativistic all electron DFT calculations and find that there are substantial changes to the Fermi surface under pressure[1]. As a consequence, the Berry curvature Ω_z , shown for a particular cut through the Brillouin zone in Fig. 1(a), is also strongly pressure dependent. We integrate the Berry curvature over the entire Brillouin zone in order to determine the anomalous Hall

conductivity (AHC) of CrGeTe_3 for different values of the hydrostatic pressure. The result is shown in Fig. 1(b). Interestingly, the anomalous Hall resistance extracted from transport measurements suggests that besides the intrinsic contributions to AHC which we determined here, CrGeTe_3 also has large extrinsic contributions to AHC. We have recently studied a chemically similar ferrimagnet, $\text{Mn}_3\text{Si}_2\text{Te}_6$, and similarly found that intrinsic contributions to AHC may not be enough. This would require the calculation of effects like skew scattering which we will address in future work.

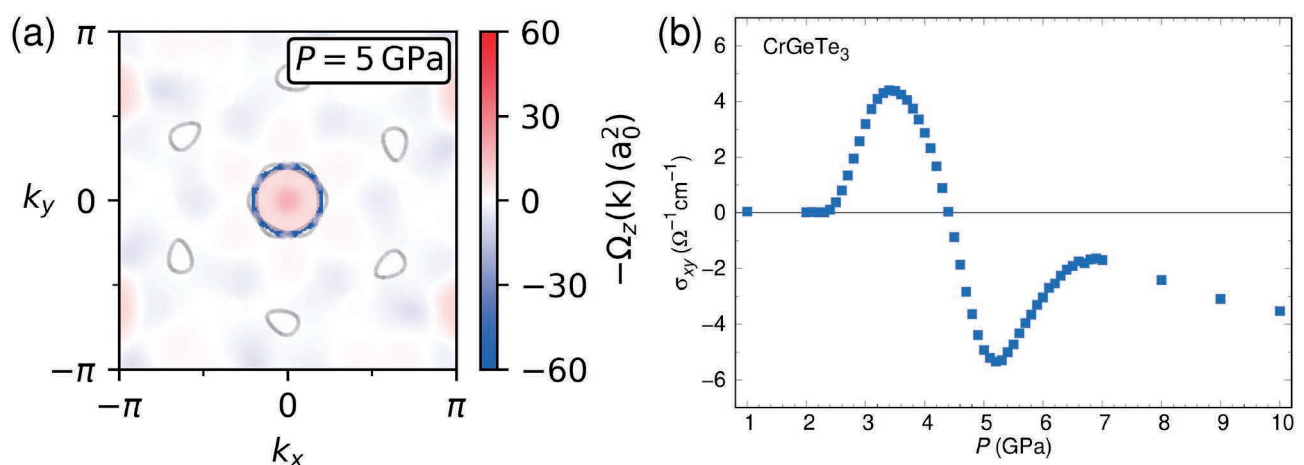


Figure 1: (a) Berry curvature of CrGeTe_3 at a pressure of $P=5$ GPa. The gray lines indicate the Fermi surface. (b) Anomalous Hall conductivity as function of pressure.

[1] G. Scharf, D. Guterding, B. Hen, P. M. Sarte, B. R. Ortiz, G. Kh. Rozenberg, T. Holder, S. D. Wilson, H. O. Jeschke, A. Ron, Phys. Rev. Res. **7**, 013127 (2025).



電子自由度のアシンメトリによる トポロジカル相制御

上田 健太郎

東京大学大学院工学系研究科 講師

D01班に参画させていただき、はや二年が経ちました。この間、セミナーやミーティングへの参加を通じて、多くの刺激や新しい交流の機会を得ました。多くの方々との共同研究にも発展し、非常に実りある二年間となりました。代表の鬼丸先生をはじめ、本研究領域の皆様に感謝申し上げます。

本課題では、空間反転対称性の破れたハーフホイスラー希土類化合物を舞台に、電子自由度のアシンメトリがもたらす新しいトポロジカル物性を開拓してきました。以下、二つのテーマについて概要を紹介します。

(i) 運動量空間におけるスピントクスチャーの外場制御と超巨大磁気抵抗効果

空間反転対称性の破れに起因するバンドのスピントクスチャーは、特にスピントロニクス分野で重要視されている(図1)。しかし、フェルミエネルギーに比べて非常に小さなエネルギースケールである外部磁場では、制御が困難であった。本研究では、参画者が初めて単結晶化に成功した $RAuSn$ ($R=Ho, Er, Tm, Lu$)におけるスピントクスチャーを、第一原理計算と量子振動解析を組み合わせることで明らかにした。非磁性 $LuAuSn$ では、111面にラシュバ型、100面にドレッセルハウス型の、2.3 meVに及ぶ巨大なスピントクスチャーが生じていることを突き止めた(図1)。さらに、 $HoAuSn$ において、

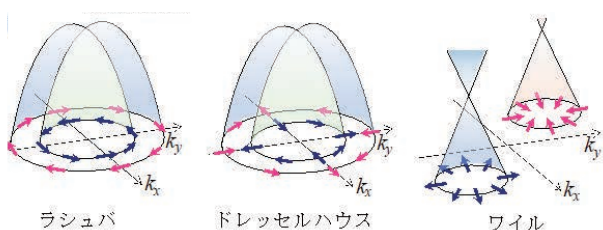


図1. 運動量空間におけるスピントクスチャー

240 meVもの交換分裂でワイル点が生じ、渦状のようなスピントクスチャーへ変化すること、4桁を超える負の超巨大磁気抵抗効果が現れること、を明らかにした。

【K. Ueda, T. Yu, *et al.*, Phys. Rev. B **111**, 035140 (2025)】

(ii) 強四極子秩序を伴う反強磁性トポロジカル絶縁体DyPtBiにおける異常な金属状態

反強磁性トポロジカル絶縁体(AFMTI)は、時間反転操作(Θ)と並進操作($T_{1/2}$)を組み合わせた操作($S = \Theta T_{1/2}$)下で定義される Z_2 不変量が有限な系である。磁性と結合することで、アクシオン場由来する電磁応答など多くの興味深い物性が期待されている。しかし、その候補物質($MnBi_2Te_4$ など)は極めて少ない。

研究対象のDyPtBiは、Dyの4f電子が反強磁性秩序することでギャップが開きAFMTIが実現する(図2a,b)。広島大の石井先生、北海道大の柳澤先生による超音波測定により、強四極子秩序が磁気秩序と同時に起こることを突き止めた(図2c)。これに伴う格子歪みが立方対称性を破り、大きなバルクギャップを誘起したと考えられる。さらに一軸応力下で中性子回折と抵抗率測定を行い、磁区の数減少が転移温度以下の抵抗率を増加させること(図2d)、つまり磁壁に電気伝導性があることを見出した。【K. Ueda, I. Ishii, T. Yanagisawa, *et al.*, in preparation】

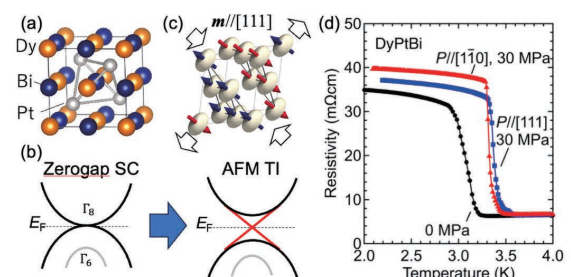


図2. (a) DyPtBiの結晶構造、(b) 電子構造、(c) Dy 4f四極子秩序、(d) 一軸圧下での抵抗率の温度依存性



軸性アニーリングによる 強相関非対称物質の創製

志村 恭通

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 准教授

まず、このたびは2年間ご支援いただきまして、誠にありがとうございました。

一軸歪は、非従来型超伝導や幾何学的フラストレート系などに対して、ドメイン制御のみならず、対称性の低下に伴う基底状態を変えうる重要なパラメーターとなります。一軸歪を印加した状態での精密測定も重要ですが、私は物質合成の新たなアプローチとして“軸性アニーリング”を独自に考案しました。軸性アニーリングとは、単結晶試料に一軸歪を加えた状態のまま、圧力セルごと石英管に真空封入して1000℃以上の高温で保持し、試料に歪を残す方法です。

対象物質として選定したCeRhSnは、Ceが擬カゴメ格子を組む非磁性の重い電子系化合物の一つです。近藤温度が約240 Kと高いため、通常なら温度を下げて非磁性のフェルミ液体的挙動を示すはずですが。しかしグリューナイゼン比(熱膨張率/比熱)の温度変化から、基底状態が磁気秩序相と非磁性相の境目、即ち量子臨界点近傍に位置することが知られています。さらにCeRhSnは熱膨張率の異方性から、擬カゴメ格子の面内方向への一軸歪に敏感な“異方的”量子臨界状態であると考えられています。

そこで私は、CeRhSnの面内方向へ一軸歪を印加して高温保持する軸性アニーリングを行いました。そしてX線では難しい試料の内部歪を観測するため、単結晶中性子回折を行いました。その結果、試料がある方向に一樣に歪んだ証拠は得られなかったものの、伸びたドメインと縮んだドメインが増大することを示す結果が得られました。さらに、その試料に対して物性測定を行ったところ、未加工の試料と比較し

て、約2 K以下で熱膨張率や磁化、比熱がひとけた大きな値を示すことを明らかにしました。この結果は軸性アニーリングにより、何らかの4f電子の局在磁気モーメントが発達したと考えられます。

現在は、本結果の再現を含め、アニーリングの圧力や温度、冷却速度などのパラメーターを調整しているところですが、まだ霧の中を手探りで歩いているような感覚です。しかし本手法が確立すれば、ピエゾ磁気効果などの交差相関応答の研究にもつながると期待しています。

一方、CeRhSnの研究は、A02班 橘高准教授(東大)らにより見出された“回転”グリューナイゼン比という新たな量子臨界性の指標の開発、木村教授(大阪大)らにより行われた赤外分光実験による量子もつれの検出、P. Gegenwart教授(独: Augsburg大)らにより行われたCeRh_{0.9}Pd_{0.1}Snの量子グリフィス相の観測と、2025年に我々の試料から数多くの成果が得られています。他グループからの論文も散見され、CeRhSnは単結晶の物性報告から4半世紀経つにもかかわらず、未だ魅力は尽きないようです。

最後に私は、軸性アニーリングや試料合成に取り組みつつも、1 K以下の極低温測定を行っております。例えば、“スキル相伝”の一環として原子力研究開発機構の北澤崇文さんとHoCo₂Zn₂₀の磁化測定を行いました。また手軽に極低温のデータを提供するため、Yb系金属磁気冷凍材料YbCu₄Niを活用した極低温物性測定システムの構築を行っております。公募第2期には応募しておりませんが、軸性アニーリングに加えて極低温測定でも“アシンメトリ量子”に引き続き貢献できれば幸いです。



局所的に空間反転対称性の破れた ウラン化合物の物質探索と超伝導

青木 大

東北大学金属材料研究所 教授

UTe₂をはじめとして、ウラン化合物には魅力的な超伝導体が数多く存在する。ウラン化合物の重い電子系超伝導体は10種類ほどが知られているが、その多くがスピン三重項超伝導体の候補として考えられている。とりわけ、強磁性超伝導体URhGe, UCoGe, UGe₂は、特定の磁場方向で強磁性ゆらぎの誘起による磁場再突入型（リエントラント）超伝導や磁場強化型超伝導が現れ、パウリリミットを大幅に超える上部臨界磁場H_{c2}を持つことからスピン三重項超伝導が確実視されている。いずれも非共型な空間群に属しており、局所的に空間反転対称性が破れている。アンダーソンは昔、「奇パリティ（スピン三重項）超伝導体は、f電子を持つ原子が単位胞内に少なくとも2個ないといけない」と1ページにも満たない論文で予言的に書いているが、まさにそのとおりになっている。UTe₂は超伝導発見の一報が2018年末にもたらされ、すでに7年が経過したことになる。超純良単結晶も育成されるようになり、多くの進展があった。

本研究課題は、UTe₂の超純良単結晶を用いた精密物性測定と、UTe₂に触発された新奇ウラン化合物の物質開発が主なテーマである。新物質開発については、UTe₂の構造に遷移金属を入れた化合物、たとえばUCuTe₂のような化合物ができないかと期待して、さまざまな化合物の育成に挑戦した。なお、

ThCuP₂という化合物の存在は知られており、UTe₂型の結晶構造にCuが入り込んだ構造になっている。UTTe₂ (T=Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au)について、Teフラックス法、塩フラックス法、液相輸送法[1]で試してみたが、どれも失敗した。その代わりというわけではないが、UTSb₂ (T=Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au)の単結晶育成をSbフラックス法で行った。こちらは、すでに物質の存在が知られており、**P4/nmm**の空間群を持つ局所的に空間反転対称性が破れた系であるが、おおむねどれも単結晶育成に成功している。遷移金属の欠損が起きやすい系であるので、今後注意深く物性評価を行っていきたい。CeRh₂As₂に触発されて、CeT₂Sn₂ (T=Cu, Ni)などの**P4/nmm**の空間群で122系の化合物の単結晶育成も行っている。また、U₂RhIn₈においては、RRR=700の純良単結晶育成に成功し、3種類の準2次元フェルミ面を検出した[2]。

UTe₂については、超純良単結晶を用いたH_{c2}の角度依存性を報告し[3]、圧力下の交流比熱測定から磁場**b**軸方向におけるリエントラント超伝導がゼロ磁場の多重超伝導につながることを報告した[4]。すなわち、リエントラント超伝導が多重超伝導の帰結として出現することを明らかにした。UTe₂のスピン三重項超伝導を強く支持する結果である。

[1] D. Aoki, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 043703 (2024).

[2] D. Aoki, Y. Homma, H. Harima, and I. Sheikin, Phys. Rev. B **111**, 035155 (2025).

[3] D. Aoki, I. Sheikin, N. Marquardt, G. Lapertot, J. Flouquet, and G. Knebe, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 123702 (2024).

[4] T. Vasina, D. Aoki, A. Miyake, G. Seyfarth, A. Pourret, C. Marcenat, M. Amano Patino, G. Lapertot, J. Flouquet, J.-P. Brison, D. Braithwaite, and G. Knebel, Phys. Rev. Lett. **134**, 096501 (2025).



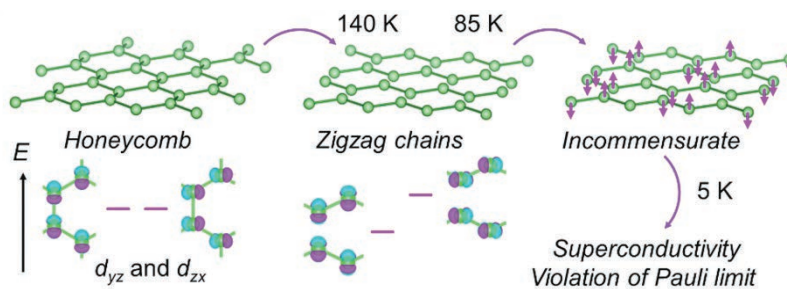
ハニカム格子超伝導体における軌道転移の発見

石川 孟

東京理科大学理学部第一部応用化学科 講師

公募D01班にてお世話になっております石川孟と申します。公募研究では、局所的に空間反転対称性が破れているハニカム格子系に着目し、有機無機ハイブリッド物質の磁性研究 [1] (計画研究C01班の清水先生との共同研究)、金属有機構造体 (MOF) の構造相転移と圧電性の研究 [2] (公募研究A01班の鬼頭先生との共同研究)、ヨウ化物超伝導体の構造相転移の研究 [3] に取り組みました。本報告では二次元ハニカム格子超伝導体 La_2IRu_2 において観測された構造相転移について紹介します。 La_2IRu_2 は空間群 $P6_3/mmc$ に属する層状化合物で、 Gd_2IFe_2 型と呼ばれる結晶構造をもちます。この構造は希土類の三角格子と遷移金属のハニカム格子を有するため、フラストレート磁性やハニカム格子に由来するバンド構造の実現が期待できますが、あまり性質が調べられていません。我々は過去に La_2IRu_2 が 4.8 K で、同型の La_2IOs_2 が 12 K で超伝導を示すことを報告しました。そのときに超伝導に先立ち2段階の相転移が存在することが分かっていたのですが、その正体は不明でした。我々は

最近単結晶の育成に成功し、実験室系と放射光施設で結晶構造を詳細に調べたところ、140 K でハニカム格子がジグザグ鎖を形成するように歪み ($P6_3/mmc \rightarrow Cmc$)、85 K で $q \sim (0.36, 0.36, 0)$ の波数をもつ格子に非整合な歪みが生じることが分かりました。横浜国立大の河村先生の第一原理計算から、高温の相転移が d_{zx} 軌道と d_{yz} 軌道の縮退を解く一種の軌道ネマティック転移として理解できることが分かりました。今後、より低温で生じる構造変化の起源や、これらの相転移が多極子の観点からどのように理解できるか、高い上部臨界磁場をもつ超伝導とどのように関連するかを明らかにしたいと考えています。また、計画研究B01班の服部先生が関連する理論研究に取り組んでいることが分かり [4]、何らかの形で共同研究が出来ればと考えています。最後に、4月に東京理科大学神楽坂キャンパスに異動いたしました。応用化学科ということで、今後も物質開発に取り組んでいきますので、ご指導の程よろしく願いいたします。



[1] H. Ishikawa *et al.* Physical Review B **109**, L180401 (2024).

[2] S. Kitou *et al.* Journal of the American Chemical Society **147**, 13642 (2025).

[3] H. Ishikawa *et al.* under consideration.

[4] K. Hattori *et al.* Physical Review Research **6**, L042068 (2024).



原子レベルで制御された空間アシンメトリに 起因する磁気相互作用

松野 丈夫

大阪大学大学院理学研究科 教授

本公募研究では、原子層レベルで制御された酸化物界面における空間アシンメトリに着目し、そこから生じる磁気相互作用を実験的に理解することを目的として研究を進めています。空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用が共存する界面では、通常の強磁性体とは異なる非対称な磁気相互作用、すなわち Dzyaloshinskii–Moriya (DM) 相互作用が現れることが知られており、アシンメトリ量子の観点から重要な研究対象です。具体的には、強いスピン軌道相互作用をもつイリジウム酸化物 SrIrO_3 と、遍歴強磁性体である SrRuO_3 からなるエピタキシャル界面を作製し、界面に由来するDM相互作用の評価に取り組んでいます。これらの薄膜では、成膜条件や層構造のわずかな違いが磁性に与える影響についても注意深く検討しており、原子レベルで制御された界面が形成されています。この $\text{SrIrO}_3/\text{SrRuO}_3$ 界面では、異常ホール効果中に現れる特徴的な信号（トポロジカルホール効果）とスキルミオン形成との関連が我々のグループにより最初に報告され [1]、その後多くの関心を集めてきました。しかし、この手法ではスキルミオンの存在を仮定する必要があり、DM相互作用そのものを定量的に評価するには限界があることから、磁気構造の解釈に依らない評価手法が求められてきました。

そこで本研究では、傾斜磁場下における異常ホール効果測定を通じて磁化反転過程を詳細に調べ、その解析に磁気液滴核形成モデルを適用することで、

界面DM相互作用を定量的に評価しています。磁場の印加方向を変えながら磁化反転挙動を解析した結果、 $\text{SrIrO}_3/\text{SrRuO}_3$ 二層膜では、同一条件で作製した SrRuO_3 単層膜と比較して、磁化反転を支配する面内磁場成分が系統的に大きくなることが分かりました。この面内磁場成分は、磁化反転の核形成を支配する有効磁場 H_{DMI} として定義され、界面DM相互作用に対応する量であると解釈できます。観測された H_{DMI} の増大は $\text{SrIrO}_3/\text{SrRuO}_3$ 界面に起因するDM相互作用の寄与を直接反映していると考えられます。本手法は、スキルミオンなどの特定の磁気構造の存在を前提とせず、磁化反転過程のみに基づいて界面DM相互作用を評価できる点に特徴があります。

本公募研究で得られた知見は、空間反転対称性の破れとスピン軌道相互作用が界面磁性をどのように決定するのかを、実験的に検証可能な形で示すものです。これらの成果は、界面磁性の基礎的理解に加えて、スキルミオンの設計や制御といった将来的展開にもつながり、アシンメトリ量子に基づく界面磁性の理解と設計に資すると考えています。

[1] J. Matsuno *et al.*, *Sci. Adv.* **2**, e1600304 (2016).

[2] S. Kim *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 220402(R) (2017).



表面非対称電子軌道の制御による 非相反伝導特性の最大化

金澤 直也

東京大学生産技術研究所 准教授

共同研究者 松岡 秀樹 東京大学生産技術研究所 特任助教

関 修平 京都大学工学研究科 教授

須田 理行 名古屋大学理学研究科 教授

対称性の破れは物質の示す応答に非相反性をもたらす。空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れた系では、外場に対する応答が方向によって異なる非相反現象が発現する。本稿では、分子のキラリティ（ねじれ）という空間的非対称性を活用し、トポロジカル強磁性表面の磁化状態を非相反的に制御することに成功した我々の最新の研究成果を紹介する[1]。

我々は、キラリイオン液体を用いた電気二重層トランジスタ (EDLT) ゲーティングにより、FeSi(111)薄膜表面の強磁性ドメイン偏極率を制御できることを実証した。FeSiはバルクでは非磁性絶縁体であるが、表面にはZak相に起因する二次元強磁性状態が局在している[2]。この表面に局在した磁性は界面環境に極めて敏感であり、キララル分子との相互作用を探る理想的なプラットフォームとなる。

本研究の中心となる発見は、ゼロ磁場冷却後の磁気ドメイン偏極率がイオン液体のキラリティに依存して非対称になる点である。S体キラリイオン液体を接触させると下向き磁化ドメインが優勢となり、R体では上向きドメインが優勢となる。一方、ラセミ体（S体とR体の等量混合物）ではこの偏りは消失する。すなわち、分子の鏡像異性体を入れ替えるだけで、磁化の優先方

向が反転するという明確な非相反応答が観測された（図）。特に、磁化ドメイン分極率が最大87%に達し、FeSiの二次元強磁性がキララル分子との結合に対して特異的に高い感受性を持つことを示している。

この現象の微視的機構として、キララルフォノンによる角運動量移行などが候補として挙げられる。いずれの機構においても、分子のキラリティがもたらす空間反転対称性の破れと、何らかの動的過程による時間反転対称性の破れが協奏的に作用し、磁化方向の選択性を生み出していると考えられる。

本成果は、キララル分子界面という新たな自由度を用いた非相反スピン制御の可能性を切り拓くものである。電流や外部磁場を必要としない磁化制御は、低消費電力スピントロニクスデバイスへの応用が期待される。

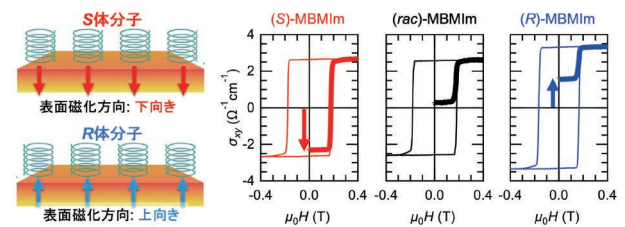


図:分子のキラリティ（ねじれ）によるFeSi表面磁化ドメイン偏極率の制御。

[1] H. Matsuoka, A. Moriyama, T. Hori, Y. Tokura, Y. Iwasa, S. Seki, M. Suda, and N. Kanazawa, Electric-Field Control of Two-Dimensional Ferromagnetic Properties by Chiral Ionic Gating, *Nano Lett.* **25**, 15297–15304 (2025).

[2] Y. Ohtsuka, N. Kanazawa, M. Hirayama, A. Matsui, T. Nomoto, R. Arita, T. Nakajima, T. Hanashima, V. Ukleev, H. Aoki, M. Mogi, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi, *Sci. Adv.* **7**, eabj0498 (2021).



RuO₂ 薄膜における超伝導と磁性

打田 正輝

東京科学大学 准教授

共同研究者 石原 滉大 東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教
木俣 基 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター、研究副主幹

ルチル型酸化物の一つであるRuO₂は、低温における温度計をはじめとして既に幅広い応用がなされている材料ですが、近年、超伝導体及び典型的な交替磁性体の候補物質として、改めて大きな注目を集めています。RuO₂薄膜において巨大なエピタキシャル歪みによって超伝導が誘起されることが発見され[1]、ほぼ同じ時期に、副格子上的共線の反強磁性秩序に基づいた、いわゆる交替磁性的スピン分裂のアイデアが提案されました[2]。これをきっかけとして、RuO₂においては、バルク試料における反強磁性秩序の有無の解明、及び薄膜試料におけるスピントロニクス機能の実証、の二つを主な方向性として、精力的な研究が行われています。一方で、エピタキシャル歪みを受けたRuO₂薄膜において実際に反強磁性秩序が存在するのであれば、交替磁性的スピン分裂と関連した輸送現象、特に超伝導輸送現象を研究する上で理想的な系になることが期待されます。理論的には、このような非相対論的スピン分裂バンドにおける異方的超伝導状態の研究が急速に進んでいます。

本研究では、エピタキシャル歪みを受けた高品質RuO₂薄膜が反強磁性秩序を示すかどうかを明らかにすること、ならびに超伝導と交替磁性との関連を

調べることに焦点を当てました。まず、これまでRuO₂において反強磁性秩序に起因するとされてきた共鳴回折ピークについて再検討し、その偏光依存性・アジマス角依存性を詳細に調べることで、これらのピークは、主に副格子構造に由来した局所的な電荷異方性に起因していると結論づけました[3]。また、どのような種類のエピタキシャル歪みが超伝導転移温度と良く相関しているかを調べたところ、二つの副格子を結び付けているらせん対称性を破るような歪みと超伝導転移温度との相関はほぼ見られないことが明らかになりました。さらに、A02公募班の石原氏らと共同で、RuO₂が示す超伝導に対する不純物効果の研究も進めています。点欠陥を導入するために電子線照射を行ったRuO₂薄膜では、超伝導転移温度が系統的に抑制されることがわかりつつあります。

他に本研究領域に関連する成果として、面内磁場が面直方向のホール抵抗率ベクトルを誘起する非対角応答の研究を進めており[4]、特にA02計画班の木俣氏らと共同で、強磁場下における非対角応答の多極子依存性を明らかにしました[5]。

[1] M. Uchiida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 147001 (2020), J. P. Ruf *et al.*, Nat. Commun. **12**, 59 (2021)

[2] M. Naka *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019), L. Šmejkal *et al.*, Sci. Adv. **6**, eaaz8809 (2020)

[3] C. A. Occhialini *et al.*, arXiv: 2510.13767 (2025)

[4] A. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **133**, 236602 (2024), S. Nishihaya *et al.*, Phys. Rev. Lett. **135**, 106603 (2025), S. Nishihaya *et al.*, Adv. Mater. **37**, e02624 (2025)

[5] A. Nakamura *et al.*, arXiv: 2507.21458 (2025)



アシンメトリ量子研究の現在地

大原 繁男

名古屋工業大学大学院工学研究科 教授

令和8年（2026年）の年明け早々、1月6日（火）午後から8日（木）夕刻までの3日間、名古屋工業大学において本領域研究の「令和7年度 領域全体会議・成果報告会」（以下、本会議）が開催された。

領域研究として3年目、前半の公募研究が2年目の終了をむかえることから、本会議は「成果報告会」と銘打たれている。そのため、計画研究と公募研究については全構成員が口頭講演を行った。

口頭講演数は、招待講演2件、若手招待講演1件、計画研究26件、公募研究18件であった。ポスター講演は、学生（博士後期14件、博士前期20件、学部1件）と若手を主体とした研究者（28件）により63件行われた。最後に、会議の締めくくりとして、評価委員の鳥養先生と小形先生からご講評をいただいた。

参加者数は120名以上を数え、あちらこちらで活発な議論が繰り広げられた。特にポスター会場では、2日目のポスター講演はもとより、すべての休憩時間において絶えることなく議論が交わされていた

のが強く印象に残った。図1に全体集合写真、図2にポスター講演の俯瞰写真と図3、4に最終日（3日目）の昼休みのようすを示す。賑わいが伝わると幸いである。学生や若手研究者間の議論も活発で連携も進んでいるように感じた。

本領域研究では、物質中の対称性の破れを軸に、これまでの量子物性研究で捉えきれていない新しい秩序や交差相関の創出と解明を目指している。評価委員の小形先生も指摘されたように、本会議では「アシンメトリ量子」の考え方がうまく共通認識となったことが感じられた。このことは、本領域の出発点となった拡張多極子による基底と「非対称性から生まれる物語（ストーリー）」という筋書きが広範に使うことができるということの立証であろう。

計画研究と公募研究の報告では、研究内容にとどまらず、装置開発や共同研究の展開、業績一覧を提示する講演が多くあった。本会議が報告会でもあることがよく意識されていたと思う。



図1 全体集合写真

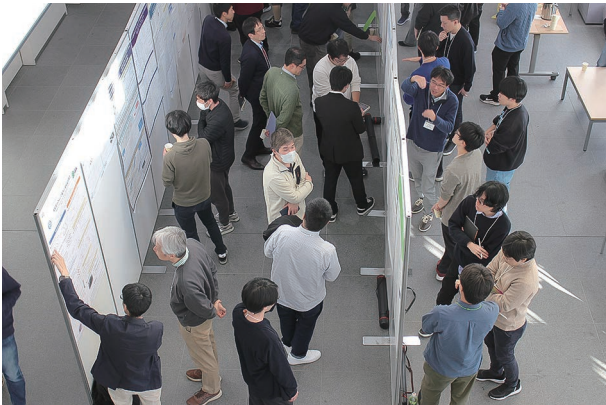


図2 ポスター発表俯瞰写真

共同研究の発展は学術変革領域研究においてとても重要であり、今後も注力する必要がある。どんな物質が見出されたか、次にどのようなことをすれば面白いのか、あるいは、誰と組めばそれができるのか、という情報の共有が進んだように感じる。後半は公募研究の数も倍増する。これからも新しい出会いが新しい共同研究を生み出していくであろう。

以下、いくつか私の印象に残った成果に言及する。公募研究については本ニュースレターに成果が掲載されているので参考にされたい。

擬カゴメ構造をもつURhSnとHoAgGeは、それぞれカイラル四極子秩序と磁気トロイダル秩序を示す物質として注目される。いずれの物質も、単結晶合成、精密測定、理論が協働してその解明が進められており、領域内での共同研究が発展した典型と言える。また、URhSnのカイラル四極子秩序の理解は、いわゆる「隠れた秩序」の解明に繋がっていることが予想され、今後の発展にわくわくする。

EuIr₄In₂Ge₄は、偶然も手伝って合成された物質であり、物質探査の醍醐味を思い出させてくれた。微細

加工試料での非相反伝導の観測に至り、吸収にもめげず中性子を用いた観測に挑み成果が出ていた。測れないと思いきんではいけない。測りたければ測ろう、である。

物性制御についても元素の置き換えや不純物効果、人工的な歪の導入など幅広く試みられていた。理論計算による支援も進んでいると感じた。メゾスコピック系への展開も始まっている。元々スピントロニクスとアシンメトリ量子は相性がよい。アシンメトリロニクスの発展へ向けて、ますます分野を広げるべく力を合わせたい。

奇パリティ混成あるいは拡張多極子の観測は本領域の本質である。従来からの手法の精密化や顕微化、熱が関係する測定の進展など、深く幅広くなっていた。私にとっては、共鳴X線散乱を用いての挑戦的な手法開発や高強度の放射光やX線の吸収・散乱を用いての電荷分布の観測、光電子運動量顕微鏡を用いたフェルミ面の観測の高精度化には驚くものがあった。そこには密度汎関数理論(DFT)による理論計算も強く寄与している。計画研究と公募研究、あるいは公募研究間での共同研究も進められており、この領域研究がきっかけであれば、嬉しいことである。実空間での電子分布(というのは奇妙な表現だが、実空間であることを強調したい)を観測することは今後ますます重要になるであろう。

対称性に視点を移してみる。立方晶の物質の報告は複数あり、新しいタイプのフラストレーションの提案もあった。いわゆる1-2-20系物質もお家芸として研究が進むことが期待される。ホイスラー化合物も物質設計のやりやすさもあり、研究が増えてくるかも

しれない。

期せずして同じ結晶構造や結晶空間群型の物質を研究している場合も見受けられた。また $Pnma$ だな、などと思いながら講演を聞いていた。直方晶といえば、いわゆる1-2-10系もお家芸だと思うし、注目される。

私がカイラル物質を研究していることもあるが、理論による拡張多極子の観点からのカイラリティの分類や現象の予測にはとても興味をひかれた。合成すべき物質の予測にもつながると感じた。

以上、すべての結果に言及できないが、全体として研究の深まりとともに「アシンメトリ量子」が概念から明確な結果へと領域として進みつつあることがはっきりとわかる報告会であった。評価委員の鳥養先生が指摘されたように、公募研究は計画研究と相補的であり、研究対象と手法の両面において領域の視野を著しく拡大していただいた。また、口頭講演とポスター講演も相補的であったと私は感じた。口頭講演は時間が限られていることもあり、物質や手法、物性について大きな結論や指針が示されたのに対



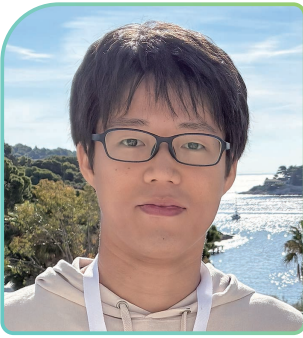
図3 最終日風景1



図4 最終日風景2

し、若手によるポスター講演ではその詳細や実際が語られていた。

若手の育成も学術変革領域研究の重要な役割である。鬼丸代表から、若手の海外派遣を進めたい案内があった。どんどん手があがることを期待して報告を終えることにする。



クロアチア研究会・国際会議参加報告

沼 昂輝

岡山大学大学院環境生命自然科学研究科 博士後期課程2年

私はこの度、若手研究者派遣助成事業によるご支援を受け、2025年10月10日にクロアチア・ザグレブで開催されたThe mini-workshop: Research exchange between Croatia and Japan、及び同月12-17日にフヴァル島で開催されたInternational Conference on Strongly Correlated Quantum Materials (HVAR2025)に参加しました。合計15時間以上のフライトを経て到着したザグレブは、西洋建築が並ぶ美しい町並みが印象的でした。

国際会議に先立ち、ザグレブの研究所 (Institut za fiziku) にてワークショップが開催されました。前半は現地の方々による遷移金属ダイカルコゲナイド (MX_2 系) を中心とした研究紹介、後半は鬼丸先生による領域紹介をはじめ、大原先生、芳賀先生(ついでに私)による非対称性に着目した研究紹介と、双方の特色がよく表れたワークショップでした。私は後半セッションにて口頭発表を行い、研究内容を紹介する機会をいただきました。実験系の参加者が多かったこともあり、観測方法に関するご質問を多く頂き、活発な議論につながりました。

その後、ザグレブから飛行機とフェリーを乗り継いでフヴァル島へ移動し、12日より国際会議HVAR2025に参加しました。本会議では、修士から研究している $CeRh_2As_2$ に関する内容でポスター発表を行いました。世界的に注目されている物質ということもあり、多くの方々から参考となるご助言をいただきました。さらに会議2日目の最後には、ドレスデンの M. Brando 氏から前向きなコメントを頂き、研究の励みになりました。一方、口頭講演でも同物質に関する最新の研究が紹介されており、物質の理解が進

む喜びと同時に競争の激しさを実感しました。また、講演全体を通して、多くの物質に対してDFT+DMFTの計算結果が紹介されていたことが印象的で、世界的に広く普及している計算手法であることを改めて認識しました。

本記事の執筆にあたり、「物理の話はあまり書かなくていいよ」とお聞きしていましたが、気がつけば物理の話ばかりになっていました。それも、今回の会議で得られたものが大きかったためと感じています。代わりに、フヴァルで撮影したビーチの写真を載せますので、美しいアドリア海やリゾート地の雰囲気を想像していただければと思います(図1)。

最後になりますが、今回の派遣にあたりご支援を賜りました鬼丸先生をはじめ、関係者の皆様はこの場を借りてお礼申し上げます。本会議で得た知見を今後の研究活動に活かしたいと思えます。



図1: “休憩時間に” 立ち寄ったビーチの写真。澄んだ海辺を駆けているように見えるが、実際は砂に足を取られてよろめいている様子。



第19回物性科学領域横断研究会 「凝縮系科学の最前線」参加報告

川又 雅広

東北大学金属材料研究所 助教／東京都立大学理学研究科 特別研究員(参加当時)

2025年11月27日、28日の2日間にわたり、第19回物性科学領域横断研究会が東京大学物性研究所にて開催されました。この研究会は、組織委員長・副委員長を交互に務めてこられた秋光純先生および福山秀敏先生により、平成19年に当時の科研費特定領域の合同研究会として発足したものであり、以降毎年欠かさずことなく開催されてきました。今年で19回目を迎える、歴史ある研究会です。本年度は、新たに7つの学術変革領域研究(A・B)が加わり、計15領域が参加する大規模な研究会になりました。2日間を通じ、各領域からの講演が行われ、物質科学分野における最新の研究成果が幅広く紹介されました。

オープニングでは、秋光委員長より、最近Nature誌に掲載された日本の科学力低下を指摘する記事に言及しつつ、今後の研究活動への期待と激励の言葉が述べられました。1日目は、5領域の講演とポスター発表が行われ、ポスター発表は全体で46件に上り、活発な議論が交わされました。本領域からは筆者を含め6件のポスター発表を行い、僭越ながら、筆者の発表を若手奨励賞に選んでいただきました(写真)。本研究は、A01班の松村氏・中尾氏・岩佐氏、B01班の服部氏、C01班の松田氏をはじめとする共同研究による成果[1, 2]であり、班を超えた融合研究の取り組みを評価いただけたものと受け止め、この場をお借りして共同研究者の皆様へ改めて感謝申し上げます。

1日目の講演終了後には、秋光先生・福山先生により創設された凝縮系科学賞の第20回授賞式が行われました。実験部門では藤野智子氏(横浜国立大

学)、理論部門では花井亮氏(東京科学大学)が選出され、記念講演も行われました。

二日目には、本領域を含む10領域の講演があり、本領域からは井澤公一氏の「アシンメトリ量子物質における非線形伝導テンソル」および、関山明氏の「放射光X線の偏光特性を活用した強相関軌道対称性の決定」の2つの講演がありました。

クロージングでは、福山副委員長より、これまでの領域横断研究会や参加領域に関する情報が研究会のホームページに集約されており、今後の研究展開において極めて有用なデータベースとして活用できる、とのお話がありました。これらは研究会HPの「関連領域リンク」から閲覧可能ですので、ぜひ一読いただければと思います。

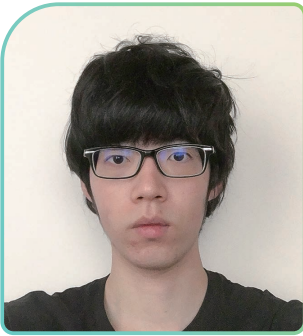
本研究会は、現在日本で進められている最先端の物性科学研究を広く学ぶことのできる貴重な機会ですので、学生や若手研究者の方々も来年度以降の参加をぜひご検討ください。



(写真) 秋光委員長より若手奨励賞表彰を受ける筆者。

[1] M. Kawamata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **95**, 024701 (2026).

[2] R. Higashinaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **95**, 034707 (2026).



トピカルミーティング「Workshop on theory of cross correlations, multipoles, and computational material design 2025 Winter」@ 御殿場

佐藤 匠

北海道大学理学研究院 博士研究員

2025年12月21-23日に、静岡県御殿場市「御殿場高原 時之栖」にて、B01班主催の研究会が開催されました。本研究会は、理論に特化した国際ワークショップとして昨年度に続き2回目の開催となりました。主な参加者を理論研究者と想定し、一般的な学会では発表時間の制約から十分に議論しきれない理論の詳細や手法についても共有し、議論を深めることを目的として開催されました。

十分な議論時間を確保するため、各講演には40分の時間が設けられ、加えて長めのコーヒープレイクが設定されました。その結果、2件の招待講演を含む12件の口頭発表と12件のポスター発表が行われ、会場の各所で活発な議論が展開されました。また、昨年度と同じ会場での開催となり、参加者全員が会场上階のホテルに宿泊したことで、時間を気にせず議論できるという点も大きな魅力でした。

本研究会のトピックは、交差相関応答、多極子、計算科学に基づく物質設計に絞られ、これらの分野で第一線に立つ研究者による濃密な講演や議論が行われました。発表には未出版の成果や進行中の課題も含まれていたためここには詳細を書くことはできませんが、第一原理計算による物性の定量評価や多極子による電子構造の定義・分類、強相関電子系や準結晶における多極子など、多岐にわたる内容が扱われました。私は周期結晶中における磁気多極子の定義に関する最近の成果を発表し、講演内外の時間で多くの質問や示唆に富むご指摘をいただきました。

本研究会で個人的に特に印象に残ったのは、カイラリティに関する議論です。物理学における多様

な定義や、固体中での起源、定量的評価の課題などについて、専門家たちが多角的な視点からカイラリティという概念を探求する様子には、学ぶところが多くありました。一つのトピックをここまで深く掘り下げられるのも、本研究会の特徴の一つだと感じました。最後に、本研究会を開催して下さった大槻先生をはじめとする主催者の先生方に心より感謝申し上げます。来年度もぜひ参加したいです。



図1 講演の様子。活発な議論が行われました。



図2 集合写真。背景に美しい富士山が望めます。



国際会議参加報告 REXS2025, Spain

松村 武

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

2025年10月6～10日の期間、スペインの地中海沿岸Roses (ロザス) で開催されたInternational Conference on Resonant Elastic X-ray Scattering (REXS2025)に参加してきました。1980年代に、BlumeやHannonらの理論が発展して共鳴X線散乱による磁性研究の可能性が開拓され、今では定石となった偏光解析などの手法が様々な物質に適用され始めた1990年代初頭にこの会議の起源があります。共鳴非弾性散乱と区別するためにElasticの文字が加えられ、2010年代から、主に欧米の主な放射光施設を中心に数年おきに開催されてきました。

今回は口頭42件、ポスター 15件で、参加者の全員が発表するほどの小規模の会議でした。今回、私が講演依頼を受けたこともあり、始めて参加した次第です。日本人は2人でした。過去に論文で名前を見ただけの方が何人もいて、じかに接することができたのは貴重な機会でした。特に、共鳴散乱の理論で何度も目にしたことがあるvan der Laan先生が参加されていたのは驚きでした。若手、ポスドク、学生の発表も多数ありました。

初日はバルセロナ郊外にある放射光施設ALBAで午前9時からオープニングがあり、続いてこの会議の特徴の一つとも言えるチュートリアルがありました。4つのコース (1) Coherent Diffractive Imaging、(2) X-ray Photon Correlation、(3) Circular Dichroism in REXS、(4) REXS & FDMNES があり、その中から1つを事前に選択して、約2時間コースの授業を受けるといったものです。私はなじみの薄い(1)を選択しましたが、その講師役を務めていたのが博士課程の学生で、事前に配布されたPythonコードを動かしながら

らの説明に加えて、レーザーを使った卓上装置でのデモ実験もあり、見事なものでした。

私は最近のEu化合物の研究を中心に、PFのBL-3Aで行っている円偏光X線を使ったらせんヘリシティ観測を紹介しました。これは、共鳴X線散乱の従来型の手法と言えます。一方、本会議のほとんどの講演は、マイクロ-ナノスケールの磁気イメージングと超高速時分割計測でした。これは昨今のビームラインが目指す方向性を表しているようにも見えます。とはいえ、どんな磁気秩序や軌道秩序なのか素性がわからない物質に対しては従来型の手法が不可欠であり、その重要性を再確認すべきだという声もありました。

会議場となったホテルからは地中海が一望でき、コーヒータイムにはいつも素晴らしい景観が眼前に広がっていました (写真)。昼食も浜辺のレストランで、穏やかな日差しの下、海を見ながらの地中海料理とワインを楽しみ、午後のセッションの開始が近づいても誰も気にしない、南欧の相変わらずの時間感覚はさすがのものでした。





討論会「アシンメトリ量子物質の機能物性に関する現状の把握と展望」

山根 悠

大阪大学基礎工学研究科 助教

2025年11月1日(土)～11月3日(月)の間、島根県松江市のホテル白鳥で、討論会「アシンメトリ量子物質の機能物性に関する現状の把握と展望」が開催されました。会場のある松江といえば、現在放送されているNHKの朝ドラ「ばけばけ」の舞台であり、視聴者の1人である私にとって今最もホットな都市の1つです。大阪大学から会場までの移動時間は約5時間と長かったためゆっくり観光する余裕はありませんでしたが、松江駅から会場まで歩いた際、松江大橋を渡ることができました。主人公「松野トキ」が作中で何度も手を合わせた人柱伝説の残る欄干を見つけ、私も手を合わせることが出来ました。

本討論会には、領域内外の計17名が参加し、約10件の発表が行われました。会場のキャパが非常に限られているにも関わらず、私たち(山根、日比野、中村、桐越)の4名は、若手枠として参加させて頂きました。この場を借りて感謝を申し上げます。

さて、本会は「討論会」という名前の通り、成果だけでなく、学会発表では話しにくいような研究のうまく行っていない点も共有し、協力しあって領域全体の発展に貢献することを目的として開催されました。この目的のために、発表は1人1時間程度と一応決められていましたが、時間に縛られずその都度質疑応答しながら発表するスタイルが採用されました。また、発表以外にも多くの自由討論の時間が設けられていたものの、それでも足りないくらい議論が白熱していました。加えて、会場と宿泊施設が同一であったことから、プログラム外の夕食やその後のホテルの部屋でも研究活動についての意見交換が行われました。

1日目は、磁性金属間化合物における電流誘起磁化について、これまでに得られた成果と現状の課題が発表されました。電流誘起磁化を正しく測定するには、電流の作る浮遊磁場を細心の注意を払って差し引く必要があることが参加者の共通認識として共有されました。

2日目は、9:30から18:00過ぎまで、理論・実験の両面から交差相関応答に関して発表と活発な議論が行われました。すべてを紹介することはできませんが、理論の発表では、多極子を起点として応答現象を理解する準備は整ってきており、今後は現実に観測されている現象をどう説明していくかを考えている段階に入っている、と認識されました。実験の発表では、奇パリティ多極子が活性となる金属間化合物において、多極子のもつ対称性を反映した非線形伝導や光第二高調波発生が発現し、これらは交差相関応答の理解を深める上で相補的に利用できることが分かってきました。また、偶パリティ多極子を伴う反強磁性物質における異常ホール効果が多数報告されました。

最終日は、カイラル物質において研究されてきた円偏光二色性や電気磁気カイラル異方性などの特徴的な物性が俯瞰的に紹介され、これらが電気トロイダル単極子を用いた文脈でどう理解できるか議論されました。また、最近注目を集めているカイラリティ誘起スピン選択性(CISS)に関しては、現在のところEdelstein効果との質的な違いを明らかにするには至っておらず、その解明が今後重要になってくるとの認識を共有しました。

このように、本討論会では、普段の研究会と違って時間を気にすること無く、納得するまで議論を交わす



ことができました。その結果、現在の問題点を明らかにし、これから機能物性を開拓していくための方針が共有されたように思います。若手枠として参加させていただいた私としては、ベテラン研究者が学会発表で話しにくいような研究上の困難に出会った時、どのように工夫して乗り越えたのかを本人から聞くことができ、非常に興味深い体験でした。今後困難に直面した際には、今回伺った解決までの道のりを参考にしながら自分なりの方法で乗り越え、分野の発展に貢献できるような成果につなげたいと思います。

最後になりますが、同じく若手枠として参加した3名の研究者の感想をご紹介します。

2025年度4月より神戸大学理学研究科の助教を務めております日比野瑠央と申します。所属変更に伴い研究テーマを模索している中で、今回のような、トピックを絞った深い議論が可能な研究会に参加させて頂き大変貴重な機会となりました。自身の研究についても、実現までの課題を、学会等とは異なる雰囲気の中で議論する事ができ有意義なものとなりました。全体を通して、各先生が頭を悩ませながら実験的に難しい点を語っていたり、理論家の方々と認識のすり合わせをしたりしていた様子が印象的でした。若手の立場からも面白い研究結果を提供していけるよう研究に邁進していきたいと強く感じました。このような研究会に参加させて頂き、改めて感謝申し上げます。

—— 神戸大学理学研究科 日比野 瑠央

会場の規模が限られる中、若手枠として参加させていただいたことに深く感謝いたします。本討論会では、発表者と聴衆の距離が近く、時間に縛られず納得いくまで議論するという形式が印象的でした。完成した成果だけでなく、研究が行き詰まっている点や試行錯誤の過程まで率直に共有され、領域全体で課題を捉え直す貴重な機会となりました。若手として参加し、第一線の研究者が困難をどう乗り越えてきたのかを直接伺えたことは、今後の研究姿勢を考える上で大きな指針となりました。次世代を担う研究者としての緊張感を胸に刻みつつも、未知の現象に挑む楽しさを大切にしながら、研究を進めていきたいと思っています。

—— 名古屋工業大学物理工学類 中村 翔太

普段、現実物質の交差相関応答を評価する際には、実験によって決定された秩序を分子場として仮定し、その枠組みのもとで議論を進めることが多い。一方で本研究会では、対称性の観点から本来許されないはずの応答が観測されることがあり、その背景として秩序変数や結晶対称性そのものの再検討を要する物質も存在するとのことであった。このように秩序の同定段階に不確実性が残る状況では、交差相関応答の定量的評価へ直ちに進むことは困難である。今後は理論側からも、揺らぎの解析などを通じて秩序変数候補を絞り込み、その上で交差相関応答を定量的に評価するという、より段階的なアプローチが必要であると感じた。

—— 岡山大学異分野基礎科学研究所 桐越 研光



アウトリーチ

日本学術会議公開シンポジウム共催報告 「量子が世界を変える — 科学の100年と未来への挑戦」

網塚 浩

北海道大学大学院理学研究院物理学部門 教授

2025年は量子力学誕生から100年という節目の年にあたる。この記念すべき年に、日本学術会議物理学委員会主催の一般市民を対象とする公開シンポジウム「量子が世界を変える — 科学の100年と未来への挑戦」が、2025年11月15日に日本学術会議講堂においてハイブリッド形式で開催された。

本シンポジウムは、日本物理学会をはじめとする多くの学協会や教育研究機関が共催・後援する企画であり、その中で「アシンメトリ量子」も共催団体として参画した。日本学術会議主催の公開シンポジウムに、学術プロジェクト組織が共催という形で関与する例は多くなく、本領域にとって、基礎研究の成果と意義を社会に向けて示す一つの機会となった。

本シンポジウムは、素粒子・宇宙・物性・量子情報・計測技術など、量子力学に立脚する多様な研究分野の第一線研究者が一堂に会し、量子科学の過去・現在・未来を一般市民と共有することを目的として企画された。

当日は、対面45名、オンライン140名が参加し、小学生から高齢層まで、幅広い世代が同じ場で量子科学に触れる機会となった。会場では小学生から「どうして素粒子はそのような構成になっているのか」といった素朴な問いが投げかけられ、第一線の研究者が言葉を慎重に選びながら応答する場面も見られるなど、終始、和やかな雰囲気の中で進行した。

プログラムは三部構成とし、第1部では量子力学誕生の歴史的背景と、その後の科学・社会へのインパクトを概観し、第2部では、量子力学が多様な分野へと広がり、新しい知や技術を生み出してきたことを中心に、物理学の裾野の広さと奥行きを伝えること

を意図した。

続く第3部のパネルディスカッションでは、「物理で描く未来の自分」をテーマに、研究者自身の経験を交えながら、物理を学ぶことの意味やキャリアパスについて議論を行った。この場でも、小学生から自身の進路相談を投げかけられ、研究者がそれぞれの立場から答える場面が会場を沸かせるなど、世代を越えた対話が生まれたことは印象的であった。

事後アンケートでは、「基礎研究の重要性を改めて実感した」といった声が多く寄せられ、全体として概ね好評であった。

本シンポジウムで得られた経験は、今後のアウトリーチ活動を検討する上で貴重な指針となるものと思われる。「アシンメトリ量子」が本企画に参画したことにより、学術会議の公開の場において領域名が示され、多様な参加者に認知される機会となったこと自体も、本領域にとって意義あるアウトリーチであった。



シンポジウムフライヤー（本領域、渡辺陽子氏作成）



茨城大学 岩佐研究室&研究紹介

熊田 隆伸

茨城大学理工学研究科量子線科学専攻 物質構造物理研究室 博士後期課程2年

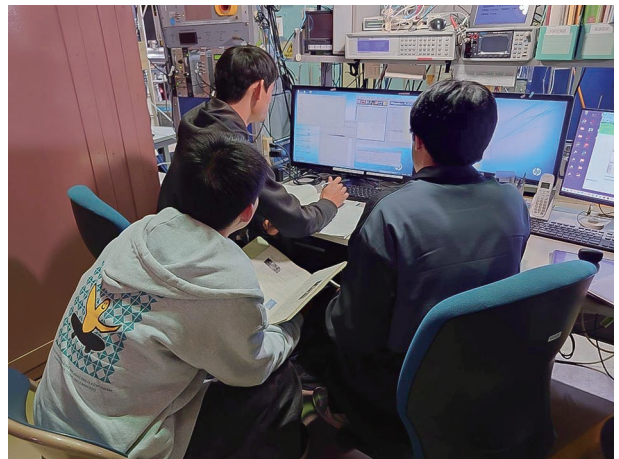
茨城大学物質構造物理研究室（岩佐研究室）の熊田です。このたびは貴重な機会をいただきありがとうございます。岩佐研究室と自身の研究内容について紹介させていただきます。

岩佐研について

岩佐研究室は、岩佐先生と学生8名（D2：1名、M2：2名、M1：2名、B4：3名）の計9名で活動しています。居室は水戸キャンパスと東海キャンパスの2拠点にあり、実験やミーティングの内容に応じて行き来しています。長距離の移動が多いため、車持ちの学生が多いです。

研究室では主にRemeika相化合物を中心とした強相関電子系の構造と物性について研究しています。試料合成から自分たちで行い、X線・中性子を用いた回折実験を通じて、構造や磁氣的性質を明らかにしています。最近ではRemeika相化合物以外の希土類化合物や、円偏光共鳴軟X線回折を用いたカイラルドメイン構造の観測などの新しい手法にも取り組んでおり、研究テーマが広がっています。

当研究室の強みはなんといっても立地の良さです。近隣には日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究用原子炉JRR-3、およびJ-PARC MLFの中性子散乱装置群、高エネルギー加速器研究機構（KEKつくば）のフォトンファクトリー（PF）など、世界的に重要な量子ビーム施設が集まっています。そのため、学生のうちからこうした大型施設を使った実験に参加できる機会が多くあります。例えばKEK PFの出張実験では一度の滞在が1～2週間ほどで、年間では6月頃に1回、11月頃に2回くらいのペースで行っています。



ビーム実験中の様子（KEK PF BL-8A）

アシンメトリ量子に参画されている中尾博士をはじめスタッフの皆さんには常日頃お世話になっています。限られたビームタイムを最大限使うため、各自が合成した試料をどの順番で、どのくらい時間を割いて測定するかを自分たちで決めていきます。加速器の運転状況や測定のセッティングが上手くいかないと日付を跨ぐこともあり、仮眠を挟んで数時間後に再集合というときもあります。とはいえずっと忙しいわけでもなく、全員で交代して実験できるので、空き時間にフットサルをしたり、宿舎でカレーを作ったりと出張中ならではの楽しみもあります。中には自転車でイースつくばまで行く人も…。濃密な実験と息抜きのバランスが取れているのも、岩佐研での出張実験の魅力です。

研究室としての特徴は自由度が高く、自分のペースで主体的に研究を進められる環境が整っていることです。一人ひとりに研究テーマがあり、自分のペースで研究できるため、活動的な人は実験をたくさん行えます。その分、データ解析は大変になりますが、より大きな成果につながられます。

また、茨城大学の物性実験系研究室（桑原研・中野研・横山研・大山研など）と協力してJRR-3の中性子散乱装置HQR (T1-1)を運営しながら、共同で実験を行うこともあります。居室が近く、たまにボードゲームやキャッチボールをしたり、冬には福島へスノボに出かけたりすることもあります。コアタイムがないので、昼頃ふらっとやってきて、夜遅くまで作業する人がいるなど、自由な雰囲気が特徴です。

岩佐先生は原子科学研究教育センター（RECAS）のセンター長も兼任され多忙ですが、学生のやる気を最大限に尊重してくれます。「やってみたい」と言ったことは大抵チャレンジさせてもらえる、理想的な環境だと思います。そんな岩佐先生にはしばしば熱狂的なファンが生まれます。血液型を聞いて興奮したり、先生が数年前にパソコンを買い換えた時期

を詳細に覚えている人がいました。

岩佐研究室は、主体的に研究を進めたい方や、実験を存分に楽しみたい方にはとても適した環境です。興味を持った方は、ぜひ一度研究室を訪れてみてください。

自身の研究内容の紹介

私は主に、Eu系のRemeika相化合物 ($\text{Eu}_3\text{Tr}_4\text{Sn}_{13}$: $\text{Tr} = \text{Rh}, \text{Ir}$) における結晶構造と磁気構造の解明を中心に研究しています。Remeika相化合物 $\text{Ln}_3\text{Tr}_4\text{X}_{13}$ は希土類元素 Ln を含む物質群であり、 $\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Nd}$ の系では立方晶空間群 $\text{Pm}\bar{3}n$ から低温でカイラルな非中心対称の立方晶空間群 $I2_13$ へ構造相転移することが知られています [1,2]。このカイラル相ではパリティ混合超伝導やトポロジカル半金属が期待さ



～毎年恒例のOB・OG合同BBQ～

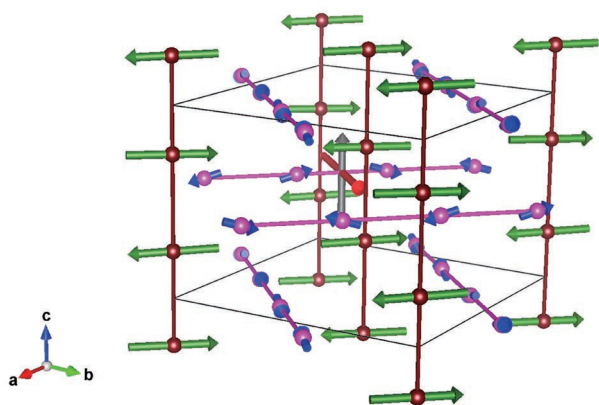


図. $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ の反強磁気構造

れ、Ce系ではWeyl-Kondo半金属が同定されてい
 ます[3]。一方、Euの系においては約10 Kで反強磁気
 秩序を示し、 $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ は57 Kで構造相転移するこ
 とが報告されています[4-6]。しかし、 $\text{Eu}_3\text{Tr}_4\text{Sn}_{13}$ ($\text{Tr} =$
 Rh, Ir)における結晶構造と磁気構造の詳細は未解
 明でした。

そこで私はX線回折実験 (KEK PF・BL-4C, 8A) を
 通して構造相転移の有無と低温相の結晶構造を決定
 し、中性子回折実験 (JRR-3 T1-1, T1-3, J-PARC MLF
 BL18, 20) により磁気構造の解明を行いました。そ
 の結果、 $\text{Eu}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ が30 Kで構造相転移を起こす
 ことを新たに明らかにし、 $\text{Eu}_3\text{Tr}_4\text{Sn}_{13}$ ($\text{Tr} = \text{Rh, Ir}$) の
 低温相はいずれも正方晶空間群 $P4_2/mnm$ であるこ

とを決定しました[7,8]。この結果より、特定のEuイオ
 ン間で局所的な反転対称性の破れを伴う構造である
 ことが指摘できます。さらに中性子回折により、 Eu^{2+}
 ($J = 7/2$)に起因する反強磁気秩序が異常に大きなス
 ピン揺らぎを伴うことを見出しました。これらの揺ら
 ぎは、低温での結晶構造における反転対称性の局所
 的な破れにより、競合する磁気相互作用が生じるこ
 とに起因すると考えられます。今後は、これらの結晶
 構造と磁気秩序を、拡張多極子自由度を含めた枠組
 みで表現し、局所的な対称性の破れと磁気相互作用
 の関係をより深く理解することを目指しています。

現在は、JAEAの特別研究生としてJ-PARC MLF
 (BL18) に行き、鬼柳博士 (J-PARCセンター) のもと
 で中性子回折実験に関する解析技術などを学ばせて
 いただいています。また、谷口博士(東北大学)との
 共同研究で、Remeika相化合物と共通の結晶構造を
 持ち、磁気秩序と混合原子価状態を示す EuRuSn_3 に
 ついても研究を進めています[9,10]。構造対称性に
 基づく新しい特異な磁性を見つけ、その起源を解明
 していく過程に楽しさを感じながら、日々研究に取り
 組んでいます。

- [1] K. Suyama *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 235138 (2018).
- [2] A. Shimoda *et al.*, Phys. Rev. B **109**, 134425 (2024) and references therein.
- [3] K. Iwasa *et al.*, Phys. Rev. Materials **7**, 014201 (2023).
- [4] A. Maurya *et al.*, JPS Conf. Proc. **3**, 017022 (2014).
- [5] L. Mendonça Ferreira *et al.*, Physica B **384**, 332 (2006).
- [6] J. R. L. Mardegan *et al.*, IEEE Trans. Magn. **49**, 452 (2013).
- [7] T. Kumada *et al.*, Phys. Rev. B **111**, 104440 (2025).
- [8] 熊田隆伸ほか, 日本物理学会第80回年次大会 17pSK303-8 (2025).
- [9] T. Harmening *et al.*, Solid State Sci. **12**, 284 (2010).
- [10] T. Kumada *et al.*, in preparation.



大槻 純也

岡山大学 准教授

MultiPie・QtDrawで学ぶ多極子表現と群論

1. はじめに

編集担当者から MultiPie の使い方について記事を書いてほしいと頼まれた。そこで、ユーザーの視点から MultiPie の有用な使い方を紹介しようと思う。MultiPie は多極子の完全基底を生成するプログラムであるが、多極子のお勉強ツールとしても優秀である。結晶中の多極子基底は、群論の既約表現として定義されるので、多極子物性を理解するにはまず、点群や空間群を学ぶ必要があり敷居が高い。しかし、MultiPie を使えば、群論の難しい定理などは知らなくても、既約分解などができてしまう。具体的な結果から群論のイメージを掴み、結果の解釈から学び始めることで、初学者のハードルが格段に下がることが期待できる。そこで本稿では、MultiPie を使って多極子について学ぶことをコンセプトに、MultiPie の使い方を解説する。

MultiPie および QtDraw は楠瀬博明氏(明治大学)と大岩陸人氏(北海道大学)により開発されているオープンソースソフトウェアである[1,2,3]。結晶構造の情報を元に多極子の完全基底を生成することができる。QtDraw はさまざまな 3D オブジェクトを描けるお絵描きソフトで、MultiPie と連携することで結晶構造、電子の軌道やスピンを対称操作に基づいて描ける点が特徴である。MultiPie は、テキストベースの入力ファイルを用いてコマンドラインから実行するプログラムなので、少々敷居が高い。一方、QtDraw は GUI で操作ができるので直感的である。

本稿ではもっぱら QtDraw を通して MultiPie を利用する方法を紹介する。

本稿では、以下の事項を実行する手順を具体的に示すことで、QtDraw の基本的な使い方を概観する。

- ・基本的な使い方
- ・既約分解をしよう：結晶場分裂
- ・活性な多極子を調べよう
- ・クラスター多極子：URhSn を例に

本稿は MultiPie 2.0.7 および QtDraw 3.1.0 (2026 年 1 月時点の最新バージョン) を基に書いている。

2. 基本的な使い方

まずは、環境を整える。QtDraw を使うには、Python 3.12 以上が必要である¹。Python を使用可能になったら、あとは公式ドキュメント [3] の手順に従えばインストールできる。このサイトは、「qtdraw doc」などのキーワードで検索すれば見つかる。コマンド

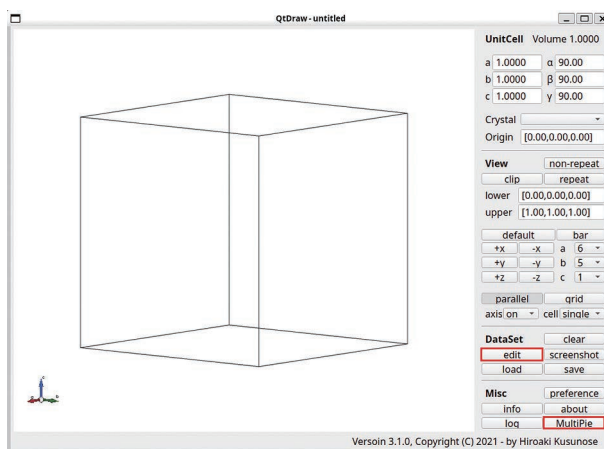


図 1 QtDraw の起動画面。

¹ 公式サイト Python.org からダウンロードするか、apt などのパッケージ管理コマンドでインストールできる。

Windows なら、Windows Subsystem for Linux 2 (WSL2) を利用して Linux 環境 (Ubuntu など) を用意するのもよい。Anaconda はお勧めしない (個人の意見)。

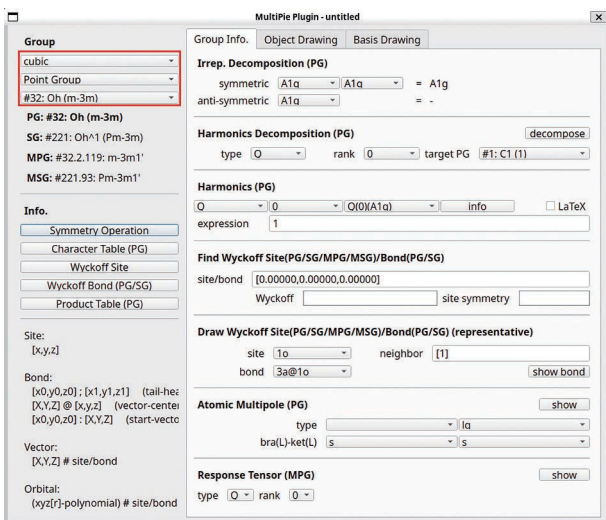


図 2 MultiPie の機能呼び出すウィンドウ。

ラインで

```
$ pip install qtdraw
```

と入力すれば、QtDraw がインストールされる。このとき、依存関係により MultiPie も自動的にインストールされる。続いて、playwright というツールの設定を行う [3]。それが完了したら

```
$ qtdraw
```

と入力して、図 1 の画面が現れればインストールに成功している。まだユニットセルの枠しか描かれていないが、マウスでぐりぐり動かせる。

図 1 の右側のパネルにあるボタンにより各種操作を行う。この中で、赤枠で示した 2 つの機能について解説しておく。「edit」ボタンを押すと、描画されているオブジェクトの一覧が表示される。この一覧から、各オブジェクトの表示・非表示の切り替えや削除ができる。「MultiPie」ボタンを押すと、図 2 に示すウィンドウが開く。ここから MultiPie の機能を使用することができる。左に点群・空間群を選ぶ欄

があり、点群の指標表や空間群のワイコフ位置など、群の基本的な情報を参照できる。右には 3 つのタブがあり、「Group info.」では多極子の基本的な情報を確認でき、「Object Drawing」では対称操作を施した図を描く機能を、「Basis Drawing」では既約表現で分類された図を描く機能を利用できる。

3. 既約分解をしよう：結晶場分裂

まずは、原子軌道の結晶場分裂を調べてみよう。ここでは、 p 軌道の 3 重縮退が、正方晶の結晶場で $\{p_x, p_y\}$ 軌道と p_z 軌道に分裂することを確認する。まずは、図 2 の赤枠に系の対称性を入力する。点群と空間群が選べるが、ここでは点群 O_h を選ぶ。結晶場分裂を調べるには、右側の「Group info.」タブにある「Harmonics Decomposition (PG)」を使用する (下図)。



電荷分布に対応して $\text{type}=\text{Q}$ を選び、 p 軌道ならランク 1 を選択する。「target PG」に点群 D_{4h} を指定し、「decompose」ボタンを押す。これにより、右に示す表が新しいウィンドウに表示される。1 列目と 2 列目にそれぞれ点群 O_h と D_{4h} の下での p 軌道の既約表現が示されている。ここで、

	O_h	D_{4h}
1	$Q_{1,1}(T_{1u})$	$Q_{1,1}(E_u)$
2	$Q_{1,2}(T_{1u})$	$Q_{1,2}(E_u)$
3	$Q_{1,3}(T_{1u})$	$Q_1(A_{2u})$

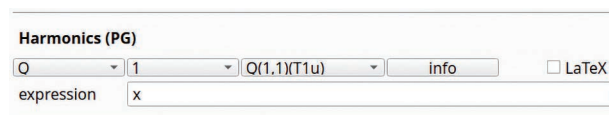
例えば記号 $Q_{1,2}(T_{1u})$ は、既約表現 T_{1u} に属するランク 1 の電気多極子を表す。下付き添え字の 2 つ目の数字は、縮退した表現内の基底を区別するラベルで、

1次元表現の場合は省略される。この表から、 p 軌道は、点群 O_h において3重縮退の既約表現 T_{1u} に分類されるが、正方晶の下では E_u と A_{2u} に分裂することがわかる。この適合関係を式で表せば

$$T_{1u}(O_h) \downarrow D_{4h} = A_{2u} \oplus E_u$$

となる。

各基底の表現（異方性）は、「Harmonics (PG)」を使用して調べる（下図）。



Q と 1 を入力してその右の「info」ボタンを押すと、新規ウィンドウに右に

示す表が表示される。

ここから、3つの基底

の表現が順に x, y, z

であることがわかる。

先の結果と合わせる

と、既約表現 E_u の表現は $\{x, y\}$ で A_{2u} は z であることがわかる。この結果は、正方晶では p 軌道が p_z 軌道と $\{p_x, p_y\}$ 軌道に分裂することを意味している。同様にして、 d 軌道の5重縮退が、立方晶および正方晶の結晶場において分裂する様子を確認するのは読者の演習に任せたい。

	symbol	expression
1	$Q_{1,1}(T_{1u})$	x
2	$Q_{1,2}(T_{1u})$	y
3	$Q_{1,3}(T_{1u})$	z

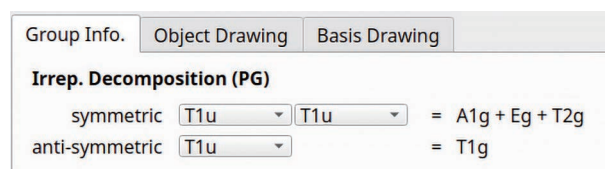
4. 活性な多極子を調べよう

次に、縮退した特定の既約表現において、活性となる多極子の自由度を調べよう。前節に引き続き、 p 軌道を例にとる。 p 軌道は基底が3つなので、多極子の自由度の数は $3^2=9$ である。この例は速水氏

らによる解説記事シリーズのその3 [4] で取り上げられているので、その解説と合わせるとよい。

(a) 既約分解

まずは、既約分解を用いて、多極子の自由度を既約表現で分類する。これには、「Group info.」タブの「Irrep. Decomposition (PG)」を使う（下図）。



symmetric の右にある欄から、 p 軌道が属する既約表現である T_{1u} を選ぶと、その右に対称積の既約分解の結果が表示される。この結果は

$$[T_{1u} \otimes T_{1u}] = A_{1g} \oplus E_g \oplus T_{2g}$$

と表される。次に、anti-symmetric の欄でも同様に T_{1u} を選択をすると、反対称積の既約分解の結果として

$$\{T_{1u} \otimes T_{1u}\} = T_{1g}$$

が得られる。この例のように単一殻を扱う場合には、対称積は時間反転が偶の多極子に、反対称積は時間反転が奇の多極子に対応することが知られている。時間反転の偶奇を上付きの+, -で表すと、上記の結果は

$$T_{1u} \otimes T_{1u} = A_{1g}^+ \oplus E_g^+ \oplus T_{2g}^+ \oplus T_{1g}^-$$

とまとめられる。これにより、 p 軌道の電子は電気的な自由度を $1+2+3=6$ 個、磁気的な自由度を 3 個もち、すべて偶パリティであることがわかる。

(b) 行列要素

既約分解により多極子の分類はできたが、それらのランク（単極子、双極子、四極子、など）までは

わからない。これを知るには多極子演算子の行列要素を調べる必要がある。これには、「Group info.」タブの「Atomic Multipole (PG)」を使う（下図）。

type=Q を選び、その右の欄から「lg」を選ぶ。これは行列要素を表示する基底を指定している。その下の「bra(L)-ket(L)」で、 p 軌道を選ぶ。「show」を押すと、下に示す表が表示される（枠内に収まるように加工してある）。

No multipole	matrix	
bra	$\langle p_x , \langle p_y , \langle p_z $	
ket	$ p_x \rangle, p_y \rangle, p_z \rangle$	
1	$Q_0^{(a)}(A_{1g})$	$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix}$
2	$Q_{2,1}^{(a)}(E_g)$	$\begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{6} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{6}}{6} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{6}}{3} \end{bmatrix}$
3	$Q_{2,2}^{(a)}(E_g)$	$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
4	$Q_{2,1}^{(a)}(T_{2g})$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{bmatrix}$
5	$Q_{2,2}^{(a)}(T_{2g})$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$
6	$Q_{2,3}^{(a)}(T_{2g})$	$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

2 列目の記号から多極子の種類がわかる。ここで、上付き添え字の (a) は atomic を意味している。この結果から、ランク 0 が 1 つ、ランク 2 が 5 つあることがわかる。3 列目の行列は、基底 p_x, p_y, p_z に対応した多極子の行列要素を表す。この行列は、文献 [3] の式 (6) と規格化定数を除いて一致している。MultiPie の行列は、行列を \hat{O} とすると、 $\text{Tr} \hat{O} \hat{O}^\dagger = \sum_{ij} O_{ij} O_{ij}^* = 1$ で規格化されている。

同様にして、磁気多極子 M の行列要素も得ること

ができるが、その結果はここでは省略する。なお、トロイダル多極子 T と G を選択しても何も表示されない。これは、単一殻内の電子はトロイダルの自由度をもたないためである。一方、 p と d や p と f など、異なる殻の間には T と G が存在するので確認してほしい。

以上の結果から、 p 軌道内の多極子自由度は、点群 O_h の下で、1 つの電気単極子 $Q_0(A_{1g})$ 、それぞれ 2 つと 3 つの電気四極子 $Q_2(E_g)$ と $Q_2(T_{2g})$ 、および 3 つの磁気双極子 $M_1(T_{1g})$ に分類できることがわかった。

5. クラスター多極子：URhSn を例に

最後に、クラスター多極子の分類を調べよう。例として、歪んだカゴメ構造をもつ URhSn を取り挙げる。URhSn は、温度 $T_c=16$ K および $T_0=54$ K で U の $5f$ 電子に起因した相転移を示す [5]。中間相 $T_c < T < T_0$ は、電気四極子 O_{xx} または O_{yz} の秩序の可能性が高い [6]。前者は極性、後者はカイラル（ソッケ）な構造に対応する。NMR からカイラル秩序が有力視されている [7]。カイラルではない結晶構造において電子の秩序によってカイラリティが自発的に生じるという点で、「アシンメトリ量子物質」として注目すべき物質である [8]。

まずは結晶構造を準備しよう。これには、「Object Drawing」タブを使う（下図）。

はじめに、左の「Group」欄から空間群 $P\bar{6}2m$ (No

189) を選択しておく。その上で、「Object Drawing」タブの「Site」の欄に U サイトの座標をひとつ入力する。U 原子は 3g サイト $(x, 0, \frac{1}{2}), (0, x, \frac{1}{2}), (\bar{x}, \bar{x}, \frac{1}{2})$ ($x = 0.5752$) に位置しているので、このうちのひとつを図の①に入力して Enter を押す。すると、空間群の対称操作により、等価な位置に球が描かれる。U 原子を結ぶボンドも描いておこう。図の②の欄に、2 つの U サイトの座標をセミコロン (;) で繋いで入力する。Enter を押すと、対称操作により等価なすべてのボンドが描画される。こうして得られたものが図 3 である。なお、cif ファイルや VESTA ファイルを読み込ませる方法や、結晶などの情報を MultiPie に与えて QtDraw 形式 (拡張子 qtdw) のファイルを生成する方法もある。

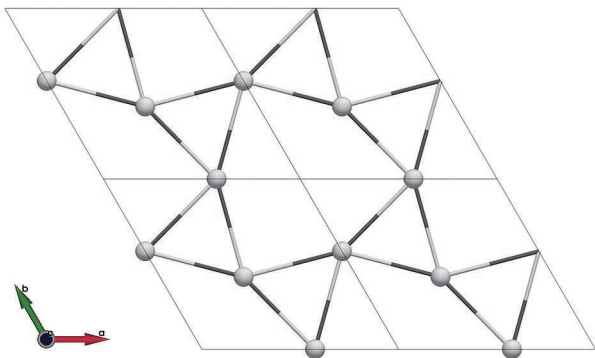


図 3 URhSn の結晶構造 (U 原子のみ)。

それでは、U サイト上の $5f$ 電子が電気四極子をもつときに、その秩序構造がどのクラスター多極子として分類されるかを調べよう。これには「Basis Drawing」タブを使う (下図)。

Orbital : draw symmetry-adapted orbital.
 1. choose (type,rank). 2. input representative site/bond, + ENTER,
 => 3. choose (type,basis), 4. push "draw" or 3. input linear combination, + ENTER or 3. push "modulation".

Q 2 [0.57524,0.00000,0.50000]
 => basis Q Q01: Q(2)(A1')

linear combination Q03 draw info

modulation (SG)

「Orbital」の項目に、多極子の種類・ランクと座標

を入れる。いまは U サイトに電気四極子を置きたいので、上図のように多極子 Q、ランク 2、U サイトの座標を入力し、Enter を押す。次に、basis の横の欄からクラスター多極子の種類を選ぶ。電気四極子を含む電荷分布は時間反転が偶なので、その集合からできるクラスター多極子は Q か G、すなわち電気が電気トロイダルのもどちらかである。まずは Q を選んでみる。Q を選択し「info」ボタンを押すと、次の図のように、14 個の Q 多極子の一覧が現れる。

tag	symbol	symmetry	1st cluster (c.c.)
Q01: Q(2)(A1')	$Q_2(A'_1)$	$-\frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2} + z^2$	$\frac{\sqrt{3}(-\frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2} + z^2)}{3}$
Q02: Q(3)(A1')	$Q_3(A'_1)$	$\frac{\sqrt{10}x(x^2 - 3y^2)}{4}$	$\frac{(x-y)(x+y)}{2}$
Q03: Q(3)(A2')	$Q_3(A'_2)$	$\frac{\sqrt{10}y(3x^2 - y^2)}{4}$	xy
Q04: Q(1)(A2'')	$Q_1(A''_2)$	z	xz
Q05: Q(1,1)(E')	$Q_{1,1}(E')$	x	$\frac{\sqrt{21}(x-y)(x+y)}{14} - \frac{\sqrt{21}(-\frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2} + z^2)}{21}$
Q06: Q(1,2)(E')	$Q_{1,2}(E')$	y	$\frac{\sqrt{21}xy}{7}$
Q07: Q(2,1)(E')	$Q_{2,1}(E')$	$\frac{\sqrt{3}(x-y)(x+y)}{2}$	$\frac{\sqrt{2}(x-y)(x+y)}{4}$
Q08: Q(2,2)(E')	$Q_{2,2}(E')$	$-\sqrt{3}xy$	$-\frac{\sqrt{2}xy}{2}$
Q09: Q(3,1)(E')	$Q_{3,1}(E')$	$-\frac{\sqrt{6}x(x^2 + y^2 - 4z^2)}{4}$	$\frac{\sqrt{14}(x-y)(x+y)}{28} + \frac{\sqrt{14}(-\frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2} + z^2)}{7}$
Q10: Q(3,2)(E')	$Q_{3,2}(E')$	$-\frac{\sqrt{6}y(x^2 + y^2 - 4z^2)}{4}$	$\frac{\sqrt{14}xy}{14}$
Q11: Q(2,1)(E'')	$Q_{2,1}(E'')$	$\sqrt{3}yz$	$\frac{\sqrt{2}yz}{2}$
Q12: Q(2,2)(E'')	$Q_{2,2}(E'')$	$-\sqrt{3}xz$	$-\frac{\sqrt{2}xz}{2}$
Q13: Q(3,1)(E'')	$Q_{3,1}(E'')$	$\sqrt{15}xyz$	$\frac{\sqrt{2}yz}{2}$
Q14: Q(3,2)(E'')	$Q_{3,2}(E'')$	$\frac{\sqrt{15}z(x-y)(x+y)}{2}$	$\frac{\sqrt{2}xz}{2}$

1 列目と 2 列目はクラスター多極子としての記号を表し、3 列目にはその対称性 (異方性) が、4 列目には構成要素である原子多極子の代表サイトでの異方性が示されている。この中で、3 列目に 1 次の x, y, z のいずれかが書かれた 3 つが極性な電気四極子秩序であり、その中で、既約表現 A'_2 に分類される Q04 が z 軸を主軸とする極性な秩序状態である。 A''_2

	E	$3C_2'$	$2C_3$	σ_h	$3\sigma_v$	$2S_3$
irrep.	1(1)	$2_{100}(3)$	$3^+_{001}(2)$	$m_{001}(1)$	$m_{120}(3)$	$-6^+_{001}(2)$
A'_1	1	1	1	1	1	1
A'_2	1	-1	1	1	-1	1
A''_1	1	1	1	-1	-1	-1
A''_2	1	-1	1	-1	1	-1
E'	2	0	-1	2	0	-1
E''	2	0	-1	-2	0	1

図4 点群 D_{3h} の指標表。QtDraw で得られた表に C_3 などのシェンフリース記号を追加してある。

が極性であることは、図4の指標表において、水平面 (xy 面) に対する鏡映 σ_h が -1 (奇) で破れており、鉛直面 (zx 面、 yz 面) に対する鏡映 σ_v は $+1$ (偶) で保たれていることからわかる。Q04 を選択して「draw」ボタンを押すと図5が得られる。これは電気四極子 O_{xx} のクラスター多極子秩序状態である。次に、basis として G を選ぶと、下図のように1つの多極子からなる表が得られる。

tag	symbol	symmetry	1st cluster (c.c.)
G01: G(2) (A_1'')	$G_2(A_1'')$	$-\frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2} + z^2$	$-yz$

この既約表現 A_1'' は、図4の指標表からわかるように、2種類の鏡映対称性 σ_h と σ_v のどちらも破っているので、カイラルである。「draw」ボタンを押すと、四極子の配置が図示される。結果を図6に示す。

電気四極子を配置する方法は全部で $5 \times 3 = 15$ 通りある (電気四極子の種類の数5と単位胞内のUサイトの数3の積)。これがクラスター電気多極子の基底の数に対応している。上記の結果から、14個がQに分類され、1個がGに分類されることがわかつ

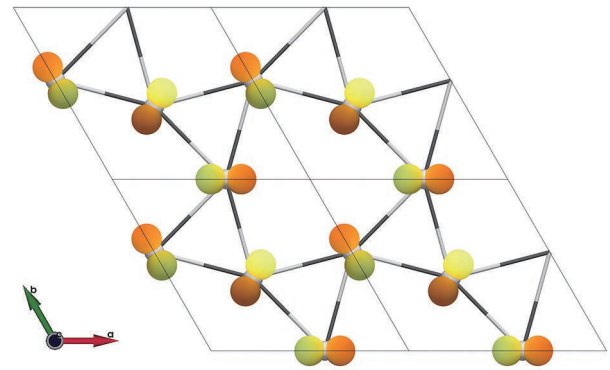


図5 電気四極子 O_{xx} からなる極性なクラスター秩序状態 $Q_1 (A_1'')$ 。

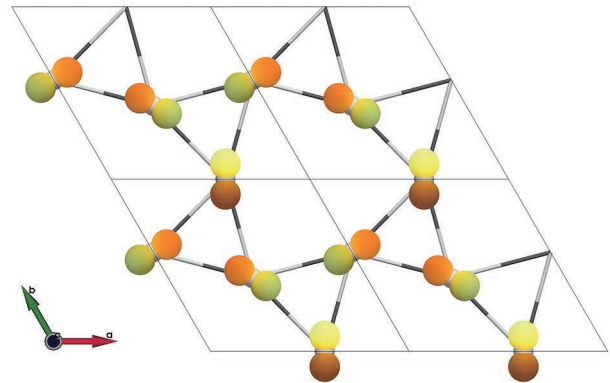


図6 電気四極子 O_{xx} からなるカイラルなクラスター秩序状態 $G_2 (A_1'')$ 。

た。この例のように、MultiPie を利用することで、歪んだカゴメ構造上の電気四極子秩序のような複雑な配置に対しても、非常に簡単にクラスター多極子としての既約表現を同定することができる。

6. おわりに

本稿では、MultiPie を利用して電子の結晶場状態や多極子秩序の既約表現を得る方法を紹介した。複雑な秩序構造の既約表現による分類は、これまで職人技という感が強かったが、MultiPie を使うこと

で誰でもできるようになる。今回は電気四極子の秩序状態を取り上げたが、もちろん磁気秩序を扱うこともできる。対称操作を用いた作図は磁気点群、磁気空間群にも対応している (Object Drawing タブ)。本稿よりもさらに踏み込んだ使用法が公式ドキュメント [2] で紹介されている。例えば、原子や多極子などの配置を Python コード上で設定して、コマンドラインから QtDraw を実行する方法もある。こうすると、全ての多極子の図を作成するといった繰り返し処理が簡単に実行できる。

近年、様々なオープンソースコードが開発されている。オープンソースの利点の一つは、開発者とユーザーの距離が近い点にある。ユーザーの声を開発者に届けることで、ユーザーも開発に貢献できる。積極的に声を届けよう。

この原稿を執筆するにあたり、楠瀬博明氏には MultiPie および QtDraw の使い方全般についてご教示いただきました。ここに感謝いたします。

[1] H. Kusunose, R. Oiwa, S. Hayami, Phys. Rev. B **107**, 195118 (2023).

[2] <https://cmt-mu.github.io/MultiPie/>

[3] <https://cmt-mu.github.io/QtDraw/>

[4] 速水賢 他、固体物理 **55**, 379 (2020).

[5] Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134411 (2020).

[6] C. Tabata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 083701 (2025).

[7] Y. Tokunaga *et al.*, unpublished.

[8] T. Ishitobi, K. Hattori, Phys. Rev. Lett. **136**, 056402 (2026).

非物理の人に非対称性が彩る物理の面白さを伝える

ゆるい科学コラム

アシメ★通信

第6話 「もう一人の自分は物理オタク？」



芦芽量子

鬼丸せんせー、今日は日本物理学会が開かれとる広島大学に遊びに来たんよ！
ほいたら、友だちに会えたんじゃ〜。



絶対零子

こんにちは。北海道大学物理学科2年の絶対零子と申します。
北大はアシンメトリ量子の関係者が多いので、
アシメ通信も毎回楽しみに読んでます！
こうして鬼丸先生と芦芽さんに会えて感無量です。

広島へようこそ！なんだかお二人はよく似た姉妹みたいですね。



零子ちゃんとはもうえらい意気投合してしもうて（笑）、
宮島を案内してきたんよ。
初めて会うたんに、ソウルメイト感がハンパのうて、
ほんま「オルター・エゴ (Alter ego)」みたいじゃったわ。

哲学における「もう一人の」自分、という意味ですね。
そういえば、最近物性分野では
「オルター・マグネティズム (Alter magnetism)」という
コンセプトが流行っています。

鬼丸

鬼丸





もう一つの磁性？ 大学では常磁性、強磁性、反強磁性、フェリ磁性を習いましたが、他にもあるのですか？

日本語では**交替磁性**と翻訳されています。
合成の磁化（双極子）が零になるのは反強磁性と同じだけど、
電子構造をみるとスピン非縮退で、時間・空間反転の対称性が
従来の磁性とは異なるものをそのように表現する場合があります。



さっぱり分らんの人じゃけど！ 絵え描いてちょっと説明してくれん？



例えば、この図のように正四面体の頂点に置かれたベクトルが全て重心方向を向き、その隣では逆に重心から外側に向く磁気構造は All-In All-Out 構造といますが、これもオルターマグの一種(*1)です。



あれ？ これって**磁気八極子**じゃないですか？
電磁気学の授業で多重極展開をやった時に出てきました。

さすが！オルターマグネティズムは**多極子と対称性の概念**で理解するとすいぶん見通しが良くなりますね。



磁石でないのにスピン分裂が生じるのは、多極子が零でないからなのね。



心の声（やっば！！零子ちゃん、ぶちかっこえんじゃけど！！
鬼丸先生とガチ物理トークぶちかましよるとか、何ぞれ、神展開すぎん！？（汗）

うろたんの豆知識コーナー



*1「**交替磁性（オルターマグネティズム）**」という言葉の使い方には、いくつかの立場がある。ひとつは狭い意味での定義で、「**共線的(colinear)な構造をもち、時間反転対称性(T)が破れている磁性体**」を指す。もうひとつはより広い意味での定義で、「**このような磁性体に加えて、非共線的(non-colinear)な構造や、T対称性ではなく空間反転対称性(P)だけが破れている場合も含めて考えよう**」という立場である。いずれもPT対称性が破れているのでスピン分裂が起こる。どこまでを含めるべきかについては、現在も学会で議論が続いているニョロ。

本文の磁気八極子は広義の交替磁性である。多極子による交替磁性の記述法については、ニュースレター No.4の冒頭に速水先生が解説しているからそれを読んでほしいニョロ。

（蛇語訳注： 零子氏は、黒猫（シュレディンガー）を飼っているが、広島に連れて来なかったのでうろたんは少し安堵しているらしい。）



2026年4月からの関連行事

■ 令和8年度領域全体会議

日時：2026年5月26日(火)～28日(木)

場所：ラフォーレ那須

アシンメトリ量子主催

■ 日本物理学会

日時：2026年9月14日(月)～9月17日(木)

場所：東京大学

■ アシンメトリ量子国際会議

日時：2026年9月24日(木)～26日(土)

場所：大阪大学

アシンメトリ量子主催

■ International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2026 (SCES 2026)

日時：2026年9月27日(日)～10月2日(金)

場所：富山国際会議場

■ Hot topics in correlated f-electron and related systems - International Workshop in Beppu hot springs-

日時：2026年10月5日(月)～7日(水)

場所：別府国際コンベンションセンター

アシンメトリ量子共催

■ 第20回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会)

日時：2026年11月20日(金)～11月21日(土)

場所：東京大学 物性研究所

事務局からのお知らせ

■ 謝辞記載のお願い

本学術変革領域に関する業績には、以下の謝辞の記載をお願いいたします。

■ 記載例は次のとおりです。

【英文】: This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JPXXXXXXXX.

【和文】: 本研究はJSPS科研費 JPXXXXXXXXの助成を受けたものです。

(※XXXXXXXXは課題番号)

■ 計画研究の課題番号と課題名の対応は次のとおりです。

23H04867 A01:量子ビームによるアシンメトリ量子物質のミクロ解析

23H04868 A02:精密物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓

23H04869 B01:アシンメトリ量子物質の基礎理論と設計

23H04870 C01:アシンメトリ量子物質の深化

23H04871 C02:アシンメトリ量子物質の開拓

23H04866 X00:アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出の研究総括

(※ 共用機器の利用、国内旅費援助・海外派遣で得られた成果の場合、こちらも含めてください。)

■ 公募研究の課題番号と課題名の対応は次のとおりです。(括弧内は研究代表者名)

24H01670 顕微スピンARPES でプローブする反強磁性秩序の実空間・波数空間相関 (木村 昭夫)

24H01685 軟X線吸収・散乱による拡張磁気多極子観測手法の開拓 (山崎 裕一)

24H01644 対称心のない欠損スピネル化合物における分子多極子軌道の直接観測 (鬼頭 俊介)

24H01640 非対称な熱流とその交差相関の開拓 (水上 雄太)

24H01646 バルク超伝導体を用いた巨大超伝導交差応答の研究 (石原 滉大)

24H01659 ベクトル圧力:一軸圧力回転装置の開発と実証 (池田 敦俊)

24H01638 量子アシンメトリ物質における熱・弾性交差相関現象の開拓 (小野瀬 佳文)

24H01639 アシンメトリ量子の検出・可視化手法の開発と人工アシンメトロニクスへの展開 (松原 正和)

24H01663 電流下で顕在化する多極子アシンメトリ応答の光技術観測 (米澤 進吾)

24H01675 準結晶と近似結晶における奇パリティ結晶場と多極子の開拓 (渡辺 真仁)

24H01662 ミクロな非対称性が誘起する超伝導非相反現象 (大同 暁人)

24H01668 Microscopic theory for cross-coupled ferroic orders in chiral magnets (Harald O. Jeschke)

24H01649 電子自由度のアシンメトリによるトポロジカル相制御 (上田 健太郎)

24H01673 軸性アニーリングによる強相関非対称物質の創製 (志村 恭通)

24H01641 局所的に空間反転対称性の破れたウラン化合物の物質探索と超伝導 (青木 大)

24H01650 カイラリティ自由度をもつ拡張ハニカム型無機有機ハイブリッド物質の開発 (石川 孟)

24H01666 原子レベルで制御された空間アシンメトリに起因する磁気相互作用 (松野 丈夫)

24H01652 表面非対称電子軌道の制御による非相反伝導特性の最大化 (金澤 直也)

24H01654 交替磁性揺らぎによる超伝導発現の実証 (打田 正輝)



編集後記

本領域の前半戦を締めくくる第6号をお届けします。各班の活動が本格的に軌道に乗り始め、多彩な成果を一望できる内容となりました。今号には19件の公募班成果報告が寄せられ、実験・理論の両面から「アシンメトリ量子」を切り拓く取り組みが着実に前進していることを強く実感します。

かつてパソコンやインターネットが世界を変えたように、いま私たちは生成AIがその役割を担い始めた時代に生きています。試しに「編集後記とは何か」をAIに尋ねると、「記事全体を俯瞰し、編集者の視点や想いを読者に伝える場」と即座に返してくれます。伝えたい点を箇条書きするだけで、AIはそれを見事な文章へと整えてくれます。技術的特異点とも言える変化が連続する現代において、次世代科学へとつながる芽が本領域からも力強く育っていくことを願ってやみません。北川進先生のノーベル化学賞に続くような大発見が生まれることを期待しつつ、後半戦も一層盛り上げてまいりましょう。

(橘高俊一郎)



A S Y M M E T R Y

Unveiling, Design, and Development of
Asymmetric Quantum Matters

アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出

文部科学省科学研究費補助金「学術変革領域研究(A)」(令和5年~9年度)

領域番号: 23A202

学術変革領域研究(A)

「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」ニュースレター 第6号

2026年3月 発行

編集人 田端 千紘

発行人 鬼丸 孝博

発行所 広島大学大学院先進理工系科学研究科

TEL: 082-424-7027

事務局 岡山大学異分野基礎科学研究所

大槻 純也

TEL: 086-251-7804



領域ホームページ

<https://asymmetry.hiroshima-u.ac.jp/>