



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7号

2026年9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/>



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7号

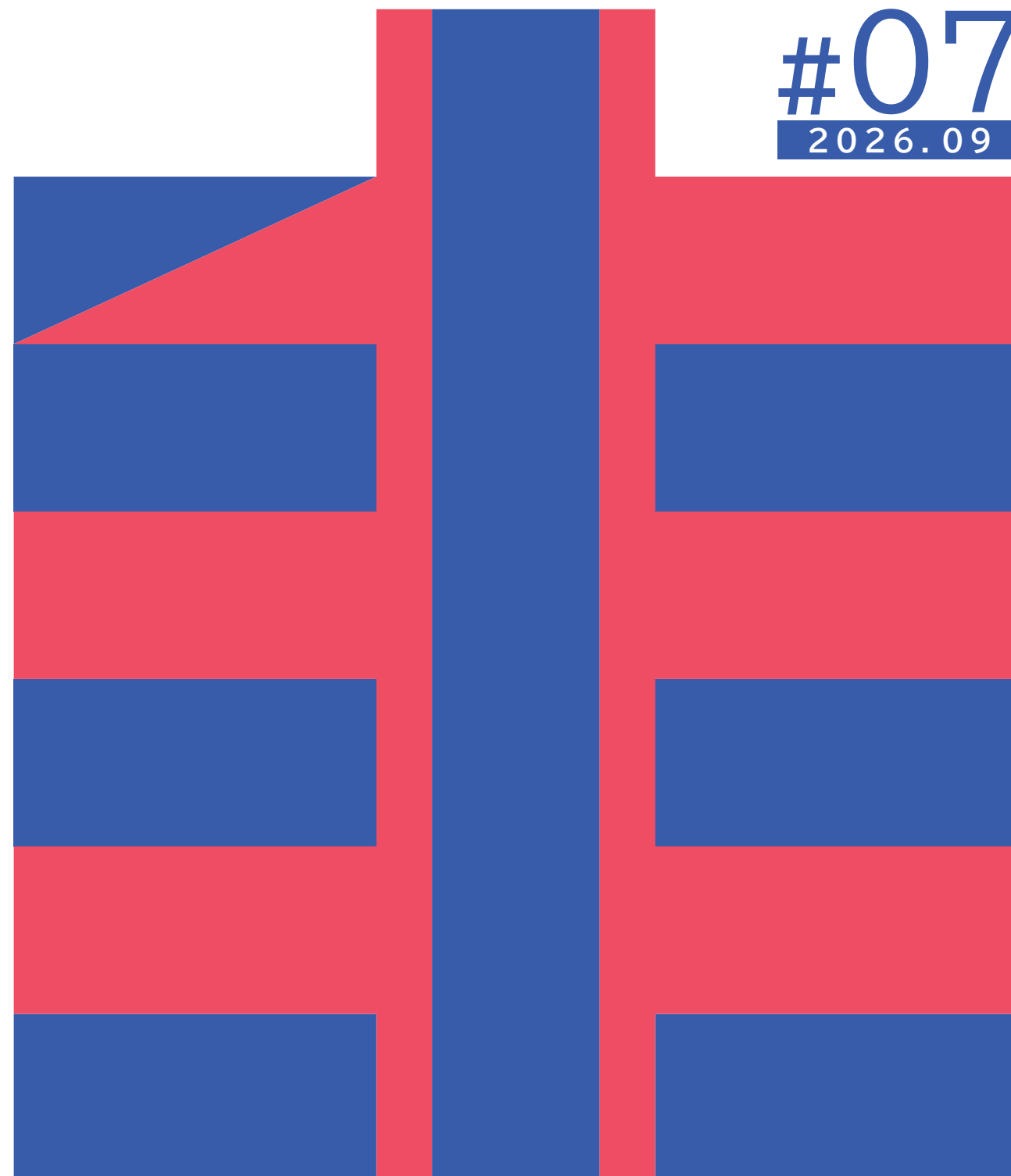
文部科学省科学研究費補助金「学術変革領域研究（A）」アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出

領域番号：23A202

A S Y M M E T R Y

NewsLetter

#07
2026.09



Unveiling, Design, and Development of Asymmetric Quantum Matters

CONTENTS

巻頭言

News Letter 第7号 巻頭言	鬼丸 孝博	03
---------------------------	-------	----

解説

光第二高調波発生で“アシンメトリ量子”を視る — 対称性の破れを可視化する非線形光学 —	松原 正和	04
非相反伝導で探るスピントクスチャ — EuIr ₄ In ₂ Ge ₄ における角度分解非相反伝導測定 —	木俣 基／横山 旭	10

今号の研究成果

構造カイラリティを伴わない純電子的カイラリティ	石飛 尊之／服部 一匡	16
-------------------------------	-------------	----

公募班紹介

A01

非中心対称な価電子分布の可視化と軌道混成の定量評価	鬼頭 俊介	20
顕微Spin-ARPESで探る量子アシンメトリ反強磁性体の電子状態	木村 昭夫	21
トロイダル秩序に潜む一次元的な磁気励起の探索	常盤 欣文	22
共鳴非弾性X線散乱によるカイラリティを有する素励起の観測	石井 賢司	23

A02

アシンメトリ量子物質における創発現象と弾性応答	小野瀬 佳文	24
フェロアキシシャル物質からのスピン流生成	塩見 雄毅	25
キラル接合界面における自発的な時間反転対称性の破れの解明と アシンメトロニクス応用	金澤 直也	26
アシンメトリ量子の検出・可視化技術の高度化と 人工アシンメトロニクス機能の創出	松原 正和	27
磁化非対角項を直接検出する新規手法の開発と 拡張多極子秩序下の交差相関現象への応用	河野 洋平	28
時間・空間反転対称性の破れたメタマテリアルにおける 非線形伝導の空間スケール依存性	山根 悠	29
交差相関応答による奇パリティ超伝導状態の可視化	北川 俊作	30
交替磁性体のアシンメトリ磁場ひずみ応答	米澤 進吾	31
精密バルク測定を用いた無機化合物における新奇キラル物性の開拓	石原 滉大	32
カイラルな系を対象とした非対称熱応答の開拓	水上 雄太	33
「表面弾性波を外場としたアシンメトリ量子物性の制御」に向けて	日比野 瑠央	34
密度波に起因するアシンメトリ輸送現象の開拓	蔣 男	35

B01

超伝導体のミクロな非対称性が誘起する非相反・非線形現象の開拓	大同 暁人	36
奇パリティスピン分裂がもたらす非線形量子物性の理論開拓	奥村 駿	37
熱応答が拓くアシンメトリ量子物質の新規交差応答	那須 譲治	38
フォトニック環境のデザインが齎す固体中のトロイダル秩序誘発	大上 能悟	39
多極子基底を用いた有効ワニエ模型によるキラル・強軸性秩序の微視的記述	大岩 陸人	40
対称性が壊れない物質相の理論研究	堀田 知佐	41
多極子と共存・競合する超伝導に関する強相関電子系の微視的理論の構築	角田 峻太郎	42

D01

正四面体クラスターに着目したアシンメトリ立方晶物質の開拓	岡本 佳比古	43
非対角非線形磁気熱電機能の開拓	打田 正輝	44
アシンメトリ量子物質の光制御	豊田 新悟	45
分子性アシンメトリ量子物質の開発と新機能開拓	福岡 脩平	46
原子層物質における量子幾何を反映した新奇アシンメトリ量子応答の開拓	井手上 敏也	47
らせん磁性体や反交替磁性体を含む 新規アシンメトリ量子物質の探索と実現	Hirschberger Maximilian	48
動的化学アシンメトリが拓く5d多極子秩序の増幅と機能性量子物質設計	平井 大悟郎	49
極性金属におけるアシンメトリ構造の変調と電子協奏現象の開拓	高津 浩	50
極性非対称反強磁性体における交差相関応答の可視化と機能創出	木村 健太	51
酸化物人工アシンメトリ界面による非相反伝導制御研究	高橋 圭	52
一次元ジグザグ鎖構造を持つYb化合物における金属的励起の解明	石田 憲二	53
結晶対称性のアシンメトリが生む新しい磁性相とスピン輸送	松野 丈夫	54
トポロジカル電子構造を有する アシンメトリ量子物質の量子振動による電子状態の研究	菅原 仁	55
無機キラル超伝導体の不斉単結晶におけるスピン偏極超伝導特性の観測	高阪 勇輔	56
相対論効果が顕著なアシンメトリ量子物質の開拓	笹川 崇男	57

会議・滞在報告

令和8年度 領域全体会議・公募研究キックオフ会議@那須高原	小林 達生	58
第二回 若手研究者分野横断交流会 参加報告	今津 毅士	59
第二回若手研究者分野横断交流会 ー未来へ続く研究とつながりー 2026/3/5-6開催報告	鬼頭 俊介	60
会議報告：「格子や分極が絡んだ交差相関応答」 討論会@九州工業大学戸畑キャンパス	松平 和之	62

コラム

アシメ★通信	64
--------------	----

若手紹介

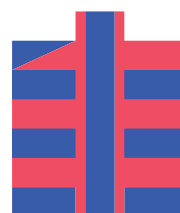
カイラルな構造をもつ超伝導体RhGe ₄ の高圧合成とIrGe ₄ の結晶構造解析	小原 颯	66
物理量に基づく結晶の記述と物性解析	石飛 尊之	67

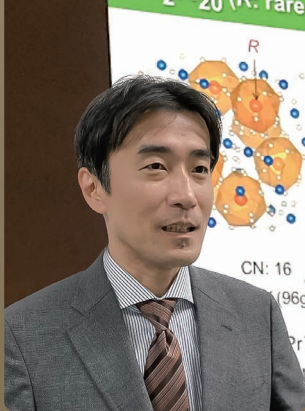
報告

受賞ニュース	68
--------------	----

事務局からのお知らせ

2026 年 10 月からの関連行事	68
事務局からのお知らせ	69
編集後記	70





News Letter第7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

公募研究（第II期）の方々をお迎えし、「アシンメトリ量子」の4年目がスタートしました。5月26日－28日に、那須高原にあるホテル ラフォーレ那須にて、令和8年度 領域全体会議・公募研究キックオフ会議を開催しました。（本号の別記事を参照。）初夏の心地よい気候にも恵まれ、領域内外から118名の方々にご参加いただきました。各計画研究から最新の研究成果と進捗についての報告があり、公募研究の方々からはこれから2年間の研究計画に関するプレゼンがありました。（本号の記事をご参照ください。）第II期の公募研究で対象とする物質系や研究手法はさらに広がりを見せ、アシンメトリ量子物質の研究のさらなる展開に期待が膨らみます。また、ポスター講演も55件（うち学生の発表が44件）あり、ポスターを前にしての議論もとても活発でした。同じホテルに滞在しての会議でしたので、研究に関する意見交換の時間も十分に確保でき、新たな交流が広がるよい機会となりました。また、6月22日には、九州工業大学にて、討論会「格子や分極が絡んだ交差相関応答」を開催しました。（本号の別記事を参照。）これまでの研究成果をベースとして、さらに挑戦的な共同研究へと展開するという方向性を共有できました。

さて、今年度は本領域の活動に対する中間評価を受ける年にあたり、これまでの研究成果と領域としての活動、それらを踏まえた今後の推進方策をまとめて、文部科学省へ報告書を提出しました。計画研究と公募研究によって得られたインパクトの高い研究成果の数々、そして計画研究と公募研究の連携によって得られた本領域ならではの成果をアピールすることができました。領域のメンバーの皆様には、アシンメトリ量子物質に関する研究成果をあげていただき、また報告書作成に際して貴重な情報を快く提供していただき、深く感謝いたします。これからヒアリングを経て、評価結果が返ってきますので、領域としての方向性をしっかりと定めて取り組んでまいります。

また、9月24日－26日には、本領域主催の国際ワークショップ Asymmetry 2026を、大阪大学の豊中キャンパスの大会館にて開催します。国内外から13名の招待講演者を迎え、アシンメトリ量子物質に関する国際的な研究交流を通して、領域としての最新の研究成果を世界に発信します。これまでに国内外から200名近い参加登録があり、若手研究者・大学院生の参加も多くあります。若手の皆さんにはこの機会を大いに活かして、国際的な研究交流のきっかけにしていきたいと思います。

本領域では、領域内での活発な研究交流を推進するべく、さまざまな企画を行っています。アシンメトリ量子物質に関連する研究で成果をあげておられる領域内外の方々に、アシンメトリ量子セミナーにて講演をしていただいております（ハイブリッド配信）。また、昼食をとりながら研究の話題について語り合うランチタイムセミナー（オンライン配信）を始めました。大学院生や若手研究者を他の研究室へ派遣して、専門な実験技術を習得するスキル相伝プログラムもさまざまなグループ間で行われています。お互いの実験技術や研究テーマの共有を通して、特に若い世代の主体的な研究を後押ししたいと考えています。博士学生の海外の研究室・研究所での研究活動も支援しますので、ぜひ積極的にご応募ください。

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。



光第二高調波発生で “アシンメトリ量子”を視る — 対称性の破れを可視化する非線形光学 —

松原 正和

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

本稿の狙い

物質の中には、外からは直接見えない「向き」が潜んでいます。電荷のわずかな偏り、スピンの配列、結晶のねじれ、磁気の渦、そして多極子。これらは、電子がどの方向を選び、時間反転にどう応答し、空間のどこを特別扱いするかを表す、量子物質の個性です。ところが、その個性はしばしば小さく、しかも向きの異なるドメインとして試料中に入り組んで現れます。全体を平均して測るだけでは、本来そこにあるアシンメトリが互いに打ち消され、何も起きていないように見えてしまうこともあります。

本稿では、光第二高調波発生 (Optical Second Harmonic Generation: SHG) を、アシンメトリ量子を「検出する」「可視化する」「制御する」、そして「設計へつなぐ」ための非線形光学手法として紹介します (図1)。SHGは、空間反転対称性の破れを調べる古典的な手段であると同時に、時間反転対称性、局所対称性、磁気多極子、軌道秩序、人工構造の対称性まで読み出す多チャンネルのプロープになります。

SHGの魅力は、「信号が出るか出ないか」を超えて、対称性の破れを模様として読める点にあります。入射光と発生光の偏光を選び、結晶を回転させ、温度・磁場・電場を変えていくと、SHG強度は花びら状の角度パターンや明暗のドメイン像として現れます。その模様は、物質がどの対称性を保ち、どの対称性を失ったかを語る「光学的な指紋」です。

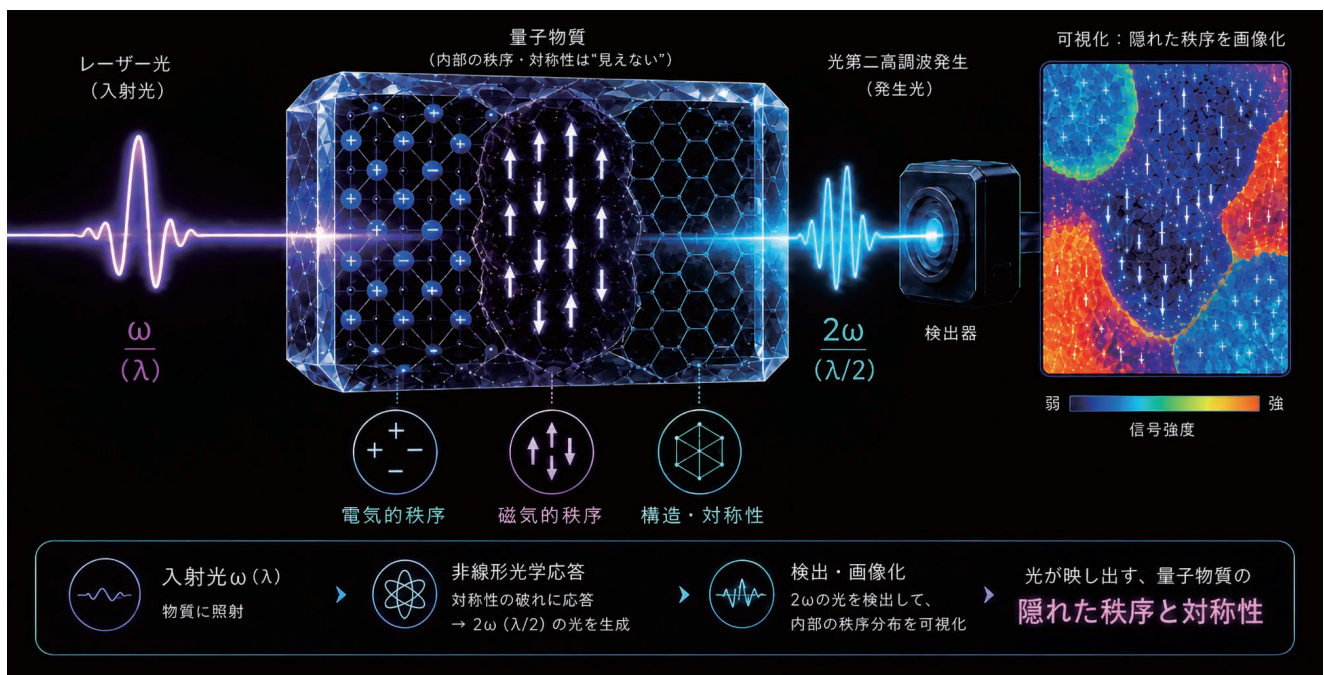


図1 SHGの概念図。入射レーザー光 (ω) の二倍の振動数をもつ光 (2ω) が発生する非線形光学過程を示す。発生光の強度、偏光、空間分布を解析することで、物質中の電氣的秩序、磁氣的秩序、構造・対称性の情報を光学的に読み出すことができる。

アシンメトリ量子は、強誘電性、磁気秩序、多極子秩序、人工構造などに、多様な形で現れます。しかし、物質合成、輸送測定、光学測定、理論といった分野を横断して、それらを同じ言葉で議論することは必ずしも容易ではありません。SHGは、この隔たりを埋める一つの共通言語になり得ます。どの対称性が破れ、どのドメインがどこに存在するのかを光で読み出すことで、異なる物質系や研究分野の間に具体的な接点を作ることができます。

1. アシンメトリ量子はなぜ「見えにくい」のか

量子物質の多くの機能は、何らかの対称性の破れから生まれます。強誘電体では空間反転対称性が、強磁性体では時間反転対称性が破れます。カイラル結晶では右手型と左手型が区別され、磁気トロイダル秩序では電気と磁気が結びついた向きが現れます。さらに拡張多極子の考え方をを用いると、局所的な電荷分布やスピン配列の偏りを、非相反応答や交差相関機能を生み出す「種」として捉えることができます。

難しいのは、その種が必ずしも大きな電気分極や磁化として現れないことです。反強磁性体では、隣り合うスピンの反対向きに並ぶため、全体の磁化はゼロになります。それでも、スピン配列が作る多極子は向きをもち、異常ホール効果、非相反伝導、光電流応答などを支配します。つまり私たちは、平均するとゼロに見える秩序、あるいは通常の測定では見落とされやすい秩序を相手にしているのです。

もう一つの難しさはドメインです。アシンメトリ量子は、向きの異なる複数のドメインとして試料中に共存することがよくあります。バルク測定ではそれらが平均化され、「秩序は本当にあるのか」「どちら向きなのか」「外場で制御できたのか」が分からなくなります。ここで威力を発揮するのが、対称性に鋭敏で、しかも顕微鏡として空間分解できるSHGです。

2. SHGとは何か

SHGは、入射光の振動数 ω に対して、その二倍の振動数 2ω をもつ光が物質中で発生する非線形光学現象です。レーザー光のように強い光を物質に入射すると、電子分布は入射光と同じ振動数で揺れるだけでなく、二倍や三倍の振動数成分を含んで応答します。その二倍成分が外に放射されるのがSHGです。

最もよく知られているのは、電気双極子 (electric dipole: ED) 過程によるSHGです。この場合、誘起される二倍波の分極は、次のように表されます。

$$P_i(2\omega) = \epsilon_0 \chi_{ijk}^{(2)} E_j(\omega) E_k(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $\chi_{ijk}^{(2)}$ は二次の非線形感受率で、物質の対称性を反映するテンソルです。式(1)に空間反転操作を行うと、分極 P_i は符号を変えますが、電場の二乗に相当する $E_j E_k$ は符号を変えません。そのため、空間反転対称性をもつ物質では、ED-SHGの $\chi_{ijk}^{(2)}$ はゼロになります。この選択則により、SHGは、波長変換の手段であると同時に、空間反転対称性の破れを調べる高感度プローブとして発展してきました。

3. 「破れている・破れていない」を超える

しかし、話はそこで終わりません。アシンメトリ量子研究でSHGが特に面白いのは、「空間反転対称性が破れているかどうか」の判定にとどまらない点です。実際の光と物質の相互作用には、磁気双極子 (magnetic dipole: MD) 遷移や電気四極子 (electric quadrupole: EQ) 遷移も含まれます。これらを含めると、二倍波分極は一般的に、式(2)のようにED、MD、EQの寄与の和として考える必要があります。

$$\begin{aligned} P_i(2\omega) &= P_i^{\text{ED}}(2\omega) + P_i^{\text{MD}}(2\omega) + P_i^{\text{EQ}}(2\omega) \\ &\propto \chi_{ijk}^{(2)eee} E_j(\omega) E_k(\omega) \\ &\quad + \chi_{ijk}^{(2)em} E_j(\omega) H_k(\omega) \\ &\quad + \chi_{ijkl}^{(2)eq} E_j(\omega) \nabla_k E_l(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

MD過程やEQ過程はED過程より弱いことが多い一方で、対称性の選択則が異なります。そのため、 $\chi_{ijk}^{(2)eee}$ で表されるED-SHGが禁制となる空間反転対称な物質においても、 $\chi_{ijk}^{(2)em}$ で表されるMD-SHGや、 $\chi_{ijkl}^{(2)eq}$ で表されるEQ-SHGが許容されることがあります。さらに、磁気秩序は時間反転操作で向きが変わるため、磁気起源のSHG成分は時間反転に対して奇の性質を示すことがあります。この性質を利用すれば、反強磁性ドメインの反転や磁気多極子の符号を高感度に検出できます。空間反転対称性をもつ反強磁性体NiOや強磁性半導体EuOでSHGが磁気秩序を捉えた研究は、その重要な先駆例です[1,2]。

つまりSHGが見ているのは、単一の対称性ではなく、電荷・スピン・軌道・格子が作るテンソル応答の全体像です。SHGテンソルは、物質がどの対称性を持ち、どの対称性を失ったかを反映する光学的な指紋です。これを多極子の分類や点群・磁気点群と対応づけることで、抽象的に見えがちなアシンメトリ量子を、実験室で測定できる信号として扱うことができます。

4. 検出する：隠れたアシンメトリ量子を光で映し出す

SHG測定では、入射光と発生光の偏光を変えながら信号強度を測定します。偏光配置を変えたり、結晶を回転させたりすると、SHG強度はしばしば花びらのような角度パターンを描きます (図2)。このパターンは、 $\chi_{ijk}^{(2)}$ テンソルの許された成分、すなわち物質の対称性を反映しています。例えば、極性ディラック金属BaMnBi₂におけるSHGの偏光角依存性は、この物質が極性構造をもち、その極性軸がc軸方向を向いていることを明確に示しました[3]。

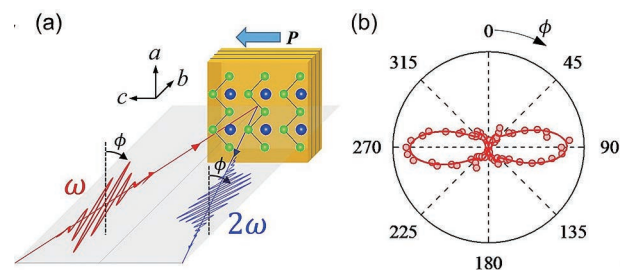


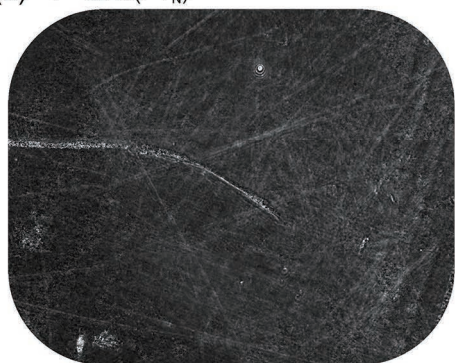
図2 極性ディラック金属BaMnBi₂におけるSHGによる極性軸の検出。(a) 結晶構造とSHG測定配置。(b) SHG強度の偏光角依存性。特徴的な角度パターンから、空間反転対称性の破れと極性軸の向きを決定できる。

さらに、メソスケールの微小な磁性体では、渦状磁気配列が作る磁気トロイダル双極子をSHGで検出することができます[4]。ここでは、原子スケールの結晶対称性だけでなく、人間が設計した形状やサイズが光応答の選択則を決めます。SHGは、自然の結晶に備わった多極子だけでなく、人工構造の中に作りこんだ拡張多極子を読む手段にもなりえます。輸送測定で見える非相反応や光電流応答を、その背後にある対称性と結びつけるうえでも、SHGは重要な橋渡し役になります。

5. 可視化する：平均値の向こうにあるドメインを見る

アシンメトリ量子を本当に理解するには、空間平均された信号だけでは不十分です。右向きと左向きのドメインが半分ずつ存在すれば、バルクの信号はゼロに見えるかもしれません。しかし顕微鏡で見れば、そこには豊かなドメイン構造が広がっています。SHG顕微鏡は、この「対称性の地図」を描くための強力な方法になります。

(a) $T = 80 \text{ K} (> T_N)$



(b) $T = 45 \text{ K} (< T_N)$

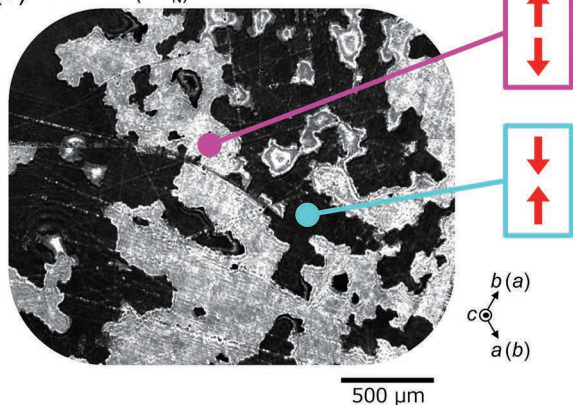


図3 SHGイメージングによるイルメナイト型 MnTiO_3 の反強磁性ドメイン観察。(a) ネール温度 ($T_N = 65 \text{ K}$) 以上ではほぼ一様に見えるが、(b) 低温では明瞭な明暗コントラストが現れる。このコントラストは、2種類の反強磁性ドメインを反映している。

SHG顕微鏡では、試料上の一点一点で二倍波の強度を測ります。得られる画像は、通常の光学顕微鏡写真のように表面形状を写したものではありません。強誘電ドメイン、磁気トロイダルドメイン、反強磁性ドメイン、フェロアキシャルドメインなど、アシンメトリ量子の実空間構造を、対称性のコントラストとして直接見るすることができます。

私たちは、SHGイメージングを用いてイルメナイト型 MnTiO_3 における反強磁性ドメインを可視化し、同時にフェロアキシャル双晶が見られないことを確認しました(図3) [5]。この例は、SHGが単に明るい・暗いを測る手法ではなく、反強磁性秩序、軸性秩序、ドメイン選択といった見えにくい秩序を識別する道具であることを示しています。

「見る」ことは「制御する」ことの第一歩です。外場を加えたときにドメインがどのように動くのか、冷却過程でどのドメインが選ばれるのか、欠陥や歪みがどこでドメインをピン止めするのかを調べることで、アシンメトリ量子を制御するための具体的な手がかりが得られます。

磁気誘起強誘電体 TbMnO_3 では、SHGイメージングにより、電気と磁気が結びついたマルチフェロイックドメインを可視化し、電場、磁場、光による制御を追跡しました(図4) [6]。その結果、強誘電性を磁場で制御するメモリ・ロジック素子の基礎原理を確立し、さらに電氣的に異なる性質をもつドメイン壁を選択的に作り出す新原理を見出しました。また、光を用いてマルチフェロイック秩序を可逆的に切り替えられることも、可視化によって初めて明らかになりました[7]。SHG顕微鏡は、機能の観察にとどまらず、新しい機能を開拓するための武器にもなります。

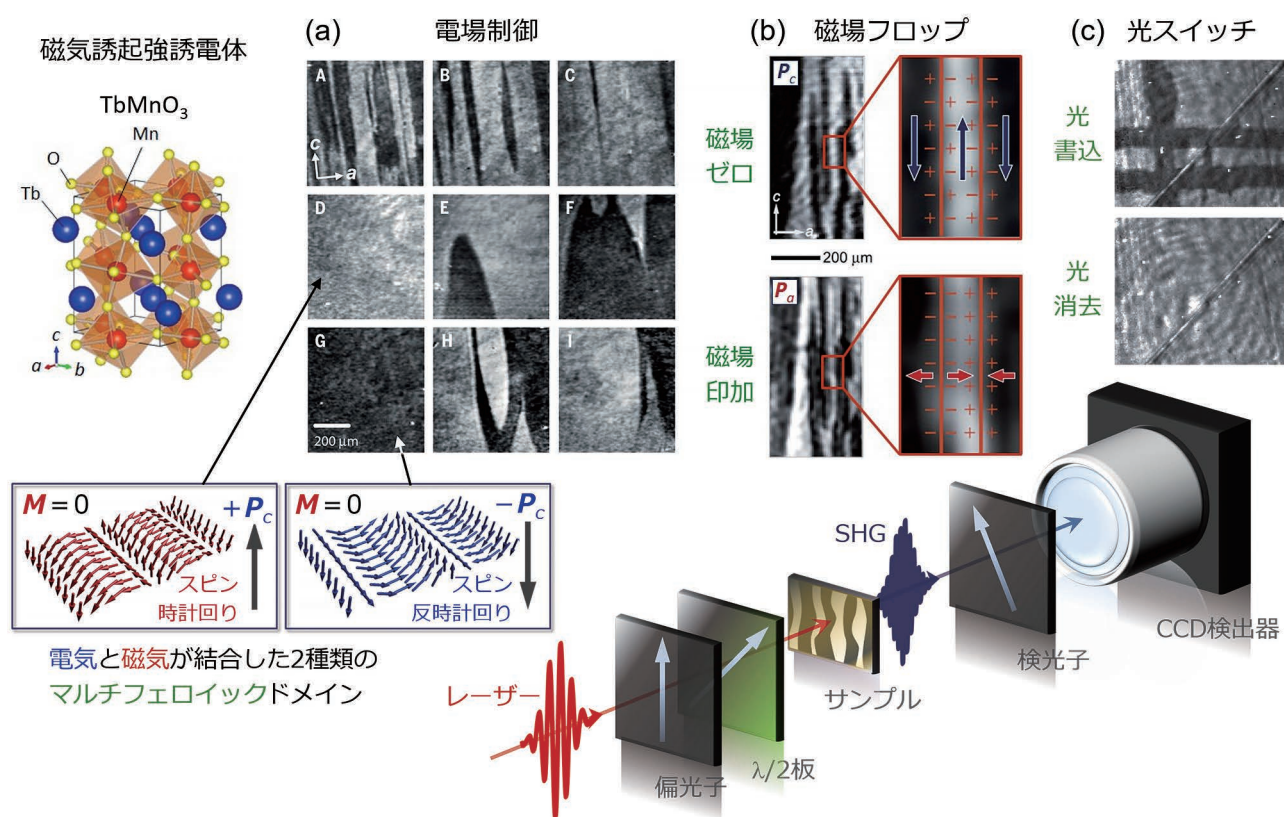


図4 磁気誘起強誘電体 TbMnO_3 におけるマルチフェロイックドメインのSHG観察と外場制御。(a) 電場制御。(b) 磁場フロップ。(c) 光スイッチ。明暗の違いは、磁気秩序と電気分極が結合した2種類のドメインに対応する。

6. SHGが拓くこれから

アシンメトリ量子研究では、目に見えないものを扱います。空間反転対称性の破れ、時間反転対称性の破れ、局所的な回転の歪み、磁気の渦。これらは普段の直感ではつかみにくいものです。しかしSHGを使うと、それらは二倍波として現れ、偏光パターンとして読み出され、顕微鏡像として目の前に浮かび上がります。見えなかった対称性がスクリーンに現れる。その瞬間こそ、SHGを使う研究の大きな魅力です。

今後の重要な方向の一つは、自然物質で見つかったアシンメトリを理解するだけでなく、必要な対称性を自分たちで作り込み、その応答を光で確かめることです。メソスケールの磁気トロイダル双極子をSHGで検出した研究は、人工構造の中に現れる拡張多極子を光で読む可能性を示しています[4]。

ナノメートルからマイクロメートルの構造を設計すれば、対称性そのものを人工的に操作できます。三回回転対称性をもつ磁性メタマテリアルでは、光の偏光を変えるだけでスピン駆動光電流の向きと大きさを制御できることが示されました[8]。さらに、構造サイズを変えることで、応答波長を系統的に調整できることも分かってきました[9]。これは、アシンメトリ量子を「見つける」段階から、「作り、設計し、使う」段階へ進める重要な一歩です。SHGはその過程で、設計した対称性を確認し、機能発現の起源を可視化し、次の設計へ戻すフィードバックループを与えてくれます。

SHGは、空間反転対称性の破れを鋭敏に検出する古典的な強みをもちながら、磁気双極子・電気四極子遷移を通じて多彩な多極子にも迫ることができます。自然物質の隠れた秩序から、人工構造で設計した新しい応答まで、SHGはアシンメトリ量子研究の共通言語として、ますます重要になるはずです。今後は理論研究者とも連携し、SHG測定を点群・磁気点群の決定、多極子の分類、第一原理計算との比較へと発展させ、アシンメトリ量子を定量的に理解し、設計する物質科学へつなげていきたいと考えています。

[1] M. Fiebig, D. Fröhlich, Th. Lottermoser, V. V. Pavlov, R. V. Pisarev, and H.-J. Weber, Phys. Rev. Lett. **87**, 137202 (2001).

[2] M. Matsubara, A. Schmehl, J. Mannhart, D. G. Schlom, and M. Fiebig, Phys. Rev. B **81**, 214447 (2010).

[3] M. Kondo, M. Ochi, T. Kojima, R. Kurihara, D. Sekine, M. Matsubara, A. Miyake, M. Tokunaga, K. Kuroki, H. Murakawa, N. Hanasaki, and H. Sakai, Commun. Mater. **2**, 49 (2021).

[4] D. Sekine, Y. Sato, and M. Matsubara, Appl. Phys. Lett. **120**, 162905 (2022).

[5] D. Sekine, T. Sato, Y. Tokunaga, T. Arima, and M. Matsubara, Phys. Rev. Mater. **8**, 064406 (2024).

[6] M. Matsubara, S. Manz, M. Mochizuki, T. Kubacka, A. Iyama, N. Aliouane, T. Kimura, S. L. Johnson, D. Meier, and M. Fiebig, Science **348**, 1112 (2015).

[7] S. Manz, M. Matsubara, T. Lottermoser, J. Büchi, A. Iyama, T. Kimura, D. Meier, and M. Fiebig, Nat. Photon. **10**, 653 (2016).

[8] M. Matsubara, T. Kobayashi, H. Watanabe, Y. Yanase, S. Iwata, and T. Kato, Nat. Commun. **13**, 6708 (2022).

[9] G. Cavanna, H. Taketani, H. Watanabe, Da Pan, D. Oshima, A. Honda, T. Kato, and M. Matsubara, Nanophotonics **14**, 5611 (2025).



非相反伝導で探るスピントクスチャ -EuIr₄In₂Ge₄における 角度分解非相反伝導測定-

木俣 基

日本原子力研究開発機構原子力科学研究所先端基礎研究センター 研究副主幹

横山 旭

東北大学金属材料研究所 博士後期課程

1. はじめに

空間反転対称性および時間反転対称性が同時に破れた系では、さまざまな交差相関応答が生じることが知られています。その代表例として、誘電分極と磁気秩序が結合したマルチフェロイクスにおける磁気電気効果が挙げられます。

一方、金属では伝導電子によって電気分極が遮蔽されるため、対称性の破れは磁性絶縁体での磁気電気効果としてではなく、特異な電気伝導やスピン応答として現れます。近年では、その代表的な現象として電流誘起磁化や非相反電荷輸送が大きな注目を集めています[1-4]。

非相反電荷輸送は、電流の向きを反転させたときに輸送係数が変化する非線形伝導現象です。電気抵抗率に、電流密度に依存する非相反項が存在する場合、拡張したオームの法則は、現象論的に次式で表すことができます。

$$E = (\rho + \gamma j)j = \rho j + \gamma j^2$$

ここで ρ [Ωm]は電気抵抗率、 j [Am⁻²]は電流密度であり、 γ [VA⁻² m³]を非相反抵抗率と定義します。これまでの実験研究では、空間反転対称性が破れた物質に外部磁場を印加することで時間反転対称性を破り、磁場誘起の非相反電荷輸送を観測する研究が精力的に行われています。このような非相反応答は、空間反転対称性の欠如とスピン軌道結合によって形成されるフェルミ面上のスピン偏極構造（スピントクスチャ）を強く反映します。外部磁場を印加すると、スピントクスチャに応じてフェルミ面が異方的に歪むため、その結果として非相反伝導にも結晶方位に依存した異方性が現れます。したがって、結晶のさまざまな結晶方位に沿って電流を印加し、非相反伝導の角度依存性を詳細に測定することで、運動量空間におけるスピントクスチャを実験的に決定できると期待されます。本稿では、この考え方にに基づき、非相反伝導測定を運動量空間のスピントクスチャを可視化する輸送プローブとして確立した EuIr₄In₂Ge₄の研究をご紹介します[5]。

2. 集束イオンビーム (FIB) による微細加工

非相反伝導では、電流印加方向と結晶方位との関係を精密に制御した輸送測定が重要となります。そのため、本研究では集束イオンビーム (Focused Ion Beam: FIB) を用いた微細加工技術を活用しています[6, 7]。FIBは、細く絞ったイオンビームを試料表面に照射し、サブミクロンサイズの微細加工を行う装置です。FIBの最大の特長は、バルク単結晶から直接微細素子を作製できる点にあります。このため、薄膜化が難しい物質を含め、多様な結晶材料を輸送測定用デバイスへ加工することが可能です。また、ごく小さな単結晶しか得られない物質であっても、その結晶を直接加工してデバイス化できることから、新規物質の物性評価にも広く利用できると考え

られます。さらに、加工する結晶方位を精密に制御できることから、本研究のように結晶方位に依存した非相反伝導を調べる実験においても、その能力が十分に発揮されます。

なお、本装置は本領域の共用設備として導入されています（領域ニュースレター #4にて紹介）。微細加工や輸送測定用デバイスの作製にご興味のある方は、ぜひお気軽にお問い合わせください。

3. 「角度分解非相反伝導測定」による $\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ のスピントクスチャの可視化

本研究では、非相反伝導の電流方位依存性から運動量空間のスピントクスチャを検出することを目指しました。この意味で、本手法は非相反伝導を用いた一種の「角度分解測定」と考えることが可能です。

$\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ は、空間群 $\bar{4}2m$ に属し、空間反転対称性が破れた正方晶構造を持つ物質です。結晶全体として反転対称性が破れているため、スピン軌道結合により伝導電子のバンドがスピン分裂し、フェルミ面上には特徴的なスピントクスチャが形成されます。バンド構造計算からは、図1(a)に模式的に示すようなドレッセルハウス型スピントクスチャが $k_a k_b$ 面内に実現することが予測されています[8, 9]。このスピントクスチャの特徴は、スピン偏極方向が波数方向に対して一様な関係を持たない点です。すなわち、

結晶方位によってはスピン偏極が波数と平行になり、別の方位では垂直になるなど、非一様なスピン配向を示します[10, 11]。これは、スピン偏極が波数に対して常に垂直となるラシュバ型スピントクスチャ（図1(b)）とは対照的な特徴です。

このように、 $\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ は理論的にスピントクスチャが予測されており、顕著な異方性を示します。したがって、非相反伝導測定によって運動量空間のスピントクスチャを検出する実験手法の有効性を検証するためのモデル物質として打って付けであると考えこの物質に着目しました。

$\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ の磁化率はキュリー・ワイス則に従った温度依存性を示し、 $B \parallel [110]$ および $B \parallel [001]$ におけるキュリー・ワイス温度は、それぞれ -3.2 K および -12.4 K と見積もられています。この弱い磁気異方性は、 Eu^{2+} イオンの有効磁気モーメント ($4f^7$, ($S = 7/2 = J$), ($L = 0$)) によって良く再現され、Euの4f電子がほぼ局在した状態にあることを示しています。また、さらに低温では $T_N \approx 2.5 \text{ K}$ において反強磁性転移が生じます。

一方、バンド構造計算からは、スピン軌道結合の大きいIrの5d電子が伝導バンドの形成に大きく寄与していることが示されています。このことから、本物質は磁性と伝導電子が弱く結合した磁性伝導体であると考えられます。

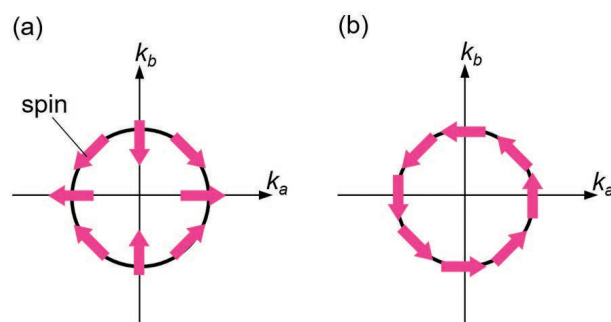


図1：二次元面内における(a)ドレッセルハウス型、および(b)ラシュバ型スピントクスチャの模式図。前者では波数方向に依存して、波数とスピン偏極方向の関係性が変化するのに対し、後者では、波数とスピン偏極方向は常に垂直となる。

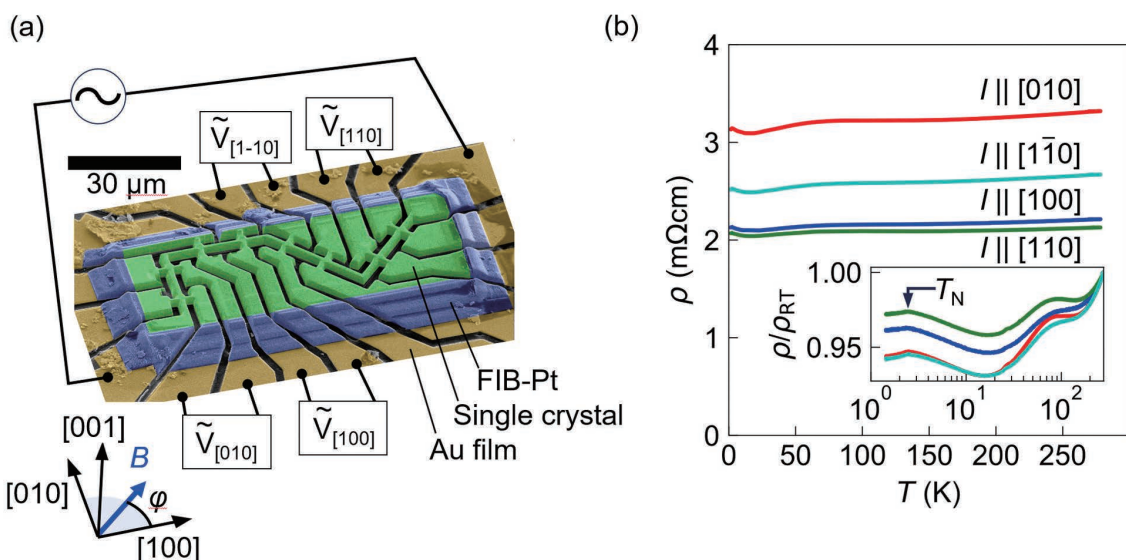


図2：(a)本研究で作製したFIB加工素子のSEM像。この素子では、同一の結晶片内で異なる結晶方位における伝導測定を行うことができる。(b)各電流パスにおける電気抵抗率の温度依存性。

図2に、本研究で使用したFIB加工デバイスの走査型電子顕微鏡（SEM）像を示します。本研究では、運動量空間におけるスピントクスチャの異方性を明らかにするため、一つの結晶片の中で電流印加方向が結晶の[100]、[010]、[110]および $[1\bar{1}0]$ 方向となる輸送デバイスを作製しました。

作製したデバイスの各電流パスにおける電気抵抗率は2 - 3.5 mΩcm程度であり、ばらつきはあるものの、概ねバルク単結晶で報告されている値と一致しています（図2(b)）。このことは、FIB加工による結晶へのダメージは小さく、バルク結晶の性質を維持したまま素子化できていることを示しています。

一般に、フェルミ面上にスピントクスチャが存在する場合、外部磁場を印加すると、ゼーマンエネルギーの利得を稼ぐように、スピン分裂したフェルミ面が運動量空間内で相対的に歪みます[12]。その結果、バンド構造の対称性が崩れ、電流の極性に依存して輸送特性が異なる非相反伝導が発現します。したがって、フェルミ面のシフト量、ひいては非相反伝導の大きさは、磁場方向とスピン偏極方向との相対的な関係によって決まります。

この考え方にに基づき、各波数方向（すなわち各電流印加方向）について、フェルミ面の相対的なシフト量（非相反伝導の大きさに比例すると仮定）の磁場角度依存性を計算した結果を図3(e)-(h)に示します。図中の矢印は、それぞれの電流パスにおいて電流方向と外部磁場が平行となる角度を表しています。

ドレッセルハウス型スピントクスチャを仮定した場合 $I \parallel [100]$ および $I \parallel [010]$ の場合には、電流方向と磁場方向が平行となる条件でフェルミ面のシフト量が極値を取ります。一方、 $I \parallel [110]$ および $I \parallel [1\bar{1}0]$ では、電流と磁場が垂直となる条件で極値を示します。この違いは、ドレッセルハウス型スピントクスチャでは、結晶方位に依存して波数方向とスピン偏極方向の関係が平行になったり垂直になったりすることを直接反映したものです。そのため、

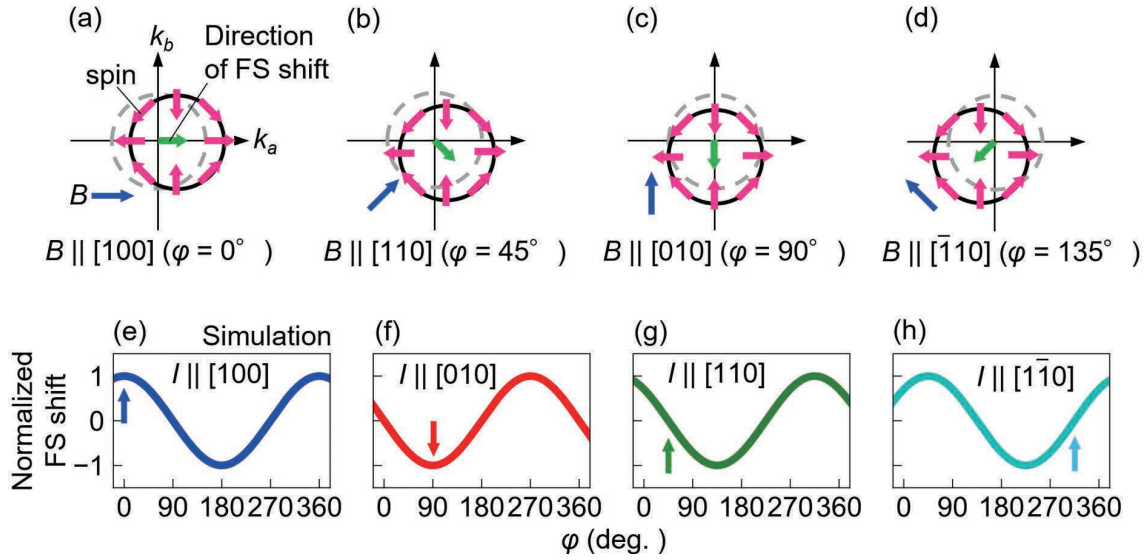


図3：(a) - (d) ドレスセルハウス型スピントクスチャを持つフェルミ面に対して、外部磁場をそれぞれ $B \parallel [100]$ ($\varphi = 0^\circ$)、 $B \parallel [110]$ ($\varphi = 45^\circ$)、 $B \parallel [010]$ ($\varphi = 90^\circ$)、 $B \parallel [\bar{1}10]$ ($\varphi = 135^\circ$) の方向に印加した場合に生じるフェルミ面シフトの模式図。(e) - (h) 電流方向をそれぞれ $I \parallel [100]$ 、 $I \parallel [010]$ 、 $I \parallel [110]$ 、 $I \parallel [\bar{1}10]$ とした場合の、電流に平行な方向のフェルミ面シフト量の磁場角度依存性のシミュレーション結果。図中の矢印は、電流と磁場の方向が平行となる磁場の角度を示している。

この特徴的な角度依存性は、スピントクスチャを識別するための重要な指標となります。

図4に、各電流印加方向における非相反伝導度の磁場角度依存性を示します。縦軸は非相反伝導度 σ_2 であり、 $\sigma_2 = \gamma/\rho^3$ と定義されます[13]。 σ_2 は抵抗率の影響を除いて非相反応答を評価できることから、本研究では非相反伝導の大きさを示す量として用います。実験結果とシミュレーション結果を比較すると、各電流方向における磁場角度依存性が良く一致していることが分かります。特に、 $I \parallel [100]$ および $I \parallel [010]$ では電流方向と磁場方向が平行な条件で、 $I \parallel [110]$ および $I \parallel [\bar{1}10]$ では両者が垂直な条件で非相反伝導が極値を持つという特徴が、実験でも明瞭に再現されています。

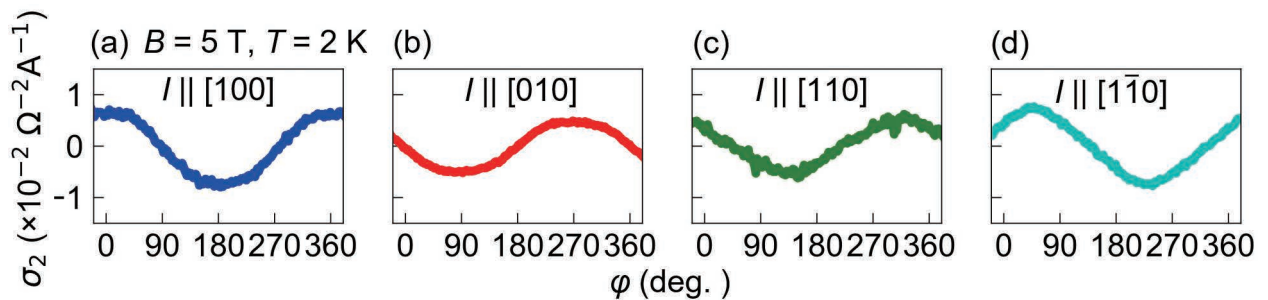


図4：(a)-(d) 各電流方位 ($I \parallel [100]$ 、 $I \parallel [010]$ 、 $I \parallel [110]$ 、 $I \parallel [\bar{1}10]$) における非相反伝導度の磁場角度依存性の測定結果。図3(e)-(h)に示したし角度依存性と定性的に良い一致を示している。

この結果は、バンド計算で予測されたドレッセルハウス型スピントクスチャを輸送測定から実験的に検証できたことを示しています。すなわち、非相反伝導の角度依存性を詳細に解析することで、フェルミ面上のスピンの偏極構造を実験的に決定できることが実証され、非相反伝導測定がスピントクスチャを可視化する有力な輸送プローブとなることが示されました。

最後に、非相反伝導の磁場および温度依存性の結果について議論します。図5(a)は、 $I \parallel B \parallel [010]$ における様々な温度での非相反伝導度の磁場依存性を示したものです。2 Kでは、非相反伝導度は磁場の増加とともに増大し、約5 Tで最大値に達した後、高磁場側では減少へ転じます。この変曲点は磁化の飽和磁場と一致しており、非相反伝導がEuの磁気モーメントと強く結び付いていることを示しています。また、2.5-3 T付近には小さな異常が観測され、この磁場は磁化微分(dM/dB)に現れる異常とも対応しています [図5(a)内相図]。これらの結果から、非相反伝導は磁気状態の変化を敏感に反映する輸送現象であることが分かります。

一方、温度を上昇させると非相反伝導度は急速に減少します。図5(b)に非相反伝導度(σ_2)のゼロ磁場近傍の傾き(σ_2/B)の温度依存性を示します。図からわかるように、 σ_2/B は T_N 以下ではほぼ一定の値を示す一方、 T_N を超えると急速に減少することが分かりました。この高温側の減少にべき乗則を仮定すると、およそ T^{-4} に相当する強い温度依存性を示します。一般に、磁気モーメントに起因する物理量であれば、その温度依存性は磁化率と同様に T^{-1} 程度の温度依存性を示すと考えられます。実際、比較のために示した、異常ホール係数(ρ_{AHE}/B [$\Omega\text{m}\cdot\text{T}^{-1}$])の温度依存性 (図5(b)右軸) は概ね T^{-1} に比例し、磁化率の温度依存性とよく対応しています [14]。しかし、非相反伝導はそれよりもはるかに急峻な温度依存性を示しており、その起源を単純な磁気モーメ

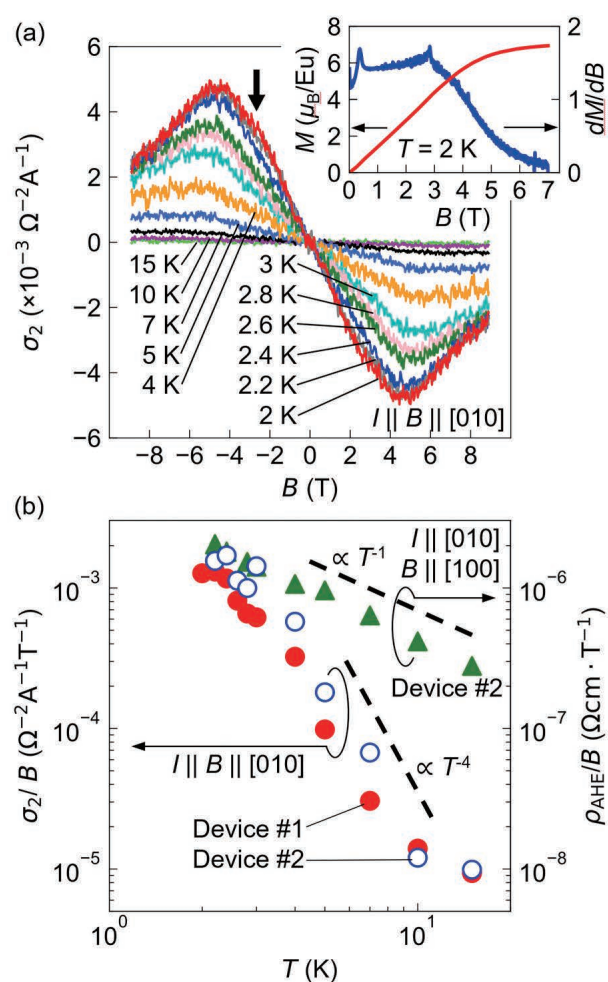


図5: (a) $I \parallel B \parallel [010]$ における非相反伝導度 σ_2 の磁場依存性。低温で σ_2 は磁場とともに増大し、約5 Tで極大となった後、高磁場側では減少する。挿入図は $B \parallel [010]$ における磁化曲線 (左軸) およびその磁場微分 dM/dB (右軸) を示しており、 σ_2 の変化が磁化過程と密接に対応していることが分かる。(b) ゼロ磁場近傍における σ_2 の傾きの温度依存性 (左軸) と、異常ホール係数 (ρ_{AHE}/B) の温度依存性 (右軸)。破線は、それぞれ T^{-4} および T^{-1} に比例するガイドラインである。

ントの発達だけで説明することはできません。この結果は、非相反伝導と異常ホール効果がいずれも磁気モーメントと密接に関係しながらも、両者の発現機構が異なることを示しています。すなわち、非相反伝導は単に磁化の大きさや伝導電子のスピン偏極率を反映した現象ではなく、より豊かな起源を持つ輸送現象であることが示唆されます。

まとめ

本研究では、空間反転対称性の破れた反強磁性体 $\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ において非相反伝導の角度依存性を詳細に測定し、スピントクスチャを実験的に検証できることを示しました。本手法は試料の微細加工を必要とするものの、比較的単純な電気伝導測定に基づくため、高圧・強磁場など、光電子分光の適用が困難な実験環境においても対称性の破れた電子状態を調べる有力な手法となることが期待されます。このような観点から、我々は本手法を「角度分解非相反伝導測定」と位置付け、角度分解光電子分光 (ARPES) とは異なる特徴を有する運動量空間プローブとして発展する可能性を持つのではないかと考えています。

また、非相反伝導の磁場・温度依存性を調べた結果、磁化率や異常ホール効果から単純に期待される振る舞いとは大きく異なることが明らかになりました。このことは、非相反伝導が磁気モーメントだけでなく、より複雑で豊かな電子状態を反映したプローブである可能性を示唆しています。その微視的な発現機構は現時点では未解明ですが、今後は非磁性参照物質との比較測定などを通じて、磁性イオンの果たす役割を明らかにしていきたいと考えています。

謝辞：

本研究は、仲地立、松田達磨（以上、東京都立大院理）、本間佳哉、仲村愛、清水悠晴、李徳新、三宅厚志、青木大（以上、東北大金研）、本田史憲（九大アイソトープセンター）、大貫惇睦（理研）の各氏（敬称略）との共同研究です。深く感謝致します。

[1] T. Furukawa, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 954 (2017).
[2] H. Saito, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033702 (2018).
[3] G. L. J. A. Rikken, J. Fölling, and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. **87**, 236602 (2001).
[4] T. Ideue, *et al.*, Nat. Phys. **13**, 578 (2017).
[5] A. Yokoyama, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 023701 (2025).
[6] P. J. W. Moll, *et al.*, Nature **535**, 266 (2016).
[7] M. Kimata, *et al.*, Nature **565**, 627 (2019).

[8] N. P. Calta, *et al.*, Angew. Chem. **54**, 9186 (2015).
[9] R. Nakachi, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 075001 (2024).
[10] G. Dresselhaus, Phys. Rev. **100**, 580 (1955).
[11] C. M. Acosta, *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 104408 (2021).
[12] R. H. Silsbee, J. Phys.: Condens. Matter **16**, R179 (2004).
[13] K. Yasuda, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 127202 (2016).
[14] A. Fert and P. M. Levy, Phys. Rev. B **36**, 1907 (1987).



構造カイラリティを伴わない 純電子的カイラリティ

石飛 尊之

東北大学大学院理学研究科 特任研究員

服部 一匡

東京都立大学理学部 教授

カイラリティ

右手と左手のように、自身の鏡像と重ね合わせられない性質をカイラリティ（掌性）と呼びます。19世紀のパースツールによる酒石酸塩結晶の形と旋光性の発見に始まり、化学における鏡像異性体、生命科学における生体分子の左右性、素粒子物理学における粒子の内部自由度の非対称性にまで、自然科学の広い分野に現れる基本概念です[1]。カイラリティは物性物理においても重要なテーマであり、光学活性、カイラリティ誘起スピン選択性（CISS）、カイラルフォノンなど、光・電子・スピン・格子振動の応答に直結します[2]。

カイラリティの制御

カイラリティの符号を選択し制御できれば、様々な物性応答を外部から自在に切り替えられる可能性があります。しかし、その制御は一般に容易ではありません。結晶のカイラリティを反転させるには、巨視的な数の原子を協調的に動かす必要があるためです。構造変化に伴う慣性が避けられないため、高速な切り替えには根本的な制約が存在します。

電子のカイラリティ

一方で、カイラリティは原子配列の非対称性に限られるものではありません。例えば、素粒子物理学におけるカイラリティは、粒子の内部自由度の非対称性に関係する概念です。近年、物性物理学においても、時間反転偶の擬スカラー量「電気トロイダル単極子」など、電子自由度を用いてカイラリティを定量化する研究が進んでいます[3,4]。ディラック電子がもつカイラリティ自由度や[5]、第一原理計算による電子カイラリティの評価[6]などと合わせて、本領域でも盛んに議論されていることだと思います。ただし、電子カイラリティを定義できても、その期待値が有限になる起源は構造カイラリティにあります。電子カイラリティの期待値が生じるためには、原子配列に基づくポテンシャルが鏡映対称性を破る必要があるためです。

純粋に電子系によるカイラリティ (PEC)

結晶構造は鏡映対称なまま、電子の内部自由度だけで自発的にカイラリティが生じることはあり得るでしょうか。私たちは、このような状態が実現し得ることを示し、それを「純電子的カイラリティ (PEC: purely electronic chirality)」と名付けました[7]。PEC では、カイラリティを示す秩序変数は電子自由度から生じ、平衡原子位置の変位を必要としません。これは単に「構造に由来しないカイラリティ」という概念的な新しさにとどまらず、電子の秩序変数の反転のみでカイラリティを切り替えられることを意味します。原子の大きな慣性という制約から解

放されるため、カイラリティの選択や高速制御といった画期的な性質が期待されます。本稿では、PECが実現する条件、特徴的な物性応答、および候補物質について紹介します。

純電子的カイラリティの条件と設計指針

カイラリティは、時間反転偶、空間反転奇である擬スカラー量「電気トロイダル単極子 G_0 」によって表すことができます。これは、極性ベクトル $\mathbf{Q}$ と軸性ベクトル $\mathbf{G}$ の内積 $G_0 \propto \mathbf{Q} \cdot \mathbf{G}$ として構成できます。もし低温相で $\mathbf{Q}$ が新たに秩序すると原子の変位を伴うため「純電子的」ではなくなります。また、原子軌道で奇パリティ電子自由度を秩序させることも、一般には容易ではありません。そこで、結晶構造に元々存在する局所的な極性ベクトル $\mathbf{Q}$ を利用し、そこに電子自由度から生じる $\mathbf{G}$ (電気トロイダル双極子) の秩序を結合させる方針をとります。

電気トロイダル双極子の秩序というと、特殊に思えるかもしれませんが、結晶中では d 電子や f 電子系などでよく現れる「電気四極子」と混成し得ます。例えば、一軸異方性が強い系では、特定の結晶場 ($O_{20} = 3I_z^2 - I(I+1)$ など) のもとで、電気四極子 ($Q_{xx} = I_z \sigma_x + I_x \sigma_z$) と電気トロイダル双極子 ($G_y = I_z \sigma_x - I_x \sigma_z$) が混成します。これは、 $\text{Tr}[O_{20} Q_{xx} G_y] \neq 0$ によって確かめられます。この性質を利用すれば、電気四極子秩序に注目した、現実的な候補物質に基づくカイラリティの設計が容易になります。

PECを実現するための基本方針は以下の2点に集約されます。

1. 元の結晶はアキラルで、各原子位置(副格子)には、局所的な極性ベクトルが存在すること
2. その極性ベクトルと平行な $\mathbf{G}$ 成分(または混成する電気四極子成分)が秩序すること

これらの条件が揃うことで、擬スカラー $G_0 \propto \mathbf{Q} \cdot \mathbf{G}$ が生じ、PECが実現します。

純電子的カイラリティの例: 歪カゴメ格子

上記PECの条件を満たす系として、歪カゴメ格子や各種ブリージング格子(カゴメ、ハニカム、正方)などが挙げられます。これらは結晶全体としてはアキラルですが、高対称な“レギュラー”格子からの各サイトのずれが局所的な極性ベクトルの役割を担います。代表例が、「歪カゴメ格子」です。歪カゴメ格子上の局在電気四極子自由度の120度秩序を考えると、全ての鏡映対称性を破り、PECが実現することがわかります(図1)。歪カゴメ副格子の二次元座標自由度(極性成分 $\hat{Q}_x, \hat{Q}_y$) と、局在電子の電気四極子

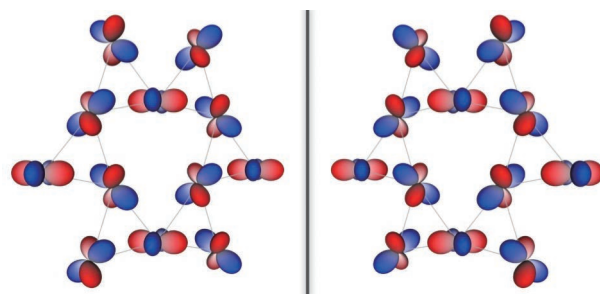


図1: 歪カゴメ格子上の電子カイラリティ秩序の模式図。赤青は電荷や有効スピン軌道結合の符号を表す。左右の鏡像対は逆符号のカイラリティをもつ。

(Q_{yz}, Q_{zx}) を組み合わせると、上述の一軸異方性下での電気トロイダル双極子と電気四極子の対応関係から、カイラリティ $C \sim \hat{Q}_x Q_{yz} - \hat{Q}_y Q_{zx}$ が定義できます。ここで、 $Q_{yz} \sim G_x$ および $Q_{zx} \sim -G_y$ であり、 C は確かに擬スカラーとなることがわかります。この電子秩序によって、歪カゴメ格子の原子位置は不変ですが、四極子秩序変数の符号 $(Q_{yz}, Q_{zx}) \rightleftharpoons (-Q_{yz}, -Q_{zx})$ がカイラリティの右手・左手型に対応します。

カイラルな物性応答

この電子秩序によるカイラル物性について、四極子近藤結合をもつ二軌道近藤格子模型に120度四極子秩序を反映し解析しました。その結果、構造カイラリティがなくとも、カイラル結晶特有の内積型のスピン運動量結合や電流誘起磁化が現れることが確認されました(図2)。特徴的な点は、これらの応答に伝導電子のスピン軌道相互作用が不要な点です。結晶構造を反映したホッピングによって生じる副格子依存の軌道ラシュバ結合 $\sim l_z (k_x \hat{Q}_y - k_y \hat{Q}_x)$ と、カイラリティ秩序変数との近藤結合 $\sim g l_z (\sigma_x \hat{Q}_y - \sigma_y \hat{Q}_x)$ が組み合わせることで、内積型のスピン分裂 $\sim k_x \sigma_x + k_y \sigma_y$ が生じます。ただし、後者にはスピン軌道相互作用は必須です。

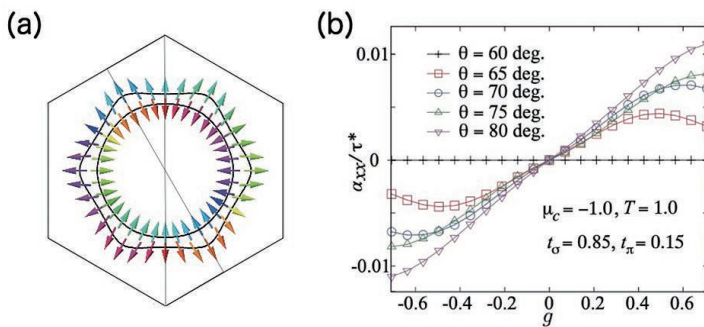


図2: 純電子的カイラリティを反映した伝導電子模型の解析。(a)フェルミ面上のスピン分裂。(b)電流誘起磁化係数 M/E のカイラリティ結合係数 g 依存性。歪カゴメ格子の歪み角 θ を変えてプロットしており、レギュラーカゴメ格子に相当する $\theta = 60^\circ$ では電流誘起磁化は生じない。

候補物質: URhSn

PECの候補物質として注目されるのが、U原子が歪カゴメ格子を形成するURhSnです。この物質は54 K (T_0) で未知の相転移、16 K で強磁性転移を示します。私たちは、 T_0 以下でUの局在 $5f$ 電子が Q_{yz}, Q_{zx} 型の120度四極子秩序を形成し、電子カイラリティの秩序が実現していると考えています。この秩序は、これまでに報告されているバルク物性 [8]、共鳴X線散乱及び中性子散乱 [9]、Sn-NMR [10]の実験結果と整合します。秩序形成に伴ってRhサイトの構造変位が生じ得るため、本系は厳密な意味でのPECとは言い切れません。しかし、磁気エントロピーの振る舞いが示すように、秩序化のエネルギー利得は、ほぼ f 電子に由来しており、構造変位は秩序の形成自体に必須ではありません。そのため、円偏光などの外場を用いることで、格子が追従できない電子系の時間スケールでの高速なカイラリティの切り替えが可能になるなど、PECの重要な性質を示すことが期待できます。

純電子的カイラリティの発展性と展望

PECは豊かな発展性を備えています。特に重要だと思われるものを以下に列挙します。

1. ドメイン制御：格子と異なり、電子は磁場とよく結合するため、磁場を用いたカイラリティドメインの選択・制御が可能です。URhSnのSn-NMRでもその兆候が観測されており、新たなドメイン選択手法となり得ます。高速に切り替えるには、円偏光を用いるのが良いと考えられます。
2. カイラルフォノン：静的構造がアキラルであっても、電子格子相互作用を通じて、電子カイラリティがカイラルフォノンを誘起します。
3. 輸送や交差相関：電子系は磁場と強く結合するため、磁場中 (URhSnでは強磁性秩序相) での非相反伝導や電流誘起磁化などの交差相関が顕著になることが期待されます。
4. 候補物質の拡大：現在はURhSnが主な候補ですが、 Q_y 、 Q_x 型四極子秩序を示す例があるU、Dy、Tbなどの f 電子系をはじめ、軌道自由度を持つ物質群へとこの概念が広がっていくことが期待されます。

まとめ

純電子的カイラリティ (PEC) は、カイラリティの起源を従来の「原子配列」から「電子秩序」へと拡張する概念です。アキラルな結晶においても、電子系のカイラリティが、スピン運動量結合や電流誘起磁化などのカイラル物性を発現させます。最大の利点は、磁場や光を用いたドメイン制御や、重い原子の移動を伴わないことによる高速なカイラリティ制御への道を拓く点にあります。現在、最も有力な候補物質であるURhSnの実験的検証を進めるとともに、類似した四極子秩序を持つ物質の探索を行うことで、PECの物理が今後さらに大きく展開していくことが期待されます。

謝辞

この研究は日本学術振興会科学研究費助成事業 (No. JP21H01031, JP23H04866, JP23H04869, JP23K20824) の支援を受け実施されました。

[1] L. D. Barron, Chirality **24**, 879 (2012).
[2] E. Bousquet, *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **37**, 163004 (2025).
[3] R. Oiwa and H. Kusunose, Phys. Rev. Lett. **129**, 116401 (2022).
[4] J.-I. Kishine, H. Kusunose, and H. M. Yamamoto, Isr. J. Chem. **62**, 202200049 (2022).
[5] S. Hoshino, M.-T. Suzuki, and H. Ikeda, Phys. Rev. Lett. **130**,

256801 (2023).
[6] T. Miki, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **134**, 226401 (2025).
[7] T. Ishitobi and K. Hattori, Phys. Rev. Lett. **136**, 056402 (2026).
[8] Y. Shimizu, *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134411 (2020).
[9] C. Tabata, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 083701 (2025).
[10] Y. Tokunaga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **137**, 046501 (2026).



非中心対称な価電子分布の可視化と軌道混成の定量評価

鬼頭 俊介

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

A01公募班として本領域に参画いたします東京大学の鬼頭俊介と申します。第1期に引き続き、第2期もどうぞよろしくお願いいたします。

結晶構造は物性を理解する上で不可欠な情報です。結晶構造が分かれば、対称性だけでなく、化学結合、価数状態、軌道状態などについても間接的あるいは経験的な理解が可能になります。しかし、結晶構造や対称性だけから物性を完全に理解・予測することはできません。なぜなら、物性を担うのは電子（特に価電子）であり、その電荷・スピン・軌道といった自由度が物性を支配しているからです。

私たちのグループでは、大型放射光施設SPring-8で利用可能な高輝度・高エネルギーX線を最大限に活かした回折実験と、独自に開発した価電子密度観測技術を組み合わせることで、結晶構造にとどまらず、物性を担う価電子の実空間分布を可視化することができます[1-2]。これにより、多様な結晶性物質において、その物性の起源により直接的に迫ることが可能となりました。

本研究課題では、特に対称心のないサイトにおける価電子密度に着目します。例えば、*d*電子を有する遷移金属イオンが対称心をもつサイトに存在する場合、その価電子密度は主として*d*軌道の線形結合によって記述できます。一方、対称心のないサイトでは、価電子密度分布そのものが非中心対称となり得ます。このような電子状態を記述するためには、

*d*軌道だけでなく、*p*軌道との混成を考慮する必要があります(図1)。逆に言えば、価電子密度を精密に観測・解析することで、各軌道の混成度合いや電子の対称性の破れの程度を定量的に評価できる可能性があります[3]。本研究では、この観点から「アシンメトリ量子」の実験的研究を推進したいと考えています。

また、A01班の一員として、領域内の共同研究にも積極的に貢献したいと考えています。通常のX線構造解析や価電子密度観測に加え、散漫散乱強度を用いた短距離秩序の解析にも取り組んでいます[4]。さらに、圧力・磁場・電場・電流などの外場下におけるX線回折実験や、共鳴X線散乱、非弾性X線散乱の経験もあります。関連する研究テーマにご興味をお持ちの方は、ぜひお気軽にお声がけください。2年間、どうぞよろしくお願いいたします。

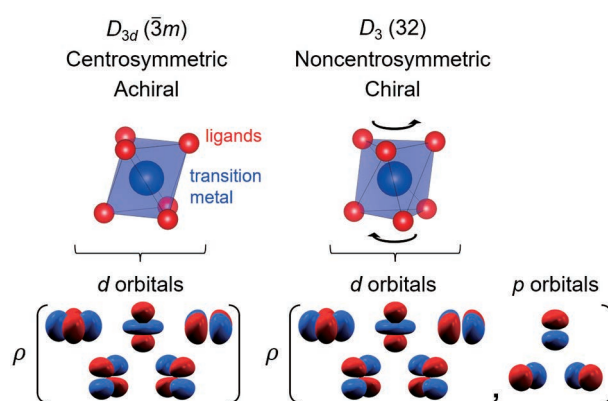


図1 対称心がないサイトにおける軌道混成のイメージ図

- [1] S. Kitou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 065701 (2017).
- [2] S. Kitou *et al.*, Phys. Rev. Res. **2**, 033503 (2020).
- [3] K. Gautam *et al.*, arXiv:2506.01298.
- [4] S. Nishida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **136**, 206501 (2026).



顕微Spin-ARPESで探る 量子アシンメトリ反強磁性体の電子状態

木村 昭夫

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授

共同研究者 黒田 健太 広島大学大学院先進理工系科学研究科、准教授

第1期に続き、第2期も量子アシンメトリ公募研究に採択いただき、大変嬉しく思います。第1期では、本領域の先生方との交流を通して多くの刺激を受けるとともに、反強磁性体における対称性と電子状態の関係について理解を深めることができました。第2期では、この流れをさらに発展させ、黒田健太先生と共同で反強磁性体における新たな量子アシンメトリ現象の解明に取り組みます。

反強磁性体は、長らく高温超伝導体をはじめとする強相関電子系の研究の舞台として重要な役割を果たしてきました。一方で、巨視的な磁化を持たないため、応用面では磁気抵抗素子のピンニング層など限られた用途にとどまっていました。しかし近年、 Mn_3Sn における巨大異常ホール効果やAltermagnetの発見を契機として、反強磁性体が多彩な機能性を示すことが明らかとなり、スピントロニクス材料としても急速に注目を集めています。

私たちが特に興味を持っているのは、空間反転対称性を欠く奇パリティ反強磁性体です。このような物質では、時間反転対称性と並進対称性の組み合わせにより、通常のラシュバ型とは本質的に異なるスピントクスチャーが実現します。とくに、波数空間全体で面直方向に揃ったスピンの偏極は、低電流で磁化反転を実現するスピン軌道トルク (SOT) デバイスへの応用も期待されており、基礎・応用の双方から極めて魅力的な研究対象です。

本研究では、このようなスピントクスチャーをスピン分解角度分解光電子分光 (Spin-ARPES) によって

直接可視化するとともに、薄膜試料を用いて電子状態と対称性の関係を詳細に調べます。また、PT対称性は保たれているものの、P対称性とT対称性が個別には破れている系では、スピン縮退を保ったまま非対称なバンド構造が現れることが理論的に予測されています。このような電子構造は非相反伝導の起源となる可能性があり、その実験的検証にも挑戦したいと考えています。

一方、ARPESでは磁気ドメインの存在が大きな課題となります。そこで本研究では、第2高調波発生 (SHG) 顕微鏡による反強磁性ドメイン観察を組み合わせ、実空間での磁気秩序と波数空間の電子状態を対応付けながら研究を進めます。黒田先生らは最近、 $LaMnSi$ において反強磁性ドメインの可視化に成功しており、この手法との融合によって電子状態と磁気構造を包括的に理解できると期待しています。

反強磁性体は、かつてネール自身が「面白いが役には立たない」と評した時代から大きく様変わりしました。現在では、量子アシンメトリが生み出す新奇な電子状態やスピントロニクス機能を担う有望な舞台となっています。実験屋としては、「本当に理論が予測する電子状態が見えるのか」「新しい対称性がどのような電子構造を生み出すのか」を直接観測できる瞬間が何よりの楽しみです。この2年間も、本領域の先生方との活発な議論を通じて理解をさらに深め、新しい量子アシンメトリ現象の開拓につなげたいと考えています。よろしくお願いいたします。



トロイダル秩序に潜む 一次元的な磁気励起の探索

常盤 欣文

日本原子力研究開発機構 研究主幹

日本原子力研究開発機構の常盤欣文です。このたび、公募研究「トロイダル秩序における新奇分数励起の観測」として本領域に参加させていただくことになりました。これまで私は、量子スピナイス、キタエフ量子スピン液体候補物質、フラストレート近藤格子など、強い相互作用と幾何学的フラストレーションが生み出す新奇な量子状態に興味を持ち、主に熱測定を通じて研究を進めてきました。

本研究で対象とする UNi_4B は、約20 K以下で磁気トロイダル秩序を示すウラン化合物です[1]。この物質では、六つのU磁気モーメントが渦状のループ構造を作り、そのループが結晶中で秩序化しています。磁気トロイダル秩序は、空間反転対称性と時間反転対称性がそれぞれ破れた磁気秩序であり、電気磁気効果や非相反応答など、アシンメトリ量子物質に特徴的な現象と深く関係しています。

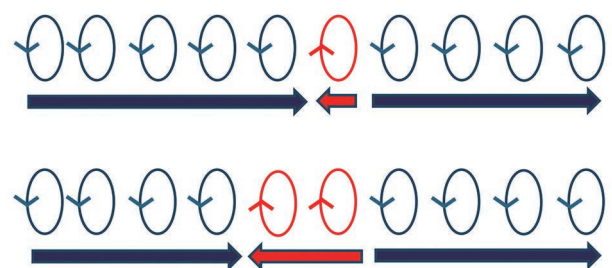
私が注目しているのは、 UNi_4B において磁気モーメントが形成するループ構造が、どのように揺らぐのかという点です。通常の磁性体では、磁気励起は個々のスピンの歳差運動が波として伝わるスピン波として理解されます。一方、 UNi_4B では、複数の磁気モーメントからなるループが一次元的に連なっており、このループ構造が磁気励起の基本的な自由度として振る舞う可能性があります。

図に示すように、ループ全体が反転する「ループフリップ励起」を考えると、反転したループは周囲とは反対向きのトロイダルモーメントを持つ励起状態

に対応します。このとき、反転したループ領域の端にはドメイン壁の励起が形成されます。これらのドメイン壁が、一次元的に低いエネルギーで移動できるならば、励起は通常のスピン波とは異なり、波数とエネルギーに広がりを持つ連続的な磁気励起スペクトルとして現れると期待されます。

したがって、 UNi_4B の磁気励起を調べることは、トロイダル秩序に固有のループ自由度とその動的性質を明らかにするうえで重要です。本研究では、非弾性中性子散乱により広い波数—エネルギー空間を測定し、観測される磁気散乱が通常のスピン波で説明できるのか、あるいはループフリップや一次元的なドメイン壁運動に由来する連続励起を含むのかを検証します。

領域内では、皆様とも連携しながら、アシンメトリ量子物質における興味深い低エネルギー励起の存在とその起源を明らかにしていきたいと思います。どうぞよろしくお願いいたします。



図：磁気モーメントが形成するループが一次元的に配列した系における、ドメイン壁伝搬の模式図。赤色はフリップして励起された反対向きのループを表す。各ループの下矢印は、対応するトロイダルモーメントの向きを示している。

[1] S.A.M. Mentink, *et al.*, Phys. Rev. B **51**,



共鳴非弾性X線散乱による カイラリティを有する素励起の観測

石井 賢司

量子科学技術研究開発機構放射光科学研究センター 上席研究員

A01班の公募研究として本領域に参画させていただけることになりました。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

ご承知の通り、量子ビームをプローブとした測定手法は物質の性質を微視的に調べる上で極めて有効です。量子ビームの一つである放射光を利用し、そのエネルギーを元素の吸収端に合わせて測定するX線吸収分光や共鳴X線散乱はA01班の他の皆様がすでに活用されています。これらにより電子の、本領域ではアシンメトリ量子の「静的」な性質を調べることができます。それに対し、我々が利用するのは「動的」性質を調べることができる共鳴非弾性X線散乱 (Resonant Inelastic X-ray Scattering, RIXS) と呼ばれる手法です。物質の動的性質を運動量依存性まで含めて調べる手法としては、中性子非弾性散乱が古くから利用されてきました。プローブ自身のエネルギーが中性子よりも何桁も大きなX線を非弾性散乱として利用するにはエネルギー分解能の面で難しさがありました。しかし、近年の放射光光源の高輝度化、および、それに伴う分光技術の発展によりその問題が克服され、現在ではエネルギー分解能は数十meVに到達しています。RIXSでは電荷・スピン・軌道・格子、すべての励起を観測することができ、分解能向上に合わせて、強相関電子系の中では大きな相互作用を有する銅酸化物において、電荷励起、スピン励起などが順次調べられてきました[1-3]。また、

RIXSでは中性子非弾性散乱のような大型試料は要しないため、サブmmの結晶や薄膜でも測定ができ、デバイス化した試料などでの測定にも期待が寄せられています。

さて、本公募研究においては、RIXSを用いた研究としてアシンメトリの一つであるカイラリティに注目します。近年、カイラリティを有するフォノンやマグノン、さらにそれらが引き起こす物性に興味を持たれています。水晶はカイラルな結晶構造を持つ代表的な物質の一つですが、水晶に存在するカイラルフォノンが円偏光を利用したRIXSによって観測できることが最近の海外での研究で示され[4]、カイラリティを研究する新たな道が拓かれました。カイラリティを有する励起には必ずしもカイラルな結晶構造は必要ではありませんが、まずは本領域内の研究者と協力し、カイラルな結晶構造を有する物質に円偏光RIXSを適用することで、カイラルな素励起の観測、物質ごとの特徴の解明を目指したいと考えています。

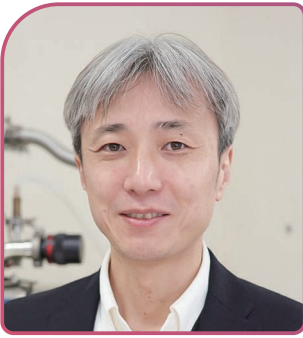
国内においては、2024年に東北大学キャンパス内で新たな放射光施設であるNanoTerasuが稼働を開始しました。そこには世界最高のエネルギー分解能を有するRIXS装置が整備されており、日本はRIXSを用いた研究を行う上で有利な立場にあります。本領域での研究活動を通じ、カイラリティ以外の新たなアシンメトリ量子に対するRIXSの適用可能性が見出せることにも期待しています。

[1] K. Ishii *et al.*, Phys. Rev. Lett. Phys. Rev. Lett. **94**, 207003 (2005).

[2] K. Ishii *et al.*, Nat. Commun. **5**, 3714 (2014).

[3] K. Ishii *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 195132 (2025).

[4] H. Ueda *et al.*, Nature **618**, 946 (2023).



アシンメトリ量子物質における 創発現象と弾性応答

小野瀬 佳文

東北大学金属材料研究所 教授

第一期に引き続き、第二期も公募研究をさせて頂けることをありがたく思っております。あと二年間どうぞよろしくお願いいたします。

アシンメトリ量子領域では、対称性の破れた物質における新奇な物性や量子現象の開拓を目的とされていますが、私自身も近年、まさにこうした方向性を目指して研究を進めてまいりました。対称性の破れは、物性の様々な側面に影響を及ぼします。例えば、電子バンドにおけるスピン分裂や波数空間の対称性が、元の結晶構造や磁気構造の対称性に由来していることは広く知られています。このようなバンド構造と対称性の関係は、電子のみならずマグノンやフォノンにも共通する性質です。例えば、空間反転対称性が破れた強磁性体では、マグノンの非相反伝搬現象が観測されています。今回の公募研究で私が着目したのは、アシンメトリ量子物質におけるフォノンや弾性応答です。

このテーマに関しても、近年いくつか研究を行ってまいりました。例えば、表面弾性波の非相反伝搬の開拓や、その逆効果（表面弾性波による強磁性磁化の制御）といった研究を行ってきました[1,2]。本研究では、この方向性を発展させ、静的な弾性応答も含めた研究を展開することを目指します。具体的には、(1)アシンメトリ量子物質における一軸圧力応答、(2)歪勾配応答、(3)表面弾性波の巨大非相反性の開拓といった研究を行うことを計画しています。

(1)の1軸圧力効果に関しては、らせん磁性体のCrAsに着目して研究を進めております。この物質は、神戸大の小手川先生が圧力を印加すると超伝導が発現することを発見された物質になります[3]。我々は、らせん磁性が大きな一軸歪みを伴うことに着目して、小手川グループ、理論の東北大野村グループと共同で研究を進めています。

(2)の歪勾配応答は、量子常誘電体KTaO₃を対象として研究を進めています。歪勾配とは物質の曲げやねじれといったもので、ここでは試料を曲げたときの電気分極の誘起（フレキシoelectリック効果）の研究を進めていきます。

(3)に関しては、最近我々が開拓した磁性強誘電弾性体Tb₂(MoO₄)₃を用いて[4]、従来よりも大きな表面弾性波の非相反性を探求する予定です。

この他にも、領域内の多くの皆様と共同研究を進めております。名工大大原先生、中村先生のグループや原研木俣先生のグループとそれぞれ別の磁性体の非相反伝導の研究で共同研究を進めております。また、Tb₂(MoO₄)₃の光応答の研究で、岡山大大槻先生のグループとの共同研究を行っていますし、らせん磁性体のマグノン励起に関して東大堀田先生のグループと共同研究を行っています。

これからも多くの皆様と議論や共同研究を活発に行っていきたいと考えています。引き続きよろしくお願いいたします。

[1] R. Sasaki, Y. Nii, Y. Iguchi, and Y. Onose, Phys. Rev. B **95**, 020407(R) (2017).

[2] R. Sasaki, Y. Nii, Y. Onose, Nat. Commun. **12**, 2599 (2021).

[3] H. Kotegawa, S. Nakahara, H. Tou, and H. Sugawara, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 093702 (2014).

[4] S. Tajima, H. Masuda, Y. Nii, S. Kimura, Y. Onose, Commun. Mater. **5**, 267 (2024).



フェロアキシャル物質からのスピン流生成

塩見 雄毅

東京大学大学院総合文化研究科 准教授

2026-2027年度の公募A02班メンバーとして新たに参画させて頂きました。私はスピン流に関する実験研究を研究室の一つの軸としています。これまでに量子スピン系やトポロジカル物質など、様々な量子物質を対象としてスピン流の生成・検出実験を行ってきました。本研究課題では、本領域の速水さんらの理論論文に触発されて、フェロアキシャル物質のスピン機能開発に取り組むこととなりました。対象とするフェロアキシャル物質は一見してスピンの素となる磁性や伝導電子をもたない絶縁体ですので、そこからのスピン流生成は非自明です。皆さんの助けを借りながら、この難しい課題に挑戦していきたいと思っています。

そもそもスピン流は電荷の流れがない磁気の流れとしてスピントロニクスで生まれた概念ですが、今では物性物理学で広く重要な概念となっています。最初に実現されたスピン流は伝導電子のスピンの流れを利用したものでしたが、その後、広く角運動量の流れであることが認識され、マグノンやその他の磁気励起が運ぶスピン流が開拓されてきました。これまで様々なタイプのスピン流が見いだされてきており、私もその研究の一端を担ってきました。

重要なことは、異なるタイプのスピン流が互いに変換可能であることです。例えば、マグノンが運ぶスピン流は伝導電子のスピン流へと変換でき、逆も可能です。また、スピン流を力学的な角運動量（回転の勢い）に変換すれば物体を動かすこともできます。角運動量保存則のおかげでこのような異なるスピン流の間の変換が許されます。これを実証するために様々な異種物質の接合構造が作られ、接合界面を利

用したスピン流変換が世界中で研究されています。新しいタイプのスピン流を見つけてスピン流の概念を広げることは、単なるスピン流研究の対象物質を増やすだけでなく、スピン流に関わる物理現象を拡げることにも繋がります。本課題で掲げるフェロアキシャル物質からのスピン流生成が達成されれば、スピン流生成源として新たな非磁性絶縁体の活用が可能になり、未開拓の物理領域への扉が開かれることとなります。個人的には、近年発展が著しいカイラル物質のスピン応答（カイラル誘起スピン選択性など）との関連が気になっています。

もちろん、本領域には多様な背景をもつ研究者が参画し、アシンメトリという非常に広い共通概念のもとで様々な研究が行われていますから、フェロアキシャル物質に限定せず、本領域メンバーと共同で色々な研究に取り組みたいと考えています。フェロアキシャル物質に限らず、スピン流関係で（あるいは関係がなくても）私がお手伝いできる話題があれば是非お気軽に議論させて頂ければと思います。

先日、那須高原で行われたキックオフミーティングに参加させて頂きました。私もそれなりのキャリアがありますので、これまで多くの学術変革領域に関わってきましたが、中には新参者として疎外感を感じる領域もありました。しかしながら本領域はf電子系の研究者とd電子系の研究者（こういう分け方がいいのかわかりませんが）がうまく交わり、アシンメトリという一つの大きな柱のもとに研究を進めており、一体感があるところが素晴らしいと感じました。私も微力ながらこれから本領域に貢献できればと思っています。



キラル接合界面における 自発的な時間反転対称性の破れの解明と アシンメトロニクス応用

金澤 直也

東京大学生産技術研究所 准教授

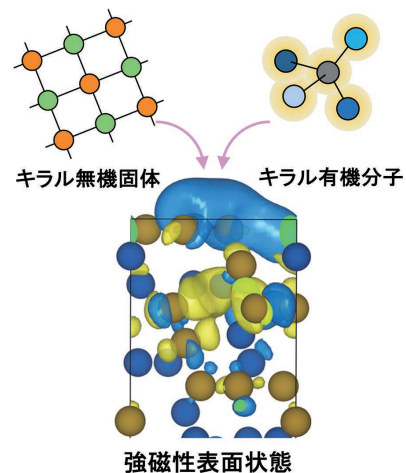
共同研究者 鬼頭 俊介 東京大学新領域創成科学研究科 助教
須田 理行 名古屋大学理学研究科 教授
松岡 秀樹 東京大学生産技術研究所 特任助教

公募研究第二期に採択いただきました、東京大学生産技術研究所の金澤です。第一期では、アシンメトリ量子状態がもたらす非相反伝導や整流効果に着目し、結晶や分子の対称性の破れを利用した磁性制御に取り組んできました。特に、キラル分子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、トポロジカル強磁性表面をもつFeSiの磁気ドメイン偏極率を最大80%超まで制御できることを実証しました[1]。FeSiはバルクでは非磁性絶縁体ですが、Zak位相に由来する二次元強磁性が表面に局在しており、界面環境に極めて敏感であるため、キラル分子との相互作用を調べる理想的な舞台となります[2]。注目すべきは、磁場も電流も加えていないにもかかわらず、分子のキラリティ（鏡像異性）だけで磁化の優先方向が反転し、ラセミ体では偏りが消失する、すなわち「自発的な時間反転対称性の破れ」が観測された点です。

キラル分子がもたらすこうした応答は、近年「キラル誘起スピン選択性 (CISS)」として国際的に注目を集めています[3]、その物理的起源は依然として活発な議論の的です。第二期では、この起源解明に踏み込みます。「他の非対称系と比べて、なぜキラル系では巨大なスピン応答や自発的な時間反転対称性の破れが普遍的に現れるのか」について“電子キラリティ”と“構造キラリティ”という2つの観点から捉えることを目指します。特に、高輝度放射光X線回折を基盤とする「コア差フーリエ合成 (CDFS) 法」による価電子分布の直接観測と、「キラルイオンゲート法」に

よる分子吸着のオンデマンド制御という、第一期で確立した2つの手法を組み合わせます。界面に生じる近接的な効果と、より長距離におよぶ寄与を切り分け、磁化制御を担う支配的な要因を明らかにしていきたいと考えています。

また得られた知見をもとに、接合物質組合せの最適化指針を導き、磁場・電流フリーで磁気ドメイン偏極率90%超とその電場制御の実現を目指します。こうした制御は、低消費電力スピントロニクスへの新たな道筋となることも期待されます。対象もFeSiにとどまらず、多彩な物質群を接合の舞台に据え、アシンメトリ量子物質全体へと展開したいと考えています (図)。ぜひ領域の皆様と幅広く議論・連携させていただければ幸いです。



- [1] H. Matsuoka, N. Kanazawa *et al.*, Nano Lett. **25**, 15297-15304 (2025).
[2] Y. Ohtsuka, N. Kanazawa *et al.*, Sci. Adv. **7**, eabj0498 (2021).
[3] B. P. Bloom *et al.*, Chem. Rev. **124**, 1950-1991 (2024).



アシンメトリ量子の検出・可視化技術の高度化と人工アシンメトロニクス機能の創出

松原 正和

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

この度、A02班の公募研究として第1期に引き続き第2期にも参画させていただくこととなり、大変光栄に思います。

私の研究は、「電子自由度の非対称性（アシンメトリ量子）がどのように新しい機能を生み出すのか」を、光を用いて明らかにすることを目的としています。特に、光第二高調波発生（SHG）と呼ばれる非線形光学効果を、物質の対称性に極めて敏感なプローブとして活用することで、反強磁性秩序やフェロアキシャル秩序といった本来“捉えづらい秩序”を含む様々なアシンメトリ量子の高感度検出・可視化に取り組んできました[1-3]。

第1期では、このような検出技術の高度化と並行して、ナノ～メゾスケールにおいて対称性を人工的に設計・操作する「人工アシンメトロニクス」の研究を展開しました。例えば、ナノ磁性体や磁性メタマテリアルにおいて、対称性の設計により光誘起スピン流や光電変換応答を制御できることを実証し、人工的に操作された対称性が新たな機能を創出可能なことを示しました[4]。これにより、アシンメトリ量子を「検出可能な概念」から「設計・利用可能な物理量」へと発展させる基盤を構築しました。

第2期では、これらをさらに発展させ、(1) SHGを基盤としたアシンメトリ量子の高感度検出・可視化技術の高度化、(2) メゾスケール人工構造におけるアシンメトリ量子の創出と新機能開拓、を統合的に

推進します。特に、イメージングと偏光解析を融合した空間分解対称性マッピング技術を確立することで、物質機能の鍵となる対称性を定量的かつ網羅的に可視化することを目指します。これにより、ナノからメゾ、さらにはバルクへと至る空間スケールを横断したアシンメトリ量子の統一的理解に迫るとともに、多様な物質系に適用可能な汎用的評価基盤の構築を目指します。

また、本研究の大きな特徴は、領域内外との密接な連携にあります。第1期においては、多様な物質系を対象とした共同研究を通じて、測定手法の共有や試料提供を含む連携を進め、異なる専門性を融合することで研究の幅を広げてきました。第2期ではこれをさらに発展させ、物質合成、理論、デバイス応用など多様な分野の研究者との協働を通じて、異なる物質系・手法・スケールを横断した研究ネットワークを構築し、アシンメトリ量子研究の加速に貢献したいと考えています。

本研究を通じて、アシンメトリ量子という概念を「検出・可視化・設計・制御可能な物質科学」へと深化させるとともに、光スピントロニクスやエネルギー変換といった新しい量子機能の創出につなげていきます。領域内外の皆様とのさらなる連携を通じて、本分野の発展に貢献できれば幸いです。

[1] M. Matsubara *et al.*, Science **348**, 1112 (2015).

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

[3] I. Aoki, T. Matsumura, M. Matsubara *et al.*, Phys. Rev. Mater. **10**, 014406 (2026).

[4] G. Cavanna*, H. Taketani*, M. Matsubara *et al.*, Nanophotonics **14**, 5611 (2025).



磁化非対角項を直接検出する 新規手法の開発と拡張多極子秩序下の 交差相関現象への応用

河野 洋平

中央大学理工学術院 准教授

A02公募班として参画させていただきます、中央大学の河野洋平と申します。この度は本研究課題を採択いただき光栄に思っております。2年間よろしくお願いいたします。

私のこれまでの研究は、極低温下における磁化・比熱・磁気熱量効果などの熱力学量測定を通じた量子臨界現象の解明に焦点を当ててきました。当初は低次元量子スピン系に現れる量子臨界性[1]を対象としていましたが、近年では重い電子系物質における量子臨界性[2]にも対象を広げてきました。

これらの研究で用いてきた磁化測定手法の一つであるキャパシタンス式ファラデー法[3]が、本研究課題で開発を目指す新規手法の出発点です。同手法は、強磁場下かつ希釈冷凍機温度域、すなわち0.1 K以下まで適用可能な高感度直流磁化測定手法であり、多様な低温物性研究に用いられてきました。

ファラデー法は、磁場勾配中に置かれた磁化が受ける力を検出することを基本原理とします。キャパシタンス式ファラデー法では、測定磁場マグネットと同軸に配置された磁場勾配コイルの中心に試料を置き、この力を最終的に極板間の静電容量変化として検出します。この構成では磁場方向と磁場勾配方向が一致しているため、従来法は磁場と同方向の磁化成分の測定に特化してきました。

一方、ファラデー法では、ある方向の磁場勾配と結合するのは同じ方向の磁化成分です。したがって、

測定磁場の方向と磁場勾配の方向を独立に制御できれば、原理的には任意の磁化成分を測定可能です。実際、横磁場マグネットの中心から外れた領域に生じる横磁場勾配を利用し、磁化の磁場角度依存性が測定された例があります[4]。しかし、その適用範囲や感度はいまだ限定的です。本研究の目標は、自作の磁場勾配コイルを用いても十分な感度を確保し、広い磁場角度範囲で磁化成分を測定可能な手法を開発することです。

拡張多極子秩序下における交差相関現象という観点から見ると、理論的には、電気トロイダル双極子秩序下において横磁化成分に特徴的な磁場依存性が現れる可能性が提案されています[5]。磁気トルク測定がこのような場合に真っ先に思い至る代表的手法ですが、本研究では、磁化の非対角成分をより直接的に検出する手法を開発し、異方的な磁気応答や拡張多極子秩序に伴う交差相関現象の解明に応用することを目指します。

開発が軌道に乗りましたら、C01やC02の物質開発班の方々との連携や、B01の理論班の方々との議論も進めたいと思っております。また、私の主催する極限量子物性研究室はまだ2年目ということもあり、設備が整っていない部分も多く、A02班の方々とも是非共同研究をさせていただければ幸いです。どうぞよろしくお願いいたします。

[1] 河野 洋平, 「熱力学量測定による量子臨界現象の検証-磁性体中のボース・アインシュタイン凝縮を例に」, アシンメトリ量子若手秋の学校テキスト, DOI: 10.15027/55825 (2024).

[2] S. Yuasa *et al.*, Phys. Rev. B **111**, 045123 (2025).

[3] T. Sakakibara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 5067 (1994).

[4] H. Sato *et al.*, J. Phys.: Cond. Matt. **18**, L297 (2006).

[5] A. Inda and S. Hayami, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 043701 (2023).



時間・空間反転対称性の破れた メタマテリアルにおける 非線形伝導の空間スケール依存性

山根 悠

大阪大学基礎工学研究科 助教

今年度からA02班の公募研究として領域に参加させていただくことになりました、大阪大学の山根と申します。2年間よろしくお願いいたします。

まず、簡単に自己紹介いたします。私は2020年3月に広島大学の鬼丸代表の元で博士号を取得しました。学位取得後の5年間は兵庫県立大学の助教として、カイラル構造をもつ磁性体の物質開発に取り組むとともに、低温センターの運営にも携わりました。2025年3月からは大阪大学の助教として、アシンメトリ量子が誘起する非線形伝導現象を、拡張多極子を利用して対称性の観点から解明する研究を進めています。

奇パリティ多極子の1つである磁気トロイダル双極子(TMD)は、時間反転(T)対称性と空間反転対称性(P)がともに破れた系で活性となります。近年、TMDを有する系において非線形伝導現象が発現すると理論的に指摘され[1]、 UNi_4B や HoAgGe のような、磁気秩序に伴いTMDが活性となる物質で実験的な検証が進められています[2,3]。しかし、TMDと非線形伝導の発現機構の関係は未解明です。現実の物質では、電子相関の効果や複雑なバンド構造が影響し、発現機構の微視的な理解を困難にしています。また、TMDを含む奇パリティ多極子の活性・不活性は結晶構造や磁気構造に基づいて議論されるため、素朴に考えると対称性の要請を満たせば非線形伝導が発現すると考えられますが、どの空間スケールまでこの考え方が有効であるかはわかっていません。この点を解決することは、多極子と非線形伝導のミクロな発現機構の関係

を理解する上で重要です。

本課題では、電子相関の影響が小さい物質を用いたメタマテリアルに注目して研究を展開します。具体的には、T対称性が破れた強磁性Co/Pt多層膜に対し、電子ビームリソグラフィを用いて楔形の構造欠陥を数百nm程度の周期で導入することにより、面内のP対称性を破ります。この構造は、現実の物質で活性となる数十Å(数nm)程度のTMDよりも2桁以上大きなメゾスケール構造をもちます。そのため、このメタマテリアルで非線形伝導が観測されれば、多極子を用いた考察がミクロな空間スケールを超えて有効であることを示すことができます。さらに、多極子の空間スケールと、平均自由行程やフェルミ波長といった電子の特徴的長さとの関係が非線形伝導の発現に重要であると考えています。そこで、よりシンプルな系として、長い平均自由行程とフェルミ波長をもつBiやSbの薄膜に同様の構造欠陥を導入し、外部磁場によりT対称性を破ることによりTMDを活性にします。この系でより大きな非線形伝導率が観測されれば、非線形伝導の発現機構と多極子の空間スケールの関係に対する理解が深まることに加え、将来的なデバイス開発の指針を得ることも期待できます。

本課題は、A02班の井澤教授、松原教授、B01班の速水教授と協力して進めています。領域内の皆様とも多くの議論や共同研究を重ねながら研究を発展させていきたいと考えておりますので、今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

[1] M. Yatsushiro, H. Kusunose, and S. Hayami, Phys. Rev. B **104**, 054412 (2021).

[2] K. Ota *et al.*, arXiv:2205.05555.

[3] T. Miyamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **135**, 076502 (2025).



交差相関応答による 奇パリティ超伝導状態の可視化

北川 俊作

京都大学 准教授

皆様、はじめまして。A02公募班として本領域に参加します京都大学の北川です。

皆さんご存じの通り、空間反転対称性や時間反転対称性が破れた系では、入力と出力の対称性が異なる交差相関応答が発現します。私がターゲットとしている現象は、局所的に空間反転対称性が破れた重い電子系超伝導体CeRh₂As₂における交差相関応答です。

ここでいう、局所的な空間反転対称性の破れとは、結晶全体としては空間反転対称性が保たれている（反転中心がある）一方、Ce原子に着目すると、反転中心がなく、空間反転対称性が破れている状況をいいます。これにより、各Ceサイトに特有の反対称スピン軌道相互作用が働き、副格子の自由度と結びつくことで、特異で豊かな物理が引き出されます。

実際、CeRh₂As₂はc軸方向に磁場をかけると、超伝導のパリティが偶から奇へ転移する「超伝導パリティ転移」の可能性が強く示唆されています(図)。加えて、私たちは、CeRh₂As₂の低磁場超伝導相の内部に奇パリティ多極子秩序とみなせる反強磁性状態が共存していることを発見しました。つまりCeRh₂As₂は、110年以上の超伝導研究の歴史において類を見ない、「奇パリティ超伝導」と「奇パリティ多極子」という2つの奇パリティ秩序が交錯する、交差相関応答の探索に最適な舞台といえます。

本研究では、CeRh₂As₂において発現する2つの奇パリティ状態にて現れる交差相関応答を観測することを目指します。具体的には、電流印加型NMR測定を用いて、交差相関応答によって生じる微小な電流誘起歪みや電気磁気効果を、NMRの周波数シフトや

分裂として直接捉えたいと考えています。微視的なプローブであるNMRを用いることで、試料のドメイン構造などに影響されずに、本質的な対称性の破れの情報を引き出すことが可能と考えています。

また、本研究に限らず、様々な物質を対象とした共同研究も積極的に進めていきたいと考えています。NMRは物質の微小な内部磁場や電子状態の変化を局所的に探る強力な実験手法です。「この物質のNMR測定で何かわかりませんか?」といったご相談や、理論・実験の垣根を越えた議論を大歓迎します。

最後に、研究活動だけでなくアウトリーチ活動にも力を入れていきたいと考えています。私が所属する研究室には、バーチャルYouTuber「固体量子」さんがいますので、本領域から生まれるワクワクするような最先端の研究成果も、「固体量子」さんを通じて広く世の中にアピールし、次世代を担う若手や科学ファンの裾野を広げることに貢献できればと思っています。コラボも大歓迎です。2年間どうぞよろしくお願い致します。

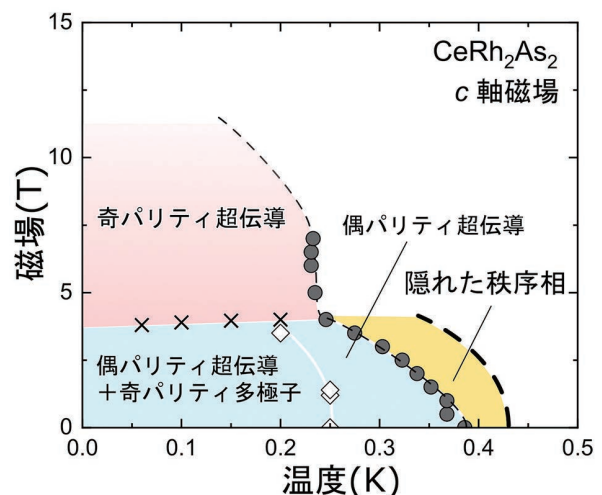


図: CeRh₂As₂で提案されている相図。



交替磁性体のアシンメトリ磁場ひずみ応答

米澤 進吾

京都大学大学院工学研究科電気電子デジタル理工学専攻 教授

近年、「交替磁性 (altomagnet)」と呼ばれる新しい磁性が注目されています。この状態は、磁化はゼロなのに時間反転対称性 (Time-reversal-symmetry; TRS) が破れているという特異な状態を示します。これは、磁化を持ちTRSを破る典型例である強磁性や、磁化を持たずTRSを保つ反強磁性とは異なる状態であり、量子アシンメトリ現象の典型例として重要な研究対象です。しかし、交替磁性体では磁化がゼロであるため、通常の測定ではTRS破れを検出できません。そこで本研究では、ピエゾ磁気効果 (Piezomagnetism; PZM) [1]を用いた新しいアプローチに挑戦したいと考えています。

PZMとは、磁場をかけると、磁場に比例して結晶がわずかに歪む現象や、その逆効果で応力に比例して磁化が生じる現象のことで、その応答係数の符号はTRS破れの符号と対応します。前者は線形磁歪 (Linear magnetostriction) とも呼ばれます。ひずみは熱力学的な物理量であるため、PZMは交替磁性の熱力学的なプローブとして有力だと考えています。その検出のため、我々は、Fiber Bragg grating (FBG) 法という、光ファイバーを歪みゲージとして利用する方法を用います。この方法は、低温・強磁場環境でも高感度に歪みを測定できるという大きな利点を持っています。また、センサー自体が細いため、複数のセンサーを試料に張り付け、多軸方向のひずみを同時計測することも可能です。我々のグループでは、

最近この方法を用い、強磁性におけるPZMの検出に世界で初めて成功しました[2]。

本研究では、本領域の神戸大・小手川さん、日比野さんとの共同研究により、 f 電子系交替磁性体である Ce_2MGe_6 ($M = \text{Cu, Au, Pt, Pd}$) におけるPZMの系統的な研究を行うことを計画しています。これらの物質群は、本領域で盛んに研究されており、非常に大きい異常ホール効果が起こることなどが注目されています[3]。

現在、当グループでは Ce_2CuGe_6 を対象にFBGを用いた歪み測定を進めています。現在、15 Kでの磁気転移に伴う歪みの異常を明瞭に観測し、 b 軸方向磁場下における二段階のメタ磁性転移の観測にも成功しました。また、 c 軸磁場下ではPZM様の応答が見られた一方、試料の固定方法によって信号が大きく変わることも判明し、測定系の最適化も重要です。

後期の公募研究では、この研究を進めるとともに、ベクトルマグネットを用いた磁場方向制御下でのPZM測定など、新たな手法にもチャレンジします。領域内共同研究も進めていき、交替磁性の熱力学的なプローブとしてPZMを確立することを目指します。

また、当研究室では、前期公募研究に引き続き、別のTRS破れの有力な検出手法である磁気光学カー効果の研究も進めています[4]。これに関しても、共同研究を積極的に進めていければと思っています。

[1] B. A. Tavger and V. M. Zaitsev: Sov. Phys. JETP, **3** (1956) 430.

[2] M. Tomikawa *et al.*, Phys. Rev. B, **110**, L100408 (2024).

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

[4] G. Watanabe *et al.*, arxiv: 2604.14947; S. Yamane *et al.*, arXiv:2606.10300.



精密バルク測定を用いた 無機化合物における新奇キラル物性の開拓

石原 滉大

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

この度は、アシンメトリ量子の第2期A02公募班として研究提案を採択していただき、誠にありがとうございます。前期から引き続いての参加となりますが、どうぞよろしくお願いいたします。

私はこれまで、バルク物性測定による超伝導ギャップ対称性の研究を行ってきました。最近の例を紹介すると、希釈冷凍機温度までの磁場侵入長測定や局所磁化測定を通じて、重い電子系超伝導体 UTe_2 やカゴメ格子超伝導体の超伝導状態における対称性の破れを議論してきております[1,2]。一方で、通常状態での対称性の破れが特異な超伝導物性を誘起する場合があります。例えば時間反転対称性を破る強磁性状態の中で超伝導が実現するとスピン三重項状態が安定化すると考えられており、空間反転対称性が破れている場合には、クーパー対のパリティ混成やヘリカル超伝導状態、トポロジカル超伝導状態などが議論されています。実際、私は空間反転対称性の破れたハーフホイスラー超伝導体において、スピン七重項超伝導状態[3]や非相反電気伝導の検証を行ってきました。本研究提案では、空間反転対称性の破れた超伝導体の中でも特に、キラルな結晶構造を持つ超伝導体に注目したいと思います。

本研究提案の一つ目のテーマは、無機キラル超伝導体における非相反電気応答の解明です。キラルな結晶構造を持つ超伝導体は非常に限られています

が、近年有機超伝導体における巨大なスピン偏極状態[4]や超伝導ダイオード効果[5]が注目を集めております。しかしながら、スピン軌道相互作用が小さい有機物質でこれらの巨大応答が検出されるのは非常に不思議であり、その微視的機構は未解明となっています。そこで、近年報告された無機キラル超伝導体 $IrGe_4$ などに注目し、FIB加工を用いた非相反応答と超伝導ダイオード効果の観測を通して、キラル物質における電気磁気応答の微視的機構の解明を試みます。

また、近年我々は円偏波マイクロ波共振器を用いたマイクロ波帯における円二色性の観測手法を新たに開発しました[6]。この手法ではサブmm程度の小型試料でも測定可能であり、極低温下までの拡張が可能という利点を有しています。本研究では、この新規手法を用いて $URhSn$ で期待されている純粋電子キラリティ秩序や時間反転対称性を破るループカレント秩序の検出を行い、アシンメトリ電子状態の新たな検出手法の確立を試みます。

前期ではアシンメトリ量子に参画されている多くの先生方に共同研究の機会をいただき、興味深い成果もいくつか得られております。今期も本領域の発展に貢献できるよう努めてまいりますので、どうぞよろしくお願いいたします。

[1] K. Ishihara *et al.*, Nat. Commun. **14**, 2966 (2023).

[2] H. Yoshida *et al.*, Sci. Adv. **11**, eadu2973 (2025).

[3] K. Ishihara *et al.*, Phys. Rev. X **11**, 041048 (2021).

[4] R. Nakajima *et al.*, Nature **613**, 479 (2023).

[5] T. Sato *et al.*, Phys. Rev. Research **7**, 023056 (2025).

[6] M. Roppongi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **95**, 124704 (2024).



カイラルな系を対象とした 非対称熱応答の開拓

水上 雄太

東北大学大学院理学研究科 准教授

東北大学の水上 雄太と申します。前期2年間に引き続き、A02班の後期公募研究班として本領域に参画させて頂くこととなり、大変光栄です。引き続きどうぞよろしくお願い申し上げます。

前期の自己紹介と重複することにはなりますが、私は最近、単結晶試料を対象とした高感度な熱測定を活用し、熱応答や熱輸送が電子のみならずフォノンやスピン、さらには分数化励起を含む多様な自由度を反映する普遍的なプローブであるという観点から、主に磁性体・超伝導体を対象として研究を進めております[1-3]。前期の研究では、空間反転対称性の破れた物質や α -termagnetにおける新しい熱応答および熱輸送現象の探索を行うとともに、測定系の更なる高感度化・高度化に取り組んで参りました[4]。

後期の研究では、これまでの研究をさらに発展させ、空間反転対称性の破れた結晶の中でも、結晶構造にカイラリティを持つカイラル結晶を舞台とした熱応答の研究に取り組みたいと考えております。カイラル結晶は、本領域における研究対象の一つとなっているかと思いますが、鏡映対称性および反転対称性を欠く特徴的な結晶構造を有しており、近年、電子輸送や光学応答をはじめとする様々な物性において特異な非対称応答の発現が期待されています。一方で、熱輸送や熱励起に関わる現象についてもその結晶構造の対称性に起因した新しい非対角・交差相関応答が期待され、その実験的検証に取り組んでいきたいと考えております。

試料としては、磁性・非磁性の両方のカイラル結晶について、電気伝導測定では輸送現象へのアプローチが難しい絶縁体の試料も対象として、新たな非対角応答や非対称応答を、熱測定から検出できればと考えております。ただ、手法を限定せず、広く研究を展開したいとも考えておりますので、熱測定はあくまで起点として、様々な方と共同研究を始められればと考えております。

本研究の遂行にあたっては、得られた実験結果の理解について、B01の理論班の方々との連携を通じてカイラル系における熱応答の観点から深めるとともに、C01およびC02の物質開発班の方々との協力のもと、新たな候補物質に対する熱測定を進められればと考えております。また、A01およびA02の測定班の方々との交流を通じて、測定手法そのものの高度化や新しい測定技術の開発にも取り組みたいと考えております。

以上、後期の公募研究の概要にはなりますが、簡単にご紹介させて頂きました。カイラリティと熱応答の関係にご興味をお持ちの方がおられましたら、ぜひ議論や共同研究の機会を頂けますと幸いです。領域内の多様な研究者の皆様との交流を通じて、新しい研究の展開につなげていければと考えておりますので、どうぞお気軽にお声がけください。

[1] O. Tanaka, Y. Mizukami *et al.*, Nat. Phys. **18**, 429-435 (2022).
[2] K. Imamura, S. Suetsugu, Y. Mizukami *et al.*, Sci. Adv. **10**, eadk3539 (2024).

[3] Y. Mizukami *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA Nexus 4, pgaf060 (2025).
[4] R. Ohno *et al.*, in preparation.



「表面弾性波を外場とした アシンメトリ量子物性の制御」に向けて

日比野 瑠央

神戸大学大学院理学研究科 助教

2026年度より公募研究A02班として参画させていただきます、神戸大学の日比野と申します。私は2025年に、北海道大学の網塚先生(A01班)、柳澤先生(A02班)、日高先生の研究室で学位を取得し、その後は神戸大学の藤先生、小手川先生(C02班)の研究室に所属しております。学生時代より本領域「アシンメトリ量子」には大変お世話になっており、領域を通して生まれた人との繋がりや経験が、現在の研究にとっても非常に重要なものになっております。そのような領域に、公募班として参画できることを嬉しく思い、2年間で成果面でも貢献・恩返しできればと考えております。

本研究は、表面弾性波によって誘起される「回転歪み場」がアシンメトリ量子物性を制御する外場として使えないかというアイデアに基づいています。学生時代にバルク単結晶の超音波測定を行っていた経験が活かせないかと考えております。表面弾性波はバルクの弾性波と異なり、表面近傍に回転に対応する歪み場を誘起することができます。この「回転歪み」は表面の法線方向、波の進行方向に直交する向きに一樣な角運動量をもたらします。このフォノン角運動量に着目し、強磁性薄膜の磁化(磁気双極子)を制御した先行研究が知られています[1]。本研究は、より高次(拡張)多極子の制御へと研究を拡げることを目指すものです。具体的には、磁気双極子と同様に $(P, T) = (\text{even}, \text{odd})$ となる磁気トロイダル四極子、磁気八極子の秩序を制御できないかと考えております。こうした秩序を持つ物質として、 Mn_3Sn [2]や Ce_2CuGe_6 [3]といった巨大な異常ホール伝導度をもつ反強磁性体が知られています。現状これらの物質

では、磁場によって磁気ドメインを反転することで異常ホール伝導度の符号を制御しています。本研究では、表面弾性波を印加した状態で異常ホール伝導度を測定することで、磁場ではなく「回転歪み場」を使った制御の可能性について検証していきます。

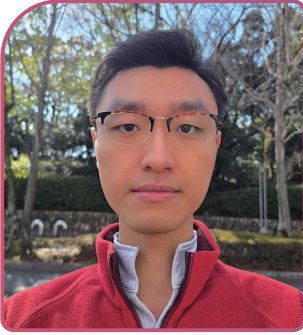
また、時間反転対称性に関してoddなフォノン角運動量($u \times \dot{u}$)ではなく、 $(P, T) = (\text{even}, \text{even})$ の回転歪み($\nabla \times u$)そのものに着目しますと、対称性の観点からは電気トロイダル双極子(ETD)との結合が期待されます。ETDを秩序変数とするフェロアキシシャル結晶のドメインの制御へと研究を更に進展させていけないかと考えております。

表面弾性波を印加した状態でのトランスポート測定を目的としたデバイス作製には、本領域でも注目を集めているFIB(収束イオンビーム)の利用を計画しています。FIBを用いることで、薄膜成長が可能な試料だけでなく、バルク単結晶を用意できる幅広い化合物を対象とした研究への進展が期待できます。実験的にチャレンジングな研究テーマであると同時に、技術的な壁を突破できたら、交差相関応答の検証(電流下弾性定数測定など)、高分解能・高周波弾性測定などへの展開も可能になります。2026年5月に開催された領域全体会議・公募研究キックオフ会議でも様々な方と議論して多くの実験的・理論的フィードバックを頂きました。2年間でトライ&エラーを繰り返し、今後の研究の発展に繋がる学びが得られるよう頑張りたいと思いますので、よろしくお願いします。

[1] R. Sasaki *et al.*, Nature Commun. **12**, 2599 (2021).

[2] S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 7577 (2015).

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



密度波に起因する アシンメトリ輸送現象の開拓

蔣 男

大阪大学大学院理学研究科 助教

この度、公募研究として本領域に参画させていただくことになりました、大阪大学の蔣男（Jiang Nan、ジャンナン）です。どうぞよろしくお願いいたします。生まれは中国ですが日本育ちです。私はこれまで、非相反伝導現象を用いたらせん磁性体のキラリティ制御などの研究[1,2]を進めてきました。最近は、ファンデルワールス層状物質を舞台として、非相反伝導現象やスピン流を用いた新しい物性検出に取り組んでいます[3,4]。

本公募研究では、その対象を電荷密度波、すなわちCDWに広げたいと考えています。CDWとは、物質中の電子密度が空間的に周期的な濃淡をもつ秩序状態です。CDWは古くから、並進対称性が破れた秩序として理解されてきました。1T-TiSe₂[5]など特殊な物質を考えると、空間反転対称性も破れたCDW秩序は存在しますが、ここで提案したいのはそうではなくて、単純な一次元CDWであっても実は空間反転対称性が破れているのではないかと、ということです。

単純な正弦波としてCDWを考えると空間反転対称性は保たれます。しかし、実際の密度波は完全な正弦波ではなく、基本波に加えて二次高調波などの高調波成分を含みます。ここで重要になるのが、基本波と高調波の「位相のずれ」です。基本波の山と高調波の山の位置関係がずれると、全体の波形には向きが生まれ、空間反転対称性が破れます（図1）。私はこの高調波の位相自由度を、密度波に隠れた新しいアシンメトリの自由度として捉えたいと考えています。

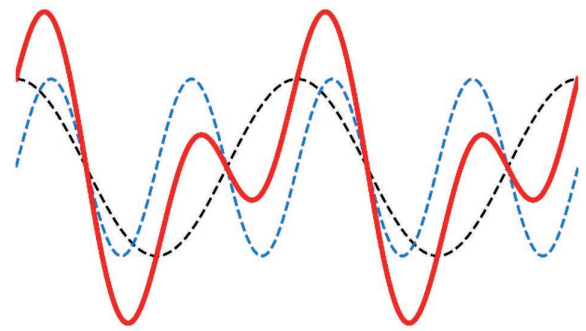


図1：空間反転が破れた波形 $\cos Qx + \sin 2Qx$

本研究では、典型的な一次元CDW物質であるNbSe₃などを用いて、この隠れた対称性の破れを輸送測定から検出することを目指します。また、CDWが自発的に空間反転対称性を破っているのであれば、反転の向きが異なる二つの状態が存在するはずです。そこで、パルス電場を用いてこの二つの状態を切り替え、その符号を非相反伝導によって読み出すことも目指します。

高調波の位相による対称性の破れは、CDWに限らず、スピン密度波など他の周期的な秩序にも拡張できるはずです。本研究を通して、これまで「並進対称性を破る波」として主に理解されてきた密度波を、「空間反転対称性も破りうるアシンメトリ量子物質」として捉え直したいと考えています。領域内では、他手法による高調波成分の検出、位相結合の理論的理解、新しい密度波物質への展開など、さまざまな共同研究を進められればと思っています。少しでもご興味を持っていただけたら、ぜひ気軽にお声がけください。

[1] N. Jiang *et al.*, Nat. Commun. **11**, 1601 (2020).
[2] N. Jiang *et al.*, PRL **126**, 177205 (2021).
[3] N. Jiang *et al.*, PRB **112**, L180402 (2025).

[4] N. Jiang *et al.*, PRB **112**, 235313 (2025).
[5] J. Ishioka *et al.*, PRL **105**, 176401 (2010).



超伝導体のミクロな非対称性が誘起する 非相反・非線形現象の開拓

大同 暁人

京都大学大学院理学研究科 助教

公募第1期に引き続き、公募B01班として本領域に参画させていただくことになりました、京大柳瀬研助教の大同と申します。エキゾチックな超伝導やその非自明な応答に興味を持って研究しています。どうぞよろしくお願いいたします。

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ます。その起源としては様々なものが知られていますが、私たちは特にミクロな対称性の破れを起源とするケースに興味を持っています。公募第1期では、主にこの超伝導ダイオード効果の研究を行ってきました。その際得られた成果の一部を以下で簡単にご紹介します。

多くのSDE実験では外部磁場が時間反転対称性を破りますが、例えばWSe₂/捻り三層グラフェンではフィリングや電場の制御により高効率のゼロ磁場SDEが実現します。特定の条件では、小電流で有限抵抗、大電流で一方向のみゼロ抵抗となる効率100%のSDEが観測されますが、その機構は未解明でした。

私たちは非平衡駆動によってこの現象を実現するモデル[1]を提案したほか、バレー偏極と有限重心運動量超伝導に基づく機構[2]も提案しました。物質の3回異方性により、同じ自由エネルギーを持つ3つの

クーパー対運動量が安定化する[図1]ことに注目して実験結果を説明し、電流方向によっては相反的な電流誘起ゼロ抵抗が実現することも予言しました。

また、「非平衡性が時間反転対称性を有効的に破る」という着想は、京大白石グループとの共同研究[3]でも実証されました。空間反転・時間反転対称性を持つFeSeのゼロ磁場SDEが、意図せず生じた温度勾配に由来することを対照実験で示し、外部ヒーターによる極性制御も確認しました。

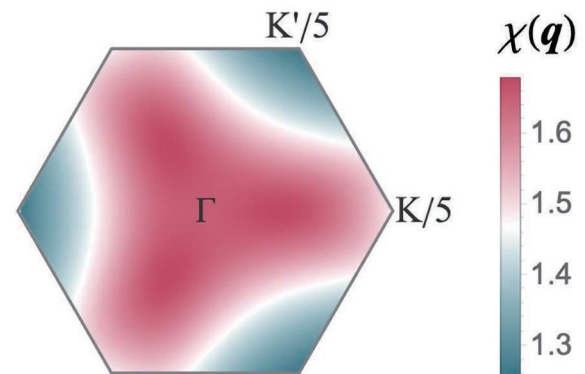


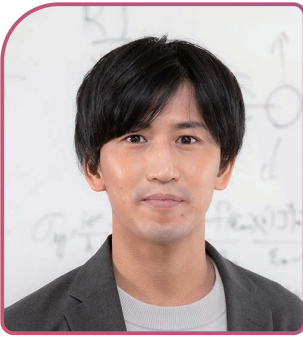
図1: 三重縮退したクーパー対運動量。

公募第2期では、公募第1期に引き続き、超伝導ダイオード効果を含む非相反電荷輸送の研究の継続・発展を試みます。これと並行して、温度勾配による非線形・非相反な熱伝導、静的・動的な歪みによって誘起される非線形・非相反現象など、より多様な物理量・外場に注目し、交差相関を含む興味深い超伝導現象を開拓します。領域の皆様と引き続き交流できるのを楽しみにしています。

[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).



奇パリティスピン分裂がもたらす 非線形量子物性の理論開拓

奥村 駿

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授

B01公募班として本領域に参画させていただきまず、東京大学の奥村駿と申します。物質が示す磁性・伝導性・光学特性についての理論研究を行っています。2年間、どうぞよろしくお願いいたします。

近年、反強磁性秩序を示し、正味の磁化がないにも関わらず時間反転対称性を破る「交替磁性」が提案され、世界中で大きな注目を集めています。強磁性においてはゼーマン分裂によって電子バンドのスピンの縮退が解けますが、通常の反強磁性ではスピン自由度は完全に縮退してしまいます。しかし、交替磁性では、運動量空間で異方的なスピン分裂が生じることで、異常ホール効果やスピン流生成といった強磁性と同等の高い機能性が現れます。

これまでの先行研究では、主に d 波や g 波型の偶パリティスピン分裂を示す交替磁性に焦点が当てられてきましたが、 p 波や f 波型の対称性を持つ奇パリティスピン分裂の物性はほとんど未解明のまま残されています。これらの奇パリティスピン分裂は、時間反転対称性を保つ一方で、空間反転対称性を破ることから、交替磁性とは本質的に異なる「アシンメトリ」な量子物性を示すことが期待されます。

最近、私たちは、D01公募班のHirschberger研究室との共同研究において、金属的な性質を示す p 波磁性体を発見しました[1]。この物質においては、格子整合な磁気周期を持つらせん磁気構造によって、図1のような p 波型の奇パリティスピン分裂が現れます。特に面白いのは、奇パリティスピン分裂が現れるらせん磁性相でのみ、非常に大きな異常ホール効果が観測されるという点です。私は、奇パリティスピン分裂が形成するスピンノーダルラインにベリー曲率が集中

し、特徴的な磁化依存性を示す異常ホール効果を引き起こすことを明らかにしました[2]。

今回の公募研究では、空間反転対称性の破れをより直接的に捉える非線形応答現象に着目した研究を進めていきます。特に、これまでのらせん磁性体における光起電力や第二次高調波発生などの非線形光学応答に関する理論研究[3]を発展させ、奇パリティスピン分裂に特徴的な非相反輸送特性を解明していきます。また、 p 波型だけではなく3重回転対称性をもった f 波型のスピン分裂についても、実験的実証に向けた具体的な理論提案を行っていきたいと考えています。

本領域では、カイラリティや多極子秩序などを基盤として、研究の興味が合致する方々が非常に多いと感じております。B01班の理論チームはもちろんのこと、実験グループとも深く連携して、アシンメトリ量子物質が示す新機能の開拓に貢献できれば幸いです。どうぞよろしくお願いいたします。

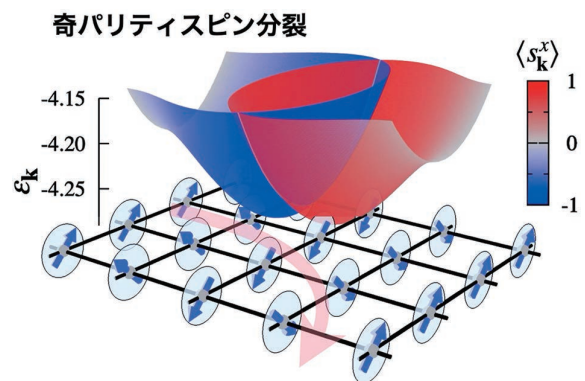
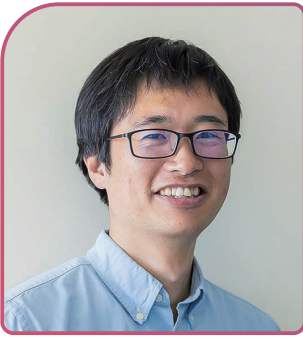


図1: らせん磁気構造がもたらす伝導電子バンドの p 波型奇パリティスピン分裂と異常ホール効果。

[1] R. Yamada *et al.*, Nature **646**, 837 (2025).

[2] S. Okumura, M. M. Hirschmann, and Y. Motome, arXiv:2512.14071 (2025).

[3] S. Okumura *et al.*, Phys. Rev. B **104**, L180407 (2021).



熱応答が拓く アシンメトリ量子物質の新規交差応答

那須 譲治

東北大学大学院理学研究科 准教授

本学術変革領域の公募研究「アシンメトリ量子物質の基礎理論と設計」に採択いただき、誠にありがとうございます。私は大学院生の頃より一貫して、強相関電子系に現れる電子軌道の自由度に関する研究に取り組んできました。そのため、私自身の研究の柱と深く関わる本領域に参画できることを大変嬉しく思っております。私は、局在電子の軌道自由度に興味を持っており、主に磁性絶縁体を対象として研究を展開しています。磁性絶縁体では、スピンや軌道自由度に由来する準粒子が輸送現象や励起構造に顕著に現れます。磁気秩序や軌道秩序からの素励起は、マグノンやオービトンと呼ばれるボソンの準粒子として記述されます。また、量子スピン液体においては、スピン自由度があたかも分裂したかのような準粒子が系の励起構造を支配します。

本研究では、特に準粒子に由来する輸送現象に注目して研究を進めたいと考えています。対象は絶縁体であるため、電荷の輸送ではなく、熱やスピンといった電気伝導を伴わない輸送現象に着目します。その中でも、私は熱輸送に興味を持って研究を進めています。熱は電気や磁気よりも日常的で身近な概念である一方、その理論的取り扱いにはしばしば難しさが伴います。例えば、熱輸送係数を計算する際には、単純に久保公式に代入して計算するだけでは、正しい答えが得られない場合が少なくありません。そのため、交差応答や非線形応答に関しては、理論研究を展開する余地が残されているのではない

かと考えました。また、熱の流れを駆動する温度差は、電場と同じ対称性を持つ外場であるため、その性質を生かした交差応答も期待されます[1]。これらの背景から、熱応答を基軸としてアシンメトリ量子物質の開拓を目指す、という本研究の提案に至りました。

熱応答に関する研究として、最近、私たちは熱とスピン流との交差応答や非線形熱ホール効果の研究を進めています。そこでは、半古典理論や量子運動方程式を用いて実空間における熱の流れを直接計算し、さらに空間勾配で展開することで、温度勾配に対する二次応答を直接求めることに成功しています[2,3,4]。本領域でターゲットとする多極子秩序、あるいは多極子秩序と見なせる現象の中には、交差応答や高次応答として観測されるものも多く含まれると考えられますし、熱応答を用いた測定が向いている系もあるかと思います。そのため、アシンメトリ量子物質の研究に関して、私たちの手法が何らかの形で貢献できるのではないかと期待しています。私たちの研究にご興味があれば、お気軽にお声がけいただけますと幸いです。領域内の計画研究や公募研究の皆さんと協力して新しい発展へつなげることができればと考えています。

2年間という短い期間ではありますが、本領域の研究推進に貢献できればと思いますので、どうぞよろしくお願いいたします。

[1] J. Nasu and S. Hayami, Phys. Rev. B **105**, 245125 (2022).
[2] S. Koyama and J. Nasu, Phys. Rev. B **109**, 174442 (2024).
[3] S. Koyama and J. Nasu, Phys. Rev. B **112**, 014447 (2025).

[4] A. Kuwabara, and J. Nasu: arXiv:2603.10605, to appear in Phys. Rev. B.



フォトニック環境のデザインが齎す 固体中のトロイダル秩序誘発

大上 能悟

理化学研究所 基礎科学特別研究員

物質の性質は、その物質自身だけで決まるわけはありません。どのような環境に置かれるかによって、物質を感じる揺らぎは異なる形を帯び、それに伴い応答や機能も変わります。

私は光と物質の相互作用を理論的に研究しています。大阪大学で量子光学とナノフォトニクスを学び、その後、英国 Imperial College London でメタマテリアルの理論研究に取り組みました。現在は理化学研究所において、光科学と物性物理学を横断する研究に取り組んでいます。

物性物理学では、対称性の破れが新しい機能を生み出す源として理解されています。空間反転対称性の破れによる強誘電性や、時間反転対称性の破れによる強磁性はその代表例です。近年では、その両方が破れた系に現れるトロイダル秩序や非相反応答が注目されています。

一方で私が関心を持っているのは、物質そのものだけでなく、それを取り巻く電磁環境です。量子電磁気学によれば、真空は何もない空間ではありません。そこでは電磁場が絶えず揺らいでおり、その零点揺らぎは物質の性質にも影響を及ぼします。私はこの研究を、「真空の彫刻と、その物質への転写」という言葉で捉えています。共振器やメタマテリアルを用いると、広がった真空揺らぎに新しい形を与えることができます。本研究では、そのように設計されたフォトニック環境を通して、量子物質の性質そのものを書き換える可能性を探究しています。

学術変革領域「アシンメトリ量子」にて取り組む課題では、特にアシンメトリな電磁環境に着目します。本研究で注目しているトロイダル秩序は、電気的な

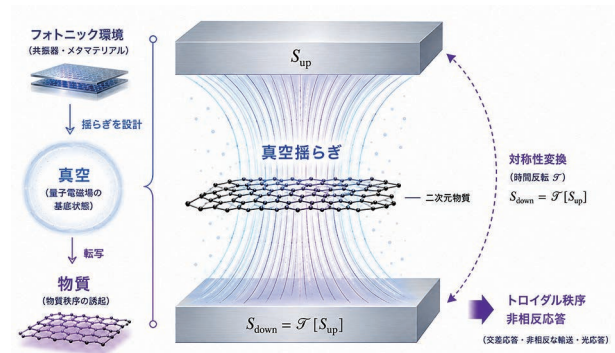


図1: PT 対称なフォトニック構造による真空揺らぎの変調と物性変調のイメージ図。

性質と磁気的な性質が結び付いた状態であり、空間反転対称性と時間反転対称性がともに破れた系に現れます。この秩序は非相反な輸送現象や光応答と深く関係しており、新しい量子機能の舞台として期待されています。従来、このような機能は物質そのものの結晶構造や電子状態に由来すると考えられてきました。これに対して私は、アシンメトリなフォトニック環境によって形作られた真空揺らぎを介して、固体中にトロイダル秩序を誘起できないかと考えています。物質を設計するだけでなく、その環境を設計することで新たな機能を創発する——そのような新しい量子物質科学の可能性を探究しています。

振り返れば、私自身もまた環境によって形作られてきました。量子光学、ナノフォトニクス、メタマテリアル、物性物理と、異なる分野や研究文化に触れる中で、自分の関心や発想も新たな形を帯びてきたように思います。本領域での交流を通してさらに多様な研究者と出会い、新たなサイエンスを生み出すことを楽しみにしています。



多極子基底を用いた有効ワニエ模型による キラル・強軸性秩序の微視的記述

大岩 陸人

北海道大学大学院理学研究院物理学部門 講師

B01班の公募研究として参画させていただくことになりました、北海道大学の大岩と申します。第一原理計算と有効ワニエ模型により、結晶構造・電子状態に潜む非対称性を微視的に記述する理論研究を進めています。本公募研究では、キラル秩序と強軸性秩序を主な対象として、多極子基底を用いた有効ワニエ模型により、その発現機構の解明、新規交差相関物性の開拓、物質設計指針の構築を目指します。

キラル秩序は、右手と左手の関係のように鏡映で重ね合わせられない秩序であり、強軸性秩序は、結晶中の多面体が同じ向きに回転することで、回転軸を含む鏡映対称性が破れる秩序として理解できます。これらは、電流誘起磁化、光学活性、スピン流、非線形応答などの多様な物性と結びつく可能性があります。私はこれまで、このような見えにくい非対称性を多極子の言葉で定量化するための方法論を開発してきました。特に、キラル結晶における電場誘起の格子回転歪み応答を、電気トロイダル単極子の観点から記述する理論を提案しました[1]。また、対称性に適合した多極子基底を自動生成するプログラムMultiPieの開発に携わり、分子・結晶中の複雑な電子自由度を多極子として分類する枠組みを整備するとともに、第一原理計算から得られる電子状態を多極子基底に基づく有効ワニエ模型へ変換する手法を開発しました[2]。

この枠組みを用いた具体例として、キラル結晶Te

およびSeの構造キラリティと電子キラリティを解析しました。その結果、構造のキラリティを特徴づける主要な電子秩序変数が、スピンを含まないp軌道間ホッピングに由来する電気トロイダル四極子であることを明らかにしました[3]。これは、キラリティを単なる原子配列の性質としてではなく、電子のbond自由度に刻まれた秩序として捉え直すものです。また、強軸性物質 $K_2Zr(PO_4)_2$ についても、P-O間のp軌道混成に由来するスピンレスな電気トロイダル八極子が強軸性秩序を特徴づける主要な電子自由度であることが分かってきました[4]。

本公募研究では、これらの成果を基盤として、「どの多極子が現れているか」の同定から、「なぜその多極子が安定化するのか」という機構の理解へ進みます。具体的には、電子間相互作用を多極子間相互作用として分解し、どの多極子チャンネルが秩序形成に有利かを評価します。電子格子相互作用についても、電子系の多極子と格子系の多極子の結合として記述し、格子回転や歪みが電子の非対称性を生み出す仕組みを第一原理計算に基づいて調べます。また、A01・A02班の可視化・測定、C01・C02・D01班の物質開発と連携し、観測された非対称性の微視的解釈と、新しいアシンメトリ量子物質の設計の両面から本領域に貢献していきたいと考えています。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

[1] R. Oiwa *et al.*, PRL **129**, 116401 (2022).

[2] H. Kusunose *et al.*, PRB **107**, 195118 (2023); R. Oiwa *et al.*, PRB **112**, 035116 (2025).

[3] R. Oiwa *et al.*, PRR **7**, 033250 (2025).

[4] Y. Xie *et al.*, PRB **113**, 205133 (2026).



堀田 知佐

東京大学総合文化研究科 教授

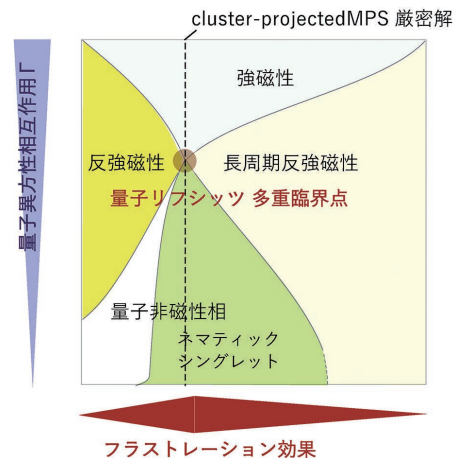
対称性が壊れない物質相の理論研究

我々のグループでは「量子多体性およびその背後に潜む見えない対称性が本質的な役割を果たす物質相とは何か」という問いの先にある物質相の開拓を目指して理論研究を行っています。幸か不幸か多くの物理現象は第一義的にはほぼ一体的な描像で捉えられ、特にアシンメトリ量子の研究で語られる磁氣的・電気的な秩序はほぼその類です。そこには、系を対称性の破れのパターンの分類表にあてはめ、それを使って外部応答をどう引き出すかという問題に持ち込むというある種のプロトコルが見られますが、我々はその逆をゆき、むしろこれらの秩序を壊したところに何があるのかを理解したいと考えています。

最近では、鬼丸グループの4fジグザグ擬スピン1/2鎖 YbCuS_2 および関連物質について、 $\text{SU}(2)$ 対称性を破るスピン間相互作用「項」が基底状態にネマティック成分を誘起することを明らかにしました。この模型ではフラストレーションと異方性の競合により、二種類の反強磁性相・強磁性相・ネマティック相が同時にリフシッツ多重臨界点で交わる豊かな相図が現れます。相図を精査する過程で、テンソルネットワーク（行列積状態; MPS）による厳密解を発見することができ、これを一般化して、AKLT模型やtoric codeを含むあらゆるフラストレーションフリー模型の基底状態を系統的に構成できるクラスタ射影MPS法を開発しました[1]。現在、これを更に発展させて、キタエフ・ハニカム模型の全固有状態を量子多体波動関数として厳密に求めることにも成功しています。キタエフ・ハニカムはマヨラナ+プラケットが厳密解で、「マヨラナフェルミオンそのものがスピン液体である」と考える人も多いと思います。今回、この世界的「常識」は真ではなくマヨラナは通常の

フェルミオンに過ぎず、スピン空間へ戻したとき初めてスピン液体固有のトポロジカルエンタングルメントが現れることを明らかにし、スピン液体の起源を理解することに繋がったと思っています。

実験との共同研究も活発に進めています。例えば、カゴメ磁性体 In-Kapellasite （吉田グループ）で観測されたプラトー相の熱ホール効果の背後には非磁性準粒子とマグノンの共存があることがわかりました。現在もパイロクロアや、カゴメ格子・三角格子スピン液体の研究が複数進行中で、いくつかは近く決着を見る予定です。我々の研究の多くは、実験グループから「通常の解析では理解できなそうな問題」をご相談いただくことを契機に始まっています。本公募を通じて、これまで接点のなかった実験研究者の方々と新たな共同研究が生まれることを期待しています。興味の対象は幅広く、量子スピン系・強相関電子系に加え、有限温度における量子平衡・非平衡現象、磁気励起、乱れの効果、統計物理の基礎的問題も扱っていますので、是非ご参照ください。



[1] Saito, Hotta, PRL **132**, 166701(2024); PRR **7**, 013086 (2025); PRB **110**, 024409(2024).



多極子と共存・競合する超伝導に関する 強相関電子系の微視的理論の構築

角田 峻太郎

東京大学大学院総合文化研究科 助教

東京大学の角田と申します。B01公募班として本領域に参画させて頂くことになりました。私の研究課題では、強相関電子系で発現する様々な多極子秩序と共存・競合する超伝導の微視的理論を構築することが目的です。特に、スピン・軌道・副格子といった自由度が絡み合うことで生まれるような新奇物性現象に興味を持っています。具体的には、特に以下の2つのテーマに取り組みたいですと思っています。

(1) 交替磁性と共存する位相変調型超伝導のメカニズムと安定性の解析

近年、交替磁性(altermagnetism)と呼ばれる磁気秩序が盛んに研究されています[1-3]。これは一見通常のコリニア反強磁性ですが、副格子構造のためにエネルギー分散に異方的なスピン分裂を伴う多極子秩序です。我々は最近、この交替磁性と超伝導が共存したとき、Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov状態と呼ばれる空間非一様な超伝導状態が安定化しうることを示しました[4, 5]。特に、交替磁性のもとでは秩序変数の位相が空間変調するFulde-Ferrell (FF)超伝導が安定化します[5]。これは、一様磁場下で秩序変数の振幅が変調するLarkin-Ovchinnikov (LO)状態が現れやすいこととは対照的な結果であり、交替磁性体に特有の発現機構があることが期待されます。本課題ではこの成果をさらに発展させ、

実空間解析を行ってAndreev束縛状態の有無を調べることでこの発現機構の違いを詳らかにしていきたいと考えています。また、不純物効果やスピン軌道結合などに対する安定性の議論を行い、候補物質の選定を行うことも目指していきたいです。

(2) 量子臨界領域における多極子揺らぎ媒介超伝導の理論構築

銅酸化物高温超伝導体に代表されるように、スピンや電荷の揺らぎに由来する異方的超伝導がこれまで数多く報告されてきました。最近では、より拡張した概念として「多極子揺らぎ」に媒介される超伝導が提案されています[6, 7]。しかし、例えばPr1-2-20系における電気四極子秩序が消失する量子臨界点付近の超伝導[8]のような、量子臨界領域における多軌道超伝導の理論はまだ未開拓というのが現状です。そこで本課題では、自己無撞着な揺らぎによる強相関電子系の理論を発展させ、このような問題へアプローチしていきたいと考えています。

上記の内容に限らず、様々なテーマについて皆様との新しい研究を発展できるよう尽力したいと思います。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

[1] K.-H. Ahn *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 184432 (2019).

[2] M. Naka *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019).

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

[4] S. Sumita *et al.*, Phys. Rev. Research **5**, 043171 (2023).

[5] S. Sumita *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 144510 (2025).

[6] V. Kozii and L. Fu, Phys. Rev. Lett. **115**, 207002 (2015).

[7] S. Sumita and Y. Yanase, Phys. Rev. Research **2**, 033225 (2020).

[8] T. Onimaru *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 177001 (2011).



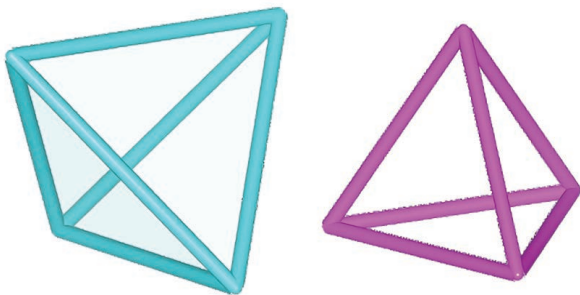
正四面体クラスターに着目したアシンメトリ立方晶物質の開拓

岡本 佳比古

東京大学物性研究所 教授

東大物性研の岡本佳比古と申します。このたびは、公募研究に採択いただき感謝いたします。2年間よろしくお願いいたします。専門は d 電子系を中心とする無機結晶固体の物質開拓で、本公募研究においても、皆さんに興味をもっていただけるような新物質を提供できるよう努力します。

本課題の目的は、アシンメトリな性質をもつ立方晶物質の新規開拓です。空間反転対称性をもたない立方晶物質を効率的に探す方法として、正四面体型のM₄遷移金属クラスターをもつ物質に着目します。正四面体は T_d 対称性を持ち、立方対称性を有しながら反転中心をもたない構造モチーフですので、正四面体を上手に並べることでアシンメトリ立方晶物質となるはずで、本課題では、「混合アニオンスピネルの新規合成」と「正四面体内包構造の低対称化」という2つの計画に基づいて、立方晶の高い対称性とアシンメトリな性質の絡み合いにより興味深い電子物性を実現する物質を見出します。



3年前に九工大で開催されたトピカルミーティングにおいても少しお話しさせていただきましたが、正四面体クラスター物質の探索研究は、私が2022年に物性研究所に着任したときに開始し、それ以降継続しています。ReSTeにおける高い熱電変換性能[1]、NbSeIにおける非協力Jahn-Teller歪による非磁性絶縁体状態[2]、Re₄As₆S₃におけるスピン分裂フェルミ面・四重縮退 Γ_8 状態と超伝導(図1左)、K₁₀Mn₄Sn₄S₁₇における四量体クラスター磁性など、面白い物性がいいくつか見つかりつつあります。これから2年間、多くの方と共同研究をできると期待しています。よろしくお願いいたします。

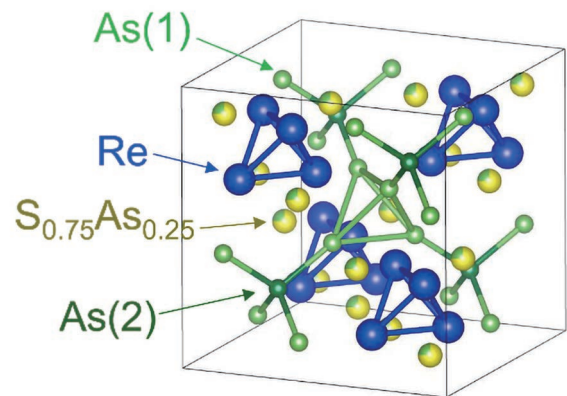


図1. Re₄As₆S₃の結晶構造と、研究室のウェブサイトのQRコード。



- [1] H. Matsumoto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **126**, 243903 (2025).
 [2] K. Kojima *et al.*, arXiv:2601.05562.



打田 正輝

東京科学大学 准教授

非対角非線形磁気熱電機能の開拓

これまでホール効果は磁場や磁化の面直成分に比例すると考えられてきました。これは、図1左上に示すように、磁場ないし磁化に対して対角かつ線形の応答です。一方で、我々のグループでは、面内磁場が誘起する異常ホール効果の観測に初めて成功しました[1]。これは、軌道磁化と呼ばれる量子幾何学量の一つが顕在化した応答となっているだけでなく、図1左下に示すように、磁場とホール抵抗率ベクトルの間に現れる新しい非対角かつ非線形の応答を実験的に開拓したという点で、学術的に興味深い進展です。

図1右に示すような電流の代わりに温度勾配と垂直な方向に電圧が生じるネルンスト効果においても、面内磁場に応答するネルンスト信号がホール効果と同様に存在すると期待されます。異常ネルンスト効果は異常ホール効果と同じ磁気点群に基づいて議論することができますが、磁場に対する非線形項を含むどの多極子項が面内異常ネルンスト効果に支配的に現れるかは全くの非自明です。実際に、面内異常ホール効果においては多極子依存性の定量的研究が進み始めており、双極子項及び八極子項が対称性として許される中でも、磁気秩序状態によってどちらが現れるか変化することがわかってきています[2]。

我々のグループは、面内異常ホール効果を初めて観測した磁性ワイル半金属EuCd₂Sb₂だけでなく、

ナローギャップ磁性半導体EuZn₂Sb₂・非磁性ディラック半金属Cd₃As₂・強磁性金属酸化物SrRuO₃においても面内異常ホール効果の観測に成功しており[3-5]、その研究の舞台となる対象物質を反強磁性体・非磁性体・強磁性体へと急速に拡大しています。この物質開拓の流れの中で、熱流や温度勾配が関わる磁気熱電効果へと新しい非対角非線形応答の学理を拡張し、その多極子依存性を定量的に解明していくことは重要です。本研究では、面内磁場によって誘起される異常ネルンスト効果を実証し、磁場に対して非対角かつ非線形に現れる磁気熱電応答の解明を目指します。このような非対角非線形磁気熱電機能の開拓は、非対角結合のエネルギー構造の理解につながるとともに、より柔軟な磁気熱電物質・デバイスの設計を可能にすると期待されます。

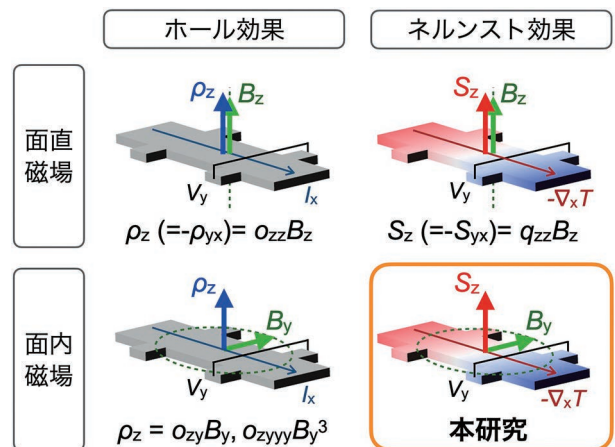


図1 本研究の狙い。

[1] A. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **133**, 236602 (2024)[2] A. Nakamura *et al.*, arXiv: 2507.21458 (2025)[3] H. Lee *et al.*, Phys. Rev. B **111**, L241106 (2025)[4] S. Nishihaya *et al.*, Phys. Rev. Lett. **135**, 106603 (2025)[5] S. Nishihaya *et al.*, Adv. Mater. **37**, e02624 (2025)



アシンメトリ量子物質の光制御

豊田 新悟

理化学研究所創発物性科学研究センター 研究員

理化学研究所の豊田と申します。この度、学術変革領域研究(A)「アシンメトリ量子」D01班の公募研究に採択していただき、大変光栄に思います。

アシンメトリ量子物質では、電流、マグノン、フォノンといった様々な物理量が非相反輸送特性を示します。私はこれまで、特に光に対する非相反性に着目し、研究を行ってまいりました。マルチフェロイック物質や磁気トロイダル秩序を有する物質においては、光の進行方向の反転によって光吸収が変化する電気磁気光学効果が生じます。こうしたアシンメトリな光学現象が顕著に増大すると、一方向に伝搬する光に対してのみ物質が透明になる一方向透明現象[1]や、一方向に伝搬する光に対してのみ非線形光学効果が現れる非相反第二次高調波発生[2]などが実現します。

このように空間反転対称性や時間反転対称性の破れは、光の進行方向、偏光、周波数変換過程などと結びつくことで、非相反性や非線形応答として顕在化します。したがって、光を用いた測定は、アシンメトリ量子物質における隠れた磁気秩序や反強磁性ドメイン構造を、非接触・非破壊で検出・可視化する有力な手段となります。さらに、光は波長、偏光、位相、進行方向を高い自由度で設計できるため、単なる観測手段にとどまらず、物質のアシンメトリを能動的に制御する外場としても利用できる可能性があります[3]。

本公募研究では、非線形・非相反光学効果を利

用したアシンメトリ量子物質の可視化を行うとともに、光によるアシンメトリ量子物質制御に取り組みます。特に、磁気モノポール、磁気四極子、磁気トロイダル秩序といった隠れた磁気秩序を有する物質を対象に、アシンメトリ量子物質の光学応答を精密に測定することで、アシンメトリ量子物質における光と空間・時間反転対称性の破れとの結びつきを明らかにしたいと考えています。さらに、その逆過程を利用することで、非従来型の光磁気制御を実現することを目指します。

この研究を進めるうえでは、物質開発、理論、精密測定、イメージングなど、領域内の幅広い専門性との連携が不可欠です。領域内の多様な研究者の皆様と議論・共同研究を進めることで、光を用いたアシンメトリ量子物質の可視化・設計・制御の新しい学理を構築したいと考えています。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

[1] S. Toyoda *et al.*, Physical Review Letters **115**, 267207 (2015).

[2] S. Toyoda, M. Fiebig, T. Arima, Y. Tokura, and N. Ogawa Science Advances **7**, eabe2793 (2021).

[3] S. Toyoda *et al.*, Nature Materials (2026).



分子性アシンメトリ量子物質の開発と 新機能開拓

福岡 脩平

北海道大学大学院理学研究院 助教

D01公募班として本領域に参画させていただくことになりました北海道大学の福岡脩平と申します。本研究課題では、分子物性科学の立場からアシンメトリ量子物質の創出に貢献したいと考えております。これから2年間どうぞよろしくお願いいたします。

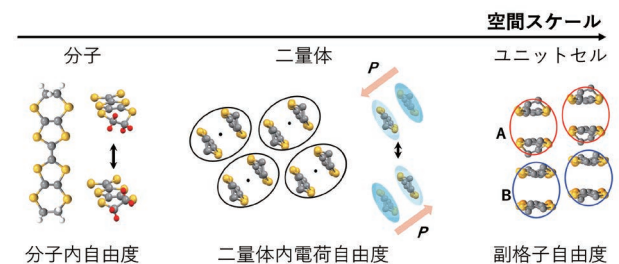
分子性物質は原子の集合体である分子を単位として構成されていることに特徴があり、分子構造や対称性の低い分子が凝縮することで生まれる多彩な分子配列に起因して、無機物質では見られないような特有の自由度が現れます。例えば図に示すように、分子構造に内在する立体配座の自由度、二量体を形成した2分子間での電荷分布の自由度、ユニットセル内に複数の二量体サイトが存在した場合の副格子自由度など、質的、空間スケールの異なる自由度が分子性物質では階層的に現れます。これらの自由度は「分子自由度」とも呼ばれ、分子性物質特有の物性の源泉となっています。本研究課題では、特に二量体構造を有する有機導体群に着目し、分子自由度が生み出す機能の開拓に取り組みます。具体的には、以下の2つのテーマに取り組む予定です。

一つ目は二量体に局在化した電子が生み出す交差相関応答の探索です。二量体に1つの電子が局在化した系では、局在電子が持つスピン自由度と、2分子間での電荷分布の偏りという電荷自由度が現れます。二量体内で電荷の偏りが生じると、二量体間での磁気相互作用も変調し、磁性と誘電性の相関、外場に対する交差相関応答の発現が予測されています[1,2]。

この電荷分布の偏りを生じさせる起源として、二量体構造の対称性、二量体化の強さは重要な要素と考えられます。 λ 型の分子配列を持つ有機導体は、二量体の中心に反転中心がない非対称な二量体を形成し、分子置換により分子間の重なりのある程度調整できるという特徴を持ちます。本研究ではこの特徴を活かし、分子置換による二量体化の強さ、二量体構造の対称性の制御を行い、二量体内電荷自由度が生み出す交差相関応答の探索を行います。

二つ目は、二量体サイトが生み出す副格子自由度に起因して発現する新規磁気状態の開拓です。ユニットセル内に非等価な二量体、グライド操作の関係にある二量体が存在するような系では、スピン分裂したバンド分散を有する補償フェリ磁性、交替磁性が発現することが理論的に示されています[3,4]。現在我々が合成に成功している、 λ' 型、 κ 型有機導体は、これらの磁気状態が実現する分子配列の条件を満たしており、本領域での研究を通して新規磁気状態の実現と機能開拓に取り組みたいと考えています。

本領域において、分子性物質は馴染みがない対象かもしれませんが、もし興味がありましたらお気軽にお声がけください。



[1] C. Hotta, Phys. Rev. B **82**, 241104(R) (2010).

[2] M. Naka and S. Ishihara, Sci. Rep. **6**, 20781 (2016).

[3] T. Kawamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **132**, 156502 (2024).

[4] M. Naka *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019).



原子層物質における量子幾何を反映した 新奇アシンメトリ量子応答の開拓

井手上 敏也

東京大学物性研究所 准教授

本年度から公募研究として本領域に参画させていただくことになりました。どうぞ宜しくお願いいたします。

私達は層間がファンデルワールス力で結合したファンデルワールス結晶を劈開して得られる原子層物質の物性に興味を持って研究を行っています。原子層物質は層数に依存性して対称性が変化したり、ヘテロ界面や捻り積層界面を作製したり、歪みを印加したりすることによって自在に対称性を制御できるため、対称性の破れを反映したアシンメトリ量子応答研究の格好の舞台です。本研究では、主に原子層磁性体に着目し、その対称性を数層試料やヘテロ界面作製等によって制御して、元の結晶にはない特異な磁気対称性とそれを反映した電子の波動関数の量子幾何学的性質を創出することで、磁性を反映したアシンメトリ量子応答の開拓に取り組みます。様々なアシンメトリ量子応答の観測と機構解明を通して、原子層磁性体ナノ構造において実現している特徴的磁気・電子状態や量子幾何学的性質に関する知見を得ると同時に、原子層磁性体にユニークなアシンメトリ量子機能の発見を目指します(図1)。

数層の原子層磁性体や界面において、特徴的な非線形輸送現象(非線形ホール効果[1-2]や整流効果[3])や非線形光学応答(第二次高調波発生[4-7]や

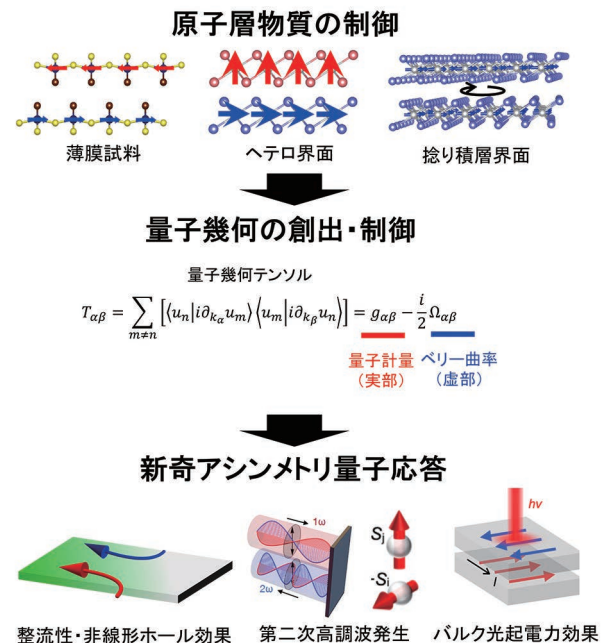


図1. 本研究の概念図(結晶構造図はVESTA (J. Appl. Crystallogr. 44, 1272 (2011).)を用いて作成)

バルク光起電力効果[8])が既にいくつか報告されています。本研究で、原子層磁性体の制御性を生かした特徴的新奇アシンメトリ量子応答を包括的に研究することで、固体中の量子幾何研究や原子層磁性体研究、アシンメトリ量子研究の新潮流を創出するとともに、アシンメトリ量子応答の発現や巨大化に有用な普遍的な物質設計指針を見出したいと考えています。2年間どうぞよろしくお願いいたします。

[1] A. Gao *et al.*, Science **381**, 181 (2023).

[2] N. Wang *et al.*, Nature **621**, 487 (2023).

[3] A. Gao *et al.*, Nature Electronics **7**, 751 (2024).

[4] Z. Sun *et al.*, Nature, **572**, 497 (2019).

[5] Z. Ni *et al.*, Nat. Nanotechnol. **16**, 782 (2021)

[6] Q. Son *et al.*, Nature **602**, 601 (2022).

[7] S. Aoki *et al.*, Adv. Mater. **36**, 2312781 (2024).

[8] Y. Dong *et al.*, Nature Materials (2026). <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02593-8>



らせん磁性体や反交替磁性体を含む 新規アシンメトリ量子物質の探索と実現

ヒルシュベルガー マクシミリアン

東京大学大学院工学系研究科 准教授

D01公募班として学術変革領域研究 (A)「アシンメトリ量子: アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」に参画している東京大学のMax Hirschbergerです。本領域において様々な先生方と共同研究を進めており、これまでに得られた研究成果と現在進行中の取り組みについて紹介します。

物質探索と単結晶育成は、凝縮系物理における基盤であると同時に、化学、物理学、材料科学を結びつける分野横断的な研究分野です。我々の研究室では、電子が量子力学に従って運動し相互作用する量子物質に着目し、その電子輸送応答および熱輸送応答を調べてきました。その代表例の一つがトポロジカル物質のワイル半金属です。ワイル半金属では、グラフェンにおける質量のないディラック電子の三次元版ともいえる準粒子が現れ、空間反転対称性または時間反転対称性が破れた物質において実現します。例えば、ワイル半金属NdAlSiでは、高移動度ワイル電子に由来する巨大な熱電ネルンスト応答が磁気揺らぎによって増強されることを明らかにしました[1]。また、関連物質であるGdAlSiでは、B01計画研究班の速水賢先生との共同研究により、ワイル半金属におけるヘリカル磁気秩序の直接的な証拠と、磁気秩序と電子構造の複雑な相関を明らかにしました[2]。

また、2024–2025年度A01公募班の山崎裕一先生

との共同研究では、 Gd_2PdSi_3 や $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$ などの中心対称な母物質に現れるナノメートルスケールの磁気スキルミオン構造を解明しました[3,4]。2024–2025年度D01公募班の青木大先生とは、電荷秩序や超構造形成によって空間反転対称性が破れるウラン系物質の研究を進めています。同じく2024–2025年度D01公募班の上田健太郎先生とは、パイロクロア物質における非フェルミ液体状態の研究に取り組んでいます。

また、A01公募班の鬼頭俊介先生とは、極性電荷秩序を示す二層ニッケル酸化物[5]、電荷秩序物質[6]、新規反強磁性体[7]などを対象として、多くのX線回折研究を進めてきました。さらに、B01計画研究班の速水賢先生およびB01公募班の大岩陸人先生とは、新しい反強磁性物質の電子物性に関する共同研究を精力的に進めています[7]。最近では、B01公募班の奥村駿先生との共同研究により、空間反転対称性を破る新しい磁気基底状態である金属的p波交替磁性体に関する成果を発表しました[8]。この状態は、補償磁性体において奇パリティスピン分裂を実現するものであり、Tomáš Jungwirthらによって提案された「反強的交替磁性 (antialtermagnetism)」の理論的枠組みとも密接に関連します[9]。

[1] R. Yamada *et al.*, Phys. Rev. X **14**, 021012 (2024).

[2] R. Nakano *et al.*, Nat. Commun. **17**, 3056 (2026).

[3] M. Hirschberger *et al.*, Nat. Commun. **10**, 5831 (2019).

[4] M. Hirschberger *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 076602 (2020).

[5] R. Misawa *et al.*, arXiv:2603.25119 (2026).

[6] R. Misawa *et al.*, Adv. Mater. **38**, e13015 (2026).

[7] R. Misawa *et al.*, *submitted*.

[8] R. Yamada *et al.*, Nature **646**, 837 (2025).

[9] T. Jungwirth *et al.*, Newton **1**, 100162 (2025).



動的化学アシンメトリが拓く5d多極子秩序の増幅と機能性量子物質設計

平井 大悟郎

名古屋大学大学院工学研究科 教授

本研究では、重遷移金属酸化物を舞台として、5d電子が有する多極子自由度と、結晶や電子状態にアシンメトリをもたらす元素を組み合わせることで、多極子秩序の高温化や新奇な外場応答の創出を目指しています。

多極子自由度はこれまで主にf電子系で研究されてきました。しかし近年、スピン軌道相互作用の強い5d電子系においても、スピンと軌道が強く結合した全角運動量Jによって特徴づけられる電子状態が実現し、多極子自由度が重要な役割を果たすことが明らかになってきました[1,2]。

私たちのグループでは、5d電子を1個有するRe⁶⁺イオンに着目し、そのJ=3/2状態から生じる四極子・八極子自由度の研究を進めてきました。特に、5d電子の局在性が高く、高対称な結晶場環境を実現できるダブルペロブスカイト酸化物に着目し、Ba₂MgReO₆において理論的に予想されていた四極子秩序を実験的に観測することに成功しました[3,4]。

本研究では、この成果をさらに発展させ、多極子自由度とアシンメトリとの協奏に挑戦します。その舞台となるのがダブルペロブスカイトA₂BB'O₆です。この構造はA、B、B'の各サイトに多様な元素を導入できる高い設計自由度を有しており、多極子自由度とアシンメトリを人工的に組み合わせることが可能です。

特に注目しているのは、PbやBiに代表される孤立電子対を有するイオンです。これらの元素は電子雲の非対称性に由来して高対称位置から自発的に変位し、結晶構造にアシンメトリを導入します。実際に、Ba₂MgReO₆のBaサイトをPbで置換した化合物では、Pbの変位に起因する構造相転移とRe由来の磁気秩序が結合した多段転移を発見しました。さらに興味深いことに、磁気転移に伴って体積が増加する負熱膨張も観測されています。これは、Pbの孤立電子対による格子自由度とReの多極子自由度が強く結合している可能性を示唆しています。

今後はPbだけでなく、BiやSnなどの孤立電子対活性元素、Cuなどのヤーン・テラー活性イオン、さらには価数揺らぎや電子状態の不安定性を有する希土類元素を導入した新しいダブルペロブスカイトの開発を進め、多極子自由度とアシンメトリの相互作用から生まれる新奇量子現象の探索を行います。

私は遷移金属化合物の合成・単結晶育成を専門としております。領域内の皆様との共同研究を通じて、新しい5d多極子物質群の開拓と、その物性発現機構の解明に取り組みたいと考えております。合成や結晶育成に関するご相談も大歓迎です。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

[1] B. J. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 076402 (2008).

[2] B. J. Kim *et al.*, Science **323**, 1329 (2009).

[3] D. Hirai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 064712 (2019)

[4] D. Hirai *et al.*, Phys. Rev. Res. **2**, 022063(R) (2020).



極性金属におけるアシンメトリ構造の変調と電子協奏現象の開拓

高津 浩

京都大学大学院工学研究科 准教授

京都大学大学院工学研究科の高津浩です。この度は学術変革領域研究「アシンメトリ量子」のD01班公募研究に採択いただきありがとうございました。本課題では、「極性金属」と呼ばれる量子物質群を舞台に、アシンメトリ構造の不安定性が生み出す新奇な物性や新しい物質の開拓に取り組みます。

私たちの身の回りでは、電気的な偏り(極性)をもつ物質がコンデンサやセンサ、圧電素子などに広く利用されています。こうした極性材料は通常、電気を流さない絶縁体です。金属中の自由電子は電荷の偏りを打ち消してしまうため、「極性」と「金属性」は長らく両立しないと考えられてきました。

ところが近年、金属でありながら極性構造へと相転移する「極性金属」が発見され、この常識が覆されました。極性金属は、ダイオード効果のような非相反伝導や電荷・スピン変換など、アシンメトリ構造に由来する新しい量子機能の舞台として注目を集めています。しかし、伝導電子が存在するにもかかわらず極性構造が安定に保たれるのか、また極性構造と電子系がどのように相互作用するのかは、いまだ十分に理解されていません。

私たちは近年、高压合成法による物質探索の中で、 LiReO_3 という酸化物が金属性を保ちながら170 Kで極性-非極性構造相転移を示すことを見出しました。この物質では、相転移をまたぐ広い温度ヒステリシスや、低温まで続く大きな弾性ソフト化に加え、圧電体に匹敵する超音波応答や、低温で顕著な超音

波の共鳴・残響現象が現れることがわかってきました(A02班の柳澤先生との共同研究)[1]。これらの結果は、極性構造と非極性構造の間を揺らぐ特異な状態の存在を示唆しています。

本研究では、こうした「アシンメトリ(極性)構造の不安定性」に着目し、静的な応力や動的な超音波によってこれを積極的に変調することで、相転移ダイナミクスや電子系の協奏現象を追究します。同時に、アシンメトリ構造に由来する物性研究の基盤となる新たな極性金属の開拓も進めます。

本領域の先生方や学生の皆さんとの連携を通じてアシンメトリ量子物質の理解を深めると共に、新しい物質・新しい機能の創出へつなげていきたいと考えています。共同研究や議論の機会を楽しみにしております。

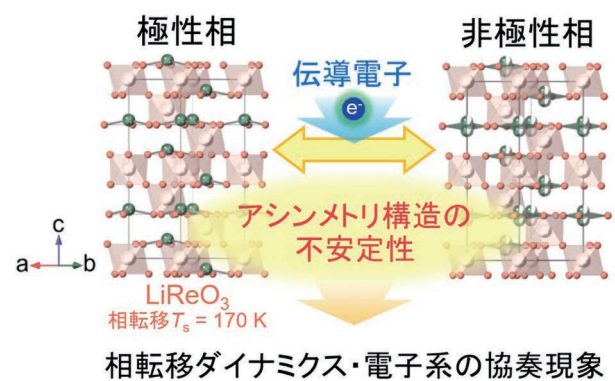


図1. 極性金属におけるアシンメトリ構造の不安定性と極性金属 LiReO_3 の模式図

[1] K. Murayama, T. Yanagisawa, H. Takatsu*, H. Kageyama* *et al.*, Sci. Adv. **12**, eadt3886 (2026).



極性非対称反強磁性体における 交差相関応答の可視化と機能創出

木村 健太

大阪公立大学大学院工学研究科 准教授

本年度から、D01班の公募研究班として本領域に参画させていただくことになりました。2年間、どうぞよろしくお願いいたします。

私は博士課程から現在に至るまで、遷移金属・希土類系酸化物を主な対象として、人々があまり注目していない物質、とりわけ新物質の開発を楽しみの一つとしながら、物性開拓に取り組んでまいりました。物質は単に新しいだけでなく、新しい物理や新奇な現象を内包していなければなりません。例えば、我々が開発した新物質 $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ は、実現例がほとんどなかった磁気四極子型の強制的秩序を示す反強磁性体であり、空間反転(P)対称性と時間反転(T)対称性の破れに起因する電気磁気効果[1]や特異な非相関光学応答[2]を示します。こうした物質との出会いもあり、この10年ほどは、 P と T の両方に非対称な反強磁性体の機能開拓を進めてきました。

一方、新しい研究テーマの模索も進めており、そのなかで近年着目している物質系が交替磁性体です。交替磁性体は、マクロな磁化をもたないにも関わらずスピン分裂したバンド構造を示す新しいクラスの磁性体であり、現在、国内外で極めて活発な研究が展開されています。このような状況下で、この研究分野に参入する意義を考えるため、研究動向を調査しました。その結果、交替磁性と電気磁気活性の共存がもたらす現象についての理論的提案はあるものの、実験研究は極めて限られていることに気が付きました。これは、両者の発現に必要な対称性の破れの要件が

異なるためと考えられます。したがって、両特性が共存する物質系を開拓することには大きな意義があると考えました。そこで本公募研究では、交替磁性と電気磁気活性が共存する物質系を探索し、その相関に起因する新規現象を実験的に明らかにすることを目指します。

本公募研究で対象とする物質系は、極性構造を有する T 非対称な反強磁性体です。構造自体が極性であるため、 T 対称性を破る磁気秩序が現れると、 P 対称性、 T 対称性、 PT 対称性のすべてが破れることになります。 P 対称性と T 対称性の破れは線形電気磁気効果を、 T 対称性と PT 対称性の破れは交替磁性の発現を許容します。線形電気磁気効果が活性となれば、同効果を介した電場による交替磁性制御が期待されます。また、線形電気磁気効果を光周波数領域に拡張することで発現する方向二色性を利用し、交替磁性ドメインの光学的可視化を試みます。これにより、その外場応答をより詳細に調べます。さらに、交替磁性と同様に T 対称性と PT 対称性の破れを発現要件とするピエゾ磁気効果にも着目し、線形電気磁気効果との共存がもたらす新規現象を実験的に調べます。

領域内の先生方との共同研究も積極的に進めさせていただきたいと考えております。当該物質系では、光だけでなく、マグノンや熱流の応答にも非相反性が現れる可能性があります。カイラルマグノンなど新たな励起の観測も期待されます。これらの観測舞台である物質の合成を通じて、アシンメトリ量子物性の理解の深化に貢献する所存です。

[1] K. Kimura *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 134418 (2018).

[2] K. Kimura *et al.*, Commun. Mater. **1**, 39 (2020).

[3] L. Šmejkal *et al.*, Phys. Rev. X **12**, 040501 (2022).



酸化物人工アシンメトリ界面による 非相反伝導制御研究

高橋 圭

金沢大学数物科学系 教授

今年度からD01班に参画させていただく高橋圭です。宜しく御願ひ致します。2024年10月に理化学研究所から金沢大学に異動し、研究室の立ち上げをしながら今後の研究の方向性を模索しているところです。この時期に皆さんと一緒に研究できることを大変光栄に、そして楽しみに思っています。

私は電子相関の強い遷移金属酸化物の薄膜をシリコンやガリウム砒素のような清浄半導体レベルに高品質化することで、量子伝導現象から新奇物理、機能化を探索しています。特に、15年前に成長手法をパルスレーザー堆積法からガスソース分子線エピタキシーへ切り替えて以降は、結晶性の高い薄膜成長に特化した研究を推進してきました。例えば、磁性半導体EuTiO₃に電子をドーピングした薄膜では、バルク結晶の低温での移動度が100 cm²V⁻¹s⁻¹程度であるのに対し、我々の薄膜では3000 cm²V⁻¹s⁻¹を超え、成長表面は原子レベルで平坦で終端面も制御されています。

本研究では、EuTiO₃上に価数が不整合なペロブスカイト酸化物を積層することで、原子レベルで急峻なアシンメトリ界面を形成し、これを非相反伝導物理の舞台にできると期待して研究を進めます。本稿ではそのきっかけとなったGdTiO₃/EuTiO₃二層膜の非相反伝導特性について紹介します[1]。EuTiO₃がEu²⁺・Ti⁴⁺の価数を持つバンド絶縁体であるのに対し、GdTiO₃はGd³⁺・Ti³⁺のモット絶縁体です。このような電荷不整合界面には電子が誘起され、二次元電子ガスが形成されることが知られています。この系が興味深いのは、Eu²⁺とGd³⁺がともに4f⁷配置 (S=7/2) をとり、7μ_B

という大きな磁気モーメントを担う点です。EuTiO₃は5.5 Kで反強磁性、GdTiO₃は30 Kでフェリ磁性へと転移し、いずれも転移温度以下では磁場を印加するとAサイトのスピン7μ_Bが磁場方向に揃ったスピン状態になります。

電流に垂直な面内方向に磁場を印加する配置で、低温で大きな非相反伝導応答を観測することに成功しました。バンド計算からこの界面のラシュバ分裂は非常に小さく、スピン-運動量結合バンド形成による起源では説明できません。磁場・温度依存性の解析から、このアシンメトリ界面に働くDM相互作用がマグノンにカイラリティを与え、このカイラルマグノンが非相反伝導の起源であると分かりました。

このように、単純なペロブスカイト酸化物二種を積層しただけで新しい物理が姿を現しました。今後は、電界効果によって界面の電子濃度を制御し、バンド構造と非相反伝導の関係を調べます。また、フェリ磁性体GdTiO₃を常磁性体LaAlO₃などに置き換えることで、スピン状態と非相反伝導の関係を明らかにしていきます。さらにEuTiO₃に限らず他の酸化物へと展開し、酸化物のイオン結晶で形成されるアシンメトリ界面を舞台に、新奇物性を創出していきたいと考えています。

酸化物薄膜の界面設計を「対称性を意図的にデザインする手段」として磨き上げ、アシンメトリ量子物性の新しい引き出し方を提示することが目標です。領域の皆様とともに新しい物理を切り拓いていけることを、強く期待しています。

[1] N. Takahara, K. S. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **136**, 206304 (2026).



一次元ジグザグ鎖構造を持つ Yb化合物における金属的励起の解明

石田 憲二

京都大学大学院理学研究科 教授

今年度より公募研究D01班に加えていただき大変うれしく思います。私は核磁気共鳴(NMR)測定から、物質の電子・磁気状態を調べてきました。これまでの研究は強相関電子系超伝導体に見られる磁性と超伝導の相関、非従来型超伝導に起因する新奇現象の発見・解明を行ってきました。今回の公募研究では表題にある一次元ジグザグ鎖構造を持つYbCuS₂の磁気秩序状態で見られる金属的励起の物性理解と起源解明、および希土類のYbやCeが構成するフラストレーション磁性体の磁気励起を調べていくつもりです。

YbCuS₂は2020年に鬼丸氏のグループで研究がはじめられた半導体物質で、図1に示すようYbは一次元ジグザグ鎖構造を有している[1]。当グループでは堀文也氏(現東北大助教)が大学院在学時に精力的に研究を行った。^{63,65}Cu核の核四重極共鳴(NQR)測定より、この物質は構造の乱れが少なく良質な物質であること、0.9 Kで一次転移を伴い、非整合な磁気構造を持つ反強磁性磁気秩序を示すことを見出した。この磁気構造は中性子実験からも示された[2]。さらに興

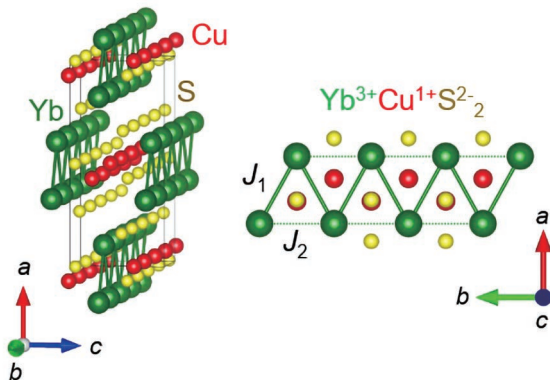


図1: YbCuS₂の結晶構造[1]

味深いことに、磁気秩序状態の0.5 K以下で核スピナー格子緩和率($1/T_1$)が $T_1T = \text{一定}$ の振舞いを示し、金属的な励起の存在を見出した。図2に見るようにこの金属的緩和率は銅金属の緩和より1桁大きく、0.9 K以下では非磁性のCu-NQR信号は観測されていないことからこの金属的励起は磁気秩序状態における素励起に起因していると考えられる。

最近、梅尾氏のグループにより5 GPa超の圧力域までYbCuS₂の物性が調べられており、我々のグループでも北川准教授が中心となって3GPa以上の圧力下のCu-NQR測定を行っていききたい。さらに近年、YbやCeなど希土類元素を用いたフラストレーション磁性の研究が精力的に行われている。希土類元素は従来の遷移金属磁性体に比べ、エネルギースケールが小さいため今まで調べることが出来なかったパラメーター領域の研究も可能になると考えられる。領域内の研究者と広く共同研究ができることを期待している。

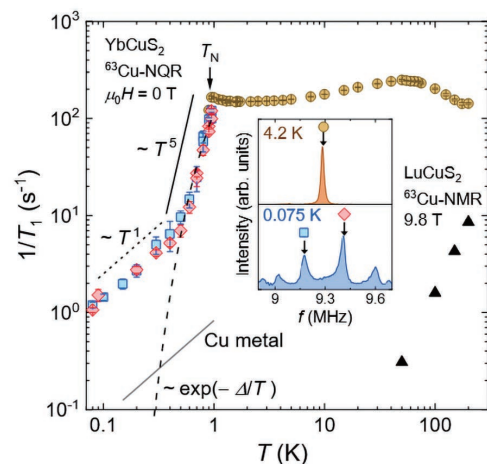


図2: YbCuS₂の $1/T_1$ の温度依存性[2]

[1] Y. Ohmagari *et al.*, J. Phy. Soc. Jpn. **89**, 093701 (2020).

[2] F. Hori *et al.*, Commun. Mater. **4**, 55 (2023)

[3] T. Onimaru *et al.*, arXiv. 2501.04533



結晶対称性のアシンメトリが生む 新しい磁性相とスピン輸送

松野 丈夫

大阪大学大学院理学研究科 教授

我々の研究室では、遷移金属酸化物の薄膜合成を通して物質の対称性や次元性を原子レベルで制御し、新しい電子状態と機能の開拓を進めています。前期の公募研究でも本領域に参画し、皆様には大変お世話になりました。そこでは、以前に観測したトポロジカルホール効果を出発点として、界面ジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用の定量と、その電子論的起源の解明に取り組みました。その成果については現在投稿準備を進めています。また同期間中には、5d 電子系酸化物を用いたスピン流研究も進展し、SrIrO₃/CoFeB 二層膜におけるスピン流吸収や、IrO₂ の結晶性がスピン軌道トルクに及ぼす影響を明らかにしました[1,2]。

今回の対象は、「交替磁性体」と呼ばれる新しい磁性相です。一見すると、界面DM相互作用、スピン流、交替磁性は互いに異なるテーマに見えます。しかし、いずれも結晶や界面の対称性を手掛かりとして、磁性とスピン輸送の発現機構を明らかにするという共通の問題意識でつながっています。前期には、異なる物質を接合した界面に生じる空間アシンメトリを利用しました。今回は、結晶構造と反強磁性秩序の組み合わせに内在するアシンメトリへと研究を展開します。典型的な反強磁性体では、反対向きの磁気モーメントが打ち消し合い、電子バンドのスピン縮退も保たれます。これに対して交替磁性体では、正味の磁化がほぼゼロでありながら、結晶対称性によって運動量空間で符号を交替させる大きなスピン

分裂が現れます。その結果、異常ホール効果やスピン流生成など、従来は主として強磁性体やスピン軌道相互作用の強い物質で議論されてきた応答が、正味の磁化がほぼない系でも期待されます。

本研究では、結晶配向とドメインを精密に制御できるペロブスカイト酸化物薄膜を舞台に、交替磁性を実証し、その固有のスピン輸送を明らかにします。バルク結晶では結晶軸の分散や双晶によって応答が不鮮明になることがありますが、エピタキシャル薄膜では結晶配向を精密に制御できるため、対称性由来する信号をより明瞭に捉えられると期待しています。絶縁体系ではLaFeO₃やLaCrO₃を対象として、異常ホール効果の有限周波数応答に対応する磁気光学Kerr効果を測定します。金属系ではSrCrO₃などを薄膜化・デバイス化し、異常ホール効果、二次高調波ホール測定、スピンホール磁気抵抗などを組み合わせ、スピン流生成を定量化します。

前期から培ってきた酸化物薄膜・界面の原子レベル制御とスピン流計測を、結晶そのものが持つアシンメトリへと展開することで、二つの公募研究を一つの流れとして発展させたいと考えています。領域内の理論、物質開発、計測の研究者の皆様との連携を通して、交替磁性に固有の光学・輸送応答とその発現機構を明らかにし、「アシンメトリ量子」の新しい磁性・スピントロニクスへと展開することを目指します。

[1] S. Hori *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 103002 (2025).

[2] T. Morimoto *et al.*, Phys. Rev. Mater. **9**, 054409 (2025).



トポロジカル電子構造を有する アシンメトリ量子物質の 量子振動による電子状態の研究

菅原 仁

神戸大学理学研究科 教授

表題の課題で公募研究に参加することになりましたのでどうぞよろしくお願いします。

私がトポロジカル物質という言葉を知ったのはケンブリッジで開催された強相関電子系の国際会議 (SCES2011) の時だったと思います。その時の印象としては、何か理論的には盛り上がっているのですが、具体的にどんな実験を行えばトポロジカルな電子状態を検証できるのか実感が湧かず「これは手をださないでおこう」と思ったことを覚えています。会議ではノーベル賞にもなったグラフェンの講演があり、試料作製方法がスコッチテープ法というなんと原始的な方法だったのでとても印象的でした。

あれから10年、そろそろ定年までの足音が聞こえてきた頃に広島大の野原さんから「トポロジカル半金属RPtBi(R=Y,La,Lu)が面白そうなので一緒にやってみませんか」とお誘いを受けたのがこの研究を始めるきっかけです。そうこうしているうちに同僚の小手川さんがCe₂CuGe₆で4f電子系反強磁性体としては初のゼロ磁場異常ホール効果を発見し[1]、こちらもトポロジカルな電子状態が関与していることが示唆されました。このような共同研究を進めてゆく過程で、近年トポロジカル物質に関する研究は飛躍に進展していて応用にも直結することを知りました。しかしながら、理論的な議論は多くなされているものの、実験的にトポロジカルな電子状態を直接観測した例はそれほど多くないことに気がつきました。そこで私の実験手法の一つである量子振動を用いてトポロジカルな電子状態を直接捉えられないかと思いこの

研究に足を踏み込んでみることにしました。

量子振動を観測するためには純良単結晶育成が鍵となります。RPtBiはハーフホイスラー合金と呼ばれる有名な物質で、実は別の元素の組み合わせで過去に作った経験があり、格子欠陥が入ることを知っていましたので、良い単結晶ができないことは経験していました。また、Ce₂CuGe₆についても信州大の中島さん(当時、大貫研)たちが単結晶を作製し高圧実験を行っていたのですが、ドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果測定がなされておらず、良い単結晶を得るの難しいのだろうと予想していました。それでも先行研究の作り方をベースに手を替え品を替え色々試して行くうちに、ようやく量子振動が観測できる単結晶育成に成功しました(図1)。しかしながら現時点ではまだまだ不十分な実験結果ですので、より高純度の単結晶を育成し、この公募研究期間にこれらの物質のフェルミ面の全容解明と、ベリー位相などのトポロジカルな電子状態の特徴について量子振動測定を用いて解明してゆきたいと考えています。

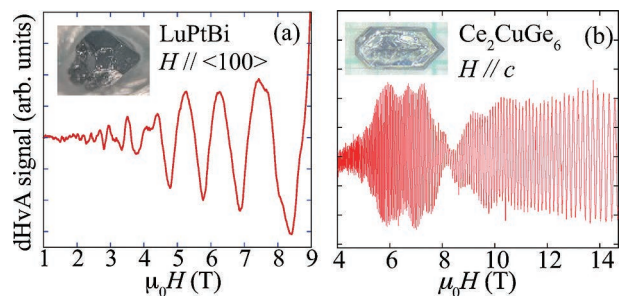


図1 (a)LuPtBiと(b)Ce₂CuGe₆のdHvA振動、内挿図はそれぞれの単結晶の写真

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



無機キラル超伝導体の不斉単結晶における スピン偏極超伝導特性の観測

高坂 勇輔

大阪公立大学工学研究科 准教授

この度は公募研究に採択いただきありがとうございます。公募D01班に参加する高坂勇輔と申します。2年間よろしくお願い致します。本公募研究では、右手と左手のように実像と鏡像が互いに重なり合わせることができない非対称性(アシンメトリ)である結晶構造キラリティに着目し、不斉無機単結晶育成手法の確立、キラルな結晶構造を有する超伝導体(キラル超伝導体)の新物質探索及び不斉単結晶試料による物性評価を目的としている。

キラルな結晶構造を有する無機キラル化合物において、磁気スキルミオン格子やキラル磁気ソリトン格子といったトポロジカル磁気構造の発見と、これらの磁気構造形成に伴う新規物性の開拓が注目を集めている。さらに、結晶構造キラリティに起因する磁気光学応答や電気伝導などの非相反物性の研究も活発である。一方、結晶構造キラリティが自発的に偏る物質は稀にしか存在せず、ほぼ全ての無機キラル化合物では試料内に左右のキラリティドメインが混在したラセミ双晶が形成される。このドメイン制御の困難さが、本研究分野の遂行を難しくしてきた。

最近、キラル構造の非対称性から生成されるスピン偏極効果であるキラリティ誘起スピン選択(Chirality-Induced Spin Selectivity (CISS))効果が新たな非相反物性として注目を集めている。本効果は、有機キラル分子のみならず無機キラル化合物においても観測されているが、その検出には構造キラリティを片方に制御した試料合成が不可欠である。右手系結晶と左手系結晶でスピン偏極の方向が反転するため、ラセミ双晶試料の場合、マクロな物性が相殺され、実験的な観測が困難となるためである。我々は、

結晶構造を右手系もしくは左手系のいずれか一方に制御可能な不斉単結晶育成手法を確立し、CISS効果をはじめとする新規物性の観測を行ってきた。

本研究課題では、これまで展開してきたキラル磁性体に留まらず、キラルな結晶構造を有するキラル超伝導体へと対象を拡張する。空間反転対称性の破れた超伝導体における混成クーパー対の形成機構は、結晶構造に伴う反対称スピン軌道相互作用に起因すると考えられてきた。キラル超伝導体もこれと同じ描像で議論されており、その掌性(左手系か右手系か)は議論の対象外であった。しかし、CISS効果によるスピン偏極状態の発見により結晶構造キラリティの非対称性も考慮しなければならない段階にある。その検証には、結晶構造キラリティを不斉化した試料合成が必須となる。そこで我々が培ってきた不斉単結晶育成が重要な役割を果たせると考えている。

また、我々はキラル超伝導体の新物質探索も並行して行っていく。現状では、キラル超伝導体は数える程しか存在しない上、超伝導転移温度 T_c も総じて低い。キラル超伝導体で期待される多彩な新物性観測には、より高い T_c を有する新物質の開拓が重要である。私が学生時代に所属していた研究室は超伝導探索に注力していたが、私の研究対象は磁性体であった。当時の大勢の研究室メンバーが未知の超伝導体を求めて苦悩する姿を間近で見てきただけに、新物質探索が険しい道であることは重々承知している。それでもなお、これまでの知見を元に、皆様に驚いて貰えるような新物質が提案できるよう、全力を尽くす所存である。



相対論効果が顕著な アシンメトリ量子物質の開拓

笹川 崇男

東京科学大学総合研究院フロンティア材料研究所 准教授

私はこれまで、トポロジカル電子物質と呼ばれる新しい量子物質の開拓に取り組んできました。トポロジカル電子物質とは、結晶の対称性や電子の量子力学的な性質によって保護された特殊な電子状態を持つ物質群であり、超巨大磁気抵抗や異常ホール効果、エキゾチック超伝導状態などの興味深い現象を示します。その研究を進める中で、特に私の関心を引いたのが、「アシンメトリ（非対称性）」と「相対論効果（スピン軌道相互作用）」が交わる領域でした。

一般に、結晶構造に空間的な非対称性が存在し、さらに重い元素に由来する強いスピン軌道相互作用が加わると、電子の運動とスピンが強く結び付きます。その結果、電子のエネルギー状態や輸送特性にも大きな非対称性が現れ、従来の物質では見られなかった新しい量子現象が創発すると期待されています。例えば、一方向に流れやすい電流応答や、光によって効率よく直流電流やスピン流を生成する現象、さらには新奇な超伝導状態などがその候補です。

本公募研究では、このような「相対論効果が顕著なアシンメトリ量子物質」の開拓を目的としています。私はこれまで、フラックス法や化学気相輸送法など複数の結晶育成手法を駆使し、多様な量子物質の高品質単結晶育成に取り組んできました。単結晶は、物質本来の性質を正確に調べるための出発点であり、とりわけアシンメトリ量子物質では結晶の向きや品質が研究成果を大きく左右します。本研究では、第一原理計算による候補物質の探索と高品質単結晶の開発を両輪として進め、新しい量子機能を示す物質の発見を目指します。

図1に示した写真は、これまでに様々な手法によって育成してきた単結晶試料の一例です。物質ごとに最適な育成条件は大きく異なり、高品質な単結晶を得るためには多くの試行錯誤が必要です。しかし、その先に未知の物性や新しい物理が待っていることが、この研究の大きな魅力でもあります。

本領域には、理論、量子ビーム実験、微細加工、機能開拓など、それぞれに強みを持つ研究者が集まっています。私は物質開拓と単結晶育成を担う立場として、試料やノウハウを積極的に共有しながら共同研究を推進したいと考えています。新しい物質との出会いを起点として、多様な研究者との連携から予想もしなかった発見が生まれることを期待しています。領域全体を盛り上げ、日本発の新たな研究潮流の創出に貢献できるよう取り組んでいきたいと思っておりますので、よろしくお願いいたします。



図1. 様々な手法を駆使して開発に成功している単結晶試料の例



令和8年度 領域全体会議・ 公募研究キックオフ会議@那須高原

小林 達生

岡山大学大学院環境生命自然科学研究科 教授

2026年6月26日から28日にかけて、栃木県那須高原のラフォーレ那須にて、令和8年度 領域全体会議・公募研究キックオフ会議が開催されました。今回の領域全体会議では、計画研究のこれまでの研究成果の発表に加え、本年度より新たにスタートした公募研究（第Ⅱ期）の研究計画について講演が行われました。参加者は118人で内訳は計画班メンバー20人、公募メンバー38人、領域外14人、学生の参加者は44人でした。49件の口頭発表と55件のポスター発表が行われ、現地に来れなかった公募メンバー4人がオンラインで講演を行いました。

まだ6月だというのに、全国的に初夏の暑さ漂う中、那須は前日から雨でしたが、会議が始まるころには雨も上がり、気温が20℃程度と気持ちの良い天候に恵まれました。那須の御用邸に隣接したラフォーレ那須は最近接のコンビニまで1 kmあり、その先に

はレストランも点在するようですが、車がないところにも歩けない合宿のような環境で研究会は行われました。そのため、昼間だけでなく、夜の部（ただの飲み会？）でも多くの参加者があり、今後2年間に向けた研究方針の話から昼間は聞けない実験の詳細やその他個人的な話まで、有意義な議論が交わされていました。

今後、次の学術変革領域研究に向けてビジョンを醸成していく時期に入ってきているとも言えます。私ごとですが、2004-7年に北川進氏が領域代表を務める特定領域研究「配位空間の化学」に参画した経験がありますが、まさかノーベル賞につながるとは・・・。「アシンメトリ量子」も、20年後にノーベル賞が取れるような研究成果やその芽となるようなアイデアが生まれることを願います。



図1 集合写真



第二回 若手研究者分野横断交流会 参加報告

今津 毅士

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 先端基礎研究センター 強相関アクチノイド科学研究グループ

2026年3月5日、6日の2日間にわたり、静岡県熱海市にて第二回 若手研究者分野横断交流会が開催されました。当該研究会は研究拠点形成事業（先端拠点形成型）：EMERALD、学術変革領域A：アシンメトリ量子、1000テスラ、キメラ準粒子の若手研究者が中心となって開催されたもので、公募A01班の鬼頭先生が世話人を務められました。

会場であるホテル・サンミ倶楽部はJR熱海駅から徒歩圏内にあり、館内でも潮風が感じられるほど海の近くに位置しています（図1）。駅からの道中には、新鮮な魚介が味わえるお店が多く立ち並ぶ商店街があり、研究会の開始前から熱海ならではの雰囲気を感じることができました。

研究会には学生やポスドクの参加者が非常に多く、10件の口頭発表、68件のポスター発表が行われました。発表内容は各領域の特色を反映した幅広いものであり、会場では若手研究者を中心に活発な質疑が行われていました。また、C02班の石渡先生、公募B01班的那須先生らによる招待講演もあり、その中ではご自身の研究内容に加え、学生時代の思い出やキャリアについてのアドバイスなどのお話を伺いました。夕食後のナイトセミナーでは、鬼丸代表らに若手からの質問に答えていただく形で、研究の進め方やキャリア形成などについてお話いただきました。普段の講演ではなかなか伺うことのできない研究者としての経験談や、若手研究者への具体的な助言を聞くことができ、参加者にとって大変貴重な機会となりました。

本研究会には複数の研究領域・拠点から若手研究者が参加しており、普段の研究活動では接する機

会の少ない分野の研究者とも交流することができました。異なる研究背景を持つ参加者との交流を通じて、自身の研究を新たな視点から見直すきっかけにもなり、分野横断交流会ならではの有意義な時間となりました。特に、専門分野や研究手法の違いを越えて互いの研究に触れることができ、今後の研究活動に向けた視野を広げる貴重な機会であったと感じます。

最後になりますが、本研究会への参加にあたり、研究会より旅費の補助をいただきました。交流会の開催・運営にご尽力いただいた世話人の先生方、ならびに協賛いただいた各研究領域の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

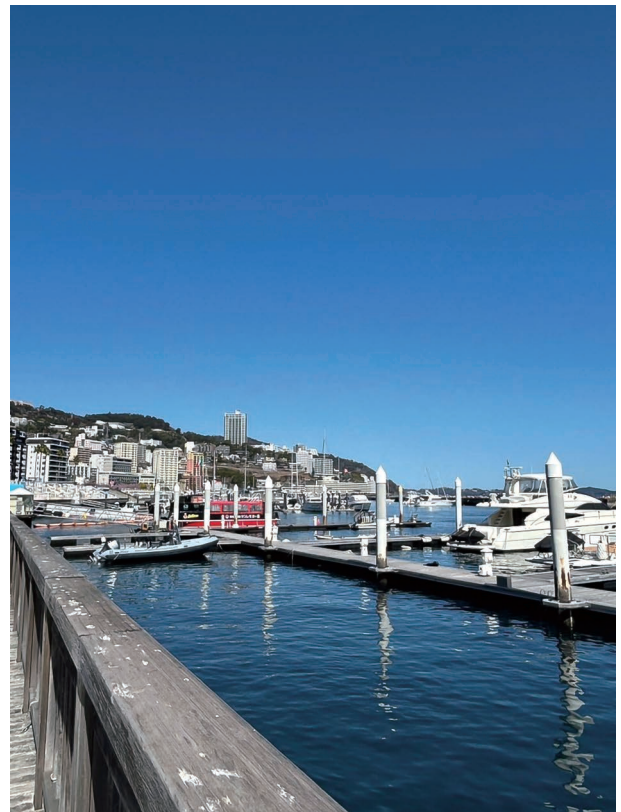


図1：熱海の海
（広島大学 磁性物理学研究室 岡田信慈氏による提供）



第二回若手研究者分野横断交流会 —未来へ続く研究とつながり— 2026/3/5-6開催報告

鬼頭 俊介

東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教

2026年3月5日（木）から6日（金）の2日間にわたり、静岡県熱海市の「ホテルサンミ倶楽部」にて、合宿形式による「第二回若手研究者分野横断交流会」を開催しました。

ホームページ:

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

■ 開催の背景と目的

アフターコロナ以降、対面での研究交流の機会が減少しておりました。本交流会はこうした状況を受け、学生から若手、中堅、シニアまで、幅広い層の研究者が一堂に会し、対面で深く交流ができる場を提供したいという思いから企画されました。

■ 本交流会の意義

本交流会は、単なる分野横断的な学術知見の共有にとどまらず、「分野を超えた若手研究者のネットワーク形成」、「学部生・修士課程の学生らの博士課程進学の見直し」、「将来的なキャリアパスに関する情報交換」など、多角的な交流を目指しています。

■ 本交流会の内容

1. 招待講演：最先端の研究とキャリアの軌跡

共催領域などから、招待講演として5名の先生方にご登壇いただきました。最新の研究成果に加え、先生方がこれまで歩んでこられたキャリアパスについてもご紹介いただき、若手参加者にとって今後の指針となる貴重な講演となりました。

● 田財 里奈 先生（京都大学）

「電荷ループ秩序の理論研究」

● 那須 譲治 先生（東北大学/1000テスラ科学）

「多軌道強相関電子系における外場応答と輸送現象」

● 金澤 直也 先生

（東京大学/キメラ準粒子/アシンメトリ量子）

「キラル物質の電子状態から探るトポロジーの起源と表面制御」

● 須田 理行 先生

（名古屋大学/EMERALD/キメラ準粒子）

「分子キラリティを起点とするキラル凝縮系物質科学の開拓」

● 石渡 晋太郎 先生

（大阪大学/アシンメトリ量子）

「計算情報科学を活用した準安定強相関物質の高圧合成」

2. 一般発表：白熱した議論の場

一般参加者の方々には、計68件のポスター発表（+ポスタープレビュー）を行って頂きました。また、ポスター発表を申し込んで頂いた方の中から、10名の方を選抜し、口頭発表を行って頂きました。一般参加者による発表では、会場の至る所で熱心な質疑応答が行われました。参加者からは「時間が足りない！」という声が漏れるほど、熱気あふれる議論の場となりました。

3. ナイトセミナー：本音で語る座談会

夜の部では、松田 康弘 先生（東京大学/1000テスラ科学 代表）、鬼丸 孝博 先生（広島大学/アシンメトリ量子 代表）、三浦 章 先生（北海道大学）をお招きし、

座談会形式のナイトセミナーを開催しました。

- ・博士課程への進学動機は？
- ・AIにどこまで研究を任せてよい？
- ・研究におけるオリジナリティとは？
- ・研究者のプライベートや出会いについて

など、多岐にわたる質問に対し、先生方から本音のアドバイスが次々と飛び出しました。真剣な議論の中にもユーモアが混じる、対面合宿ならではの刺激的なひとときとなりました。



■ 謝辞

本交流会の開催にあたり、多大なるご支援を賜りま

した「1000テスラ科学」「アシンメトリ量子」「EMERALD」「キメラ準粒子」の各領域関係者の皆様に、厚く御礼申し上げます。また、本交流会は「泉科学技術振興財団研究集会スタートアップ助成（2025-2027年度）」の支援を受けて運営しております。

世話人（五十音順）

池田暁彦（電気通信大学）

石井裕人（東京大学）

今城周作（東京大学、代表）

鬼頭俊介（東京大学）

中埜彰俊（名古屋大学）

林浩章（東京大学）

山田林介（東京大学）

■ 次回開催のお知らせ

2027年3月に「第三回若手研究者分野横断交流会」を開催予定です。次回も多くの皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております！





会議報告： 「格子や分極が絡んだ交差相関応答」 討論会@九州工業大学戸畑キャンパス

松平 和之

九州工業大学大学院工学研究院 教授

2026年6月22日(月)に九州工業大学戸畑キャンパスにて、アシンメトリ量子物質における「格子や分極が絡んだ交差相関応答」討論会を開催しました。A02班から柳澤, B01班から大槻, 是常, 服部, C01班から鬼丸, C02班から吉田, 芳賀, 石渡, 小手川, 松平, 公募研究B01班から大岩, 公募研究A02班から日比野が参加しました。また、領域外から"フレキシエレクトリック"の研究の第一人者である高橋 英史 准教授(阪大), "ピエゾ磁気効果の研究"の第一人者での青山 拓也 准教授(広大)をお呼びして、合計14名が参加しました。

最近, 新たな測定手法から格子や分極が絡んだ交差相関応答の研究が盛んになってきました。物質開発, 精密測定, 理論の研究者が集まり集中的に討論を

行い, 現状の成果に加えて課題も含めて意見交換を行いました。また, これから将来どのような研究が可能か, また「アシンメトリ量子」後の研究の展開を視野に入れた議論も行いました。研究会などでは聞けないような質問や議論もあり, 充実した討論会となりました。なお, このような未公開の成果や将来展望の議論を行うことを目的としたため, 参加者は限定する形とさせて頂きました。

プログラムは以下の通りです。

10:30-10:35 はじめに(鬼丸)

10:35-11:15 松平

「アシンメトリ量子物質の圧電および
電流誘起歪み応答」

11:15-11:35 石渡

「導電性アシンメトロニクスとしての
ペロブスカイト型酸化物の設計開発」

11:35-13:00 <昼休み>

13:00-13:40 高橋

「電気伝導系における
フレキシエレクトリック効果の展開」

13:40-14:20 青山

「非共線反強磁性体における非線形ピエゾ磁気効果」

14:20-14:30 柳澤

「弾性波を用いたアシンメトリ量子物質の研究展望」

14:30-14:50 <休憩>

14:50-15:20 日比野

「FIB微細加工と表面弾性波技術の融合による「回転歪み場を用いたアシンメトリ量子物性制御」の検証」

15:20-15:50 服部

「構造およびスピンドイマーによるカイラル秩序」

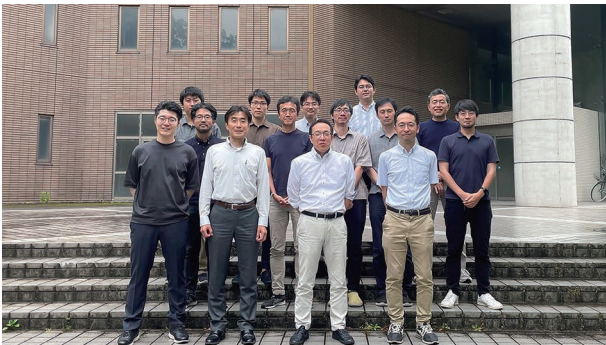


図1 参加者集合写真



図2 討論会風景

15:50-16:20 大岩

「第一原理計算と多極子基底で見る
格子・歪みが絡んだ交差相関応答」

16:20-17:00 全体議論

18:00-20:00 意見交換会

意見交換会後の有志8名が参加したアイリッシュパブでの懇親会で「AI（人工知能）」についての現状の使い方や今後の研究の未来について話題となりました。個人的には、今後のAIによる研究への影響を懸念しています。

ご存知の通り、昨今、数学の分野では、未解決問題の解決が相次いでいると聞きます。AIはすでに数学者にとって「強力な電卓」や「助手」の域を超え、「一緒に未知を切り拓く同僚」のような存在になりつつあることです。物質科学でも同じことが起こりつつあります。物質科学では、マテリアルズインフォマティクスの重要性は周知の通りですが、将来的に、本プロジェクトの主軸である「精密計測（A01,A02）」、「理論計算・設計（B01）」、「物質開発（C01,C02）」のサイクルを、AIとロボットが自律的に回す「自動化ラボ（自律実験施設）」の構築も現実味を帯びています。内閣府の目標も、「2030年までにAIロボットのプロトタイプの開発」、「2050年までに、自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットシステムを開発する。」とあります[1]。

こうした技術革新を前に、ふと「我々研究者の存在意義はどうなるのだろうか」という問いが頭をよぎります。究極的には、本人は実際に実験はしなくても（出来

なくても）アイデアさえあれば何でも作ってくれるラボが実現し、研究を完結することになるかもしれません（考えてみれば、今のように人間が行うか、将来ロボットが行うかの違いかもしれませんが）。そうなれば、PDを雇用する代わりに高性能なロボットを購入する、といった選択が当たり前になる世界が来るのでしょうか。一方で、資源や計算リソースの有限性を考えると、誰もが平等に最新AIの恩恵を享受できるのではなく、研究環境における「超格差社会」が到来する懸念も拭えません（私見ではその可能性が高いと思っています）。

しかし、物質開発の現場に身を置く者として、試料合成における「職人芸」、「セレンディピティ」は重要と考えています。本領域のアシンメトリ量子物質の創出において、マニュアル化できない微細な感覚や、失敗の中から新たな物理を見出す人間の直感は、依然としてAIを凌駕する領域にあります。当プロジェクトが重要視している「スキル相伝」もまた、単なるデータの受け渡しではなく、こうした言語化困難な「知」を次世代へ繋ぐ試みと言えるでしょう。

2050年はもう少し先であり、今の30代以下の若手研究者は、その実現を目の当たりにするのでしょうか。少なくともそれまで物質開発の現場は、まだまだ「AIを超える」ところにあり、その「職人芸」や「セレンディピティ」が重要であるのは間違いないと確信しています（多分）。

（注）文頭の水彩画は顔写真をソースにCopilotで生成しました。

[1] 内閣府 科学技術・イノベーション ムーンショット目標3 <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub3.html>

アシンメタ★通信

第7話

「平面うずまきパンが立体コロネになる？
フェロアキシャルの巻」



芦芽量子

アシンメトリ界限で「フェロアキシャル」っちゅうんが話題になっ
とるって聞いたんじゃけど、フェロアキシャルって何なん？おいし
いん？」

唐突ですね（笑）ある意味おいしいと思います。

鬼
鬼丸

「フェロ」は前回（第6話で）零子ちゃんが言うとした「強磁性
（フェロマグネティズム）」の「フェロ」と同じなんじゃろ？

いいところに気がつきました。しかし、フェロアキシャルは強磁性
とはすこし違う種類の秩序です。漢字で書くと「強軸性」。「アキシャル
（axial）」は「軸に関する」という意味で、磁気モーメントの代
わりに原子の配置や電気双極子の向きが、ある軸のまわりに渦のよ
うに並び、その回る向きがそろっているイメージです。[1,2]

あ、それってコロネパンみたいな話じゃろ！？前に（第2話で）
話しよった左右性（キラリティ）と親戚みたいなもんじゃね。
むふー（得意な鼻息）

おいしい！実はキラリティとは異なる性質なのです。
今回は、立体的なコロネの前に、真上から見た「平たいうずまきパン」
を思い浮かべると分かりやすいです。（図1）

鬼

鬼



図1 ChatGPT-5.5にて生成 (by R. Oiwa)



ぐるぐるしとし、右巻きか左巻きがあるのに、
なんでキラリティじゃないん？

そこが今回の落とし穴です。フェロアキシャルとキラリティは似ていますが、同じものではありません。キラリティは、右手と左手、あるいはコロネのように、三次元で見たときに鏡に映しても重ならない性質です。一方、フェロアキシャルは、まずは平面内のぐるぐるとして理解できます。この平たいぐるぐるは、その面を鏡にするような映し方では、元の形と重なります。



ほーなんじゃ！フェロアキシャルは「平たいすまきパン」。
キラルは「立体的なコロネ」なんじゃね。
ほんで、その平たいすまきパンのどこらへんがおいしいん？

核心を突いてきますねw これまで、フェロアキシャル秩序は時間反転対称性も空間反転対称性も破らないため、電場や磁場と直接結びつかず、制御が難しいと考えられていたのです。



ほんじゃ、おいしくないね。

ところがどっこい、なんですyo。軸方向に電場をかけると、平面内でぐるぐる並んでいた電気双極子が、電場の向きに少し傾いて、平面のぐるぐるに上下方向の成分が加わって、立体的ならせんになります。フェロアキシャル秩序そのものはキラルでなくても、電場と組み合わせることでキラリティを引き出せるのです。[2]



おお、ほんまじゃ！
平たいすまきの真ん中を指で押したらコロネっぽくなるのう！

かなり大胆ですがw イメージとしては悪くありません。



むふー。
フェロアキシャル、軸だけに、話のオチもふれんかったじゃろう！

。。。 (心の声：結局好きなパンの話っていう話の軸もブレないなあ。)



うろたんの豆知識コーナー

フェロアキシャル秩序は、軸のまわりの回転の向きがそろった秩序ニョロ。
軸に平行な鏡映対称性は破るけれど、軸に垂直な鏡映対称性と空間反転対称性を破らないニョロ。
一方、キラリティは、軸に平行な鏡映も、軸に垂直な鏡映も、空間反転も持たないニョロ。
だから、「くるくるしている＝すぐキラル」ではないニョロ。
フェロアキシャルモーメントを A_z 、軸方向の電場を E_z と書くと、 $A_z E_z$ はキラリティと同じ対称性を持つニョロ。つまり、軸だけならフェロアキシャル、軸に電場の矢印を刺したらキラルの顔をするニョロ。

[1] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi, and H. Kusunose, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).

[2] 東京大学大学院新領域創成科学研究科 プレスリリース「フェロアキシャル結晶を用いて電場誘起磁気キラル二色性を実現」(2023)
<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-08-21-001>



カイラルな構造をもつ超伝導体RhGe₄の 高圧合成とIrGe₄の結晶構造解析

小原 颯

大阪大学基礎工学研究科 博士後期課程1年

カイラルな構造をもつ超伝導体の合成技術を学ぶことを目的に東京都立大学電子物性研究室の松田教授をはじめ、増川氏、中島氏の協力のもと、RhGe₄の高圧合成とIrGe₄の結晶構造解析を行いました。

RhGe₄の合成については、3日以上にわたる高圧合成プロセスを経て、単結晶の合成に成功しました。この一連のプロセスを主体的に体験することで、論文から得た耳学問的な知識を超えて、合成条件の詳細や品質向上のための具体的な工夫の一端を習得することができました。

また、RhGe₄の高圧合成と並行して、チョクラルスキー法により作製したIrGe₄のインゴットから単結晶を取り出すために、ラウエ法により単結晶領域を決定し、単結晶構造解析を行いました。これらの実験により、左手系のIrGe₄を単離できました。この一連の実験を通じて、右手系のIrGe₄よりも左手系のIrGe₄のほうが生成されやすく、カイラル物質における左

右を作り分けることの難しさが実体験として理解できました。後日、別に提供いただいた右手系のIrGe₄試料の熱伝導を測定した際には、その試料の貴重さを噛みしめながら実験を行いました。

今後は、本プログラムで得た経験を生かして、カイラルな構造をもつ超伝導体RhGe₄およびIrGe₄を対象とした研究をより質の高いものにしていきたいと考えています。

最後に、お忙しいところ温かく受け入れてくださった東京都立大学電子物性研究室の皆様に深く感謝を申し上げます。





物理量に基づく結晶の記述と物性解析

石飛 尊之

東北大学大学院理学研究科 特任研究員

東北大学の石飛尊之と申します。私は東京都立大学で博士号取得後、日本原子力研究開発機構でポスドクをし、今年度から東北大学の是常グループにてアシンメトリ量子のポスドクに着任しました。本領域では、2024年の秋の学校の講師を務めさせていただいたほか、立ち上げ前のプレ会議にも参加するなど、これまでにもご縁をいただいております。この度メンバーとして加わりましたので、領域内の議論や共同研究の活性化に少しでも貢献できるよう努めてまいります。

私の専門は多極子の理論、特に現象論で、これまで $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ 、 UNi_4B 、 URhSn 、 CeCoSi といった物質を対象に、現象論や簡単なモデル解析をしてきました。最近では、 URhSn のカイラル四極子秩序に関連して「純電子的カイラリティ」の概念を導入し、本ニュースレターでも解説記事を書いております。基本的には、対称性に基づく議論をベースとして、複数の実験と整合する秩序変数を同定する、という研究を進めてきました。

物質の対称性と物性の関係は本領域の主題であり、世界的にも近年大きく発展してきている分野です。一方で、空間群やノイマンの原理、ランダウ理論といった基本的な道具立ては古くから確立しているにもかかわらず、対称性と物性の定性的な整合性がなお発展途上の課題であることには、以前から疑問を感じていました。その根源は、結晶学的な対称性の記述が物理的理解に向いていないため、物理量に基づくより物理学的な記述方法が必要ではないかと考えています。

最近はそのような観点から、物理量に基づく結晶

の記述と物性解析の枠組みを構築しようとしています。固体物理で唯一働く基礎的な力であるクーロン相互作用は連続回転・並進対称、時間反転・空間反転対称性をもつため、その破れは秩序変数のテンソル成分、波数(振動数)、パリティによって表すことができます。これは物理量(演算子)としては多極子の(時)空間分布に相当します。結晶構造や磁気構造(電荷や磁気モーメントの分布)を与えると、有限となる秩序変数が決まり、さらに秩序変数同士の積や空間微分から、秩序変数を系統的に生成できます。積や空間微分から無限個の秩序変数を生成できるため、有限個(非磁性だと1-4種類)の秩序変数を列挙することで、系の秩序変数/対称性の完全な情報を含み、これは(磁気)空間群と一対一に対応します。物理量の積(結合)で表される物性の創発は、全く同じテンソル成分、波数(振動数)、パリティの秩序変数があれば生じ得ると、構造と物性の関係が極めて簡単に理解できます。このように物理量のテンソル成分、波数(振動数)、パリティに注目して整理しておくことで、反射則、バンド理論、マクロ物性、局所対称性や、それら同士の整合性の解析が簡単に行なえます。

この枠組みは特に現象論に有効であり、 URu_2Si_2 の隠れた秩序変数の特定など、未解決問題への応用も進めています。本領域への参加を通じて、アシンメトリ物性に関する実験・理論の情報に触れ、多くの方と議論できることを楽しみにしております。特に、構造と物性、あるいは物性同士の整合性に関する問題がありましたら、気軽にお声かけいただけますと幸いです。2年間どうぞ、よろしくお願いいたします。



受賞ニュース



速水 賢

北海道大学
大学院理学研究院 教授

北海道大学大学院理学研究院（物理部門）の速水 賢教授（計画研究B01）が令和8年度科学技術分野の文部科学大臣表彰において若手科学者賞を受賞されました。受賞業績は「多極子による電子物性表現論と交差相関現象の理論的研究」です。速水 賢氏は、時間空間対称性を網羅する拡張多極子として物質中の電子状態を表現する形式の確立に大きく貢献し、交差相関現象、強相関電子系、トポロジカル物性をはじめとする多くの理論的解明や、それらの次世代テクノロジーへの応用に関する提案を行われてきました。その多岐にわたるご活躍は多くの研究成果を創出されており、本領域内外において常に注目を浴びておられます。

2026 年 10 月からの関連行事

■ 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

■ RIKEN CEMS Topical Meeting on Chirality in Condensed Matter Physics

日時：2026 年 10 月 19 日（月）～ 21 日（水）

場所：理化学研究所

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

アシンメトリ量子主催

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 JPXXXXXXX.

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

(※XXXXXXX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)

26H00626 非中心対称な価電子分布の可視化と軌道混成の定量評価 (鬼頭 俊介)

26H00671 顕微スピンARPES で捉える奇パリティ磁性体の実空間・波数空間相関 (木村 昭夫)

26H00684 トロイダル秩序における新奇分数励起の観測 (常盤 欣文)

26H00688 共鳴非弾性X線散乱によるカイラリティを有する素励起の観測 (石井 賢司)

26H00621 アシンメトリによって誘起される非従来型弾性応答の開拓 (小野瀬 佳文)

26H00629 フェロアキシャル物質からのスピン流生成 (塩見 雄毅)

26H00633 キラル接合界面における自発的な時間反転対称性の破れの解明とアシンメトロニクス応用 (金澤 直也)

26H00664 アシンメトリ量子の検出・可視化技術の高度化と人工アシンメトロニクス機能の創出 (松原 正和)

26H00679 磁化非対角項を直接検出する新規手法の開発と拡張多極子秩序下の交差相関現象への応用 (河野 洋平)

26H00666 時間・空間反転対称性の破れたメタマテリアルにおける非相反伝導のスケール普遍性 (山根 悠)

26H00655 交差相関応答による奇パリティ超伝導状態の可視化 (北川 俊作)

26H00656 交替磁性体のアシンメトリ磁場ひずみ応答 (米澤 進吾)

26H00631 精密バルク測定を用いた無機化合物における新奇キラル物性の開拓 (石原 滉大)

26H00623 カイラル結晶における非対称な熱流と交差相関 (水上 雄太)

26H00668 表面弾性波を外場としたアシンメトリ量子物性の制御 (日比野 瑠央)

26H00665 密度波に起因するアシンメトリ輸送現象の開拓 (蔣 男)

26H00659 超伝導体のミクロな非対称性が誘起する非相反・非線形現象の開拓 (大同 暁人)

26H00634 奇パリティスピン分裂がもたらす非線形量子物性の理論開拓 (奥村 駿)

26H00624 熱応答が拓くアシンメトリ量子物質の新規交差応答 (那須 譲治)

26H00686 フォトニック環境のデザインが齎す固体中のトロイダル秩序誘発 (大上 能悟)

26H00618 電子系主導のキラル・強軸性秩序の起源解明と新規候補物質の開拓 (大岩 陸人)

26H00635 対称性の局所破壊がもたらすアシンメトリ量子相の理論的研究 (堀田 知佐)

26H00636 多極子と共存・競合する超伝導に関する強相関電子系の微視的理論の構築 (角田 峻太郎)

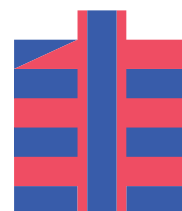
26H00640 正四面体クラスターに着目したアシンメトリ立方晶物質の開拓 (岡本 佳比古)

26H00646 非対角非線形磁気熱電機能の開拓 (打田 正輝)

26H00687 アシンメトリ量子物質の光制御 (豊田 新悟)

- 26H00619 分子性アシンメトリ量子物質の開発と新機能開拓 (福岡 脩平)
- 26H00638 原子層物質における量子幾何を反映した新奇アシンメトリ量子応答の開拓 (井手上 敏也)
- 26H00644 Exploration of magnetic materials with odd-parity spin splitting (Hirschberger Maximilian)
- 26H00652 動的化学アシンメトリが拓く5d多極子秩序の増幅と機能性量子物質設計 (平井 大悟郎)
- 26H00661 極性金属におけるアシンメトリ構造の変調と電子協奏現象の開拓 (高津 浩)
- 26H00677 極性非対称反強磁性体における交差相関応答の可視化と機能創出 (木村 健太)
- 26H00649 酸化物人工アシンメトリ界面による非相反伝導制御研究 (高橋 圭)
- 26H00660 一次元ジグザグ鎖構造を持つYb化合物における金属的励起の解明 (石田 憲二)
- 26H00667 アシンメトリ量子磁性の開拓: 対称性破れに基づくスピン輸送原理 (松野 丈夫)
- 26H00669 トポロジカル電子構造を有するアシンメトリ量子物質の量子振動による電子状態の研究 (菅原 仁)
- 26H00678 無機キラル超伝導体の不斉単結晶におけるスピン偏極超伝導特性の観測 (高阪 勇輔)
- 26H00647 相対論効果が顕著なアシンメトリ量子物質の開拓 (笹川 崇男)

ASYMMETRY
NewsLetter
#07
2026.09



編集後記

早いもので領域活動も3年半が経過し、残すところあと1年半となりました。ニュースレターも7冊目となり、編集後記の担当も2周目が回ってきました。1周目はちょうど3年前の今頃で、第1号での担当でした。そこでの編集後記に何を書いたのか見返してみると、「学術変革で行われる最新のプロジェクトや面白い発見について読者の皆様に広く情報を共有し、研究コミュニティをより一層活性化させる一助になるべく、このニュースレターを充実させていきたい」とあります。一丁前の目標を掲げており今見ると少し恥ずかしいですが、私(編集委員長)のパフォーマンスとは関係なく、領域内外の多くの方による毎回の素晴らしい記事と他の編集委員メンバーの手厚いサポートによって、この目標は自動的に達成されつつあるような気がします。本当にありがとうございます。残りの期間で少しずつでもお返ししていけるよう尽力しよう、と気持ちを新たにしました次第です。

(田端千紘)