



文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)  
1000テスラ超強磁場による  
化学的カタストロフィー  
非摂動磁場による化学結合の科学

Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)  
1000-Tesla Chemical Catastrophe  
Science of Chemical Bonding under  
Non-perturbative Magnetic Fields

# 予稿集／Abstracts

第5回領域会議／The 5<sup>th</sup> Area Meeting

2025年（令和7年） 6月20日（金）— 6月22日（日）

第1部 東北大学金属材料研究所／IMR, Tohoku Univ.

第2部 秋保温泉 佐勘／Akiu onsen Hotel Sakan



# Oral Presentations



学術変革領域研究(A) 23A201

1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学  
第5回領域会議 2025年6月20日(金) - 22日(日)

**Presentation time**

Oral : 15 min (12 min + 3 min for Q&A)

Short oral : 12 min (9 min + 3 min for Q&A)

**Venue : Lecture Hall (IMR, Tohoku Univ.)**

**June 20th (Friday)**

講演時間(min)	Session_P1_A	座長：永田 崇	研究項目 *
13:00	5 松田 康弘 (Yasuhiro H. Matsuda)	東大	A01 はじめに
13:05	12 木村尚次郎 (Shojiro Kimura)	東北大	A04 空間反転対称性を持たない常磁性体の非相反線二色性
13:17	12 若狭雅信 (Masanobu. Wakasa)	埼玉大	A04 光化学反応に対する強磁場効果
13:29	12 浜崎聖富 (Atom Hamasaki)	信州大	B02 小型パルス磁場装置の新規作成と in situ 光散乱の観測
13:41	12 北川裕一 (Yuichi Kitagawa)	北大	A04 希土類錯体の磁気キラル二色性に基づく光不斉分解反応
13:53	15 草本哲郎 (Tetsuro Kusamoto)	阪大	A04 有機ジラジカルの吸光特性の強磁場効果
14:08	15 福岡脩平 (Shuhei Fukuoka)	北大	B01 中性イオン性転移物質における分子挿入効果と磁場効果
14:23			

Break

講演時間(min)	Session_P1_B	座長：秋葉 和人	研究項目 *
14:50	15 栗原綾佑 (Ryousuke Kurihara)	東理科大	B01 鉄系超伝導体 Fe(Te,S)における構造不安定性と磁場中の電子-格子相互作用の決定
15:05	15 大和田謙二 (Kenji Ohwada)	QST	A01 放射光を用いたドメイン観察
15:20	15 塚田真也 (Shinya Tsukada)	島根大	A01 可搬型パルス磁石を用いた強誘電体の格子振動観測 (室温編)
15:35	15 平井大悟郎 (Daigorou Hirai)	名大	A01 分子軌道結晶およびスピンバイエルス系に対する磁場効果
15:50	12 片山尚幸 (Naoyuki Katayama)	名大	B01 RuP の強磁場下 EXAFS 測定
16:02	12 邱 柏霖 (Polin Chiu)	東大	(A01) 超強磁場下における誘電率測定技術の開発と BaTiO <sub>3</sub> への応用
16:14			

Break

講演時間(min)	Poster presentation
16:30	
18:00	

**June 21th (Saturday)**

講演時間(min)	Session_P1_C	座長：大池 広志	研究項目 *
9:00	15 池田暁彦 (Akihiko Ikeda)	電通大	A02 110 テスラ X 線回折-固体酸素 $\beta$ 相における異方的巨大磁歪
9:15	15 巖 正輝 (Masaki Gen)	東大	B01 GaNb <sub>4</sub> Se <sub>8</sub> における磁場誘起反強誘電-強誘電転移の検証
9:30	12 米澤 進吾 (Shingo Yonezawa)	京大	A02 パルス磁場下における磁気光学 Kerr 効果測定手法の進展
9:42	12 花咲徳亮 (Noriaki Hanasaki)	阪大	B01 原子変位を有するフラストレート格子系物質の強磁場効果
9:54	12 香取浩子 (Hiroko Katori)	東京農工大	B01 カイヤナイト構造 V <sub>2</sub> GeO <sub>5</sub> の磁性
10:06	12 高口 豊 (Yutaka Takaguchi)	富山大	B02 TMDs のペーサル面の物理修飾による光触媒活性の付与
10:18	15 三宅厚志 (Atsushi Miyake)	東北大	B01 PrSb <sub>2</sub> における磁場誘起磁化容易軸交換の温度依存性
10:33			

Break

講演時間(min)	Session_P1_D	座長：野原 実	研究項目 *
10:50	12 徳永将史 (Masashi Tokunaga)	東大	A03 超量子極限状態における絶縁化現象の探索
11:02	12 秋葉和人 (Kazuto Akiba)	岩手大	A03 圧力下・磁場中の黒リンにおける新奇電子相転移の探索
11:14	12 酒井英明 (Hideaki Sakai)	阪大	A03 ビスマス 2 次元層を持つ物質の格子歪みに対する磁場効果
11:26	12 瀬尾優太 (Yuta Seo)	東大	A03 パルス強磁場下におけるトンネルズベクトロスコピー
11:38	15 伏屋雄紀 (Yuki Fuseya)	神戸大	A03 超量子極限領域の理論的探索
11:53			

Lunch Break

講演時間(min)	Session_P1_E	座長：酒井 英明	研究項目 *
13:00	15 長田俊人 (Toshihito Osada)	東大	B01 有機層2次元 Dirac 電子系の3次元 Dirac 半金属への次元交差
13:15	15 山田林介 (Rinsuke Yamada)	東大	B01 量子極限における擬一次元強相関ディラック電子の熱電効果
13:30	15 中埜彰俊 (Akitoshi Nakano)	名大	B01 新奇熱電半金属 Ta <sub>2</sub> PdSe <sub>6</sub> の磁気輸送特性
13:45	15 樋口雅彦 (Masahiko Higuchi)	信州大	B01 「非摂動磁場を含んだ相対論的強束縛近似法」によるカタストロフィック現象の研究
14:00	ヒルシュベルガー マクシミリアン 12 (Maximilian Hirschberger)	東大	B01 Search for ideal Weyl semimetal state in 60 T pulsed field
14:12	12 打田正輝 (Masaki Uchida)	東京科学大	B01 面内異常ホール効果の研究進展
14:24	12 小島 慶太 (Keita Kojima)	東大	(B01) 立方晶 NbSe <sub>1</sub> の軌道無秩序絶縁体状態
14:36			

Move to Akiu (To be announced how to move to Akiu.)

Venue : Convention room (Hotel SAKAN at Akiu Onsen)

Session_P2_A: Special session		座長：松田 康弘		
18:00	40 牧島一夫 (Kazuo Makishima)	東大 (名誉教授)	B03	中性子星の超強磁場の起源を追う
	20 伏屋雄紀 (Yuki Fuseya)	神戸大	A03	中性子星の超強磁場の起源を尋ねる --- 物性物理からの試論
19:00	<i>Break</i>			
19:30	<i>Banquet</i>		<i>Poster award ceremony</i>	
21:30				

June 22nd (Sunday)

Session_P2_B		座長：野村 肇宏		
9:00	12 大池広志 (Hiroshi Oike)	NIMS	A02	強磁場クエンチ法による準安定超強磁場相の開拓
9:12	12 今城周作 (Shusaku Imajo)	東大	B01	超強磁場による融解現象の探索
9:24	15 井原慶彦 (Yoshihiko Ihara)	北大	B01	パルス磁場中 CW 型 NMR 測定のための高周波装置開発
9:39	15 諏訪秀麿 (Hidemaro Suwa)	東大	B01	複合スピン格子模型のダイナミクスシミュレーション
9:54	15 岡 隆史 (Takashi Oka)	東大	A06	動く音響格子中のディラック準粒子
10:09	12 那須譲治 (Joji Nasu)	東北大	A06	スピン非保存系に対するスピネルンスト効果の定式化
10:21	12 富田裕介 (Yusuke Tomita)	芝浦工大	A06	誘電体の磁場応答とホールング依存性
10:33	<i>Break</i>			
Session_P2_C		座長：池田 暁彦		
11:10	12 笠松秀輔 (Shusuke Kasamatsu)	山形大	A06	強磁場下結晶構造変化の第一原理解析
11:22	12 岩崎 龍太 (Ryuta Iwasaki)	東北大	(A06)	第一原理計算に基づいた多自由度モット絶縁体の有効理論とその磁場応答
11:34	12 稲田聡明 (Toshiaki Inada)	東大	A05	磁場と光の非線形相互作用による真空磁気複屈折効果の検証
11:46	15 坂和洋一 (Yoichi Sakawa)	阪大	A05	パワーレーザーを用いた実験宇宙物理学
12:01	15 中山 和之 (Kazuyuki Nakayama)	東大	A05	非線型光学過程による人工磁場の研究
12:16	10 TBA	講評		
12:26	5 松田 康弘 (Yasuhiro H. Matsuda)	東大	A01	おわりに
12:31				

\* ( ) つきは研究代表者、研究分担者 以外

## 空間反転対称性を持たない常磁性体の非相反線二色性

<sup>A</sup> 東北大金研

木村 尚次郎<sup>A</sup>、宮川 健吾<sup>A</sup>、淡路 智<sup>A</sup>、赤木 暢<sup>A</sup>

光との相互作用によって生じる物質の光学応答は、多彩な現象を誘起するとともに物質の電子状態を探る有用な手段となるため、古くから自然科学の対象となっている。さらに近年、光の振動電場と振動磁場との干渉を引き起こす光学的電気磁気(ME)効果のため生じる新たな光学現象が注目されている。本講演ではその一つである、空間反転対称性を持たない圧電点群  $D_{2d}$  に属する常磁性体に生じると期待される磁場誘起非相反線二色性の観測について述べる。点群  $D_{2d}$  に属する物質では、二次の ME 効果のため、次式に従って磁場誘起の電気分極  $\mathbf{P}_H$  が発生する。

$$\begin{pmatrix} P_{H,x} \\ P_{H,y} \end{pmatrix} = \tilde{\alpha} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \quad \tilde{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & \beta H_z \\ \beta H_z & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\beta$  は定数、 $x, y, z$  はそれぞれ結晶の  $[100], [010], [001]$  に対応している。(1)式は、物質に  $z$  方向の静磁場  $H_z$  を加えた状態で、それと平行または反平行に進行する  $x$  または  $y$  偏光を照射すると、光の振動磁場によってこれと直交する電気分極  $\mathbf{P}_H$  が発生することを示している。この  $\mathbf{P}_H$  と振動電場によって生じる分極  $\mathbf{P}_E$  とが干渉し互いに強め合うか、弱め合うかが偏光の  $90^\circ$  度回転によって変化するため、偏光回転により光吸収が変化する線二色性が発生する。さらに静磁場に対して光の進行方向を反転すると線二色性の現れ方が反転し、光吸収率の偏光方向に対する強弱が入れ替わる非相反応答が生じると期待される。磁場誘起非相反線二色性を観測するため、点群  $D_{2d}$  に属するオケルマナイト化合物  $\text{Sr}_2\text{SiCo}_2\text{O}_7$  の光学測定を可視半導体レーザーと光弾性変調器(PEM)、超伝導磁石を用い室温で行った。偏光子によって直線偏光にしたレーザー光の振動電場の方向を PEM によって直交した2方向に 100 kHz で変調して試料に照射し、試料からの透過光をロックイン検出することで線二色性を観測した。図1は、ロックイン検出した透過光の変調成分を、直流成分で規格化した線二色性強度の磁場依存性である。零磁場で生じたバックグラウンドを差し引いている。静磁場は結晶の  $[001]$  方向に加えている。直線偏光の向きが結晶の  $[100]$  方向の  $0^\circ$  では、磁場の増加とともにほぼ線形に線二色性強度が増大し磁場反転すると線二色性の符号も反転する。また試料を  $0^\circ$  から回転すると、一旦、二色性は消失し、 $45^\circ$  を過ぎると線二色性の現れ方が反転する。これらは、式(1)から期待される非相反線二色性の振る舞いと合致している。

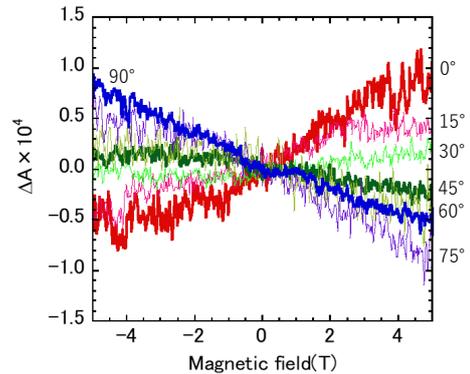


図1.  $\text{SrCo}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  の磁場誘起非相反線二色性

## 光化学反応に対する強磁場効果

A04 分担 埼玉大 若狭雅信

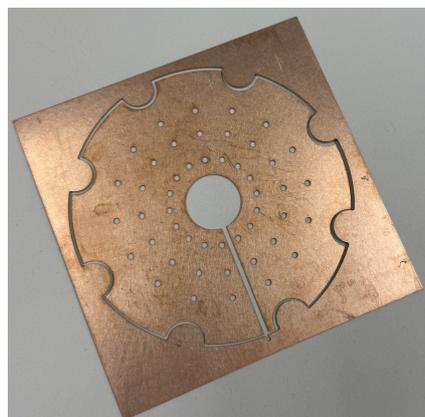
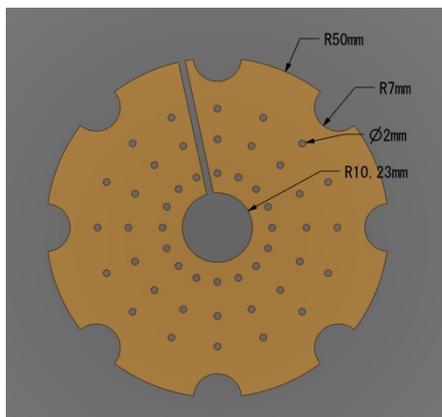
光化学反応における 1000 T 非摂動的磁場効果の発見を目指し、昨年度は、(1) 30 T 発光測定システムの開発と過渡吸収測定システムの改良復旧、(2) 可視励起ロドプシンの光化学反応に対する強磁場効果(共同研究)の予備的実験、(3) ビッター型パルスマグネットのビッター板の再設計、作成を行った。

30 T 発光測定システムの開発では、破壊型パルスマグネットを用いたシングレットフュージョン<sup>1,2</sup>の強磁場効果測定を視野に入れて、0-30 T シングルショット発光測定の装置開発を行った。ジフェニルヘキサトリエンおよびルブレンなどのシングレットフュージョン材料を用いて、発光強度の磁場依存性をシングルショットで測定した。

可視励起ロドプシンの過渡吸収の磁場効果については、過渡吸収が弱いため、吸収がより強く観測できるコアキシャル光学系での過渡吸収測定を行った。さらに、シングルショットによる測定を目指すことを諦め、10 T 超電導マグネットを用いた過渡吸収測定システムの開発を行なった。

研究室所有の 30 T パルスマグネットに関しては、(ビッター板の在庫がなくなったため)新たに銅銀板を作成し、ウォータージェット加工によりビッター板を作成した。作成したビッター板を用いてパルスマグネットを組み立て、過渡吸収測定システムを改良復旧させた。この装置を用いて、SDS ミセル溶液中でのベンゾフェノンの光化学反応の磁場効果を 1-30 T で測定した。

以上の詳細およびその後の展開については、領域会議の会場で述べる。



[1] M. Wakasa\*, M. Kaise, T. Yago, R. Katoh, Y. Wakikawa, T. Ikoma, *J. Phys. Chem. C*, 119, 25840-25844 (2015).

[2] T. Yago\*, K. Ishikawa, R. Katoh, M. Wakasa\*, *J. Phys. Chem. C*, 120, 27858-27870 (2016).

## 小型パルス磁場装置の新規作成と *in situ* 光散乱の観測

信州大理 浜崎亜富

ソフトマテリアルや生体関連の物質では、自己組織化プロセスおよびそれによって構築された構造体は非常に重要である。このような化学結合によらない弱い相互作用により構築される大きな構造体を扱う分野は『超分子化学』として知られる。自己組織化の駆動力として知られるのが分子間力であり、細かくはファンデルワールス力や水素結合などがある。自己組織化する物質群をスイッチもしくはコントロールすることは簡単ではないが、これを分子の反磁性磁化率の異方性に起因した『磁気配向』で実現したい。親水基と疎水基からなる両親媒性分子は、長鎖炭化水素に由来する分子間力で集合体をつくる。分子には磁化容易軸と磁化困難軸があり、長鎖炭化水素のように構造異方性の大きい分子では、それぞれの磁化率の差、すなわち反磁性磁化率の異方性が大きくなる。よって、分子が磁場に安定な方向に向くトルクが発生して構造体が不安定化し、極端な場合には破壊につながる。これまでに、細胞膜モデルとしても知られる Dipalmitoylphosphatidylcholine (DPPC) の球状二分子膜；リポソームに 20 テスラのパルス磁場を 5 分間隔で断続的に 40 回印加すると、わずかではあるが粒径分布が小さくなる現象が観測された。ベシクルの変形は磁気配向エネルギーと弾性エネルギーの関係で決まると予想され、磁場印加の瞬間には分裂に至らないまでも変形はしている可能性がある。そこで、パルス磁場印加時のベシクル形状の変化を明らかにするため、40 テスラを目標にした新しいパルス強磁場発生装置と *in-situ* で光散乱強度の時間変化を追跡するシステムの構築を進めている。

新しいコンデンサバンクシステムの機器の配置や結線は完了したが、要旨提出時点では制御の配線の問題により供用に至っていない。そこで従来のコンデンサバンク (10 mF, パルス幅 3 ms) でベシクル溶液に磁場を印加する実験を行った。Fig. 1 のように直径 1 mm のキャピラリーの中にベシクルを含む水溶液を入れ、両サイドから光ファイバーを差し込んで、間隔が 2 mm のところで固定し、コイルにセットして溶液の濁度を測定した。光源は 532 nm の LD レーザーを、検出器はフォトダイオードを増幅なしで用いた。Fig.2 のように、約 18 T パルス磁場印加 (充電電圧 600 V) から若干遅れて光強度がわずかに低下し、徐々に元の強度に戻る傾向がみられた。今後、検出器周りの最適化を図り S/N の向上により波形の明瞭化を予定しているほか、新しいコンデンサバンクの状況についても可能であれば会議当日に新たな進捗状況を報告する。

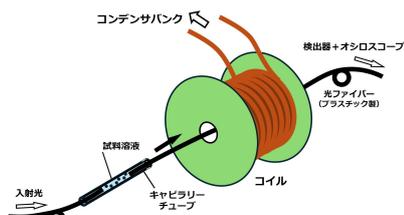


Fig. 1 磁場による粒径の変化 (模式図)

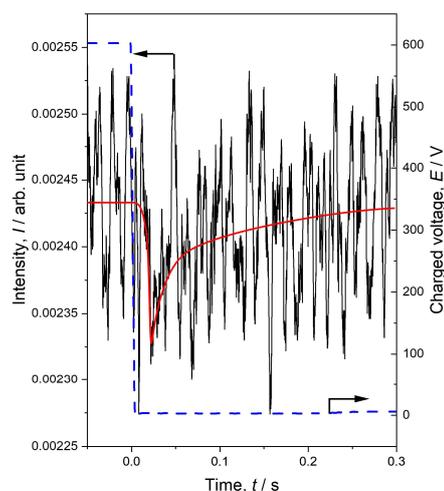


Fig. 2 ベシクル溶液の濁度の変化 (黒線：光強度、青線：コンデンサ電圧)

## 希土類錯体の磁気キラル二色性に基づく光不斉分解反応

<sup>A</sup> 北海道大学、<sup>B</sup> 東北大学

北川 裕一<sup>A</sup>、板谷 康佑<sup>B</sup>、木村 尚次郎<sup>B</sup>

磁気キラル二色性(MChD)は外部磁場の方向に依存して、キラル分子内の電子遷移確率(吸収・発光強度)が変化する現象である[1]。この現象はキラリティーに依存するため、光不斉反応への応用が期待されている。しかし、MChD は非常に弱い効果であり、光不斉反応の実証は一例のみであった[2]。本研究では磁場を利用した光反応化学の発展を目的とし、室温条件において大きな MChD を示す物質創成および MChD 効果に基づく光不斉反応を検討した[3]。

キラル希土類錯体の 4f-4f 遷移は MChD 強度式を構成する種々の遷移モーメント値が大きい。本研究では、遷移電気・遷移磁気双極子モーメントの大きさ・方向が近いことが予想されるテトラキス型キラル Eu(III)錯体を設計した(図 1: (+)-Eu、(-)-Eu)。本錯体を合成し、発光遷移( $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ )の MChD 測定を行った(室温、15 テスラ)。この際、錯体の分解による影響を防ぐため、磁場印加方向の順序を交互に変えながら信号積算を行った。さらに本錯体の吸収遷移( $^7F_1 \rightarrow ^5D_0$ )の MChD 効果に基づく光不斉分解特性を評価した。

トルエンに分散させた(+)-Eu と(-)-Eu (2 mM)の発光・MChD スペクトルを Fig. 3 に示す。発光スペクトルの 584 nm と 594 nm 付近に信号が観測された。これらの信号は  $^5D_0$  準位から結晶場分裂した  $^7F_1$  準位への遷移に由来する。同波長域に MChD 信号も観測され、その符号はエナンチオマー間で反転していることが確認された。MChD スペクトルの 584 nm で観測された信号の非対称因子 ( $|g_{MChD}|=0.23$ )は報告されてきた室温での紫外-可視領域における MChD の中で最高値となる。次に MChD を利用した本錯体の光不斉分解反応を検討した。

(+)-Eu と(-)-Eu を等量溶解させたクロロホルム溶液(10 mM)に外部磁場(15 テスラ)を印加しながら励起光を 24 時間照射した(励起波長幅：572 nm～591 nm)。反応溶液の円偏光二色性(CD)スペクトルを測定したところ、光照射中に印可した磁場方向に依存して異なる CD 信号が誘起された。本結果は MChD 効果に基づく光不斉分解反応が進行していることを示唆している。

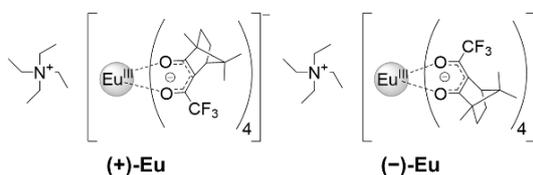


図 1. キラル Eu 錯体の構造

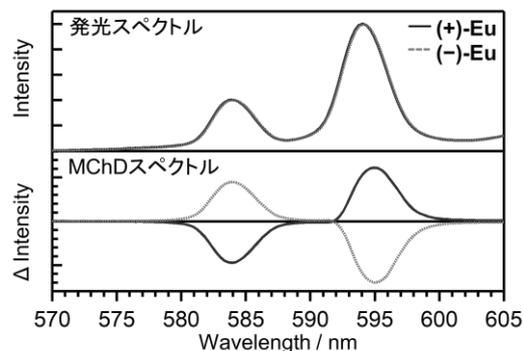


図 2. 発光・MChD スペクトル

【参考文献】 [1] G. L. J. A. Rikken, E. Raupach, *Nature*, **1997**, *390*, 493; [2] G. L. J. A. Rikken, E. Raupach, *Nature*, **2000**, *405*, 932; [3] 板谷 康佑, 総合化学院修士論文, 2024.

## 有機ジラジカルの吸光特性の強磁場効果

阪大院基礎工

草本 哲郎

我々は、1000 T という超強磁場により、分子構造、集積構造（結晶構造）、スピン状態や電子状態、電子遷移等のダイナミクスが変調を受け得るような開殻物質の創製を基に、超強磁場下で新たに発現する化学反応や光機能を創出、理解することを目指して研究を進めている。

ラジカルは不対電子を一つ有する基底二重項開殻分子であり、基底一重項である通常の閉殻分子とは異なる光物性や励起状態ダイナミクスを示す<sup>1</sup>。我々はこれまでに、ラジカルが集積した状態では、ラジカル間に働く磁気相互作用や電荷移動相互作用に基づき、物質のスピン状態と光機能が相関した機能＝スピン相関光機能が発現し得ることを見出してきた。例として我々は、PMMA ポリマー担体中に単分子分散された非ケクレ型ジラジカル（ジラジカルは分子内に二つの不対電子を有する分子）が 4.2 K において磁場応答発光を示すこと、またこの物性の発現が物質の基底状態におけるスピン自由度ならびにスピン状態依存的なダイナミクスに起因することを明らかにしてきた<sup>2,3</sup>。

最近当研究室にて開発された分子である DR3 は、比較的大きな分子内反強磁性作用 ( $2J/k_B \approx -150$  K) を有するケクレ型ジラジカルである。DR3 の溶液試料の各種分光測定ならびに DR3 を分散させたポリマーフィルム試料 (DR3<sub>film</sub>) の吸収スペクトルの温度依存性調査の結果、DR3 がスピン状態に依存した吸光特性および発光特性の両方を示す分子であることが強く示唆された。これらの結果を基に、物性研にて横型一巻きコイル法に基づく破壊型マグネットを用いて、パルス磁場中における DR3<sub>film</sub> の吸収スペクトル変化を、300, 135, 85, 42, 22 K の各温度にて測定した。その結果、どの温度においても、 $\lambda = 650$  nm 付近に見られる吸収極大の吸光度が印加磁場の増強に伴い減少することが明らかとなった。一例を図 1 に示す。これは我々の知る限りジラジカルの吸光特性に対する磁場効果の初観測である。当日は DR3 に関するこれらの研究結果について報告する。

パルス磁場中における測定実験を進めるにあたり、松田康弘先生ならびに林浩章先生に大変お世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。

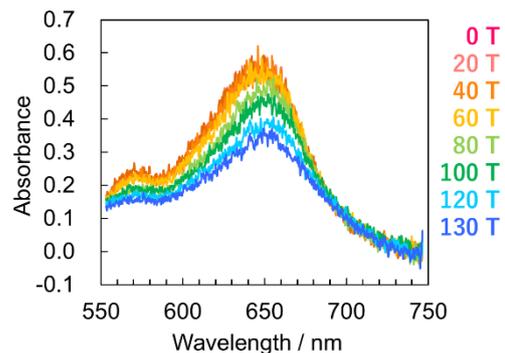


図 1. DR3<sub>film</sub> の 22 K における吸収スペクトルの磁場依存性。

[1] Mizuno, A.; Matsuoka, R.; Mibu, T.; Kusamoto, T. *Chem. Rev.* **2024**, *124*, 1034.

[2] Matsuoka, R.; Kimura, S.; Miura, T.; Ikoma, T.; Kusamoto, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 13615.

[3] Mizuno, A.; Matsuoka, R.; Kimura, S.; Ochiai, K.; Kusamoto, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 18470.

## 中性イオン性転移物質における分子挿入効果と磁場効果

北大院理

福岡 脩平

中性イオン性転移は結晶を構成するドナー性分子からアクセプター性分子への電荷移動とパイエルス不安定性に起因する格子変調（二量体化）が同時に生じる相転移現象である。中性相では結晶を構成する分子は閉殻構造であるため非磁性であるが、電荷移動が起こると、分子は開殻構造となりスピン自由度が顕在化する。故に、強磁場印加により電荷移動に必要なエネルギーに匹敵する Zeeman エネルギーの利得が得られれば、磁場による中性イオン性転移が期待できる。また、イオン性相において、ドナー性分子とアクセプター性分子は二量体を形成し非磁性化しているが、強磁場により二量体を開裂することが出来れば、イオン性相内での磁場誘起相転移が期待できる。本研究は、中性イオン性転移物質を対象として、磁場による電荷移動、二量体の開裂を誘起し、結晶の結合様式、電子状態が変化する過程で現れる新物質相、新現象の探索を目指している。

中性イオン性転移を示す典型物質である TTF-CA に対して、一巻きコイル法とストリークカメラを用いた強磁場実験を行った結果、中性イオン性転移温度直下 ( $T \sim 85$  K)、およそ 70 T 以上で紫外可視光領域での吸光度に変化が現れることを前回領域会議にて報告した。しかし、スペクトル変化が見られたのは、85 K での一点のみであり、そのほかの温度域では、およそ 150 T までの範囲で変化が見られなかった。相転移温度から離れると必要となる磁場が急激に上昇することを意味しており、さらなる探索にはより低磁場領域で磁場応答を示す物質の必要性を示している。そこで今回の実験では、TTF-CA と比べて、中性状態とイオン性状態がより拮抗しているとされる TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA に対して磁場中ストリーク測定を行った。TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA は 220 K で中性イオン性転移を示すことが知られている。図 1 (a) は中性イオン性転移温度直下 215 K で行ったストリーク測定の結果を示している。650 nm 付近で磁場による吸光度の変化が観測された。TTF-CA で磁場変化が観測された波長領域と一致しており、同じ状態変化を観測したものと思われる。吸光度の変化はおよそ 40 T 付近から観測されており(図 1 (b))、必要な磁場の低減に成功している。講演では両物質の結果を比較し、その起源について議論したい。

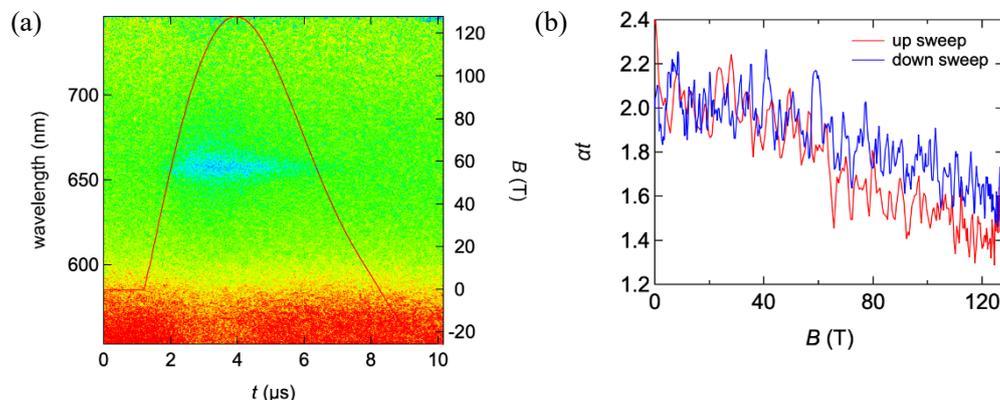


図 1. (a)  $T = 215$  K でのスペクトルの磁場依存性。 (b) 650 nm での吸光度の磁場依存性。

## 鉄系超伝導体 Fe(Te,S)における構造不安定性と 磁場中の電子-格子相互作用の決定

<sup>A</sup>東理大創域理工、<sup>B</sup>東大物性研

栗原 綾佑<sup>A</sup>, 袴田 怜志<sup>A</sup>, 近藤 雅起<sup>B</sup>, 徳永 将史<sup>B</sup>, 矢口 宏<sup>A</sup>

FeTe は室温で空間群  $P4/nmm$  ( $D_{4h}^7$ , No. 129)の正方晶であり, 60 K 程度で bicollinear な反強磁性と斜方晶  $P2_1/m$  ( $C_{2h}^2$ , No. 11)への同時転移を示す<sup>[1]</sup>. これら相転移は Te 元素から S 元素への置換により抑制される量子臨界性を示し, S 置換量が 5%程度以上で超伝導が発現する<sup>[2]</sup>. このような相転移の量子臨界性は鉄系超伝導体に共通の現象であるため, Fe(Te, S)においても Fe の 3d 電子のマルチバンドに由来するネマティック自由度や磁気自由度の寄与が重要であると考えられる. これまでの研究から, Fe(Te, S)の構造相転移が磁場によって顕著に抑制されることや<sup>[3]</sup>, スピンネマティック (電子-格子結合による bicollinear な磁気構造の実現が提案されたことから<sup>[4]</sup>, 磁気自由度が主導となり構造相転移や超伝導の発現に寄与する可能性がある.

そこで本研究では, 構造相転移の秩序変数を調べその自由度をもたらす量子状態を決定することを目的とし, 超音波を用いて構造相転移点近傍におけるスピンネマティック自由度の応答や磁場中の電子-格子結合定数を調べた. 超音波は構造相転移の秩序変数と結合する格子歪みを結晶中に印加でき, その応答を弾性定数の低温に向かっての軟化 (ソフト化) として検出できる. また, ランダウの現象論の範囲でソフト化を解析することで, 秩序変数と歪みとの結合定数を決定できるといった特徴を持つ. この超音波と物性研究所の非破壊パルスマグネットを組み合わせ, 0 T から 60 T までの超音波信号の磁場依存性を測定することで, 強磁場中の弾性定数の温度依存性を計算した.

図 1 に, FeTe における横波弾性定数  $C_{66}$  の温度依存性を示す.  $C_{66}$  は 200 K 以上から 60 K の構造相転移温度に向かってソフトモード挙動を示した. また,  $C_{66}$  のソフト化はランダウ理論に基づく  $C_{66}(T) = C_{66}^0 [1 - \Delta/(T - \Theta)]$  でよくフィットできた. これより,  $C_{66}$  を測定する際に結晶中に誘起する既約表現  $B_{2g}$  の歪み  $\epsilon_{xy}$  と, 同じく  $B_{2g}$  に属する秩序変数が結合した構造相転移が生じることを明らかにした. また, これらの結合定数は 1000 K 程度であり, 理論で予想された値とおおよそ一致する結果となった.

講演では, 磁場中の弾性定数の温度変化や磁場中の結合定数を報告し, 可能な量子状態を議論する.

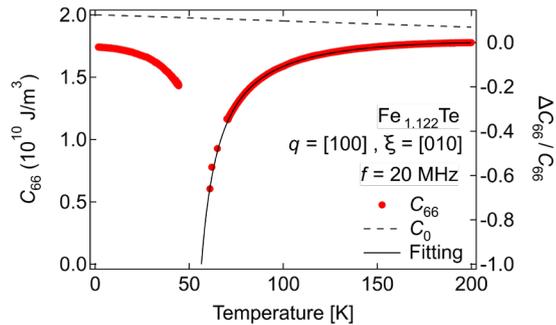


図 1. FeTe の面内横波弾性定数  $C_{66}$  の温度変化と Landau 理論に基づいたソフト化のフィッティング結果. 測定周波数は 20 MHz,  $q$  と  $\xi$  はそれぞれ超音波の伝搬方向と変位方向を表す.

[1] A. Martinelli *et al.*, Phys. Rev. B 81, 094115 (2010). [2] C. Fong *et al.*, J. Phys.: Cond. Matter. 25, 385701 (2013). [3] M. Tokunaga *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 063703 (2013). [4] C. B. Bishop *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 117201 (2016).

## 放射光を用いたドメイン観察

量子科学技術研究開発機構 (QST) 大和田謙二

A01 における研究では、分子軌道 (化学結合) の視点から、超強磁場中に新たに発現する固体結晶構造の探索・解明を目指している。特に、共有結合、イオン結合、水素結合といった基本的な結合形態に注目し、強磁場による分子軌道の変化 (カタストロフィー) を電子分布に基づく微視的描像から理解することで、化学結合への非摂動的な磁場効果の量子力学的な側面を明らかにしようとしている。

対象とする物質系には、これまで磁場効果の研究がほとんど進んでいなかった BaTiO<sub>3</sub> などの強誘電体や、VO<sub>2</sub> などの分子軌道結晶が含まれており、最大 1000 テスラの超強磁場下での結晶構造相転移の探索に取り組んでいる。これまでに、100 テスラ級までの磁場領域において、強誘電体単結晶 BaTiO<sub>3</sub> および関連物質に対する基礎的な磁場効果の検討が進められてきた。あわせて、新規材料探索や磁場下分光実験に向けた光学系、強磁場発生用マグネットの開発も推進しており、1000 テスラ実験に向けた基盤整備が着実に進行している。

強誘電体における分極ドメインの存在は物性の本質に関わる重要な要素であるが、外場印加によるドメイン再配列が現象解釈を難しくする一因となっている。この点に関して、邱 (Chiu)、松田らにより、BaTiO<sub>3</sub> において磁場変化に伴う電場誘起ドメイン再配列、いわゆる "B-dot effect" の存在が示唆された [1]。さらに、高磁場領域で発現する "Strong-B effect" との関連性も、今後の興味深い課題となっている。

本講演では、これらの現象理解に向けた取り組みの一環として、回折トポグラフィ技術を紹介する。回折ピークのスプリットに着目することで、90 度ドメインをはじめとする分極パターンを非破壊的に可視化できることを示す。この手法は、将来的に磁場下でのドメインダイナミクス観察にも応用可能であり、さらなる展開が期待される。最近、強磁場印加後の試料に対する回折トポグラフィ実験を実施し、現在、得られたデータの解析を進めている。

また、共有結合への磁場効果をより深く理解するため、BaTiO<sub>3</sub> に代表される d<sup>0</sup> 酸化物ペロブスカイトにおける「サイズ効果」にも注目している。ナノ～サブミクロン領域では、粒径の縮小に伴い結合性が共有結合性からイオン結合性へと変化し、それに伴いドメイン構造や物性もバルク単結晶とは異なる挙動を示すことが報告されつつある [3]。こうしたサイズ依存性を踏まえた磁場効果の探索は、新たな相転移機構の理解にもつながる可能性がある。さらに、これまで主に単結晶試料を対象としてきた磁場印加実験を、粉末試料へと拡張する試みも進めている。粉末試料特有の課題に対応するため、試料調整方法の最適化にも取り組んでおり、今後、ナノ結晶系における磁場応答の解明に向けた基盤構築をさらに進めていく予定である。

[1] P. Chiu, K. O., Y. M. Matsuda *et al.*, JCFMA-16, Shimane.

[2] K. Ohwada and A. Machida, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 09SP15 (2024).

[3] H. Ohsime, K. O. *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SM1022 (2023).

## 可搬型パルス磁石を用いた強誘電体の格子振動観測 (室温編)

島根大学教育学部

塚田真也

ペロブスカイト型強誘電体における磁場応答は、これまでに 20 テスラ以下の磁場環境でいくつか報告されているものの、その真偽やメカニズムは依然として明らかでない。たとえば、 $\text{BaTiO}_3$  では誘電率測定により磁場印加による相転移温度の上昇が報告されている [Wagner & Bauerle, Phys. Lett. (1981)]。一方、同様の構造を持つ  $\text{SrTiO}_3$  では中性子非弾性散乱により、フォノンへの磁場の影響が確認されなかったとの報告もある [Comes, *et al.*, Phys. Rev. B (1981)]。このように、物質や測定プローブごとの応答差から、磁場効果の本質的理解には多面的な検証が求められている。

この課題に対し、非破壊・非接触で格子振動や構造緩和を捉える光散乱測定、特にラマン散乱の磁場下測定は有効な手法となる。本研究では、最終的に 1000 テスラ級磁場下での物性計測を見据え、20 テスラ・パルス幅 15 ミリ秒の磁場中で動作するラマン散乱測定装置の開発を進めている。

図 1 (左) に、A02 班 (池田研) 提供の可搬型パルス磁石を用いて室温下で測定した  $\text{BaTiO}_3$  粉末のラマンスペクトルの時間依存性を示す。相転移と関係する準弾性光散乱が良好に観測され、図 1 (右) の解析結果からは、室温 (相転移温度：約 393 K から離れた条件) では磁場による明確な変化は見られていない。昨年度末に温度可変機構を実装したことで、今後は相転移温度近傍での応答の詳細観測が可能になると期待される。さらに測定対象を他の物質系へ拡張し、20 テスラまでの格子振動の情報を手がかりに、磁場に関わる多様な物性の理解を目指す。

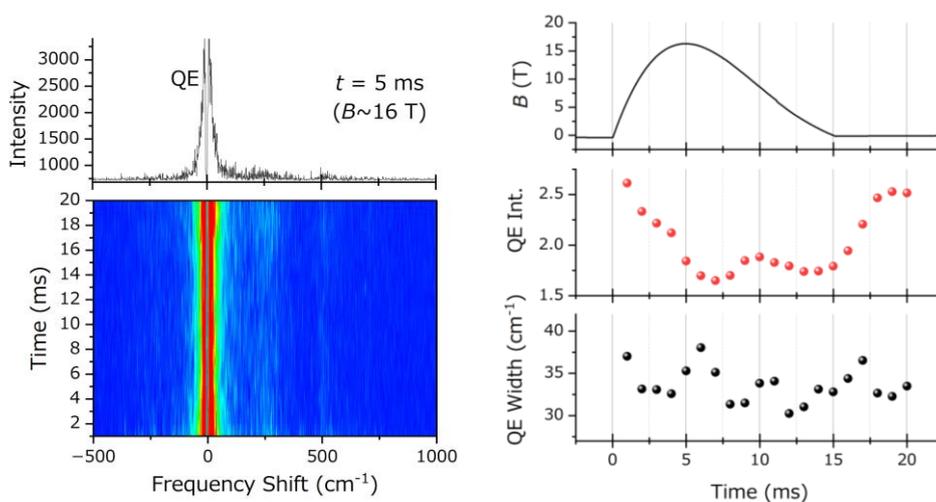


図 1 左：可搬型パルス磁石 (20 テスラ, パルス幅 15 ミリ秒) を用いて室温下で測定した  $\text{BaTiO}_3$  粉末のラマンスペクトルの時間依存性。右：対応する磁場と準弾性光散乱 (QE) の強度および半値全幅の時間変化。

## 分子軌道結晶およびスピンパイエルス系に対する磁場効果

<sup>A</sup>名大工、<sup>B</sup>東大物性研

平井 大悟郎<sup>A</sup>、井口 寛太<sup>A</sup>、竹中 康司<sup>A</sup>、  
石井 裕人<sup>B</sup>、林 浩章<sup>B</sup>、彭 詩悦<sup>B</sup>、松田 康弘<sup>B</sup>

水素や酸素が共有結合によって分子を形成するように、無機物質中でも遷移金属が共有結合に類似した強固な結合を形成することがある。これらは「分子軌道結晶」として知られ [1]、二酸化バナジウム ( $\text{VO}_2$ ) をはじめとするいくつかの物質で、分子軌道結晶の形成とそれに伴う金属-絶縁体転移が観測されている。たとえば  $\text{VO}_2$  では、2つの電子が反平行スピンの対を形成してバナジウム二量体を作り非磁性絶縁体となるが、500 T という超強磁場を印加すると、結合性軌道を構成していた電子のスピンの強制的に平行となり、結晶内の分子軌道が破壊される (図 a) [2]。本研究では、このような磁場による分子軌道結晶の破壊に着目し、磁場中でのみ現れる新たな結晶構造の発見を目指して、分子軌道結晶を形成する様々な物質群に対して磁場効果を検証している。

本発表では、2つの電子を共有してタングステン原子が正三角形の三量体を形成する  $\text{CsW}_2\text{O}_6$  [3] に対し、100 T 以上の超強磁場中でこれまで行ってきた磁歪測定に加え、新たに行った伝導度測定の結果について報告する。

さらに最近では、分子軌道結晶の類似系としてスピンパイエルス転移に着目し、同様の磁場効果を調べている。スピンパイエルス転移とは、反強磁性的に結合した2つのスピンの格子変形とともに二量体を形成し、非磁性絶縁体状態に転移する現象である (図 b)。  $\text{CuGeO}_3$  は、この転移を示す無機化合物として最初に発見された物質であり [4]、これまでに多くの研究が行われてきた。  $\text{CuGeO}_3$  の非磁性状態に磁場を印加すると、銅イオンの二量体が一部破壊されるが、破壊は一斉に起こるのではなく、磁場強度に応じて徐々に進行する。この二量体破壊が始まる付近、約 13 T の磁場中では、十数ユニットセルの間隔をもつ「ソリトン格子」と呼ばれる周期構造が出現する [5]。我々は現在、200 T までの磁歪測定により、すべての二量体が破壊されスピンの飽和するまでの過程を追跡し、その途中で現れる磁場誘起相の検出を試みている。本発表では、このスピンパイエルス系に対する高磁場実験の進捗についても報告する。

- [1] Z. Hiroi, *Prog. Solid State Chem.* **43** 47-69 (2015).
- [2] Y. H. Matsuda *et al.*, *Nat. Commun.* **11** 3591 (2020).
- [3] Y. Okamoto *et al.*, *Nat. Commun.* **11** 3144 (2020).
- [4] M. Hase *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 3651 (1993).
- [5] V. Kiryukhin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 4608 (1996).

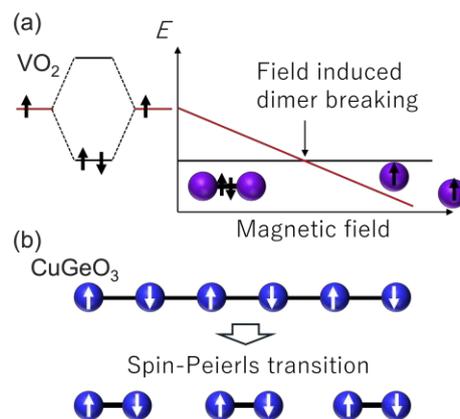


図. (a)  $\text{VO}_2$  における磁場誘起相転移と (b)  $\text{CuGeO}_3$  におけるスピンパイエルス転移の概念図。

## RuP の強磁場下 EXAFS 測定

<sup>A</sup> 名古屋大学大学院工学研究科

片山 尚幸 <sup>A</sup>

無機結晶において、低温で構成元素が凝集して形成される量体化分子の化学結合を、超高磁場を用いて切断する試みは、非摂動磁場効果を探求する本研究領域における主要なトピックの一つである。一方で、我々はこうした化学結合が形成される直前の高温相に着目している。低温相で生じていた量体化分子は完全に消失しており、一見すると、対称性の高いレギュラーな格子が復活している。しかし、実際には量体化分子が長距離の秩序を持たず、短距離秩序として高温相で生き残っていることが複数の系で見いだされている。高温相で生き残ったこれらの分子は、室温程度の熱エネルギーで現れては消える動的な状態を形成していると考えられる。高温で現れる量体化分子の揺らいだ状態であれば、低温における量体化分子の結晶状態を破壊するほどの超高磁場を用いずとも、比較的低い磁場で化学結合を抑制することができるのではないだろうか？

こうしたアイデアに基づいて、本研究では高温で短距離秩序を形成する RuP に着目した。RuP は 270 K で非磁性絶縁体転移を生じ、低温では構成元素の Ru が図 1 (b) に示すような三量体分子を形成する[1]。高温でこの三量体分子は完全に消失し、Ru は図 1 (a) に示すように高い対称性をもつ三角梯子構造を形成すると考えられてきた。ところが、我々を含めた複数のグループによって高温相局所構造の調査が行われ、高温相では低温で現れる三量体分子が短距離秩序として生き残っていることが明らかになっている。この短距離秩序を磁場で抑制できるならば、その変化を放射光 X 線で捉えることができるのではないかと考え、SPRING-8 BL39XU で強磁場下 EXAFS 測定を行った。

Ru の K 吸収端近傍の EXAFS 領域における複数のエネルギー点において、試料の吸光度のパルス磁場応答を測定した。多くのエネルギー点において、有意な吸光度の磁場応答は観測されなかったが、22.34 keV やその近傍の特定のエネルギー領域においてのみ、図 2 に示すような顕著な磁場応答が観測された。実験は一つのエネルギー領域あたり 8 回程度行っており、図 2 の結果は高い再現性が得られていることも重要である。この磁場応答が示す物理的な意味については現在検討中であるが、短距離秩序状態にある分子結合の切断を示していれば非常に興味深いと考えている。

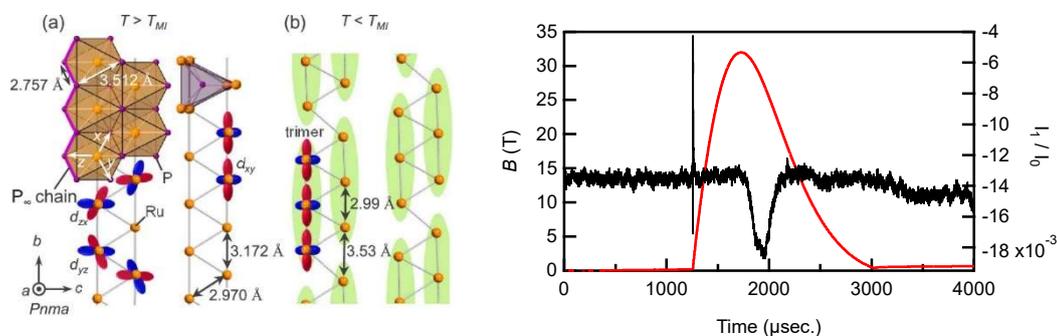


図 1 RuP の相転移近傍での格子構造[1] 図 2 22.34 keV における吸光度測定

[1] D. Hirai, N. Katayama *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **144** (2022) 17857.

超強磁場下における誘電率測定技術の開発と BaTiO<sub>3</sub> への応用

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup>QST、<sup>C</sup> 島根大、<sup>D</sup> 静岡大、<sup>E</sup> 芝浦工大

邱 柏霖<sup>A</sup>、石井 裕人<sup>A</sup>、大和田 謙二<sup>B</sup>、塚田 真也<sup>C</sup>、野村 肇宏<sup>D</sup>、  
 富田 裕介<sup>E</sup>、松田 康弘<sup>A</sup>

We developed a radio frequency (RF) high-speed dielectric constant measurement system compatible with single-turn coil (STC) system [1]. Initially, using commercially available capacitors, we verified that the system possesses high sensitivity to variations in capacitance. Subsequently, using a single-crystal BaTiO<sub>3</sub> sample, we confirmed that the system can accurately monitor the temperature dependence of the dielectric constant, with the obtained results being consistent with previously reported literature.

Based on these findings, we controlled the polarization direction and temperature conditions of the BTO sample, and applied a 100 T pulsed magnetic field from different directions. As a result, in the region where the paraelectric and ferroelectric phases coexist, a change in the dielectric constant was observed when the magnetic field  $B$  was applied parallel to the polarization direction  $P$ .

This phenomenon may be attributed to the enhancement of  $d-p$  orbital hybridization by the magnetic field, which alters the covalency of the Ti-O bonds [2]. Alternatively, it could be due to the tunneling effect between adjacent potential surfaces (APES) within the TiO<sub>6</sub> octahedral clusters induced by the 100 T magnetic field [3]. However, further investigations are necessary to verify these interpretations.

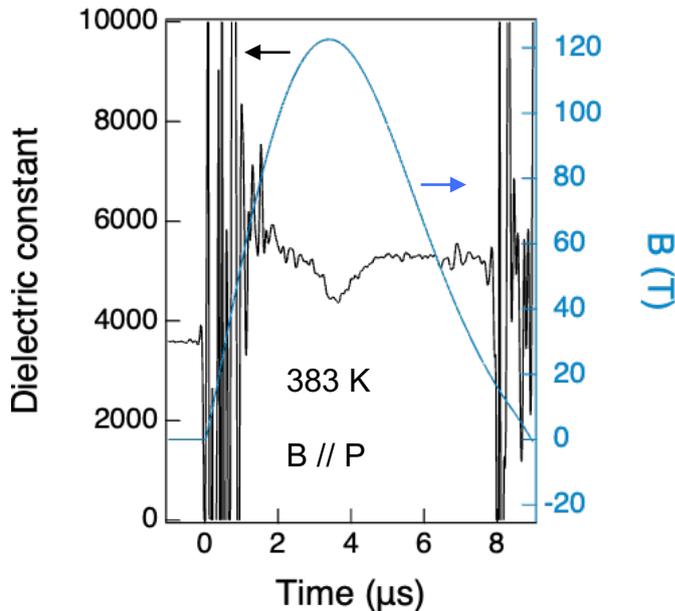


図 1 . The time dependence of the dielectric constant and that of

[1] P. Chiu *et al.*, *J. Appl. Phys.* **137**, 155903 (2025).  
 [2] I. B. Bersuker *et al.*, *Condens. Matter*, **5**(4), 68, (2020).  
 [3] Isaac B. Bersuke *et al.*, *Magnetochemistry* **8**, 9 (2022).

## 110 テスラ X 線回折：固体酸素 $\beta$ 相における異方的巨大磁歪

<sup>A</sup> 電通大、<sup>B</sup> 理研 SACLA、<sup>C</sup> 東大物性研、<sup>D</sup> 理研 CEMS、<sup>E</sup> 東北大金研、<sup>F</sup> 兵庫県立大、<sup>G</sup> 山形大、<sup>H</sup> 静岡大、<sup>I</sup> JASRI

池田暁彦<sup>A</sup>、久保田裕也<sup>B</sup>、石井悠人<sup>C</sup>、周旭光<sup>C</sup>、彭詩悦<sup>C</sup>、林浩章<sup>C</sup>、松田康弘<sup>C</sup>、野田孝祐<sup>A</sup>、田中智也<sup>A</sup>、新堀琴美<sup>A</sup>、関健汰<sup>A</sup>、小林秀彰<sup>A</sup>、Dilip Bhoi<sup>A</sup>、巖正輝<sup>C,D</sup>、Kamini Gautam<sup>D</sup>、赤木暢<sup>E</sup>、河智史郎<sup>F</sup>、笠松秀輔<sup>G</sup>、野村肇宏<sup>H</sup>、犬伏雄一<sup>B,I</sup>、矢橋牧名<sup>B,I</sup>

酸素分子はスピン 1 をもつ分子磁石である。分子軸をそろえて並べた際に分子間には最も強い反強磁性的交換相互作用が働く。凝縮した際には静電的分子間力と磁気相互作用が競合し、特殊な結晶・磁気構造が発現する。常圧低温では液体相と、3 種の固相  $\gamma$  相、 $\beta$  相、 $\alpha$  相を発現する。液体、 $\gamma$  相、 $\beta$  相では反強磁性的の短距離相関が生じ、 $\alpha$  相では長距離のネールオーダーが生じる。このとき分子軸はコリニアとなるが、この構造は類縁の  $N_2$  分子の多彩な圧力温度相図を見ても[1]、どこにも見られない特殊な構造である。ここで 120 テスラ以上の超強磁場を  $\beta$  相、 $\alpha$  相に印加することで、一次相転移が起こり超強磁場  $\theta$  相が発現することが、野村らの磁化・磁気光学計測によって確かめられた[1]。超強磁場  $\theta$  相ではスピンの強制強磁性状態になり反強磁性相関が破壊されることから、反強磁性相関を最大化するために特別に実現している分子軸コリニアの結晶構造は破壊され、全く新しい超強磁場結晶構造が発現することが期待できる。

我々は固体酸素  $\theta$  相の超強磁場結晶構造を明らかにすべく、X 線自由電子レーザー (XFEL) と破壊型 100 テスラ超強磁場パルスを組み合わせる実験開発に取り組んできた。PINK-01 によるポータブル 77 テスラ発生[3]と PINK-2 によるポータブル 110 テスラ発生に成功し、特殊クライオスタットを利用して、酸素  $\beta$  相の 110 テスラ粉末 X 線回折に成功した[4]。  $\theta$  相転移直前で  $\beta$  相の結晶構造を観測し、1%もの異方的変形を発見した。

[1] M. Kirsz, et al., Phys. Rev. B **110**, 184107 (2024)

[2] T. Nomura et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 247201 (2014), Phys. Rev. B **92**, 064109, (2015) *ibid* **96**, 054439, (2017), Oxygen **2**, 152 (2022)

[3] A. Ikeda et al., Appl. Phys. Lett. **120**, 142403 (2022)

[4] A. Ikeda et al., arXiv:2504.10085

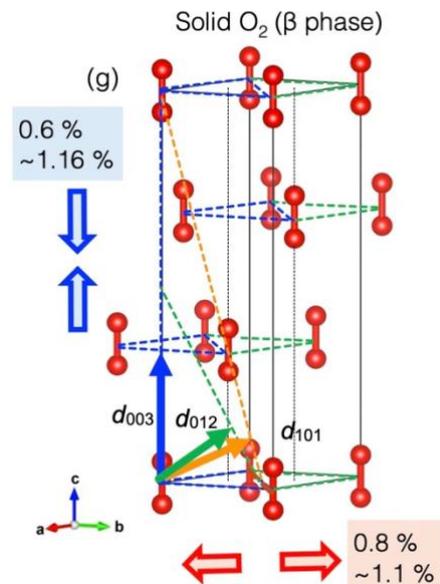


図 1. 固体酸素  $\beta$  相の 110 テスラにおける格子変形の模式図

## GaNb<sub>4</sub>Se<sub>8</sub> における磁場誘起反強誘電-強誘電転移の検証

東大物性研 巖 正輝

物質が示す誘電秩序には、電気双極子モーメントが一方向に揃った強誘電以外にも、局所的な電気双極子モーメントが系全体で打ち消し合った反強誘電が知られている。どちらの秩序が安定になるかは結晶の局所構造のポテンシャルと電気双極子間のクーロンエネルギーの競合によって決定され、それらが絶妙なバランスになっている場合に両秩序間の相転移が生じる。これまでに、電場、一軸歪み[1]、温度[2]といった外場制御による反強誘電-強誘電転移が報告されていたが、磁場による転移の報告例はない。

V 族の遷移金属元素  $M = V, Nb$  を含む欠損スピネル化合物  $GaM_4Se_8$  は、室温では空間群  $F-43m$  に属し、 $M$  原子がブリージングパイロクロア格子を組む。小さい四面体内において共有結合性の強い  $M_4Se_4$  分子軌道が形成され、 $t$  軌道に不対電子が 1 個だけ存在して軌道縮退が残る。両物質とも 40-50 K でヤーン・テラー機構による構造相転移が起こるが、 $GaV_4Se_8$  では軌道秩序によって極性空間群  $R3m$  構造を持つ強誘電状態になるのに対して、 $GaNb_4Se_8$  では電荷秩序によってカイラル空間群  $P2_13$  構造を持つ反強誘電状態へと転移する[3]。 $GaNb_4Se_8$  は、31 K でさらに分子軌道の再構成を伴って非磁性状態へと転移し、スピン-軌道相互作用の重要性が示唆される。そこで、 $GaNb_4Se_8$  に強磁場を印加して強制強磁性状態にすることで、スピン-軌道相互作用を介して軌道も強的な秩序を示し、反強誘電状態から強誘電状態への転移が期待される。

私のこれまでの研究で、 $GaNb_4Se_8$  にパルス超強磁場を印加すると、最低温度 5 K では約 110 T において巨大なヒステリシスを伴う構造相転移が起きることを磁歪測定によって発見している。昨年 12 月に開かれた第 4 回領域会議では、新たに開発した縦・横磁歪同時測定手法についても紹介し、磁場方向  $H // [111]$  の場合に相転移に伴って格子が磁場平行方向に伸びて垂直方向に縮む異方的磁歪を報告した。これは、 $GaNb_4Se_8$  の磁場誘起相における結晶構造が、 $GaV_4Se_8$  の軌道秩序相における結晶構造に類似していることを示唆しており、反強誘電-強誘電転移のシナリオと矛盾しない。そこで、この半年間で新たに一卷きコイル装置における磁化測定、超音波測定、誘電率測定に取り組んできた。本講演では、これまでに得られた実験結果を可能な限り紹介し、 $GaNb_4Se_8$  における磁場誘起相転移の描像を多角的に議論する。また、将来計画している SACLA でのシングルショット X 線回折実験に向け、転移磁場の抑制を狙って化学組成を調整した試料合成にも最近取り組んでいるので、その近況についても報告する。

[1] D. Chen *et al.*, Nano Lett. **17**, 5823 (2017).

[2] P.-F. Li *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **139**, 8752 (2017).

[3] S. Kitou, MG *et al.*, Chem. Mater. **36**, 2993 (2024).

[4] H. Ishikawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 227202 (2020).

## パルス磁場下における磁気光学 Kerr 効果測定手法の進展

<sup>A</sup> 京都大学工学研究科、<sup>B</sup> 電気通信大学情報理工学研究科中村 颯汰<sup>A</sup>、池田 敦俊<sup>A</sup>、鈴木 秀弥<sup>A</sup>、山根 聡一郎<sup>A</sup>、渡辺 岳人<sup>A</sup>、野田 孝祐<sup>B</sup>、池田 暁彦<sup>B</sup>、米澤 進吾<sup>A</sup> (A02 分担)

磁気光学カー効果とは物質表面における光の反射に伴って偏光状態が変化する効果である。これは光学周波数領域でのホール効果ととらえることもでき、異常ホール効果と同様、磁化やバンドトポロジーのプロブとして注目されている。類似の効果として、光の透過に伴う偏光の変化である磁気光学ファラデー効果が知られており、パルス磁場下での実験に既に使われている[1]。一方、磁気光学カー効果は、偏光の角度変化が最大でも 10 ミリラジアンオーダーであり、ファラデー効果に比べて桁違いに小さい。そのため、パルス磁場下でのカー効果測定は挑戦的であり、わずか数例の室温での測定報告があるのみである[2]。しかし、カー効果測定は、不透明な物質や薄膜などに適用できるという重要なメリットを持つため、カー効果の超強パルス磁場下かつ低温での測定が可能になれば、超強磁場中におけるカタストロフィー現象の有力なプロブとなりえる。

我々のグループでは、カイラル超伝導などの非自明な時間反転対称性破れ状態の検出を目指して超高感度の磁気光学カー効果の測定手法を導入してきた[3]が、現在この手法をパルス磁場下の測定に拡張する研究を行っている。本学術領域変革研究の目玉の一つである小型パルス磁場用電源バンク[4]を京都大学にインストールし、パルス磁場下の磁気光学カー効果の測定を進めている[5]。最近、我々は高精度に作られた光ファイバーコネクタの先端部分の部品であるセラミックフェルールと、その中に組み込まれた超小型レンズを利用する新しいセットアップを開発した。この方法は、非常に簡便で、全体の直径もわずか 3 ミリ強でありながら、反射光を高効率かつ安定的に光ファイバーへと戻せる。この方法を用いて試料をコイル中に配置してパルス磁場を発生させ、反射光の全時間波形をオシロスコープで取得して数値ロックイン解析を行うことで、パルス磁場中でのカー効果測定に成功した。さらに、ロックイン解析時の信号の周波数を厳密に解析することにより、符号も含めて正しいカー回転角を得ることが可能となった。現在、様々な物質や温度・磁場条件での測定を進めている。また、フォトニック結晶ファイバーを用いて光学系由来のバックグラウンドを低減する取り組みも進めている[6]。本発表ではこれらの最新の結果も含め、パルス磁場下でのカー効果測定の現状を報告する。

[1] E. Kojima *et al.*, Phys. Rev. B **77**, 212408 (2008); D. Nakamura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89**, 095106 (2018).

[2] X. Chen *et al.*, Measurement **46**, 52 (2013); S.-Y. Lin *et al.*, Chin. J. Phys. **55**, 698 (2017).

[3] Y. Hu *et al.*, arXiv: 2208.08036; 山根 聡一郎ら、本研究会 ポスター発表。

[4] A. Ikeda *et al.*, J. Appl. Phys. **136**, 175902 (2024).

[5] 中村 颯汰ら、本研究会 ポスター発表。

[6] 鈴木 秀弥ら、本研究会 ポスター発表。

## 原子変位を有するフラストレート格子系物質の強磁場効果

<sup>A</sup> 阪大理、<sup>B</sup> 東大物性研、<sup>C</sup> KEK 物構研

花咲徳亮<sup>A</sup>、松林龍<sup>A</sup>、J. Zhao<sup>B</sup>、松田康弘<sup>B</sup>、城戸大貴<sup>C</sup>、仁谷浩明<sup>C</sup>

強磁場を用いて化学的な結合に変化をもたらすカタストロフィー効果が注目されている。固体物質の中にも分子的な結合を持ち非磁性になるものがあるが、強磁場によって2量体が融解して相転移を起こす例も報告されている。特に、フラストレート格子系物質では、分子的な結合に伴う原子変位の配置について競合が生じえるため、強磁場印加によって原子変位パターンが変化する事が期待される。我々はフラストレート格子を持つチタン酸化物やニオブ酸化物などで、原子変位を起こす物質に着目して研究を進めている。

スピネル型酸化物  $MgTi_2O_4$  では、260K 付近で Ti が2量体化してシングレット対を形成し、この2量体が秩序する事で絶縁体金属転移を起こす<sup>[1,2]</sup>。超強磁場で絶縁体金属転移を誘起できるかを調べるため、RF法(~500MHz)による検出を試みた。その結果、試料が入っているコイルの電圧信号が25T以上でわずかに減少する兆候が見られた。試料の電気抵抗率が減少すれば、交流磁場に対する試料の侵入長が減少するため、コイルの信号の減少は試料の電気抵抗率の減少を示唆する可能性も考えられるが、再現性の確認と、より強磁場における効果を明らかにしていく必要がある。

強誘電状態では、化学的結合の変化によって原子が変位していると考えられ、この状態に対する強磁場効果も興味深い。パイロクロア型酸化物  $Cd_2Nb_2O_7$  は、誘電率が202K付近で肩状の構造を持ち、180K付近で大きい周波数依存性を持つピーク構造を示す事から、リラクサー的な特徴を持つ強誘電体である事が指摘されている<sup>[3]</sup>。誘電性と原子変位の関係を明らかにするため、NbのK吸収端で広域X線吸収微細構造(EXAFS)を測定した。その結果、200K以下で原子変位に由来すると考えられるスペクトルの変化が観測されており、誘電率の肩状構造等は原子の変位と関係する事が示唆された。次に、磁場に対する影響を調べるため、9Tまでの定常磁場で誘電率の予備測定を行ったが、磁場の印加によって誘電率がわずかに減少する兆候が見られた。また、磁場印加による誘電率の減少量は201K付近で最も大きくなる事が分かった。原子の変位が磁場で抑えられている兆候であると考えられるが、超強磁場下の測定によって全貌を明らかにしていく。

[1] M.Isobe and Y.Ueda, J.Phys.Soc.Jpn. 71 (2002) 1848-1851.

[2] S.Torigoe, T.Hattori, K.Kodama, T.Honda, H.Sagayama, K.Ikeda, T.Otomo, H.Nitani, H.Abe, H.Murakawa, H.Sakai and N.Hanasaki, Phys.Rev.B 98 (2018) 134443.

[3] M.Tachibana, H.Kawaji, and T.Atake, Phys.Rev.B 70 (2004) 064103.

## カイヤナイト構造 $V_2GeO_5$ の磁性

東京農工大

香取 浩子、原口 祐哉

鉱物  $Al_2SiO_5$  はアンダルサイト(Andalusite,  $Pnmm$ )、カイヤナイト(Kyanite,  $P-1$ )、シリマナイト(Sillimanite,  $Pnma$ )の 3 つの結晶構造の相が存在する多形である。 $Al_2SiO_5$  は高圧下でのみ合成が可能であるが、Si を Ge に置換した物質  $Al_2GeO_5$  は常圧下でも合成が可能である。そこで我々は、 $Al_2GeO_5$  の Al を磁性元素に置換した磁性体を合成し、その物性解明を進めている。今回は  $V_2GeO_5$  の磁化測定の結果について報告する。

固相反応法により合成した  $V_2GeO_5$  は、XRD 測定の結果、カイヤナイト構造であることが明らかになった。

$V_2GeO_5$  の磁化の温度依存性において、明確な磁気相転移は観測されなかった。高温領域における Curie-Weiss fitting により、Weiss 温度は  $\theta = -46$  K、有効ボーア磁子数は  $P_{\text{eff}} = 0.96 \mu_B$  と求められた。得られた  $P_{\text{eff}}$  は  $V^{3+}$  ( $S=1, L=0$ ) から予想される値の約 1/8 程度しかない。

また、非破壊パルスマグネットを用いた  $V_2GeO_5$  の磁化過程の測定では磁化の単調増加が観測されたが、55 T で飽和磁化の 1/10 程度しか生じていないことが明らかになった。

これらの原因を探るために、V を非磁性元素 Al に置換した  $Al_xV_{2-x}GeO_5$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) についても磁化の温度依存性を測定し、 $P_{\text{eff}}$  を求めた。その結果、 $x$  の増大とともに  $P_{\text{eff}}$  が増大する、すなわち単位体積当たりの V 数の減少とともに V 当たりの S が回復していることが明らかになった。

現在、 $V_2GeO_5$  の基底状態として、 $V^{3+}$  間距離を考慮したダイマー形成モデル[1,2]、バンド計算からはモット絶縁体の可能性が考えられる。今後、超強磁場磁化測定により段階的な磁化の増大等が観測できれば、 $V_2GeO_5$  の基底状態の解明に近づくことができると考えている。

[1] M. Marezio *et al.*, *Phy. Rev. Lett.* 28, 21 (1972).

[2] Yuri V. Mironov *et al.*, *J. Phys. Chem. B.* 109, 23804 (2005).

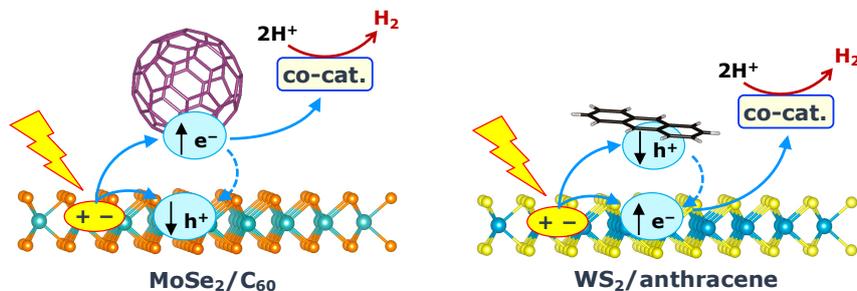
## TMDs のベーサル面の物理修飾による光触媒活性の付与

富山大学

高口 豊、石川 弥月、向井 一史、パム チ リン

我々は、カーボンナノチューブ (CNTs) や遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDs) の物理修飾による光機能界面の構築と光触媒反応への応用について検討を進めている<sup>[1]</sup>。本領域では、超強磁場を利用することで、これまで十分明らかとされていない暗い励起子の挙動を解明することや、電子移動反応の磁場効果を利用した光触媒反応の活性制御に挑戦している。これまで、CNT/C<sub>60</sub> ヘテロ接合を利用し、CNT 上の励起子から C<sub>60</sub> への電子抽出を経由したヒドロペルオキシド (HOO·) へのスピン選択的な電子移動反応が、磁場により加速されることを見出しているが、こうしたスピン選択的な電子移動反応を考えるうえで、磁場を用いたスピン偏極が可能な TMDs を利用した光触媒反応系の構築に興味をもたれる。本発表では、TMDs のベーサル面の物理修飾を利用した光触媒系の構築について述べる。

TMDs は、用いる元素や層数に応じてバンドのエネルギー準位を自在に設計可能な点に魅力がある。そこで、はじめに、CNT/C<sub>60</sub> と同様なヘテロ接合を構築し、光触媒活性を検討する目的で、MoSe<sub>2</sub>/C<sub>60</sub> ヘテロ接合の構築と水分解光触媒への応用について検討した<sup>[2]</sup>。両親媒性 C<sub>60</sub>-dendron を用いた MoSe<sub>2</sub> の物理修飾により得られた MoSe<sub>2</sub>/C<sub>60</sub> ナノハイブリッドを用い、犠牲剤と助触媒を加えて水素生成反応を行ったところ、A-exciton 励起 (波長 800 nm) における量子収率 (AQY) が 0.06% となったことから、TMD/有機分子ヘテロ接合が光触媒反応系構築に有効な手段となりえることが分かった。しかし、スピン偏極を利用した光触媒反応系の構築を狙うためには、単層の TMDs を利用することや、交換速度の遅い暗い励起子を利用しやすくするなどの工夫が必要となる。そこで、次に、スピン偏極が安定で、剥離が比較的容易な WS<sub>2</sub> を用いた光触媒系の構築に挑戦した。市販の多層 WS<sub>2</sub> の界面活性剤を用いた剥離操作の後、anthracene-dendron を用いたベーサル面の物理修飾を行なうことで、ほぼ、単層のみからなる WS<sub>2</sub>/anthracene ナノハイブリッドを合成した。これを光触媒として用いた水素生成活性を調査したところ、A-exciton (励起波長 610 nm) を利用したときの量子収率 (AQY) が 0.0015% であることが分かった。今後、この単層 WS<sub>2</sub>/Anthracene ヘテロ接合を用いた電子移動系の磁場効果を調査する予定である。



[1] Y. Takaguchi et al., *Chem. Lett.* **2019**, 48, 410-413.

[2] Y. Takaguchi et al., *Chem. Eur. J.* **2024**, e202402690.

## PrSb<sub>2</sub>における磁場誘起磁化容易軸交換の温度依存性

東北大金研 三宅厚志

RSb<sub>2</sub> (R = La, Ce, Pr, Nd, Sm)はSb層とR-Sb層がc軸方向に積層した擬2次元的な直方晶(空間群:Cmce)の結晶構造を持つ(図1)。CeSb<sub>2</sub>では圧力誘起超伝導転移が発見され、特徴的な逆S字型の超伝導相図を持つことから再注目されている[1]。我々は、CeSb<sub>2</sub>において面内の結晶軸に磁場を印加すると、約34 Tで磁化が急激に増大するメタ磁性転移が生じ、その後、磁化容易軸が磁場の方向に切り替わる磁化容易軸スイッチ現象を観測した[2]。磁場を印加した方向が容易軸、その垂直方向が困難軸になる。このスイッチされた状態は、磁場を取り除いた後も室温まで保持される記憶効果が存在する。偏光顕微鏡観察から、強磁場印加前のas-cast試料では、場所によってa軸とb軸が入れ替わったドメインが存在し、磁場で単一ドメイン化することも分かった。これらのことから、この現象は室温までの温度サイクルでも安定な「磁気形状記憶効果」があることが明らかになった。磁性R原子の特徴的な配列が重要であると考えている。ab面内でR原子は菱形状に配列しており、我々はこの特徴的な構造をパンタグラフ・ネットワークと名付けた[図1(a)]。容易軸変換はR原子間距離を保ったままパンタグラフの角度が変わることで軸変換が起きていると考えられる。そのため、パンタグラフを形成するR原子由来の面内磁気異方性が軸変換に重要であることが予想できる。今回は、CeSb<sub>2</sub>より磁化が大きいPrSb<sub>2</sub>に関する結果を紹介する。特に、温度依存性とCeSb<sub>2</sub>との比較を議論する。

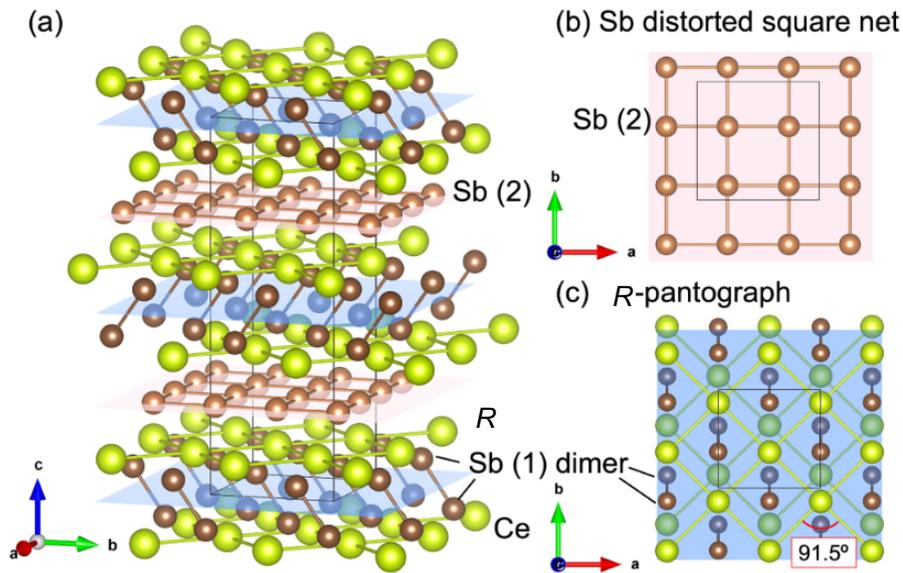


図1. RSb<sub>2</sub>の結晶構造[2]

[1] O. P. Squire *et al.*, Phys. Rev. Lett. **131**, 026001(2023).

[2] A. Miyake *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 043702 (2025). (JPSJ Editors' choice)

## 超量子極限状態における絶縁化現象の探索

<sup>A</sup> 東大物性研

徳永 将史 <sup>A</sup>

金属に強磁場を印加すると伝導電子のエネルギーはランダウ準位に量子化される。ランダウ準位の間隔がフェルミ・エネルギー( $E_F$ )を超えるほどの強磁場になると、全てのキャリアが最低ランダウ準位( $n=0$ )だけを占有する量子極限状態が実現する。このとき系は磁場方向にだけバンド分散が残った擬一次元導体になる (図1)。この量子極限状態からさらに磁場を増加した超量子極限状態では磁場方向の分散によって残っていたバンド幅( $W$ )がゼロに向かって連続的に減少していくため、相対的に電子相関の効果が増強される。三次元電子系の超量子極限状態において強相関効果がどのような量子状態を実現するかについて様々な可能性が議論されているが[1]、典型的な金属の場合、超量子極限を実現するには  $10^5$  T 級の磁場が必要とされるため物性実験は現状ではほぼ不可能である。過去には不純物置換した半導体で超量子極限を実現した実験もあるが、このような系では強磁場下でキャリアが不純物サイトに捕捉される磁気凍結という現象が起こってしまうため、新奇量子状態探索の舞台としては不向きである。

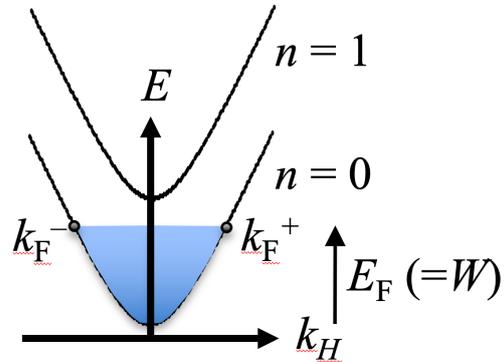


図1. 量子極限状態におけるバンド分散

我々は半金属半導体転移近傍にある BiSb 合金に注目して強磁場物性研究を行ってきた。Sb 組成が約 10%の半導体 (トポロジカル絶縁体) 試料の場合、結晶の 3 回軸方向に約 10 T の磁場を印加することで半金属に転移する。転移した後の半金属状態は超量子極限状態に対応する。我々の実験は超量子極限状態で印加磁場を増大させると 20 T 付近で系が絶縁化することを示した[2]。この絶縁化は、磁場と電流が直交する横磁気抵抗配置では見られず、磁場と電流が平行な縦磁気抵抗配置でのみ顕在化するという特徴を持つ。この異方的絶縁状態が超量子極限状態で一般的に現れるかを確認するため、我々は Sb 組成が約 4%の半金属試料に対しても実験を行った。この場合、磁場を結晶の 3 回軸と垂直な方向に印加することで半金属から半導体への転移が起こると期待されている。我々が測定した横磁気抵抗の測定結果は明瞭な量子振動を示しており、系が約 30 T 以上の磁場中で量子極限状態になること、少なくとも 60 T までは価電子帯と伝導帯が重なった半金属状態に留まっていることを示す。しかし縦磁気抵抗配置での実験結果は約 30 T 以上の磁場中で顕著な絶縁化を示している[3]。これらの絶縁化の起源は未解明であるが、現時点で確認されている出現条件などについて紹介する。

[1] B. I. Halperin, Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 1913-1919.

[2] Y. Kinoshita et al., Phys. Rev. B 107 (2023) 125140/1-9.

[3] Y. Yamaguchi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 94 (2025), 043791/1-5.

## 圧力下・磁場中の黒リンにおける新奇電子相転移の探索

<sup>A</sup>岩手大理工

秋葉 和人 <sup>A</sup>

半金属はその極めて希薄なキャリア濃度と高い易動度のために、バンド電子に対する磁場効果が顕著に現れる。そのため極限的な強磁場下におかれた半金属では、Landau準位の形成にともなう量子化の効果やキャリア間の相関効果に由来する新奇な基底状態が出現することが期待でき、これらの探索・解明のための有望な舞台と言える。実際にグラファイトや BiSb 合金では、電子と正孔が束縛され凝縮した励起子絶縁体相の実現可能性など興味深い現象が実験的に報告されている [1-3]。

我々はこれまで、キャリア数密度を外部パラメータ（とくに圧力）によって制御できる舞台として黒リンに着目してきた。我々は約 1.5 GPa 以上の圧力下における電子構造を量子振動と第一原理計算により明らかにし、圧力下の黒リンではノーダルリング半金属状態が実現することを示した[4]。

今回は半導体-ノーダルリング半金属転移近傍における強磁場下の電子相転移の可能性を探るために、先行研究において強磁場下の異常な抵抗増大が示唆[5]された面間抵抗に着目した。磁場は黒リンの積層方向に印加し、縦磁気抵抗の配置で測定を行った。低圧領域の半導体状態において、零磁場と 14 T における抵抗率の比で定義した磁気抵抗効果は高々数倍であった。一方でノーダルリング半金属への転移圧力近傍では縦磁気抵抗が飽和の傾向を見せず上昇し、150 倍を超える大きな磁気抵抗効果を観測した。また磁気抵抗効果が増大し始めるオンセット磁場の値は高温になるにつれて強磁場側にシフトし、明確な温度依存性が観測された。このことは、今回観測した磁場中における電気抵抗の急激な増大が電子相転移に関連した異常であることを示唆する。

講演では、半金属相に転移する直前の圧力で観測された上述の異常について紹介するとともに、その発現機構について議論する予定である。

- [1] K. Akiba *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 054709 (2015).
- [2] Y. Kinoshita *et al.*, Phys. Rev. B **107**, 125140 (2023).
- [3] Y. Yamaguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 043701 (2025).
- [4] K. Akiba *et al.*, Phys. Rev. B **109**, L201103 (2024).
- [5] Z. Sun *et al.*, Sci. Bull. **63**, 1539 (2018).

## ビスマス 2 次元層を持つ物質の格子歪みに対する磁場効果

阪大理

酒井 英明

ニクトゲン（リン、ヒ素、アンチモン、ビスマス）元素の単体金属は、単純立方構造からわずかに歪んだ結晶構造をとることが知られており、その原因は、フェルミ面のネスティングに起因するパイエルス不安定性によって説明される。バンド構造もこの歪みにより大きく変化し、例えば菱面体構造を持つビスマスでは、スピン軌道相互作用と協奏して三次元ディラック電子状態が実現される。一方、二次元のビスマスは、物質中に埋め込まれた形で、常圧下において歪みのない正方格子を形成できる。 $AMBi_2$  ( $A$ : アルカリ土類・希土類、 $M=Mn, Zn, Cd$ )はその好例であり、形式価数-1 価の  $Bi$  の正方格子層と  $A^{2+}-M^{2+}-Bi^{3-}$  からなるスペーサー層が交互に積層した構造を有する。二次元の場合でも、ネスティングや軌道混成などの格子を歪ませる不安定性は存在するため、 $(Sr/Eu)MnBi_2$  ではビスマスの正方格子が保たれるが (図 1 左)、格子が大きい  $BaMnBi_2$  では、正方格子が擬 1 次元的なジグザグ鎖へ歪む (図 1 右)。この構造変化は、非極性の正方晶から極性の直方晶への転移を伴い、バンド電子に起因する格子歪みの強磁場カタストロフィーの舞台として有望である。

我々はこれまでに、常圧下で正方格子を有する  $EuMnBi_2$  単結晶を対象に、ピエゾ素子や異方的基板を用いて面内方向に応力を印加し、応力誘起構造転移の探索を行ってきた。その結果、低温において、圧縮および引張の双方でヤング率の明瞭な低下が観測され、構造転移に起因する格子のソフト化を見出した。さらに、 $c$  軸方向の磁場によって  $Eu$  の反強磁性秩序を変化させることで、ソフト化が生じる臨界応力が系統的に変化し、 $Eu$  との明確なカップリングも明らかとなった。光学測定や磁化測定を組み合わせ、転移に伴う結晶構造の変化についての解明も進めている。本発表では、これらのビスマス正方格子における応力・磁場効果の詳細について報告する。また、局在スピンを持たない非磁性物質 ( $M=Cd$ ) における極性-非極性転移の探索と、およびその磁場効果に関する進展についても併せて紹介する予定である。

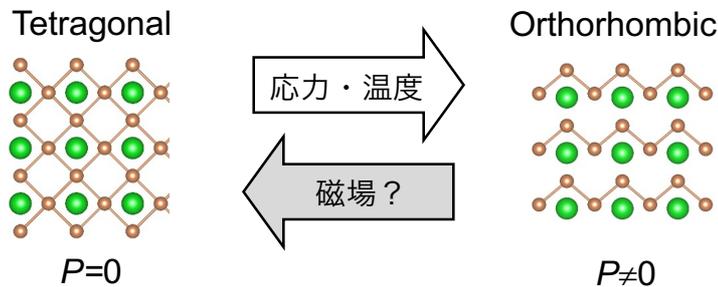


図 1. ビスマス 2 次元正方格子の歪みにおける応力、温度、磁場効果の概念図。

パルス強磁場下におけるトンネルスペクトロスコピー

<sup>A</sup> 東大生研、<sup>B</sup> 東大物性研

瀬尾 優太<sup>A</sup>、近藤 雅起<sup>B</sup>、須藤 健太<sup>B</sup>、武 之聖<sup>B</sup>、徳永 将史<sup>B</sup>、町田 友樹<sup>A</sup>

強磁場下における電子物性の新たな測定手法の開発を目指して、非破壊型マグネット  
 で発生させたパルス強磁場下におけるトンネル伝導測定を試みた。二つの導体を非常に  
 薄い絶縁体を介して接合したトンネル接合では、導体間に電圧を印加すると絶縁体を介  
 してトンネル伝導が生じる。トンネル伝導は物質の電子状態密度を直接反映するため、  
 電子物性の評価手法として広く用いられている。ここでは、層状物質ファンデルワール  
 ストンネル接合を用いて、パルス強磁場下における層状物質のランダウ準位の観測を行  
 った。

図1に実験に用いた p-MoS<sub>2</sub>/h-BN barrier/Graphite ファンデルワールストンネル接合の  
 模式図(図1a)と光学顕微鏡写真(図1b)を示した。p-MoS<sub>2</sub>及び Graphite が導体であり、間  
 に挟まれた薄い h-BN がトンネルバリアである。p-MoS<sub>2</sub>と Graphite 間で h-BN バリアを  
 介して流れるトンネル電流を測定することで、磁場印加により Graphite に形成されるラ  
 ンダウ準位(LLs)を観測する(図1c)。パルス強磁場下での測定を行う前に、予備実験とし  
 て最大 11 T の静磁場下でのトンネル伝導測定を行った。図1dがその際に得られたトン  
 ネル微分コンダクタンス( $dI/dV$ )のカラーマップである。 $dI/dV$  は電子状態密度に比例す  
 ることから、Graphite のランダウ準位形成による電子状態密度の離散化を反映した離散  
 構造が観測されている。測定は固定された各磁場下において電圧をスイープして行った。  
 続いて、非破壊型マグネットを用いたパルス磁場中での測定を行った。図1eにその際  
 の測定方法の模式図および得られた測定結果を示した。パルス磁場を印加しながら、同  
 時に高い周波数で電圧スイープを行うことで、パルス磁場下においてもランダウ準位の  
 トンネルスペクトロスコピーに成功した。本方法は、一度の測定で広いエネルギー範囲  
 のランダウ準位の磁場依存性を調べることができる強力な測定手法となり得る。

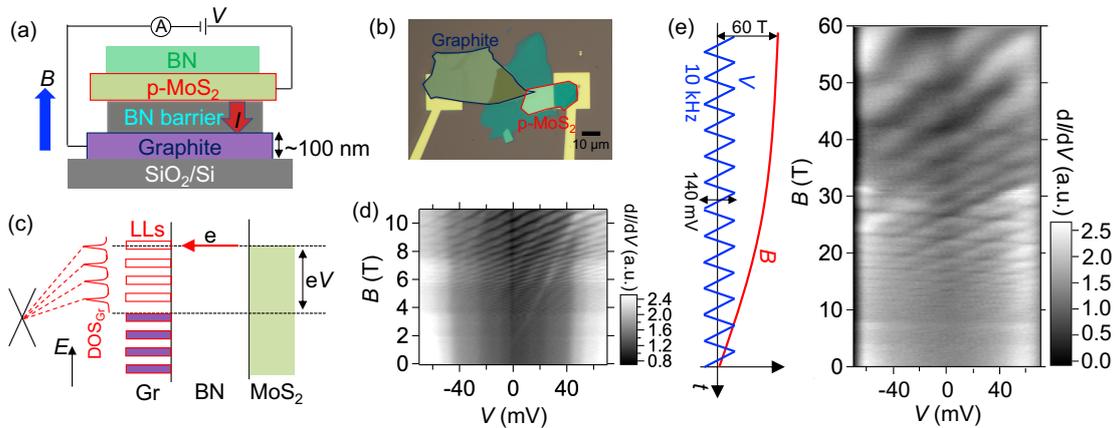


図1. (a) p-MoS<sub>2</sub>/h-BN/Graphite トンネル接合の模式図. (b) p-MoS<sub>2</sub>/h-BN/Graphite トンネル素子の光学顕微鏡写真. (c) ランダウ準位トンネルスペクトロスコピーの模式図. (d) 静磁場下でのランダウ準位スペクトロスコピーの結果 ( $T = 1.6$  K). (e) 最大 60 T のパルス磁場下でのランダウ準位スペクトロスコピーの結果 ( $T = 1.4$  K).

## 超量子極限領域の理論的探索

神戸大学

多湖崇人, 山田暉馨, 伏屋雄紀

磁場は量子効果を実験的に探る最も強力な直接的な手段の一つである。その典型例がランダウ量子化であり、電子のエネルギーが磁場下で離散化され、量子振動となって観測にかかる。磁場が十分に強くなると、サイクロトロンエネルギーが電子の運動エネルギーを上回り、最低ランダウ準位のみが占有される量子極限 (Quantum limit: QL) に達する。さらに磁場を強くすると、化学ポテンシャルが低下し、運動エネルギーが著しく小さくなる領域 — 超量子極限 (Extreme quantum limit: EQL) — に入る。超量子極限では、電子の運動エネルギーがほぼゼロに近づき、電気伝導度が低下する可能性がある。一方、電子の波動関数が広がることで電気伝導度が向上する可能性もあり、現時点では、超量子極限が金属的か絶縁体的かすらよく分かっていない。

本研究では [1], この問題に取り組むため、強磁場下の磁気抵抗とホール抵抗を久保公式に基づいて量子論的に求めた。散乱確率  $1/\tau$  については、 $T$ -行列近似を用いた。

本研究の第一の成果は、磁場の増加によって散乱確率が質的に変化する「磁場誘起クロスオーバー」の発見である (図1)。まず、量子極限に入る以前の弱磁場領域では定緩和時間近似 ( $1/\tau \sim \text{一定}$ ) がよく成り立ち [2], 量子極限に入るとボルン近似が成り立つ強磁場領域では  $1/\tau \propto B^2$  となる。さらに超強磁場領域になると、量子力学的制約により散乱強度が飽和し、最終的に  $1/\tau \propto B^{-2}$  に転じることが分かった。これにより、超量子極限では、散乱確率が普遍的なユニタリティー極限に達することが理論的に示された。

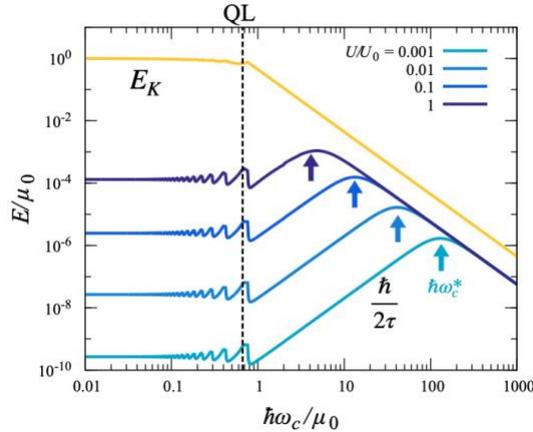


図1. 散乱確率  $\hbar/2\tau$  の磁場依存性. 矢印はクロスオーバー磁場.

この散乱確率のクロスオーバーは磁気抵抗の異常な磁場依存性として現れる。横磁気抵抗はボルン領域で  $\rho_{xx} \propto B^4$  となるが、ユニタリティー極限では線形依存性  $\rho_{xx} \propto B$  を示す。一方、縦磁気抵抗はボルン領域で  $\rho_{zz} \propto B^2$  であったものが、ユニタリティー極限では  $\rho_{zz} \propto B^{-2}$  へと転じる。つまり、超量子極限では、電流に対して垂直な磁場では絶縁体的、平行な磁場では金属的なふるまいをすることが分かった。さらに、超量子極限における横磁気抵抗とホール抵抗の測定により、不純物密度を定量的に決定できる新たな普遍的関係式も導出した。

[1] S. Tago, A. Yamada, Y. Fuseya, to be submitted.

[2] A. Yamada, Y. Fuseya, J. Phys.: Condens. Matter, 36, 245702 (2024).

## 有機擬 2 次元 Dirac 電子系の 3 次元 Dirac 半金属への次元交差

東大院工 長田 俊人

$\alpha$  型層状有機導体  $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$  や  $\alpha$ -(BETS) $_2$ I $_3$  の電子状態は、通常 2 次元 Dirac 電子系として扱われるが、十分低温では層間結合の効果が顕著となり 3 次元系のトポロジカル物性が発現する。圧力下の  $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$  の 2 次元 massless Dirac 電子系を対称性を保って単純積層すると、開いた nodal line を持つ 3 次元半金属になると予想される。しかし実験では Weyl/Dirac 点特有の chiral 異常に由来する負性縦磁気抵抗とプレーナ Hall 効果が観測された[1]。本系では電子間相互作用と複数の層間結合により時間反転対称性(TRS)と空間反転対称性(SIS)が破れたフラックス状態が形成され 3 次元 Weyl 半金属が実現するという理論提案がなされていた[2]。一方、常圧の  $\alpha$ -(BETS) $_2$ I $_3$  は層内スピン軌道結合(SOC)でギャップの開いた 2 次元トポロジカル絶縁体 (2 次元 massive Dirac 電子系) であると考えられるが、これを単純積層すると側面に表面状態を持つ 3 次元の弱いトポロジカル絶縁体(WTI)になると予想される。しかし実験的には全表面にわたる表面伝導が観測され、3 次元の強いトポロジカル絶縁体(STI)が示唆された[3]。

これらの層状 Dirac 電子系の低温での次元交差現象を説明するために、層間結合にスピン軌道相互作用(SOC)、さらに反転対称性(SIS)の破れを取り入れて 3 次元電子構造を調べた[4]。電子が層間ホッピングするときは重い陰イオン (I $_3$ ) 層を通過する必要があるため、層間 SOC の効果は面内 SOC に比べ大きくなると期待できる。SIS 破れについては電子相関の効果などにより対称性が自発的に破れた多体電子相が実現している必要がある。結果として、TRS と SIS が保たれる限りは、層間 SOC により  $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$  ではスピン縮退した各 node の全 Berry 曲率が相殺した Dirac 半金属状態、 $\alpha$ -(BETS) $_2$ I $_3$  では WTI 状態のみが許容されることがわかった[4]。SIS が自発的に破れると、 $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$  において各 node の全 Berry 曲率が有限となる Weyl 半金属状態が許容されるようになる。

[1] N. Tajima, Y. Kawasaki, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 123702 (2023).

[2] T. Morinari, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 073705 (2020).

[3] T. Nomoto, S. Imajo, H. Akutsu, Y. Nakazawa, and Y. Kohama, Nat. Comms. **14**, 2130 (2023).

[4] T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 123703 (2024); JPS Hot Topics **5**, 003 (2025).

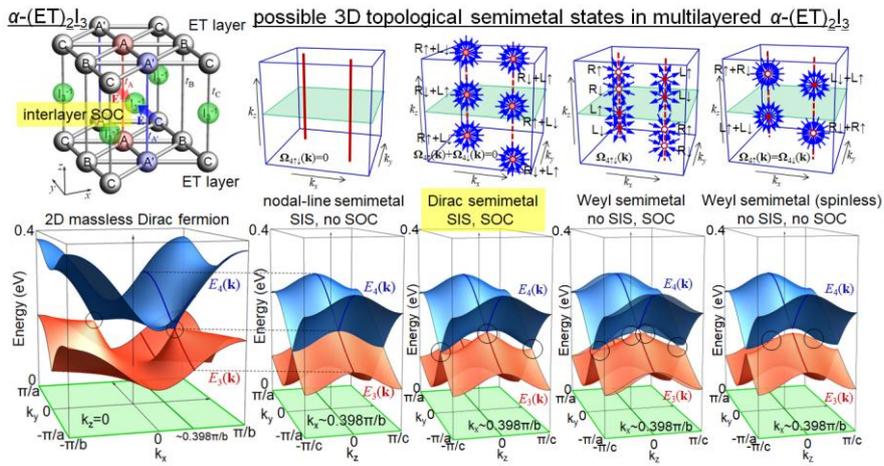


図 1.  $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$  における可能な低温電子状態[4]

## 量子極限における擬一次元強相関ディラック電子の熱電効果

<sup>A</sup> 東大物工、<sup>B</sup> 筑波大学、<sup>C</sup> 理研 CEMS、<sup>D</sup> 東大物性研、<sup>E</sup> 東大東京カレッジ  
 山田 林介<sup>A</sup>、藤岡 淳<sup>B</sup>、酒井 志朗<sup>C</sup>、平山 元昭<sup>A,C</sup>、有田 亮太郎<sup>A,C</sup>、  
 徳永 将史<sup>D</sup>、十倉 好紀<sup>A,C,D</sup>、マックス ヒルシュベルガー<sup>A,C</sup>

電子が最低ランダウ準位に縮退する量子極限と呼ばれる強磁場中では、磁場による次元性の変化というバンド電子に対するカタストロフィーが生じ、電子間の相互作用に由来した一次元系に特有な量子相が発現する。本研究では、量子極限における擬一次元状態の特徴を最大限に引き出すために、非自明なバンドトポロジーと強い電子相関効果を兼ね備える強相関ディラック半金属  $\text{CaIrO}_3$  を対象物質とした[1,2]。

$\text{CaIrO}_3$  は直方晶に歪んだペロブスカイト構造を持ち、結晶の対称性によって保護されたディラック型のラインノードをバンド構造中に持つ。4 T 程度の磁場でディラック電子は量子極限に到達し、10 T 以上の磁場において巨大磁気抵抗が現れる (図 1a)。本研究では  $\text{CaIrO}_3$  の量子極限での熱電ゼーベック効果を測定し、量子極限に到達直後にゼーベック効果が増大することが分かった。(図 1b)。低次元系における熱電効果の増大の可能性[3]を含めながら、ゼーベック効果の増大の起源を議論する。

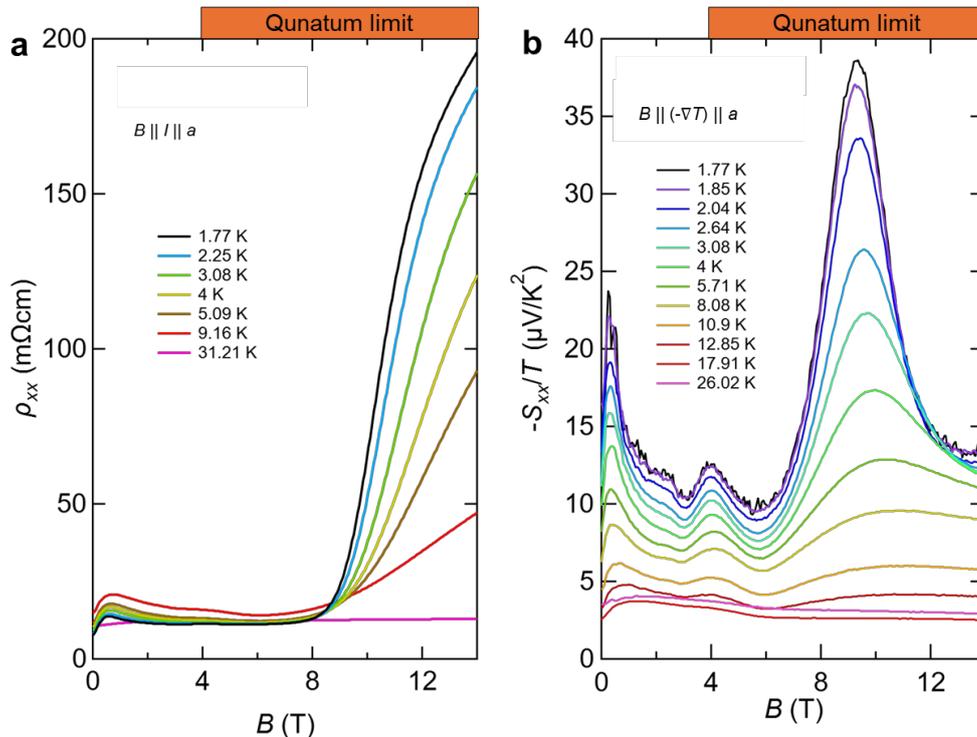


図 1. 強相関ディラック半金属  $\text{CaIrO}_3$  の量子極限における磁気抵抗とゼーベック効果.

[1] J. Fujioka, R. Yamada *et al.*, Nat. Commun. **10**, 362 (2019).

[2] R. Yamada *et al.*, npj Quantum Mater. **7**, 13 (2022).

[3] L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, Phys. Rev. B **47**, 16631 (1993).

# 新奇熱電半金属 Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub> の磁気輸送特性

名大院理 中埜彰俊

Magneto-transport properties in the novel thermoelectric semimetal Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub>

Nagoya Univ. A. Nakano

最近我々は半金属の基底状態を持つ擬一次元層状遷移金属カルコゲナイド Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub> が特異な熱電物性を示すことを発見した。Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub> は 15 K において  $2.4 \text{ mWcm}^{-1}\text{K}^{-2}$  に及ぶ大きな電力因子を示す。ここで電力因子とは、1 cc の物質の両端に 1 K の温度差を付けた際に発生する電力の目安を与える量であり、Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub> の物性値は代表的な熱電材料の Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> が示す電力因子の最大値よりも 2 桁大きい。一般的には電子と正孔が共存するために大きな熱電応答が望めないと言われてきた半金属においては極めて異例な物性であると言える。我々のこれまでの輸送測定により、Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub> の低温における熱電物性を支えているのは  $10^5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  という電子に比べて圧倒的に高い移動度をもつ正孔であり、これにより電子と正孔のゼーベック係数の補償を回避していることを明らかにしてきた。しかし、この系のフェルミオロジーに関してはほとんど調べられておらず、微視的な熱電特性の解明に向けて定常磁場下での磁気輸送特性の測定を行った。

東北大学 金属材料研究所の 15 T 超伝導マグネットを用い、0.5 K~5 K の磁気抵抗を測定したところ、小さいながらも磁気抵抗が振動する様子を観測した。振動成分から Lifshitz-Losevich の式に基づき主要なキャリアポケットのサイクロトロン質量を求めるとおよそ  $1.4m_0$  となり比較的重いキャリアが伝導を担っていることが分かった。これは異方的な結晶構造を反映したものであり、Ta<sub>2</sub>PdSe<sub>6</sub> が金属にしては大きなゼーベック係数を示すことと矛盾しない。さらに第一原理計算と比較することで、複数の振動成分を生むキャリアポケットを同定することに成功した。

当日は解析の詳細を紹介するとともに、磁場下の輸送特性として最近のネルンスト係数測定の結果についても報告する予定である。

## 「非摂動磁場を含んだ相対論的強束縛近似法」による カタストロフィック現象の研究

<sup>A</sup>信州大学、<sup>B</sup>広島大学

樋口 雅彦<sup>A</sup>、樋口克彦 (研究協力者)<sup>B</sup>

最近われわれのグループでは、磁場が印加された固体の電子状態を第一原理的に計算する手法を開発した[1,2]。これを「磁場を含んだ相対論的強束縛近似法(Magnetic-field-containing relativistic tight-binding approximation method, 以下, MFRTB 法)」と呼んでいる[1,2]。さらに、磁場の非摂動効果を取り込むために MFRTB 法を改良し、「非摂動 MFRTB 法」を開発した[3,4]。本手法により、磁氣的ブリュアンゾーン内で記述される磁氣的ブロッホバンド構造を様々な物質で計算することが可能となった。これまでに磁氣的ブロッホバンド構造を用いてドハース -ファンアルフェン(dHvA)振動、および磁気破壊現象の記述、さらに従来理論では説明できない「付加的な磁化振動」を理論的に予言してきた[1-4]。またグラフェンの半整数量子ホール効果の記述[5]や最近では結晶シリコンの半導体から金属への二次相転移現象(結合バンドと反結合バンドの交差現象)の理論的予言[6,7]、磁氣的ブロッホ状態における新奇な異常速度の理論的予言に成功した[8]。

本公募研究では、絶縁体から金属へ相転移が実験的に観測されている VO<sub>2</sub> や FeSi に「非摂動 MFRTB 法」を適用すること、そして磁氣的ブロッホ状態の変化の様相を解明することを目的としている。そのために本手法を d 電子が含まれる物質に適用できるように整備・拡張する必要がある。昨年度は、これまで s 軌道と p 軌道のみで使用可能だった「相対論的スレーター・コスター表」を d 軌道が扱えるように拡張した。さらに、「非摂動 MFRTB 法」による計算で必要になる「磁場下飛び移り積分表」を拡張し、d 軌道が扱えるようにした。その結果、s, p, d 軌道の全ての組み合わせ(18x18=324 通り)に対する磁場の非摂動効果を含んだ磁場下飛び移り積分(パイエルズ位相を用いた近似を超えた磁場下飛び移り積分)の計算が可能となった。現在、テスト計算として、一様磁場下の Cu に「非摂動 MFRTB 法」を適用し、dHvA 振動の計算を行っている。これまでに Cu の dHvA 振動(フェルミ面の腹の部分の極値断面積に反比例する磁化振動の周期)が再現されることを確認している。今後は、Cu における「付加的な磁化振動」の理論的予言をするとともに、「非摂動 MFRTB 法」を VO<sub>2</sub> や FeSi に適用し、化学的カタストロフィーに伴う磁氣的ブロッホ状態の変化の様相を明らかにしていく予定である。

- [1] K. Higuchi, D. B. Hamal and M. Higuchi, PRB **91**, 075122(2015).
- [2] M. Higuchi, D. B. Hamal and K. Higuchi, PRB **95**, 195153 (2017).
- [3] K. Higuchi, D. B. Hamal and M. Higuchi, PRB **97**, 195135 (2018).
- [4] M. Higuchi, D. B. Hamal, A. Shrestha and K. Higuchi, JPSJ. **88**, 094707 (2019).
- [5] Md. A. Rashid, M. Higuchi and K. Higuchi, PRB **108** 125132 (2023).
- [6] K. Higuchi, D. B. Hamal and M. Higuchi, New J. Phys. **24** 103028 (2022).
- [7] K. Higuchi and M. Higuchi, PRB **110**, 195136 (2024).
- [8] K. Higuchi, W. Sakamoto and M. Higuchi, PRB **110**, 205131 (2024).

## Search for ideal Weyl semimetal state in 60 T pulsed field

<sup>A</sup> 東京大学、<sup>B</sup> 理化学研究所、<sup>C</sup> 東京大学物性研究所

ヒルシュベルガー マックス <sup>A,B</sup>、田中 優樹 <sup>A</sup>、山田 林介 <sup>A</sup>、寺河 俊宏 <sup>A</sup>、  
Moritz M. Hirschmann <sup>B</sup>、近藤 雅起 <sup>C</sup>、須藤 健太 <sup>C</sup>、徳永 将史 <sup>C</sup>

The realization of an *ideal* Weyl semimetal, i.e., a topological semimetal with a point-like Fermi surface and no other trivial (or ‘irrelevant’) bands, was recently reported by some of us using a complex and heavily disordered Cr-In-Bi-Sb-Te alloy [1]. This is a ferromagnetic Weyl system with two Weyl nodes, as is allowed in time-reversal breaking band structures. An intrinsic anomalous Hall effect with a giant Hall angle (75%) appears even in low magnetic field. Previously, half-Heusler materials such as GdPtBi were reported to be time-reversal breaking Weyl semimetals induced by an applied magnetic field [2]. GdPtBi is a stoichiometric and relatively clean system, contrary to Cr-In-Bi-Sb-Te, and Shubnikov-deHaas oscillations can be observed above 7 Tesla [2,3].

We have prepared a series of single crystals of Gd(Pt,Au)Bi with carrier mobility around 2000-6000 cm<sup>2</sup>/Vs and variable band filling [4]. Using pulsed high magnetic fields at ISSP, we explore the Shubnikov-deHaas oscillations in these crystals and discuss the evolution of the electronic structure when entering the field-polarized ferromagnetic state. We interpret the data from the viewpoint of ab-initio band structure calculations [5].

The ultimate goal of this research project is (a) to explore and detect the anomalous Hall effect in the field-polarized ferromagnetic state of the magnetic Weyl semimetal GdPtBi and (b) to detect the quantum oscillations of the emergent inductance inside the antiferromagnetic state of this material, which is stable below 20 T.

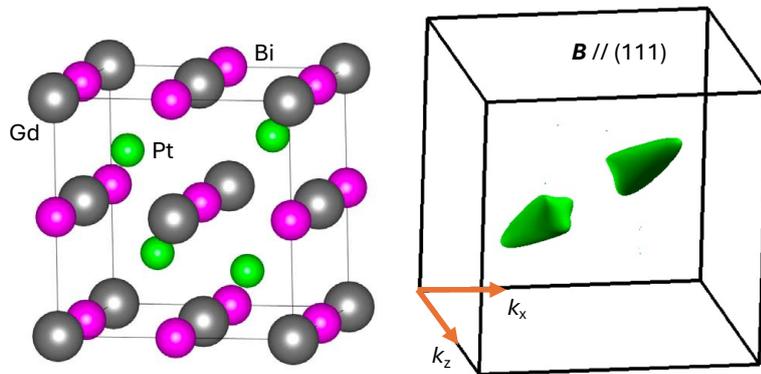


図1. Crystal structure of half-Heusler GdPtBi and Weyl electronic band structure in field-polarized GdPtBi; adapted from Ref. [2].

- [1] I. Belopolski, R. Watanabe, *et al.*, Nature **637**, 1078–1083 (2025).
- [2] M. Hirschberger, S. Kushwaha, *et al.*, Nature Materials **15**, 1161–1165 (2016)
- [3] C. Schindler *et al.*, Physical Review B **101**, 125119 (2020)
- [4] T. Terakawa *et al.*, unpublished (2024)
- [5] Y. Tanaka *et al.*, unpublished (2025)

## 面内異常ホール効果の研究進展

<sup>A</sup> 東京科学大学、<sup>B</sup> 豊田理化学研究所

打田正輝 <sup>A,B</sup>

我々は最近、理想的な磁性ワイル半金属とされる  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  の薄膜において、面内磁場成分によって面直方向のワイル点分裂が誘起され巨大な異常ホール効果が現れることを発見した[1]。この面内異常ホール効果は、量子幾何学量的一种である軌道磁化が顕在化した効果であると理解され、新たな交差相関応答として今後の学理開拓が期待される。

本発表では、この面内異常ホール効果の最近の研究進展として、スピン軌道相互作用を弱めた  $\text{EuZn}_2\text{Sb}_2$  薄膜との比較により応答の大きさや符号の変化を調べた研究[2]や、強磁性ワイル半金属に応用し軌道強磁性状態とも呼べる自発的な面内異常ホール応答を観測した成果[3]、ディラック半金属に応用することでこれまで正常ホール効果との分離が困難であった非磁性体における異常ホール効果を定量解析した結果[4]、等について紹介する。

[1] A. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **133**, 236602 (2024) Selected for Editors' Suggestions

[2] H. Lee *et al.*, arXiv:2503.11087

[3] S. Nishihaya *et al.*, arXiv:2502.10018

[4] S. Nishihaya *et al.*, arXiv:2503.04195

## 立方晶 NbSeI の軌道無秩序絶縁体状態

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup> 名大院理、<sup>C</sup> 東大新領域

小島 慶太<sup>A</sup>、山川 洋一<sup>B</sup>、鬼頭 俊介<sup>C</sup>、巖 正輝<sup>A</sup>、大熊 隆太郎<sup>A</sup>、  
小濱 芳允<sup>A</sup>、徳永 祐介<sup>C</sup>、有馬 孝尚<sup>C</sup>、岡本 佳比古<sup>A</sup>

大きさの異なる二種類の正四面体によって構成された breathing pyrochlore 構造は、3次元的なネットワークよりも孤立した四面体分子の性質が物性に重要となる。例えば spinel 型構造( $AB_2X_4$ )の A サイトの半分が欠損した lacunar spinel ( $AB_4X_8$ )は、反転対称性のない空間群  $F\bar{4}3m$  に属し、四面体分子に起因したバンド構造やスピンプラストレーションの存在により、 $GaV_4S_8$  における Skyrmion の発現[1]や  $GaNb_4Se_8$  におけるキラル電荷秩序[2]といった特徴的な電子物性が報告された。また、breathing pyrochlore 構造は2種類の A サイトカチオンが秩序化する site order spinel ( $AA'B_4X_8$ )や、異なる配位子をもつ MoSBr 型構造 ( $B_4X_4X'_4$ )でも実現しており、 $LiInCr_4O_8$  における四量体一重項状態[3]や  $ReSTe$  における高い熱電性能[4]などの舞台となっている。

今回我々は breathing pyrochlore 構造をもつ物質として MoSBr 型構造の NbSeI に注目した。2件の合成報告[5,6]がされたが電子物性はほとんど明らかでない。我々は単結晶試料を合成し、室温での構造解析の結果 breathing pyrochlore 構造をもつことを確認した。さらに第一原理計算を行うと、フェルミエネルギー近傍に Nb の 4d 軌道によるほとんどフラットなバンドだけが存在する金属的なバンド構造を有していることが明らかになった。しかし磁化率と電気抵抗率を測定したところ、300K 以下の全温度で非磁性絶縁体であることが明らかになった。構造を詳細に調査した結果、立方晶の格子中に局所的な歪を発見し、これが非磁性絶縁化の原因であると考えている。当日は 110 K 以下で生じる構造相転移も含めて、物性や構造の詳細について報告し、第一原理計算との比較をもとに電子状態の考察を行う。また最近実施した強磁場実験の結果についても触れる。

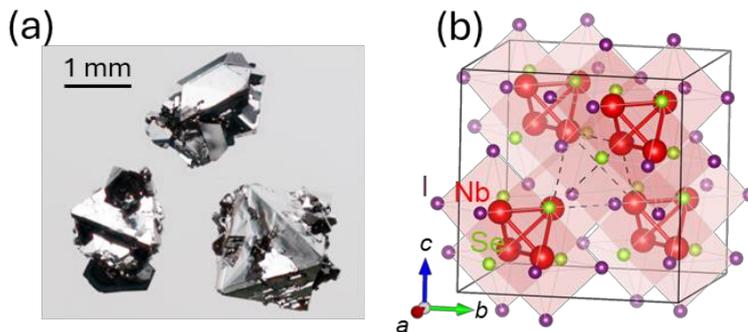


図 1

- (a) 単結晶試料写真  
(b) 室温での結晶構造

- [1] I. Kézsmárki *et al.*, *Nature Mater.* **14**, 1116 (2015).  
 [2] S. Kitou *et al.*, *Chem. Mater.* **36**, 2993 (2024).  
 [3] Y. Okamoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 097203 (2013).  
 [4] H. Matsumoto *et al.*, submitted.  
 [5] V.E. Fedorov *et al.*, *Zh. Neorg. Khim.* **26**, 2701 (1981).  
 [6] H. B. Yaich *et al.*, *J. Less-Common Met.* **102**, 9 (1984).

## 中性子星の超強磁場の起源を追う

東京大学 理学系研究科 物理学専攻

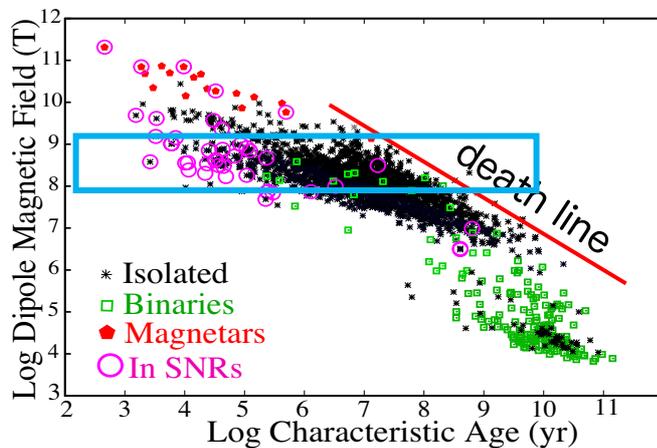
牧島一夫

星は、負の比熱をもち、輝くことで自発的にエントロピーを減らす結果、中心部は高温・高密度になる。初期質量が太陽の $>10$  倍の星は、進化の末に超新星爆発を起こして、中心部は中性子星(NS)ないしブラックホールとなる[1]。NSは中性子の縮退圧で支えられた天体で、太陽程度の質量と太陽より5桁小さい半径( $\sim 10$  km)をもち、超高密度、超高速回転、超強磁場で特徴づけられる[2]。図は観測的に推定されたNSの双極子磁場強 $B$ を、推定年齢に対し示したもので、 $B \sim 10^8$  Tのものが多いが、若い「マグネター」種族では $B \sim 10^{10-11}$  T、老齢のNSでは $B \sim 10^{4-5}$  Tと、 $B$ の値は実に7桁に及ぶ。さらに近年、マグネターの内部には、 $\sim 10^{12}$  Tのトロイダル状の磁場が潜むという観測的な証拠も得られつつある(公募研究 B03 班)[3]。

通常これらの磁場は、超新星爆発のさい「爆縮」された親星の磁場が、NS内部に残存する陽子(中性子の数%で超流体となるらしい)が作る渦糸の内部に、針金の束のように閉じ込められると説明される。陽子の渦電流の減衰につれて $B$ は弱まるとされ、図には確かにその傾向が見られるが、赤い直線(death line)の右上では、自転によるエネルギー放出が小さく天体検

出が困難なので要注意である。また別方法で推定した降着型NS(青い箱)では、磁場減衰の兆候は見られない[2]。さらに年齢 $\sim 10^9$  年では磁場強度が不連続に2~3桁ほど減るように見える。

以上のことからNSの磁場は、核力を介した中性子のスピン整列や、クーロン相互作用を介した残存電子の整列など、強磁性相の発現と、相転移によるその消失として、より良く理解できそうな兆候がある。



図：観測された中性子星の双極子磁場強度を、推定年齢に対しプロットしたもの。データ点は回転駆動型のNSで、色により種族を区別する。横長の青い箱は降着駆動型NSのもの。

[1] 「ブラックホールと高エネルギー現象」、現代の天文学第8巻(2025)、日本評論社

[2] Makishima, K. 2016, *Proc. Japan Academy* (日本学士院紀要), **B 92**, 135 (free access)

[3] Makishima, K. et al. 2024, *Monthly Not. Royal Astron. Soc.*, **532**, 4535 (free access)

## 中性子星の超強磁場の起源を尋ねる — 物性物理からの試論 —

A 神戸大理、B 東京大学  
伏屋 雄紀<sup>A</sup>、牧島 一夫<sup>B</sup>

宇宙には、我々の常識をはるかに超える極限環境が存在する。中でも、中性子星や白色矮星に宿る超々強磁場 — 白色矮星では約  $10^5$  テスラ、中性子星では驚異の  $10^9$  テスラにも達する — は、その起源と持続メカニズムについて未だ多くの謎を秘めている [1,2]。地球上では実現不可能なこれほどまでの磁場は、一体どのようにして生まれ、保たれているのか？ そして、その磁場のもとで物質はどのような状態にあるのか？

これまで、この問いには主に宇宙物理学や天文学の立場から迫ってこられた。しかし、未だ十分には説明できていない観測事実も多く残されており、理論的なブレイクスルーが求められているとのことである。本講演では、これら未解明の問題に対し、物性物理学の視点からアプローチすることによって新たな手がかりを得ようとする、一つの試みを紹介する。

研究の対象として取り上げるのは、超々強磁場を持つ中性子星と白色矮星である。こうした天体を構成する物質は、物性物理学が扱ってきた通常の物質とどれほど異なるのか？ あるいは、両者には意外な共通点が存在するのか？ 本研究では、中性子星に対しては  $^3\text{He}$  を [3]、白色矮星に対しては鉄を手がかりに、それぞれのエネルギースケールを比較検討し、天体内部の状態とのつながりを読み解く。そしてそれをもとに超々強磁場の起源についての一考を紹介する。

[1] L. Ferrario, D. de Martino, B. T. Gansicke, *Space Sci. Rev.* **191**, 111 (2015)

[2] J. M. Lattimer, M. Prakash, *Science*, **304**, 536 (2004)

[3] M. Kollar, D. Vollhardt, *Phys. Rev. B*, **61**, 15347 (2000)

## 強磁場クエンチ法による準安定超強磁場相の開拓

<sup>A</sup>NIMS MANA、<sup>B</sup>東大物性研、<sup>C</sup>東大工、<sup>D</sup>広島大先進理工、<sup>E</sup>東大生産研

大池 広志<sup>A</sup>、石井 裕人<sup>B</sup>、孫 慧傑<sup>C</sup>、野原 実<sup>D</sup>、小塚 裕介<sup>A</sup>、瀬尾 優太<sup>E</sup>、  
松田 康弘<sup>B</sup>

100 テスラを超える超強磁場は一瞬しか実現できないが、超強磁場中で現れる物質の状態を準安定相としてゼロ磁場で保持できる可能性がある。このような準安定超強磁場相を創出するために、パルス強磁場と急冷を同期する実験手法を開発した。

磁場中で高速に温度を制御するために 10 $\mu\text{m}$  程度の試料に電流パルスを印加したときに発生するジュール熱を利用した。強磁場制御室から送ったトリガー信号と同期させて試料に電流パルスを印加することで、パルス磁場と電流パルスを同期した(図 2)。磁場印加中もゼロ磁場とほぼ変わらない電流波形であり、磁場中でもゼロ磁場と同様のジュール加熱が起きていると推測される。次にパルス印加中の温度変化を確認するために、テスト用の金薄膜(図 1(a))の抵抗をリアルタイムで計測した(図 3)。あらかじめ測定しておいた抵抗の温度依存性のデータを用いて抵抗値を温度に変換すると、1 $\mu\text{sec}$  程度で 50K から 200K に急加熱された後、50K に急冷されていることが分かる(図 3)。これらの実験結果から、図 4 のような履歴で温度-磁場掃引できていることが分かった。今後は開発した強磁場クエンチ法を薄片試料(図 1(b))に適用する予定である。

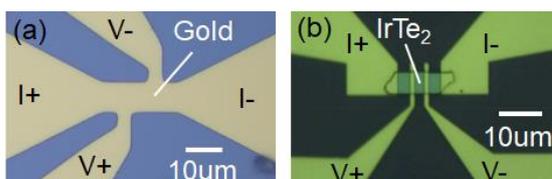


図 1, (a)テスト用金薄膜 (b) IrTe<sub>2</sub> 薄片試料

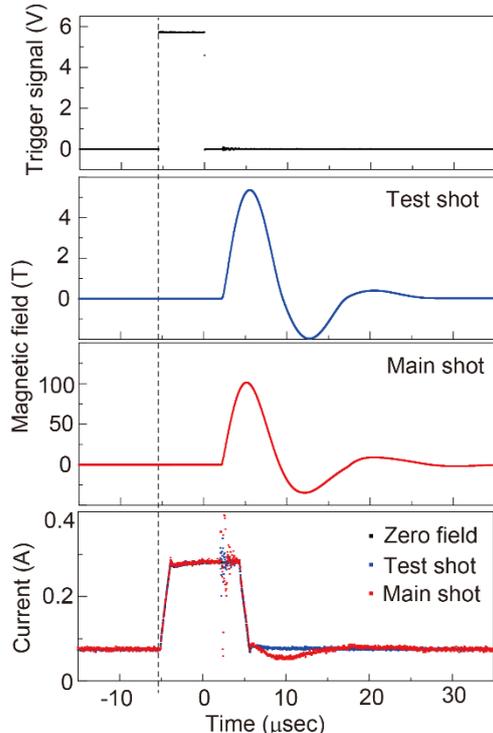


図 2, パルス磁場と電流パルスの同期

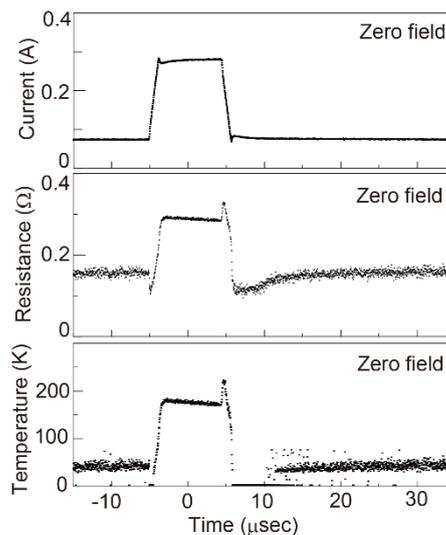


図 3, 試料温度のリアルタイム計測

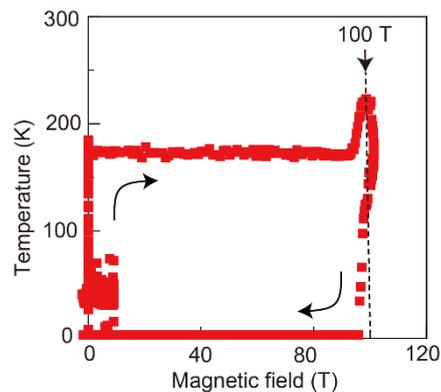


図 4, 温度-磁場の掃引履歴

## 超強磁場による融解現象の探索

東大新領域

今城周作

磁場は電荷の運動に対してローレンツ力、スピンはゼーマン効果を介して電子や核に作用する。そのため、量子物性研究において磁場は電荷・スピン・軌道などの自由度を制御して様々な現象を引き起こす外場として用いられてきた。我々は当該領域の公募研究として、ヘリウム3の核スピンに与える強磁場効果に興味をもち、ヘリウム3に模した物理を議論するために特異な電子系を探索し、Pomeranchuk効果を電子系に拡張することに成功し、その強磁場効果を調べることで磁場誘起固化現象を発見した。その際、超強磁場領域ではその磁場誘起固体状態が再融解するという興味深い現象を発見した[1]。この現象をヘリウム3の観点で考えると、結晶を形作る分子間力を磁氣的に破壊することに対応する。しかし、当該研究で観測したのは電子系の再融解現象であり、実際にヘリウム3などの原子の固体で磁場誘起融解現象が存在するかは不明であり、その検証にも興味をもたれる。

磁場は電荷・スピンの自由度に作用するが、結晶格子への直接的な磁場効果は無視されている。金属や磁性体では電子格子相互作用やスピン格子相互作用を介してフォノンが磁場に依存する可能性があるが、非磁性絶縁体では磁場効果は基本的にないと考えられてきた。しかし、近年、いくつかの非磁性絶縁体で熱ホール効果の観測が報告された[2,3]。これは磁場によってフォノンの流れが曲がるということを示す結果であるが、その詳細な起源は不明である。もしフォノンが磁場に直接作用するのであれば弾性波が磁場中で修正されることを意味しており、結晶格子が超強磁場極限で融解する可能性が期待できる。まさしく、電子系で観測された磁場誘起融解現象の答えとなる。

そこで試験的に非磁性絶縁体であるダイヤモンドと真性半導体シリコンの超音波測定を非破壊方パルスマグネットを用いて60 Tの強磁場まで行った。当日はその結果を報告する。

[1] N. Matsuyama, S. Yokomori, T. Nomura, Y. Ishii, H. Hayashi, H. Ishikawa, K. Matsui, H. Mori, K. Kindo, Y. H. Matsuda, and S. Imajo, under review.

[2] X. Li, Y. Machida, A. Subedi, Z. Zhu, L. Li, and K. Behnia, *Nat Commun.* **14**, 1027 (2023).

[3] X. Jin, X. Zhang, W. Wan, H. Wang, Y. Jiao, S. Li, arXiv: 2404.02863.

## パルス磁場中 CW 型 NMR 測定のための高周波装置開発

北大院理

井原 慶彦

高速に磁場強度が時間変化するパルス磁場中での NMR 測定の実現を目指し、測定原理の開拓と、必要となる装置開発の双方を進めている。一般に、NMR 信号を観測するためには核スピン格子緩和時間よりも長く磁場を印加する必要があるが、パルス磁場中ではこの条件を達成することが困難な場合もある。そこで、第 4 回領域会議ではこれを克服する新しい測定原理として、NQR 遷移を用いた共鳴信号の観測手法を提案し、信号強度に改善の余地はあるものの、NMR 信号が観測可能であることを示した。

これまでに行ってきたミリ秒の時間スケールで磁場が発生するパルス磁場中での NMR 測定では、定常磁場中でもよく使われるスピン - エコー法での NMR 信号観測が可能であったが、磁場発生時間スケールがさらに短い破壊型パルス磁場では、核スピン格子緩和時間より短いというだけでなく、エコー信号を観測するための測定時間を確保することすら困難である。そこで、今回は連続波 (continuous wave: CW) 型の NMR 測定装置開発を行った。ESR 測定などで使われている CW 型の磁気共鳴観測法は、測定感度を高めるため、ゆっくりと磁場を変化させながらロックイン検波を行う構成となっている。これに対し、パルス磁場中では高周波信号の吸収・反射強度を時間の関数として即座に観測する必要がある。すなわち、反射してきた高周波信号の強度 (電力) を DC 出力として取り出すことができる構成としなければならない。そこで、必要な機能が 1 つの IC にまとめられた ADL5920 (Analog Devices) に注目した。まずは、性能をテストするため、NMR 共振器 (共鳴周波数 22.35 MHz) に接続し、送信周波数を変えながら反射信号を観測した。(Fig. 1 黒丸) 得られた結果はネットワークアナライザーで測定した結果 (黒線) と一致しており、非常にシンプルな構成でも高周波信号の反射強度を測定可能であることを確認した。この方式は電気伝導度測定や超音波測定などの高周波測定に広く応用可能である。出力信号の時定数や増幅方法の調整を進め、会議では CW 法での NMR 信号観測の報告を行う予定である。

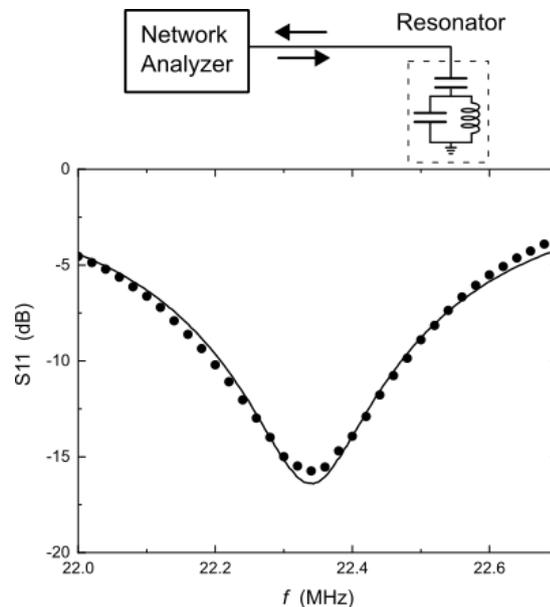


Fig. 1: Frequency response of NMR resonator. RF power is absorbed at the resonant frequency of ~22.35 MHz. Black points obtained by ADL5920 were consistent with the result of Network Analyzer E5061 (solid line).

## 複合スピン格子模型のダイナミクスシミュレーション

東大理

諏訪 秀磨

強磁場実験の主要な研究テーマの一つに、フラストレートスピン系の磁化プラトーが挙げられる。フラストレーションがあるとマクロな状態数のエネルギー縮退が生じ、さまざまな摂動に対して不安定化する。多くの物質において通常は無視できる程度に小さいスピン格子結合であっても、フラストレートスピン系では系の物性を大きく左右する。例えば代表的なフラストレートスピン系であるクロムスピネル酸化物  $\text{ACr}_2\text{O}_4$  ( $A=\text{Zn, Hg, Cd}$  等) では、スピン格子結合により大きな  $1/2$  プラトーが生じる[1]。この系は実験的によく調べられている系ではあるが、実験結果を包括的に説明する理論モデルは見つかっておらず、十分理解されているとは言えない。ここでパルス磁場に対する応答を考えると、一般的にスピンより格子自由度の緩和時間は長くなると期待されるため、格子が「取り残される」現象が生じうる。実際にラダー系 BIP-TENO では磁場の掃引速度を上げると格子がほとんど応答せず、非平衡状態として  $1/3$  磁化プラトーが新たに現れる[2]。またカゴメ格子系  $\text{Cu-titmb}$  では、磁場の掃引速度を上げると  $1/3$  プラトーが現れなくなり、格子自由度の応答の遅れが一因と考えられる[3]。このようなスピン格子複合系の実験結果を包括的に説明する理論モデルの構築と、結晶変形を伴う磁場誘起非平衡現象の解明が重要な課題となっている。そこで我々は従来のボンドフォノンとサイトフォノンモデルを融合した複合スピン格子模型を考案し、クロムスピネル酸化物の磁化過程を再現できることを示した。発表では、パルス磁場に対する時間発展シミュレーションとスピン格子模型のダイナミクスについても議論する。

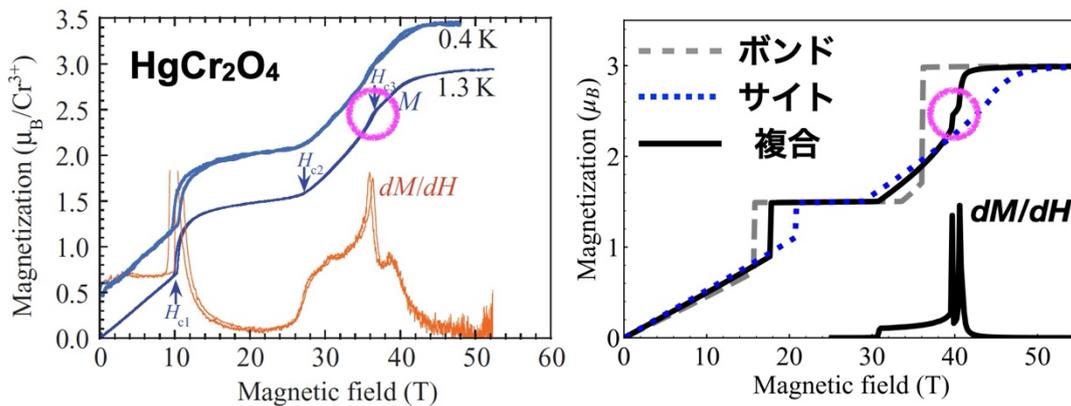


図1.  $\text{HgCr}_2\text{O}_4$  の磁化過程 (左) [1] とモデル計算 (右)。ボンドフォノンやサイトフォノンモデルとは異なり、複合フォノンモデルでは高磁場側の磁化異常 (丸印) が再現される新しい磁気相が現れる。

- [1] S. Kimura et al., Phys. Rev. B 83, (2011) 214401.
- [2] K. Nomura et al., Phys. Rev. B 105, (2022) 214430.
- [3] Y. Narumi et al., Europhys. Lett. 65(5), (2004) 705.

## 動く音響格子中のディラック準粒子

東大物性研

岡 隆史

表面弾性波を照射したディラック準粒子の物性について、フロッケ・ブロッホ理論に基づき解析を行った。その結果、ディラック準粒子を制御できることを見いだした[1]。今後、磁場中のディラック電子系に対しても拡張を行っていく。

[1] T. Oka, *in preparation*

## スピン非保存系に対するスピネルンスト効果の定式化

<sup>A</sup> 東京都立大学大学院理学研究科、<sup>B</sup> 東北大学大学院理学研究科

小山 慎之介 <sup>A</sup>、那須 讓治 <sup>B</sup>

磁場で誘起されたホール効果や熱ホール効果など、外場に対して反対称な応答を示す輸送現象は、キャリアのバンド構造がトポロジカルに非自明であることに由来しているとして、近年精力的に研究がなされている。モット絶縁体においては、電荷の自由度が凍結するため、電気的な輸送は起こらないが、スピンの自由度は活性化のため、磁気秩序からの素励起であるマグノンが熱を運ぶことができる。そのため、これまでトポロジカルマグノンの研究は、熱ホール効果(図 1 上図)を中心に研究が行われてきた。一方、近年では、マグノンに由来したスピニ流に関する研究も進められている。ここでは、トポロジカルマグノンに由来した現象として、印加した熱勾配と垂直方向にスピニ流が生成するスピネルンスト効果を考えることができる(図 1 下図)。トポロジカルマグノンは主にスピニ軌道相互作用によって生じると考えられているが、これはスピニ保存則を破るため、スピニ流は保存流ではなくなる。これによって、スピネルンスト効果をうまく定式化することが困難になる。しかしながら、これまでの研究では、スピニ保存系の理論をそのままスピニ非保存系に流用することが行われてきた。

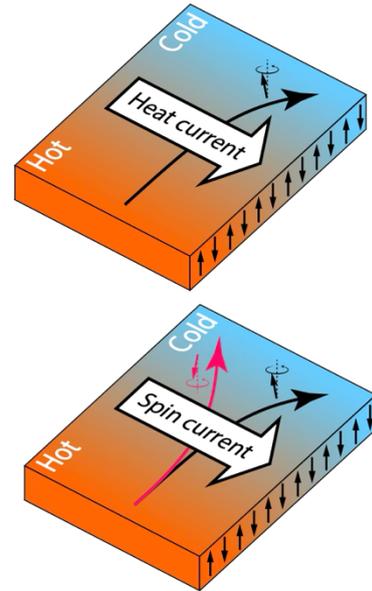


図 1. 熱ホール効果(上図)とスピネルンスト効果(下図)。

本研究では、この問題を解決するため、スピニ非保存系でも適用可能なマグノン由来のスピネルンスト効果の定式化を目的とする。一般的な局在電子模型を出発点として、Flavor-wave 理論によって自由ボソン系のハミルトニアンとして書き換えを行う。このとき、連続の方程式によってスピニの時間微分は、スピニ流の発散だけでは書けず、トルク項と呼ばれる付加項が現れる。この付加項を計算で取り入れるために、本研究では、半古典理論を適用し、空間に依存する形で、スピニ流とトルクの期待値を計算し、スピネルンスト係数を定式化することに成功した [1]。この表式では、マグノンのベリー曲率だけでなく、量子計量も現れる。我々の表式を、磁場下のキタエフ模型に適用すると、量子計量に由来して、ベリー曲率のみを起源とする熱ホール効果とは全く異なる温度依存性を示すことがわかった。当日は、スピニ保存系の理論を無理矢理スピニ非保存系に適用した従来の理論との違いも議論する予定である。

[1] S. Koyama, and J. Nasu: arXiv:2503.10281.

## 誘電体の磁場応答とポーリング依存性

<sup>A</sup> 芝浦工業大学

富田 裕介 <sup>A</sup>

最近、邱らはチタン酸バリウムに 100 T を超える磁場を印加し、その応答について調べた。その結果、印加磁場垂直に電場ポーリングしたサンプルでは、磁場印加による誘電率の異常は見られなかったが、印加磁場平行にポーリングしたサンプルでは、磁場が 100 T を超える領域で誘電率が減少する応答が見られた[1]。大きな磁場領域でのみ応答が見られることから、この応答は誘電体の磁場への応答と見られるが、印加磁場の時間変化を見ると、磁場への応答を見せる前に数十ボルト程度の誘導電場が試料に印加されているように見える。そこで、ポーリングの方向による誘導電場への応答の違いについて有限要素法を用いて調べてみたところ、磁場垂直にポーリングされたサンプルでは電歪効果が限定的だったのに対し、磁場平行にポーリングされたサンプルでは大きな電歪効果が見られた(図 1)。

本講演では、ポーリングの向きによる応答の違いの起源と大きな磁場領域における誘電率が低下する考えうる原因について発表する。

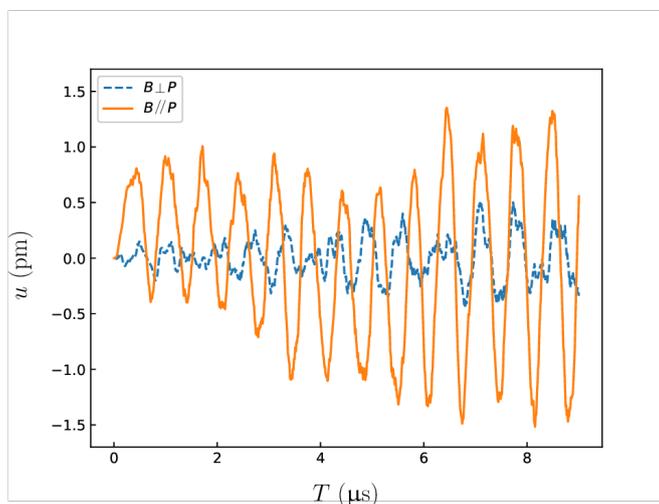


図 1. ポーリングの向きによる変位の大きさの違い。

[1] Polin Chiu, Yuto Ishii, and Yasuhiro H. Matsuda, J. Appl. Phys. **137** (2025), 155903.

## 強磁場下結晶構造変化の第一原理解析

<sup>A</sup>山形大

笠松 秀輔

強磁場下の結晶構造変化は本領域における主要なトピックスの1つである。本研究では、第一原理計算を基盤とした解析によって、観測された磁場下の変化の解釈、および実験前の予測を試みている。最近の例として、強磁場印加時の固体酸素β相の構造変化をX線自由電子レーザーによるX線回折で観測することに成功した[1]。そこで、観測された1%もの巨大かつ非等方的な磁歪(ab面内で膨張、面外で圧縮)の第一原理計算による解釈を試みた。まず、vdW-DF+U法[2]を用いた電子状態計算を行い、得られた電子状態から最局在ワニエ関数を計算し、タイトバインディングモデルを構築した。このタイトバインディングモデルから、ハイゼンベルクモデルにおける相互作用パラメータ $J$ を計算し、磁場印加前と後の構造での変化を調べた(図1)。ab面内の最隣接相互作用が最も大きく、反強磁性的であるが、磁場下の約1%の面内格子定数の膨張に伴って10%程度絶対値が減少している。つまり、強磁場下では、ab面内膨張によって反強磁性相互作用を弱めることで安定化していることが確認できた。一方、面外(c軸)方向の相互作用は面内に比べて1桁程度小さい。つまり、非等方的な磁歪を駆動しているのはab面内の磁氣的相互作用であることが確認できた。

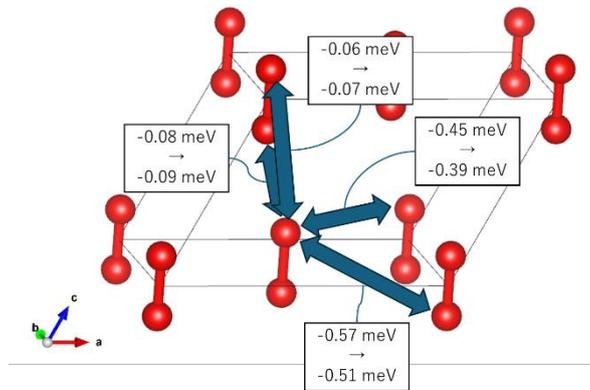


図1. β酸素における、磁場下の相互作用パラメータ $J$ の変化。

[1] A. Ikeda et al., arXiv: 2504.10085

[2] S. Kasamatsu et al., Phys. Rev. B 95, 235120 (2017).

第一原理計算に基づいた多自由度モット絶縁体の有効理論と  
その磁場応答

A 東北大理、B 都立大理、C 千葉大理

岩崎 龍太<sup>A</sup>、小山 慎之介<sup>B</sup>、是常 隆<sup>A</sup>、星野 晋太郎<sup>C</sup>、那須 譲治<sup>A</sup>

強いクーロン斥力により電子の電荷自由度が凍結したモット絶縁体と呼ばれる物質群では、スピンや軌道自由度が顕在化し、スピン液体や励起子絶縁体など、量子効果に起因した多彩な物理現象が発現する[1]。例えばスピン軌道モット絶縁体の1つである $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>では、Cl元素を媒介したRu-Ru間の異方的な局在スピン間相互作用によりキタエフスピン液体の実現が指摘されている[2]。最近では100 T級の面直磁場下でスピン液体の可能性が報告された[3]ほか、ハロゲン元素置換を施したRuX<sub>3</sub> (X=Br, I)の合成と物性測定が行われる[4, 5]など、注目を集めている物質群である。

このようなモット絶縁体に対して定量的な理論解析を行う場合、多軌道ハバードモデルに対して物質のバンド構造と電子間相互作用の取り扱いの両立が必要であるが、計算コストの観点から極めて困難である。以上の背景の下、我々は局在有効モデルへ還元することで、遍歴系と比較して困難を克服しやすいことに注目し、物質に即した局在有効モデルの構築とその平均場・古典解析手法を確立した[6]。

本研究では、RuX<sub>3</sub> (X=Cl, Br, I)を例に、局在多軌道電子系の定量解析手法構築を目指す。前回の領域会議では、Quantum ESPRESSOなどの第一原理計算パッケージと有効理論構築との接続と、構築された局在有効モデルに対し、スピン波理論を一般化したflavor-wave理論[7]に基づく励起スペクトルの計算結果について報告した[8]。今回の発表では、まず有効理論の局在自由度と磁場との結合ハミルトニアン<sup>1</sup>の定量評価手法について報告する。さらに、基底状態だけでなく励起状態も組み込んだ有効理論を系統的に構築した。構築した有効理論を用いて、励起状態を取り込んだことによる秩序状態の変化を、平均場近似による磁気構造とflavor-wave理論に基づく励起スペクトルを計算することで議論する予定である。

本枠組みの完成により、RuX<sub>3</sub>を始めとするvan der Waals物質群などの軌道自由度をもつ系に対し、平均場・古典近似及びflavor-wave理論を併用した磁場応答に関する包括的な定量解析の可能性が開かれる。

- [1] 例えば D. I. Khomskii, ECS J. Solid State Sci. Technol. **11**, 054004 (2022).
- [2] レビューとして S. M. Winter *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **29**, 493002 (2017).
- [3] X.-G. Zhou *et al.*, Nat. Commun. **14**, 5613 (2023).
- [4] D. Ni *et al.*, Adv. Mater. **34**, 2106831 (2022).
- [5] Y. Imai, *et al.*, Phys. Rev. B **105**, L041112 (2022).
- [6] R. Iwazaki *et al.*, Phys. Rev. B **108**, L201108 (2023).
- [7] S. Koyama and J. Nasu, Phys. Rev. B **108**, 235162 (2023); S. Koyama and J. Nasu, Phys. Rev. B **109**, 174442 (2024).
- [8] 岩崎 龍太 他, 「1000 テスラ科学」第4回領域会議, 31.

## 磁場と光の非線形相互作用による真空磁気複屈折効果の検証

東大 素粒子センター 稲田 聡明

2012年のHiggs粒子の発見は、それまで物質を構成する fermion やそれらの相互作用を媒介する gauge boson を研究対象としてきた素粒子物理学を新たなフェーズへと導いた。Higgs 粒子が他の素粒子と本質的に異なり、「真空」と同じ量子数を持つスカラー粒子であることで、真空は空っぽではなく Higgs 場が凝縮しており、その相転移により宇宙が進化してきたことを示している。またそれは同時に素粒子研究自体も、宇宙や真空、及びそれらを内包する「時空」に対する研究へと自然に拡張される契機となった。現在では、宇宙の成り立ちを説明する「物質・反物質間の非対称性」や、銀河及び星の形成を支配する「暗黒物質」、さらに宇宙加速膨張の起源となる「暗黒エネルギー」の探索が精力的に行われている。

A05 は素粒子班及びプラズマ班で構成され、素粒子班では

- ・ 初期宇宙の進化や星の形成を支配する暗黒物質および暗黒エネルギーの高感度探索、および新粒子に対する物性系でのアナロジーの調査
- ・ ブラックホールや中性子星などの強磁場天体で発現する真空の磁気応答や異常シンクロトロン放射の検証、および極限環境下での新たな素過程の発見

を研究目的として設定している。暗黒物質等の新粒子探索と真空複屈折等の新現象の検証のいずれにおいても従来とは異なる高感度な検出手法の開発が重要な研究項目となる。本講演では最近取り組んでいる光を用いた新規測定手法の原理検証実験やアクション探索等の計画の進捗状況について説明する。

## パワーレーザーを用いた実験室宇宙物理学 -宇宙磁化プラズマ実験の進展-

<sup>A</sup> 阪大レーザー研、<sup>B</sup> 九大総合理工

坂和 洋一<sup>A</sup>、森田 太智<sup>B</sup>

大型のパワーレーザーを用いて実験室で宇宙現象の素過程を明らかにすることを目指した実験室宇宙物理学、「レーザー宇宙物理学」を推進している。パワーレーザーをターゲットに照射すると、レーザーでしか作り出せないような高温・高密度・高流速の極限プラズマ状態を実現することができる。これを用いて宇宙プラズマ現象を模擬し、天体のリモート観測では取得が困難なマイクロな物理量と、人工衛星による「その場」観測では得られないマクロ構造を同時に計測することができる。

宇宙では様々な天体でベキ乗のエネルギースペクトルを持つ非熱的な高エネルギーの荷電粒子、宇宙線が生成されている。その標準的な生成機構、すなわち加速機構として、無衝突衝撃波と磁気リコネクションが提案されている。ブラックホール誕生の瞬間に発生するガンマ線バーストや、重い恒星の進化の最期に起こる超新星爆発等の天体現象では、普遍的に衝撃波が発生する。これらの宇宙プラズマ衝撃波は、無衝突プラズマ中に発生する衝撃波であり、無衝突衝撃波と呼ばれている。プラズマ中の電場・磁場と荷電粒子の相互作用によって、衝撃波上流の粒子よりも大きな運動エネルギーを持つ粒子の生成、すなわち加速が行われる。磁気リコネクション (磁力線再結合) とは、向きの異なる反平行の磁力線を伴う 2 つのプラズマが互いに近づく際に、両プラズマ間に流れるリコネクション電流が、電気抵抗で散逸するために磁力線が繋ぎ変わる現象である。再結合後は磁場による張力でプラズマが加熱・加速される。これは、太陽フレアや磁気圏プラズマ、降着円盤等の天体プラズマ、磁場閉じ込め核融合プラズマ等、様々な環境で観測されており、磁気エネルギーをプラズマ粒子の運動および熱エネルギーへと変換する重要な現象である。

我々は、大阪大学レーザー科学研究所のパワーレーザー激光 XII 号を用いた宇宙磁化プラズマ実験を行っている。激光 XII 号は 12 本のビームを有し、約 700 J/beam を約 1 ns という短時間に、直径約 2 m の真空容器内に設置したターゲットの約 1 mm の領域に照射することができる。講演では、これを用いた無衝突衝撃波や磁気リコネクション実験の進展を紹介する。

## 非線型光学過程による相似ゲージ場の研究

<sup>A</sup> 東大素セ、<sup>B</sup> 千葉大、<sup>C</sup> 東北大

中山 和之<sup>A</sup>、藤代 隼人<sup>B</sup>、宮本 克彦<sup>B</sup>、大野 誠吾<sup>C</sup>

近年、光渦を用いた研究が活発である。光渦は位相特異点を伴った螺旋上の波面を持つ電磁モードであり、理学・工学の両面から興味深い研究対象となっている。光渦の波面特性を利用した超解像顕微鏡、光マニピュレーション、光渦の自由度を活用した大容量空間多重通信、量子光学への応用などの研究が提案されている。このような直接的な物性応用とは別に、現実の物理系で観測・検証が困難な現象を相似な構造を有するアナロジー物理系で実証する研究が発展している。我々はその中で、光渦のような位相構造・角運動量を持つ光を用いた非線型光学過程に興味を持っている。最近、三次の非線型相互作用を利用することで角運動量を持つブラックホールをエミュレートし、ゼルドビッチ・マイスナー条件下で準粒子が増幅するペンローズ超放射の興味深い実験報告が行われた [1]。また一般的に非線型光学過程によって発生した光は、ゲージ場を伴う相似物理系と良い対応を持つ [2]。本研究では光渦をポンプ光として用い、非線型相互作用によって生じたアイドラー光のビームパターンの時間発展を観測した。

図 1. に実験配置図を示す。光源は通信帯である  $1.5\mu\text{m}$  帯のパルスレーザーを 2 セット用意した(パルス幅:  $7.4\text{ ps}$ 、平均パワー:  $0.5\text{ W}$ )。ポンプ光( $1.513\ \mu\text{m}$ )を螺旋型位相板によりトポロジカルチャージ  $\ell = \pm 1$  を持つ光渦に変換した。アイドラー光( $1.560\ \mu\text{m}$ )はシリンドリカルレンズを用いて楕円形(縦横比 1:2)のガウスビームに成形した。これら 2 つの光を有機非線型光学結晶(DAST 結晶)に入射した。DAST 結晶の出射面でのビームパターンを観測するための結像光学系を構築し、ダイクロイックミラーおよび光学フィルターを用いてアイドラー光を観測した。ここで厚みの異なる 3 種類の DAST 結晶を用いることで、アイドラー光の時間発展を調べた。アイドラー光の回転角度は DAST 結晶の厚みに比例するとともに、ポンプ光のトポロジカルチャージの符号に応じて回転方向が反転していることが観測された。これは、光渦によって生じた人工磁場(相似ゲージ場)の反転に対応していると考えられる。発表では実験と解析の詳細について報告を行う。

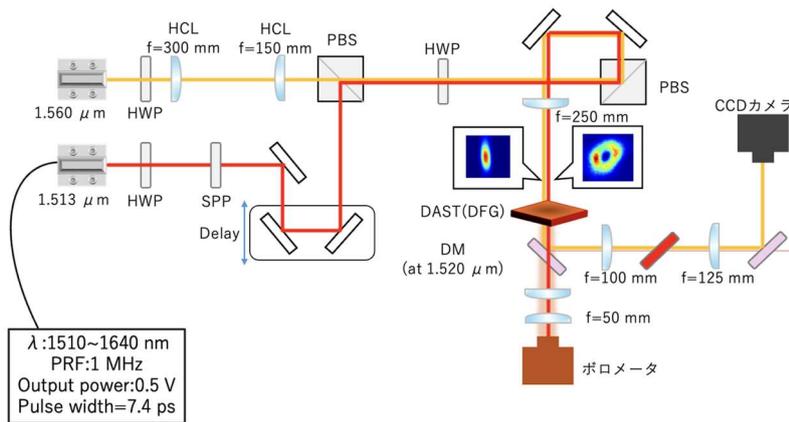


図 1. 実験配置図

[1] M. C. Braidotti et al., Phys. Rev. Lett. 128, 013901 (2022).

[2] N. Westerberg et al., Phys. Rev. A 94, 023805 (2016).

# Poster Presentations

## Poster presentations

June 20th 16:30 - 18:00 (IMR, Tohoku Univ.)

Poster No.

1	彭詩悦	東京大学	A01	超強磁場における銅酸化物高温超伝導体の電子輸送特性
2	HUANG JIAJUN	東京大学	A01	Metal-insulator transition of $Ti_2O_3$ thin-films under ultrahigh
3	井口寛太	名古屋大学	A01	$CsW_2O_6$ における分子軌道結晶相に対する磁場効果
4	加藤大地	京都大学	A01	$d^1$ バナジウム酸ハロゲン化物の構造
5	Zhao Junmeng	ISSP、University of Tokyo	A01	Quest for the magnetic-field-induced phase transition of the Peierls states in a Tioxide
6	松田康弘	東京大学	A01	破壊型超強磁場発生装置の現状
7	WANG Xiaochen	University of Tokyo	A01	Investigation of the insulator-metal transition mechanism of $V_{1-x}W_xO_2$ in ultrahigh magnetic fields
8	林浩章	東京大学	A01	$S = 1/2$ カゴメ反強磁性体 $YCu_3(OD)_{6.5}Br_{2.5}$ における磁化プラトーの探索
9	SHAO Mingyang	National Institutes for Quantum Science and Technology	A01	Tracking Ferroelectric Domain Formation in 100 nm $BaTiO_3$ using Bragg-CDI
10	原正彦	東京大学大学院	A01	KF で置換した $BaTiO_3$ への超強磁場効果の探索
11	石井裕人	東京大学	A01	100 テスラ級超強磁場中における高圧力下物性測定環境の開発
12	HUANG KAIYANG	University of Tokyo	A01	Unusual optical absorption in $NiPS_3$ due to Zhang-Rice transitions in high magnetic Fields
13	鬼頭俊介	東京大学	A01	パイロクロア型ニオブ酸化物における原子変位型短距離秩序と磁場誘起相転移の可能性
14	野田孝祐	電気通信大学	A02	ベクトルパルスマグネットの用いた異方的測定手法の開発と進捗
15	野村肇宏	静岡大学	A02	$BaTiO_3$ の超強磁場超音波測定
16	山根 聡一郎	京都大学	A02	Investigation of time-reversal symmetry breaking in $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ by magneto-optical Kerr effect
17	鈴木 秀弥	京都大学	A02	フォトニック結晶中空ファイバーを用いた磁場中磁気光学 Kerr 効果測定手法の開発
18	中村颯汰	京都大学大学院	A02	パルス磁場下や超低温下での測定に向けた磁気光学カー効果測定セットアップの開発
19	二宮大翔	広島大学	A02	ビエゾ磁気効果を示す交替磁性体 $CrSb$ の単結晶育成
20	小林秀彰	電気通信大学	A02	フル 3 次元有限要素法マルチフィジクスシミュレータによる一巻きコイル法の磁場発生ダイナミクスの解析と磁場増大法の提案
21	野原実	広島大学	A02	超強磁場による秩序破壊を予測する磁化率変化と相転移
22	松本峻平	広島大学	A02	メタルリッチ化合物 $Zr_6FeSb_2$ における Fe 1 次元ネットワークに由来するフェルミ面
23	松下真大	広島大学大学院	A02	希土類ジルコン $TmPO_4$ における電気四極子転移の磁場角度依存性
24	近藤雅起	東京大学	A03	微細加工デバイスを用いた極性縮退半導体 $SnTe$ のパルス強磁場精密磁気抵抗測定
25	山口皓史(Terufumi Yamaguchi)	神戸大学 (Kobe University)	A03	電場と温度勾配に誘起される非線形輸送現象の微視的理論
26	多湖崇人	神戸大学	A03	超量子極限における磁気抵抗: 磁場誘起のユニタリティ極限へのクロスオーバー
27	須藤健太	東京大学	A03	FIB 微細加工デバイスを用いた強磁場輸送測定
28	山田 暉馨	神戸大学	A03	Paschen-Back-like crossover in the magneto-transport phenomena
29	山下淳志	大阪大学	A03	Type II ディラック電子状態を有するフェリ磁性体 $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$ の量子振動測定
30	廣田碩人	神戸大学	A03	磁場印加による $ZrTe_5$ の熱電変換効率向上に関する理論研究
31	GUO YULIN	東京大学	A04	The optical absorption spectra of a microbial rhodopsin and the transient absorption of a microbial rhodopsin in ultra-high magnetic field
32	吉田峻	大阪大学大学院	A04	機械的刺激で発生したラジカル種が示す発光の磁場効果
33	樋川岳真	大阪大学大学院	A04	五配位 $MnII$ 錯体の外部磁場による発光特性変調
34	永田崇	東京大学	A04	紫外光吸収型チャンネルロドプシンの発見
35	太田那生也	東北大学	A06	Spinless Hubbard 模型におけるフラストレーションと超強磁場効果
36	王子瑜	物性研究所	A06	面内磁場下における二層銅酸化物の可能なトポロジカル超伝導体
37	大橋翼 (Ohashi Tsubasa)	名古屋大学 (Nagoya University)	B01	$RuP$ の強磁場印加による電子状態変化の XAFS 測定
38	大橋翼 (Ohashi Tsubasa)	名古屋大学 (Nagoya University)	B01	高強度 X 線照射による $CuIr_2S_4$ の逐次相転移現象
39	瀬高 渉	東京都立大学	B01	ジフルオロフェニレン架橋かご型化合物の強磁場下の誘電緩和
40	今井良宗	東北大学	B01	キタエフスピン液体候補物質 $Ru(B_{1-x}V_x)_3$ 単結晶の磁気トルク測定

41	厳正輝	東京大学	B01	立方晶らせん磁性体 SrFeO <sub>3</sub> における磁気異方性の解明と相図の再検討
42	江見 方敏	名古屋大学	B01	放射光 X 線を用いたスピネル型化合物 CuIr <sub>2</sub> S <sub>4</sub> の高圧下構造の同定
43	三澤遼	東京大学	B01	カゴメ金属における分子軌道形成による連続的な斜方歪み
44	砂田龍太郎	名古屋大学	B01	放射光 X 線を用いた分子ジャイロコマ C <sub>14</sub> PhF <sub>2</sub> の構造研究
45	伊藤大悟	名古屋大学大学院	B01	Tl <sub>2</sub> Ru <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の Ru <sub>2</sub> O 分子形成と強磁場による分子結合破壊の可能性
46	田中優樹	東京大学	B01	クリーンな 3D ディラック半金属 Y <sub>8</sub> CoIn <sub>3</sub> の実現
47	中村彩乃	東京科学大学	B01	面内異常ホール効果の強磁場応答
48	松林龍	大阪大学	B01	フラストレート格子を有する強誘電体 Cd <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の局所構造と磁場応答に関する研究
49	出口裕暉	東京科学大学	B01	ディラック半金属 Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> 薄膜における面内異常ホール効果の強磁場測定
50	中野遼太	東京大学	B01	ワイル磁性体 GdAlSi における歪みなしサイクロイドらせん磁性とマルチ Q 構造の発見
51	袴田怜志	東京理科大学	B01	鉄系超伝導体 Fe(Te,S)における横波弾性定数の磁場依存性
52	岡真史	北海道大学	B01	中性イオン性転移系物質 TTF(DAzP) <sub>2</sub> CA の電子物性
53	久保泰星	名古屋大学	B01	3D-ΔPDF 解析を用いた RuX(X = P, As)系に生じる短距離秩序の観測
54	米村弘明	崇城大学	B02	蛍光生成ブロープによる TiO <sub>2</sub> の光触媒反応に対する磁場効果の検討
55	高橋智哉	富山大学	B02	WS <sub>2</sub> /アントラセンデンドロンナノハイブリッドの合成と光触媒活性
56	護摩堂一鷹	富山大学	B02	ノニオン性界面活性剤を用いた CNT/C <sub>60</sub> 光機能界面の活性制御
57	内藤佳輝	大阪大学大学院	B03	外部磁場を印加したレーザーイオン加速の最適化に関する研究
58	三田村裕幸	東京大学	A03	パルス強磁場中での単体テルルの非相反電気伝導の観測
59	加藤 萌結	北海道大学	C01	ブリージングカゴメ反強磁性体における磁場中量子多体状態の探索

## 超強磁場における銅酸化物高温超伝導体の電子輸送特性

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup> 東北大金研、<sup>C</sup> 名古屋大学、<sup>D</sup> 東南大学

彭詩悦<sup>A</sup>、周旭光<sup>D</sup>、松田 康弘<sup>A</sup>、石井裕人<sup>A</sup>、淡路智<sup>B</sup>、

有田知徳<sup>C</sup>、加藤大雅<sup>C</sup>、吉田隆<sup>C</sup>

Understanding of the strange metal phase of high-Tc superconductors (HTSC), who lies outside the standard Fermi-liquid description of metals [1], is faraway to be completed. As a crucial tool, magnetic fields can directly control the spin and charge of this strange metal phase, which provide an approach to clarify its origin. Thus, magnetoresistance (MR) is a key focus with previous studies also reporting the presence of anomalous MR behavior in the strange metal phase of HTSC [2]. Here, we used optimally doped  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ( $T_c = 89 \text{ K}$ ) which is one of the cleanest and ordered cuprates, to explore the possible anomalous properties of MR. The strange metal phase in such high-Tc YBCO at low temperatures has never been well investigated because ultra-high magnetic fields exceeding 100 T are required to suppress the superconducting phase. Generating such high magnetic fields can only be achieved through the pulsed destructive manner. It is challenging to investigate the electric resistivity properties in such system due to the extremely short duration time and electromagnetic noise. Here, we accomplished this experiment by developing radio frequency (RF) reflection method adapted to the single-turn coil and electromagnetic flux compression (EMFC) magnetic field generators.

This work focuses on the longitudinal magnetoresistance (LMR) with  $B \parallel J \parallel ab$ -plane. In this case, theoretically no cyclotron motion and related scattering are expected within classical framework. In the single-turn coil system, we investigated the LMR over a temperature range spanning from 52 to 150 K up to 103 T as shown in Fig. 1(a). For the non-saturating and nearly B-linear LMR observed in the high-field phase, which cannot be explained by orbital motion in quasiparticle framework, we propose that the contributions from non-orbital origin, associated with the quantum criticality in strange metal phase, potentially contributes to the MR of YBCO. In the electromagnetic flux compression (EMFC) system, an oscillation as a function of magnetic fields with a peak in FFT analysis was observed in the LMR with magnetic field exceeding 500 T at 4.2 K, as shown in Fig. 1(b). If this observed oscillation proved to be the quantum oscillations, it implies a finite three-dimensional characteristic of the Fermi surface, which could provide a significant clue to elucidating the electronic state of YBCO. The details will be introduced in the poster.

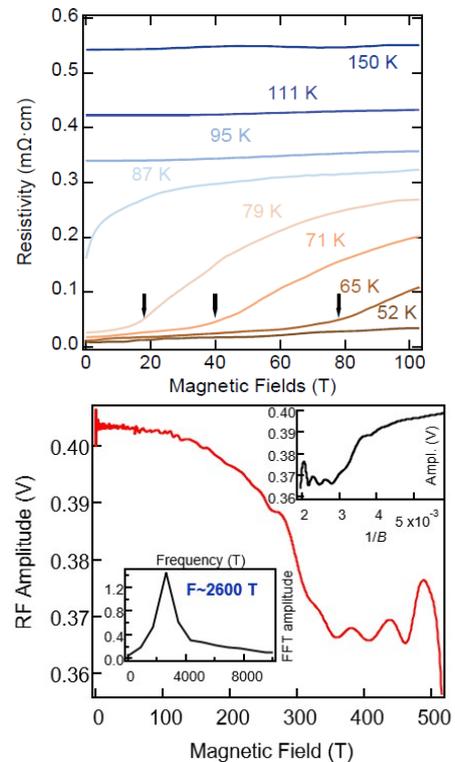


図 1 . LMR of YBCO (a) at 52 K~150 K in single-turn coil system; (b) at 4.2 K in EMFC system

[1] P.W. Phillips et al., Science 377, eabh4273 (2022).

[2] P. Giraldo-Gallo et al., Science 361, 479 (2018).

## Metal-insulator transition of $\text{Ti}_2\text{O}_3$ thin-films under ultrahigh magnetic fields

Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

Huang Jiajun, Yasuhiro H.Matsuda

Titanium sesquioxide ( $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ) is drawing broad attention due to its fascinating physical properties and promising applications in the fields of energy, biomedicine, and electronics, among others. Its richness is due mainly to the strongly correlated  $3d^1$  electrons on the  $\text{Ti}^{3+}$  sites. In stark contrast to titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ),  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  has an ultra-narrow bandgap ( $\approx 0.1$  eV) at room temperature, resulting from strong correlation among the  $3d^1$  electrons. Distinct electrical and optical properties are introduced in  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ , accompanied with varied intriguing applications.[1]

It is shown that an ultrahigh magnetic field of 500 T renders the insulator phase of tungsten (W)-doped  $\text{VO}_2$  metallic. The spin Zeeman effect on the d electrons of the V ions dissociates the dimers in the insulating phase, resulting in the delocalisation of electrons.[2] As a result, our research aims to discover the metal-insulator transition of thin-film  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  under ultra magnetic field. By now we have already observed the metal-insulator transition in  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  varying from temperature. However, under certain temperature where a pulsed magnetic field goes up to 52 T, we cannot easily find the transition. Although we also use continuous magnetic fields up to about 10 T for more precise measurements, no distinct magnetic field effect has been observed. Further study will be done by optical and electric resistivity measurements under higher magnetic fields.

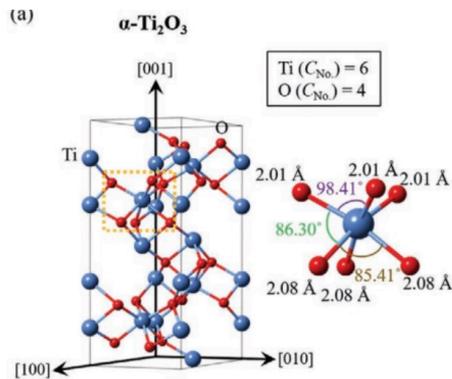


Fig1. Crystal structure of  $\alpha\text{-Ti}_2\text{O}_3$ [1]

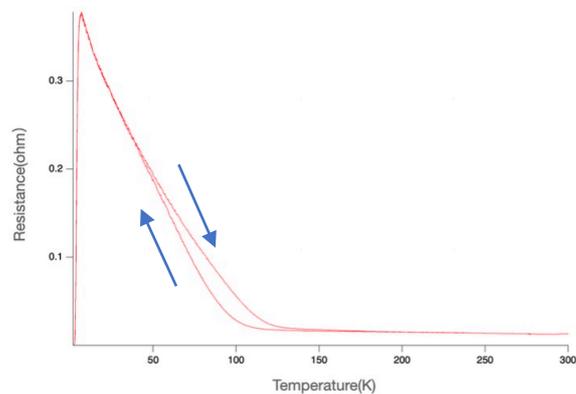


Fig2. Electric resistance of  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  thin film as varying temperature. The superconducting phase appears at a low temperature as reported in Ref.[3]

[1]Yangyang Li, et al,Adv. Funct. Mater.32, 2203491 (2022)

[2]Yasuhiro H. Matsuda, et al, NATURE COMMUNICATIONS 11:3591 (2020)

[3]Yangyang Li, et al, NPG Asia Materials, 10, 522(2018)

## CsW<sub>2</sub>O<sub>6</sub>における分子軌道結晶相に対する磁場効果

<sup>A</sup>名大院工、<sup>B</sup>東大物性研

井口 寛太<sup>A</sup>、平井 大悟郎<sup>A</sup>、石井 裕人<sup>B</sup>、林 浩章<sup>B</sup>、彭 詩悦<sup>B</sup>、

周 旭光<sup>B</sup>、松田 康弘<sup>B</sup>、竹中 康司<sup>A</sup>

結晶中で遷移金属元素間に強固な結合が形成され、この分子状のクラスターが規則正しく配列したものを、分子軌道結晶と呼ぶ[1]。これらの物質は、結合形成に伴い伝導電子が分子軌道に捕縛されることによる金属-絶縁体転移を示す場合がある。2 中心 2 電子結合により V 二量体を形成し、340 K において金属-絶縁体転移を示す VO<sub>2</sub> について、V サイトに W を置換して転移温度を 100 K 付近にまで抑制した系において、500 T という超強磁場を印加することで絶縁体から金属への相転移が観測された[2]。この転移は、強力な磁場により 2 中心 2 電子結合の結合性軌道を占有している反平行スピンの平行に揃うことにより分子軌道が破壊されることで起こる。本研究では、このような磁場による分子軌道結晶の破壊に着目し、磁場誘起相転移の過程において異なる磁場応答を期待して、VO<sub>2</sub> の 2 中心 2 電子結合と異なる結合様式により分子軌道結晶を形成する様々な物質群に対する磁場印加を行っている。本発表では、3 中心 2 電子結合により W 三量体を形成し、215 K において金属-絶縁体転移を示す CsW<sub>2</sub>O<sub>6</sub>[3] について、一巻きコイル法を用いたパルス強磁場中における磁歪と伝導度測定の結果について報告する。

CsW<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 焼結体は真空中で Cs<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>, WO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub> の混合物を焼成し、得られた粉末を水洗することで得た。各測定には、SPS 法により 100 MPa, 500°C, 10min の条件で緻密に焼結をした試料を用いた。転移温度直下 (214 K) において 100 T までの磁歪測定を行った結果、65 T 付近でわずかな体積変化を観測した。CsW<sub>2</sub>O<sub>6</sub> は絶縁体相から金属相への転移において、わずかに収縮することから、磁歪測定で得られた変化は磁場誘起金属-絶縁体転移を示唆するものであると考えられる。そこで、転移の際により顕著な変化がみられる伝導度に着目し、RF を用いた磁場中での電気抵抗率測定を行った。その結果、図に示すように磁場印加開始後からシグナルの変化が観測された。シグナルの増加は抵抗値の増加を表しており、磁場中で抵抗値が変化したことがわかる。しかし、得られた結果は dB/dT の大きな領域で抵抗値が低下し、小さな領域で抵抗値が上昇する、期待される振る舞いとは逆の変化であった。磁場印加により発生する渦電流による発熱の影響が考えられるため、端子付け方法の改善や試料形状の検討を行っており、今後の展望についても報告する。

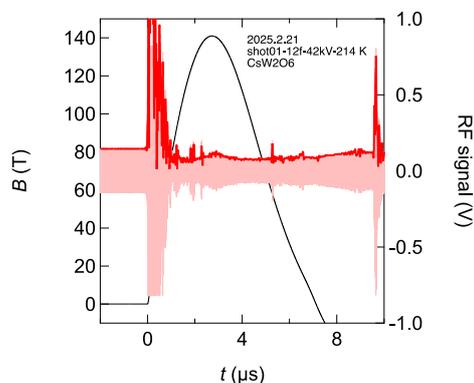


図. CsW<sub>2</sub>O<sub>6</sub> の 214 K における磁場と RF signal の時間変化

[1] Z. Hiroi, Prog. Solid State Chem. **43**, 47 (2015).

[2] Y. H. Matsuda *et al.*, Nat. Commun. **11**, 3591 (2020).

[3] Y. Okamoto *et al.*, Nat. Commun. **11**, 3144 (2020).

## d<sup>1</sup>バナジウム酸ハロゲン化物の構造

<sup>A</sup>京都大学

加藤 大地<sup>A</sup>、Vidhya Lalan<sup>A</sup>、陰山 洋<sup>A</sup>

層状物質である NbOX<sub>2</sub> (X = Cl, Br, I)は、非常に大きい第二次高調波発生 (SHG)<sup>1</sup> や圧電応答<sup>2</sup> から近年注目を集めている材料系である。この物質は、NbO<sub>2</sub>X<sub>4</sub> の八面体を有しており、Nb が d<sup>1</sup> の電子配置を持っているにも関わらず、Nb が八面体中心からズレる off-centring 歪みにより、自発分極を有している。さらに興味深いことに、polar axis と直行する方向には、Nb-Nb のダイマー形成があり絶縁体化している。この物質では、強誘電歪みとダイマー形成がカップルしているとの報告があり<sup>3</sup>、もしこの系に強磁場を印加すれば、磁場によるダイマーの開裂を通して、強誘電歪みを操作できると考えた。ただ、NbOX<sub>2</sub> では、そもそも温度によるダイマー形成の開裂の報告がなく、磁場誘起での構造変化を期待するのは困難であると考えた。

このような背景から、より低温でのパイエルズ転移を期待して、報告の室温構造に歪みが無い VOB<sub>2</sub> (空間群 *Immm*<sup>4</sup>) に着目した。しかし、興味深いことに、粉末放射光 X線回折の解析や SHG 測定等から、VOB<sub>2</sub> は報告と異なり強誘電的に V がオフセンタリングしている構造 (空間群 *Im2m*) であることが明らかとなった (図 1a)。一方で、30K までの SXRD で、V-V のダイマー形成を示唆するような XRD パターンの変化は確認できなかった。VOB<sub>2</sub> において、期待していた V-V のダイマー形成は見られた無かったものの、今回の発見は2つの観点から面白くなる可能性があると考えている。1つの可能性は、V-V がダイマー形成していないので、Nb 体と異なり磁性が期待できることである。磁化率の温度変化に極大を示すような挙動が見られたことから、低次元磁性が推測される。もう一つは、NbOX<sub>2</sub> 系の Nb の off-centering が 0.16 Å 程度であるのに対して、VOB<sub>2</sub> は 0.32 Å の巨大な歪みを示す点である。NbOX<sub>2</sub> 系は巨大な SHG 応答などから注目されているが、VOB<sub>2</sub> がより大きな polar 歪みを示すことから、Nb 体を凌駕する物性が期待できる。当日は、これらの観点について、共同研究の可能性なども議論したい。

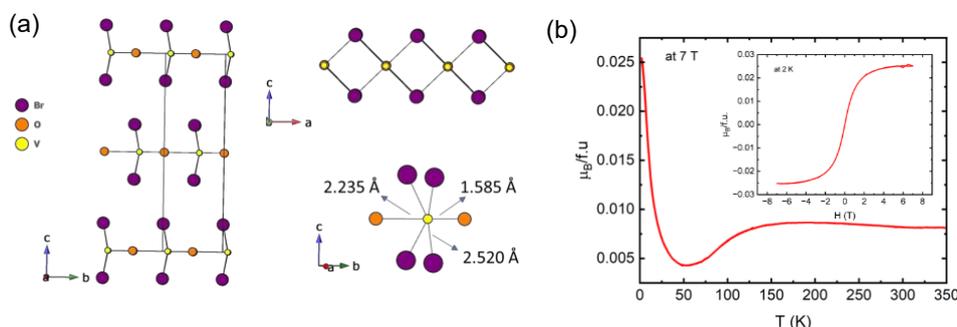


図 1. (a) 本研究で明らかになった VOB<sub>2</sub> の構造。 (b) VOB<sub>2</sub> の磁化率の変化。

(1) Abdelwahab, I., *et al.*, *Nature Photonics* **2022**, *16* (9), 644-650.

(2) Wu, Y., *et al.*, *Nat Commun* **2022**, *13* (1), 1884.

(3) Fu, T., *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145* (30), 16828-16834.

(4) Hillebrecht, H., *et al.*, *J. Alloys Compd.* **1997**, *246* (1-2), 70-79.

## Quest for the magnetic-field-induced phase transition of the Peierls states in a Ti oxide

<sup>A</sup>ISSP, Utokyo, <sup>B</sup>Dept. of Phys., Osaka Univ.

Junmeng Zhao<sup>A</sup>, Yuto Ishii<sup>A</sup>, Noriaki Hanasaki<sup>B</sup>, Yasuhiro H. Matsuda<sup>A</sup>

The orbital ordering exhibited by  $\text{MgTi}_2\text{O}_4$  at low temperatures makes it a representative material for studying the Peierls transition in three dimensions. Many scholars have conducted extensive measurement studies on it, but the driving principles of its phase transition remain unclear. The purpose of this study is to uncover the magnetic and electric properties of  $\text{MgTi}_2\text{O}_4$  in a strong magnetic field. At low temperatures,  $\text{MgTi}_2\text{O}_4$  is in a spin singlet state, exhibiting very weak magnetism. According to the theoretical model established in Ref. [1], a magnetic field of 76 T may transform the material to a ferromagnetic(FM) state. Therefore, measuring the magnetization is a good parameter for detecting whether a phase transition has occurred.

In this study, I used a destructive magnetic field generating system to investigate the magnetization phenomena of  $\text{MgTi}_2\text{O}_4$  in magnetic field up to 95 T. As shown in Fig. 1, even at 250 K, which is very close to the phase transition temperature, the magnetization curve still shows a linear increase, indicating that no FM phase transition occurs. To continue research under higher magnetic fields in other magnetic field generation systems, I developed a measurement technique for detecting a metal-insulator transition in powder sample with radio frequency(RF) electromagnetic wave. In this measurement technique, the RF amplitude can be mapped to the sample's resistivity. Therefore, by measuring the RF amplitude, we can indirectly measure the sample's resistivity.

We anticipate that this measurement technique can be successfully applied in the 600 T magnetic field generated by the electromagnetic flux compression(EMFC) system and extended to the resistivity measurement of other powder samples.

### References:

1. Di Matteo, et al. Phys.Rev.B, 2005. 72(2): p. 024431.

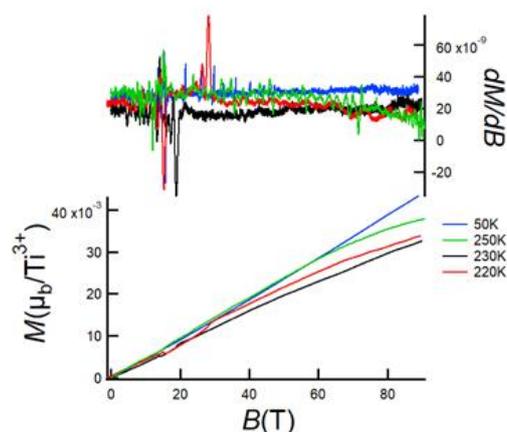


Figure 1. Magnetization at multiple temperatures up to 95 T

## 破壊型超強磁場発生装置の現状

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup> 電気通信大学

松田 康弘<sup>A</sup>、石井 裕人<sup>A</sup>、林 浩章<sup>A</sup>、邱 柏霖<sup>A</sup>、彭 詩悦<sup>A</sup>、  
 澤部 博信<sup>A</sup>、池田 暁彦<sup>B</sup>

100 T以上の磁場は殆ど全ての場合にマグネットの機械的破壊を伴うため、破壊型超強磁場と呼ばれる。1960年ごろから世界的に研究が開始されたが、破壊には爆発現象も同時に発生するため、精密計測は長年にわたり不可能と考えられてきた。しかし、エレクトロニクスの高速化によって、マグネットの爆発的破壊直前のマイクロ秒の時間を利用して精密計測を行うことは、いくつかの実験においてはそれほど難しくなくなってきた。

破壊型超強磁場の主要な発生手法としては、一巻きコイル法と電磁濃縮法がある。これらの手法は、(a) 破壊が比較的小規模（建物内で発生可能）、(b) 利用できる磁場発生空間が1 mm<sup>3</sup>以上、(c) 磁場発生時間スケールがマイクロ秒以上、の特徴を満足する。これらは、磁場を固体物理の研究に応用する場合に一般的に必要な条件と考えられる。もっとも、(3)の条件は、フォノンや電子遷移の時間スケールがピコ秒以下であること、スピン緩和もナノ秒以下の場合が多いこと、からマイクロ秒は十分長いと考えているが、固体物理においてもマイクロ秒以上の緩和現象も多く存在するため、破壊型磁場の利用が難しいケースもあり、注意が必要となる場合もある。

物性研究所における一巻きコイル法、電磁濃縮法においては、最高300 T、1200 Tの発生が可能であり、現状で測定に適用できる磁場の上限は、それぞれ、250 T、650 T程度である。図1(a)(b)は、いくつかの設定パラメータにおける磁場波形を示した。一巻きコイルでは放電電圧やコイル形状を同一パラメータにすれば、2~3%の誤差範囲で磁場波形は一致させられる。この磁場の再現性は、磁化測定において2回の磁場発生でバックグラウンド信号を差し引きする過程で実験データに大きな影響を与える。一方で、電磁濃縮法では、磁場波形の再現性は一巻きコイル法に比べると悪く、改善すべき技術課題とである。

発表においては、現在の破壊型磁場発生装置における磁場の特徴と、温度やその他の組み合わせる実験環境に関する条件、可能な測定手法などについて整理する。また、海外の破壊型超強磁場の現状についても報告する。

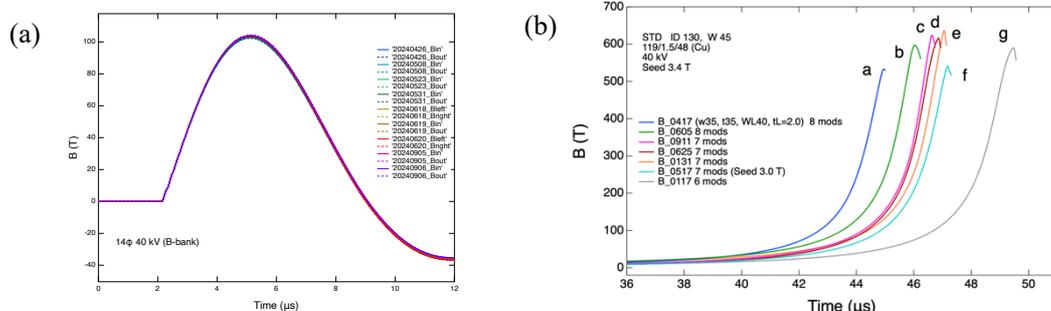


図1. (a) 一巻きコイル法による100 T発生時の磁場波形18回分。(b) 電磁濃縮法における磁場波形。

## Investigation of the insulator-metal transition mechanism of $V_{1-x}W_xO_2$ in ultrahigh magnetic fields

東大物性研 Xiao Chen Wang and Yasuhiro H. Matsuda

The metal-insulator transition (MIT) is one of the most dramatic phenomena observed in condensed matter science, in which a high-temperature metallic state is transformed into a low temperature insulating state at a critical temperature ( $T_{MI}$ ). It can occur purely electronic in origin, such as a Mott transition from a correlated metal to a Mott-Hubbard insulator, or it can be a charge-density wave transition or a Peierls transition associated with certain Fermi-surface (FS) and crystal lattice instabilities. The MIT of vanadium dioxide  $VO_2$  is one of the long-standing issues left in the research of transition metal oxides. Many researchers have suggested that the MI transition of  $VO_2$  is influenced by a combination of electron-electron correlation and crystal structure changes. The MIT of  $VO_2$  is dramatic: a large discontinuity of several orders of magnitude in resistivity and a sudden jump in magnetic susceptibility are observed across the transition at  $T_{MI} = 340$  K upon heating and at a slightly lower temperature by several Kelvin upon cooling. It is a first-order transition from a metallic paramagnet to an insulating diamagnet upon cooling [1].

Compared with vanadium dioxide crystals, W-doped  $VO_2$  drastically reduces the transition temperature  $T_{MI}$  [2], which greatly improves the utility of  $VO_2$ . In order to explore the most essential driving force behind MI transition in  $VO_2$ , we have investigated the MI transition of  $VO_2$  due to an ultrahigh magnetic field (500 T). After that, we will also conduct further studies on crystals doped with concentrations. We know that the spin Zeeman effect of electrons affects the d-electrons in  $V^{4+}$  ions, leading to delocalization of electrons by dissociating dimers in the insulating phase. Specifically, the Zeeman effect is the splitting of the spin state of electrons in the presence of an external magnetic field, which forces pairs of electrons (dimer-forming electrons) to separate, thus allowing the electrons to move more freely through the material. Because the Mott-Hubbard gap is essentially independent of the degree of spin freedom, the size of the Mott-Hubbard gap is not affected even when the spin state changes. Therefore, the structural instability of the material (i.e., dimer formation and dissociation) may be a more important driving force leading to the metal-insulator transition (MI transition) than the interactions between electrons (electron correlation) [3].

We have made the radio-frequency (RF) modulation impedance measurement on this sample in 130T ultrahigh magnetic fields using the HSTC. It was difficult to observe the MIT by these methods. Next, we will conduct further experiments with the help of an ultra-strong magnetic field created by EMFC. If ultrahigh magnetic fields can induce a reversible insulator-to-metal transition in W-doped  $VO_2$  by destabilizing the V-V dimers, it may emphasize the critical role of structural instability in the phase transition, offering new insights into the fundamental mechanisms of strongly correlated systems.

[1] Z. Hiroi, *Progress in Solid State Chemistry* **43**, 47 (2015).

[2] K. Shibuya *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 022102 (2010).

[3] Y. H. Matsuda, D. Nakamura, A. Ikeda *et al.*, *Nat. Commun.* **11**, 3591 (2020).

## $S = 1/2$ カゴメ反強磁性体 $\text{YCu}_3(\text{OD})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ における 磁化プラトートの探索

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup> 東南大学、<sup>C</sup> 成均館大学校

林浩章<sup>A</sup>、周旭光<sup>B</sup>、石井裕人<sup>A</sup>、Kwang-Yong Choi<sup>C</sup>、松田康弘<sup>A</sup>

量子スピン系は、フラストレーションや量子揺らぎによって多彩な基底状態や励起状態を示すことが知られている。特に、量子カゴメ反強磁性体のような幾何学的フラストレーション系では、多数の量子状態が微小なエネルギー差で競合し、スピン状態が高度に揺らいだまま安定化する。一方で、カゴメ格子上で働く強い電子相関のために、通常の磁場ではフラストレーションを十分に解消することができず、系の本質的な磁気相や量子現象に到達するのが難しい。このようなスピン自由度の縮退を解消し、隠れた高磁場相や特異な磁化構造を観測するには、100 テスラ級の超強磁場による物性測定が必要不可欠である。

本研究では、量子カゴメ反強磁性体である  $\text{YCu}_3(\text{OD})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$  ( $\text{YCu}_3$ ) を対象に、スピン液体をはじめとした特異な磁気特性の探索を目的として、一巻きコイル法を用いた超強磁場下の物性評価に取り組んできた。これまで報告されてきた量子カゴメ反強磁性体の多くは、原子サイト間の乱れや局所的な対称性の破れに由来する DM 相互作用によって、本質的な物性は隠されていた[1-3]。一方、 $\text{YCu}_3$  は、サイト間の乱れや DM 相互作用の寄与がない理想的なカゴメ格子を形成しているため[4]、スピン液体の実現や基底状態の解明など、カゴメ格子に由来する本質的な物理の検証が期待されている。

我々は、 $\text{YCu}_3$  における 120 テスラまでの磁化測定によって、理論的に予測されている  $1/9$ 、 $1/3$ 、 $5/9$  磁化プラトートの観測に成功した。得られた磁化曲線は、 $1/3$  プラトート終端の 80 テスラ付近まで、有効的な相互作用  $J = 45 \text{ K}$  で見積もられる理論曲線とよい一致を示した。一方で、80 テスラ以上の磁場領域では計算より低磁場で磁化が増加する様子が観測された。また、磁歪測定から 150 テスラ付近で磁化の飽和を示唆する結果が得られたが、理論で予測されている飽和磁場より 30 テスラほど低い。講演では、これらの測定結果について報告し、強磁場中での磁気状態について議論する。

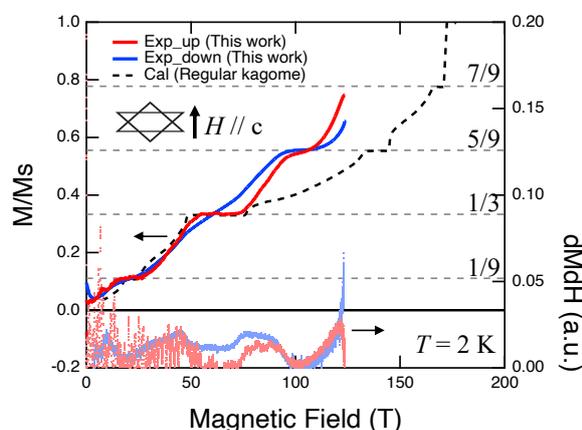


図1.  $\text{YCu}_3(\text{OD})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$  の磁化過程。赤線（青線）と黒点線は、磁場の上昇（減少）過程の実験結果と理論計算の結果を表している。

- [1] M.P. Shores, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **127** (39), 13462–13463 (2005).
- [2] J. S. Helton, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 107204 (2007).
- [3] J. Wang, *et al.*, *Nat. Phys.* **17**, 1109–1113 (2021).
- [4] X. H. Chen, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **512**, 167066 (2020).

## Tracking Ferroelectric Domain Formation in 100 nm BaTiO<sub>3</sub> using Bragg-CDI

<sup>A</sup>National Institutes for Quantum Science and Technology, <sup>B</sup>Hiroshima University,  
<sup>C</sup> University of Yamanashi and <sup>D</sup>Shimane University

Mingyang Shao<sup>A</sup>, Norihiro Oshime<sup>A</sup>, Kenji Ohwada<sup>A</sup>, Tetsu Watanuki<sup>A</sup>, Kento Sugawara<sup>A</sup>, Ayumu Shimada<sup>A</sup>, Sangwook Kim<sup>B</sup>, Shintaro Ueno<sup>C</sup>, Ichiro Fujii<sup>C</sup>, Satoshi Wada<sup>C</sup>, Shinya Tsukada<sup>D</sup> and Yoshihiro Kuroiwa<sup>B</sup>

BaTiO<sub>3</sub> is a widely used dielectric material in multilayer ceramic capacitors (MLCCs) due to its high dielectric constant and ferroelectric properties. As MLCCs require thinner dielectric layers for higher capacitance, nanosized BaTiO<sub>3</sub> powders have become essential. At the nanoscale, the dielectric constant shows strong size dependence.<sup>[1]</sup> However, the underlying mechanisms responsible for this phenomenon remain unconfirmed, largely due to the challenges associated with structural analysis of the nanoparticle. Recently, Bragg coherent diffraction imaging (Bragg-CDI) has enabled direct 3D imaging of the single nanoparticle. Dr. Oshime and Dr. Diao used this method to reveal domains in BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles with diameters of 400 nm and 200 nm, respectively, confirming their existence.<sup>[2][3]</sup> In this study, in-situ temperature-dependent Bragg-CDI was performed on a single 100 nm BaTiO<sub>3</sub> nanoparticle to investigate domain formation during cooling. At 800 K, the reconstructed electron density showed uniformity, and the maximum lattice distortion along the (200) direction was less than 0.65 Å, indicating high crystallinity. Only two localized regions of stress concentration are detected near the particle surface. And the domains initially nucleate near the previously identified surface stress concentration regions at 380 K. Thus, this study successfully captures the nucleation process of polarization domains in a single BaTiO<sub>3</sub> nanoparticle and provides valuable insights into the nanoscale mechanisms underlying the size-dependent dielectric behavior of BaTiO<sub>3</sub>.

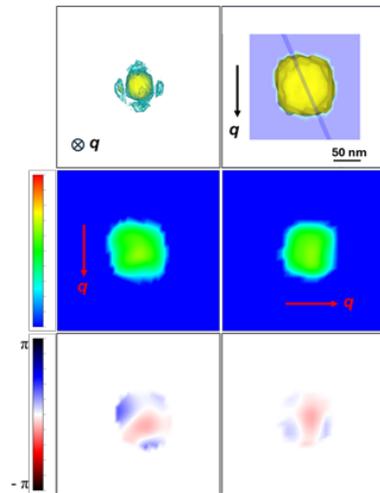


Figure 2 3D speckle pattern, 3D morphology and the cross-section of electron and phase distribution of BaTiO<sub>3</sub> particle at 800 K.

[1] T. Hoshina. *J. Ceram. Soc. Jpn.* **121**,1410 (2013): 156-161.

[2] N. Oshime, K. Ohwada, A. Machida *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SM1022 (2023).

[3] J. Diao, X. Shi, T.A. Assefa, L. Wu, *et al. Phys. Rev. Mater.* **4**, 106001 (2020).

## KF で置換した BaTiO<sub>3</sub> への超強磁場効果の探索

東大物性研 原正彦 邱柏霖 石井裕人 松田康弘

島根大学教育学部 塚田真也

チタン酸バリウム (BaTiO<sub>3</sub>) は、一般的な強誘電体として、物理学および応用の両面で広く研究されている。その特徴は、ペロブスカイト型結晶構造 (図 1) をとること、及び高い誘電率にある。強誘電性の理解には、Ti-O 間の強い共有結合が重要と考えられている。BaTiO<sub>3</sub> は温度変化に伴い高温側から、立方晶、正方晶、直方晶、菱面体晶へと相転移を示すことが知られており、強誘電転移は材料設計や電子デバイスの性能向上において重要な役割を果たしている。

また、KF を用いたフラックス法により、BaTiO<sub>3</sub> の酸素サイトをフッ素に置換することで、立方晶-正方晶間の相転移温度が KF 濃度に比例して連続的に変化することが確認されている。[1] (図 2) この現象は、フッ素の高い電気陰性度が Ti-O 間の共有結合を弱めることに起因すると考えられる。BaTiO<sub>3</sub> の強誘電性は、チタンと分極方向に位置する酸素との間の強い共有結合に依存しているが、酸素をフッ素に置換することで共有結合が弱まり、結果として強誘電性が低下すると推測される。[1]

我々の研究室では、破壊型パルスマグネットによる 100 テスラ以上での強誘電転移への超強磁場効果が BaTiO<sub>3</sub> において観測されており、強誘電転移温度の変化が確認できている。KF で置換し、強誘電転移温度を制御した BaTiO<sub>3</sub> への 100 テスラ以上超強磁場効果を観察することで、この変化の機構解明を目指している。本発表では、KF で置換した BaTiO<sub>3</sub> 単結晶の誘電特性と、強磁場効果の探索について解説する。

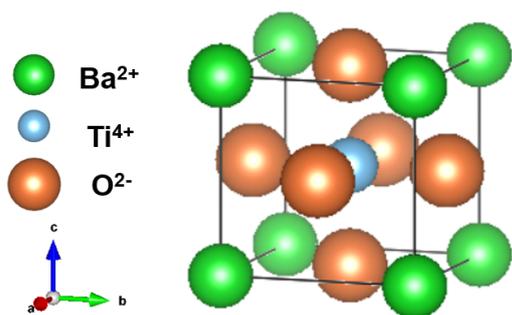


図 1. BaTiO<sub>3</sub> の結晶構造

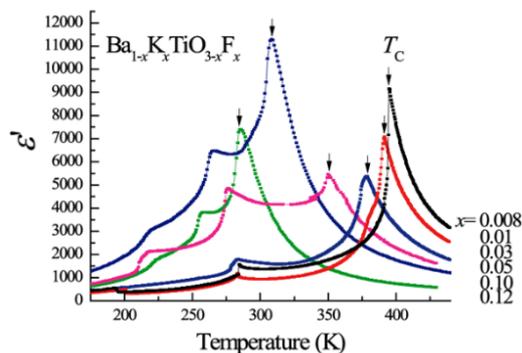


図 2. KF 置換 BaTiO<sub>3</sub> の誘電率温度依存性

### 参考文献

[1] Tsukada, S., Akishige, Y., & Kojima, S., Journal of the Crystallographic Society of Japan, 54(6), 313-318 (2012).

## 100 テスラ級超強磁場中における高圧力下物性測定環境の開発

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup> 電気通信大学、<sup>C</sup> 北海道大学、<sup>D</sup> 東大新領域

石井裕人<sup>A</sup>、D. Bhoi<sup>B</sup>、池田暁彦<sup>B</sup>、松林和幸<sup>B</sup>、

福岡脩平<sup>C</sup>、今城周作<sup>D</sup>、松田康弘<sup>A</sup>

本領域の主題である超強磁場による非摂動磁場効果は、電子のスピンや軌道を介して物性に劇的な変化を与え、新しい相転移や電子状態を誘起する。実際にこれまで様々な物質に対して超強磁場を使った研究がなされ多くの興味深い現象が発見されてきた。一方で、他の極限環境と超強磁場を組み合わせた研究例は未だ前例がない。最近我々は、高圧力による精密な電子状態の制御と超強磁場環境を組み合わせることにより、今まで以上に多角的な超強磁場研究の展開を可能にする、新しい複合的極限環境下における物性測定環境の構築を進めている。

100 テスラ級超強磁場と高圧力実験を組み合わせるためには、超強磁場がパルス磁場であるため ( $dB/dt \sim 10^7$  T/s) 金属が使えない、磁場発生空間が狭い ( $\sim 10$  mm)、超強磁場発生の際に生じる大きな電磁ノイズの中で圧力セル内の小さなサンプルの物性測定をする必要がある、という3つの課題を解決する必要がある。

まず上記の一つ目の課題を解決するため、我々は使用する圧力セルとしてFRP、ZrO<sub>2</sub>、MgO、テフロンなどの非金属を組み合わせた小型の圧力セルを採用した (図 1(a))。この圧力セルは、最高圧力こそ低い ( $\sim 10^1$  GPa) 外径は 8.9 mm と小さく、直径 10 mm 程度の一巻きコイルにおいて使用可能であるため二つ目の課題も同時に解決できるという利点を持つ。三つ目の課題に対しては、最近開発された RF 反射率測定によるインピーダンス測定を採用する [1,2]。この手法は二端子抵抗の値が 50 Ω 付近であれば、サンプルが小さくても超強磁場中で測定ができる (図 1(b))。

本発表では、圧力セルの具体的な構造、実験の詳細や開発状況を報告し、さらに今後の方針や発展の可能性について議論する予定である。

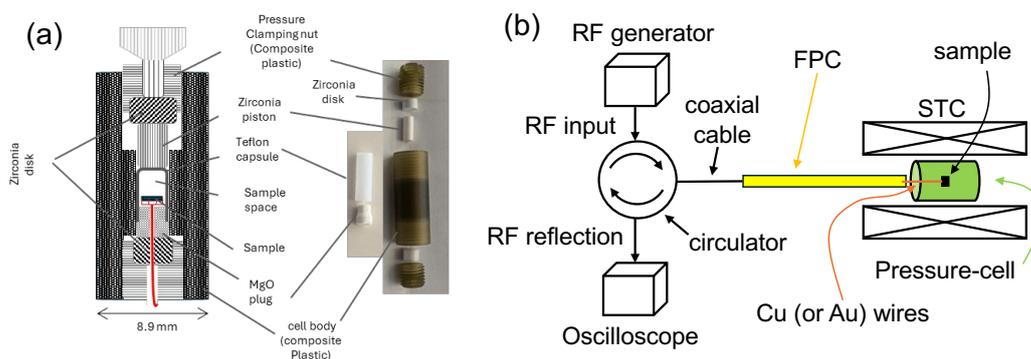


図 1 (a) 本研究で使用する圧力セルの断面図と写真。(b) 圧力セルと RF 反射率法によるインピーダンス測定を組み合わせた時の一巻きコイル実験のイメージ図。

[1] T. Shitaokoshi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 94, 094706 (2023). [2] S. Peng *et al.*, arXiv:2401.00389.

## Unusual optical absorption in NiPS<sub>3</sub> due to Zhang-Rice transitions in high magnetic Fields

<sup>A</sup>Institute for Solid State physics, Univ, of Tokyo;

<sup>B</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National Univ

<sup>A</sup>Kaiyang Huang, <sup>B</sup>Jaena Park, <sup>A</sup>Zhuo Yang, <sup>A</sup>Yoshimitsu Kohama, <sup>A</sup>Atsuhiko Miyata, <sup>B</sup>Je-Geun Park, <sup>A</sup>Yasuhiro H. Matsuda,

NiPS<sub>3</sub> is a quasi-two-dimensional Mott insulator that orders antiferromagnetically below  $T_N=155$  K. At low temperature its optical absorption shows two prominent peaks at 1.47 eV and 1.50 eV, previously assigned to a spin-orbit-entangled Zhang-Rice (ZR) triplet-to-singlet exciton and its two-magnon sideband, respectively[1].

Using a horizontal single-turn-coil system we extend magneto-optical spectroscopy to pulsed magnetic fields  $H \leq 140$  T, far beyond the 10 T range explored earlier. With increasing field the ZR exciton red-shifts whereas the magnon-assisted peak blue-shifts, and no circular dichroism is detected under either left- or right-handed illumination. Tilting the sample shows that both the energy shift and the nonlinear enhancement of the 1.47 eV peak scale with the field component along the c-axis and are progressively suppressed by temperature. Magnetization measurements up to 100 T reveal no corresponding anomaly, indicating that the intensity growth is a localized effect rather than a bulk magnetic response.

The continuous narrowing of the ZR splitting with field contradicts the prevailing picture in which the triplet is the ground state. One plausible mechanism is that the bright ZR exciton hybridizes with a higher-lying dark exciton: field-induced mixing in this two-level system drives an avoided crossing that pushes the bright ZR level downward while elevating the dark level. This scenario naturally accounts for the observed red-shift and the concomitant intensity gain, and suggests a field-induced reordering of local multiplet levels. Meanwhile, the upward shift of the higher-energy feature is consistent with Zeeman stiffening of magnon excitations.

These findings call for a revised theoretical framework to describe spin-orbit-coupled excitons in layered Mott antiferromagnets subjected to extreme magnetic fields.

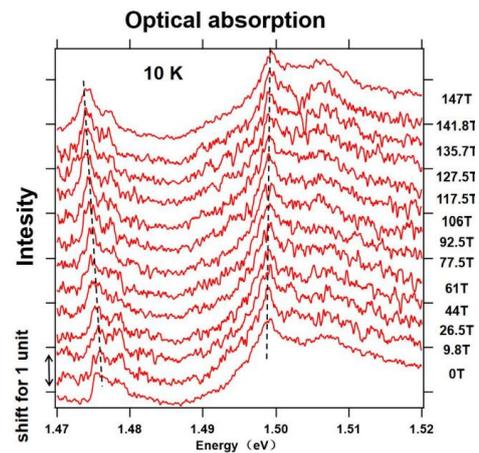


Fig.1 Absorption spectra at different magnetic fields.

[1] Kang, S., Kim, K., Kim, B.H. et al., Nature **583**, 785–789 (2020).

## パイロクロア型ニオブ酸化物における原子変位型短距離秩序と 磁場誘起相転移の可能性

<sup>A</sup>東大新領域、<sup>B</sup>理研 CEMS、<sup>C</sup>JASRI

鬼頭 俊介<sup>A</sup>、西田 祥太<sup>A</sup>、豊田 新悟<sup>B</sup>、中村 唯我<sup>C</sup>、  
徳永 祐介<sup>A</sup>、有馬 孝尚<sup>A,B</sup>

幾何学的にフラストレートした格子を持つ化合物では、格子上に存在する電子自由度により、エキゾチックな電子物性の発現が期待される。 $R_2T_2O_7$  ( $R$  = 希土類、 $T$  = 遷移金属)の化学式で示されるパイロクロア酸化物は、典型的なフラストレート物質である。例えば、 $R_2Ti_2O_7$  ( $R$  = Dy, Ho)では、パイロクロア格子上の  $R$  イオンの電子スピンのアイスルールを満たすように短距離秩序化し、スピンアイス状態を形成する[1,2]。

本研究では、パイロクロア型ニオブ酸化物  $R_2Nb_2O_7$  に着目する。Nb イオンは+4 の形式価数を持ち、スピン  $S=1/2$  の状態が期待される。しかし、 $R$  サイトにスピンを持たない  $Y_2Nb_2O_7$  では、全温度領域において非磁性の絶縁体であり[3]、空間群  $Fd-3m$  の平均構造から予想される電子状態とは一致しない。この物理的矛盾を明らかにするため、放射光施設 SPring-8 にて単結晶 X 線回折実験を行った。その結果、原子変位型の短距離秩序に対応する散漫散乱が観測された。さらに、逆モンテカルロシミュレーションを用いた散漫散乱解析により、短距離秩序が Nb のイジング型変位を伴う分子軌道形成に起因することが明らかとなった[4]。この系の非磁性機構については議論の余地が残るが、短距離秩序はアイスルールに基づく単純な 2-in-2-out 構造だけでは説明できないことが分かった。これはフラストレート格子における新たなタイプの短距離秩序であり、既存の理論モデルでは解釈できない。

さらに、 $R$  サイトを異なる希土類イオンに変えた  $R_2Nb_2O_7$  系において、低温下で X 線照射を行うと散漫散乱が消失する現象を確認した。この消失した散漫散乱は、室温に戻すと復活する。当日は、X 線照射による散漫散乱の温度・時間依存性と、強磁場による相転移の可能性についても議論する。

[1] D. J. P. Morris *et al.*, *Science* **326**, 411 (2009).

[2] T. Fennell *et al.*, *Science* **326**, 415 (2009).

[3] H. Fukazawa *et al.*, *Phys. Rev. B* **67**, 054410 (2003).

[4] S. Nishida, S. Kitou *et al.*, in preparation.

## ベクトルパルスマグネットの用いた異方的測定手法の開発と進捗

<sup>A</sup>電通大、<sup>B</sup>岩手大

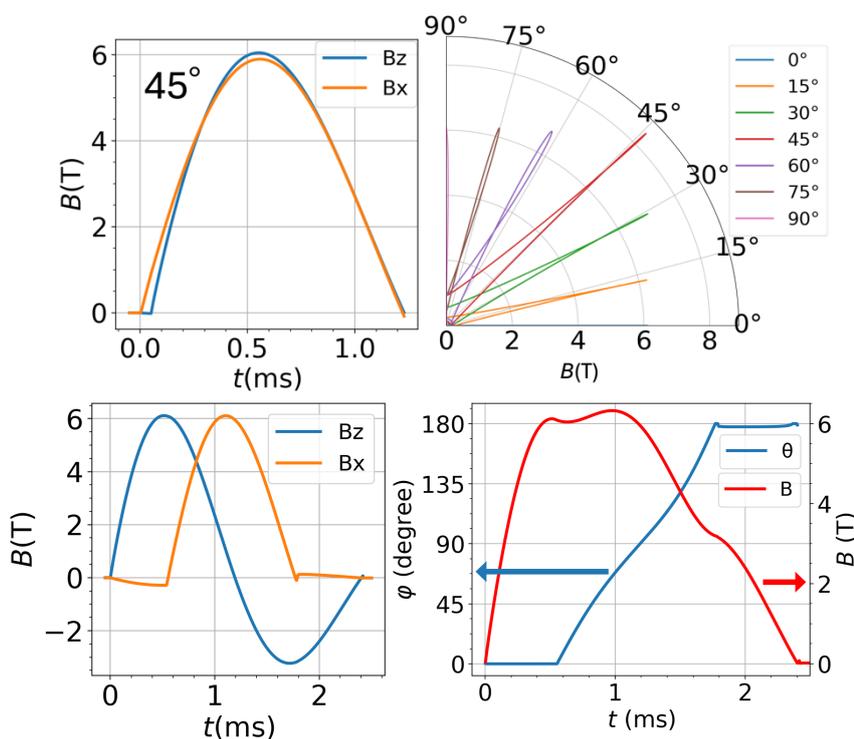
野田 孝祐<sup>A</sup>、関 健太<sup>A</sup>、Dilip Bhoi<sup>A</sup>、松林 和幸<sup>A</sup>、秋葉 和人<sup>B</sup>、池田 暁彦<sup>A</sup>

結晶構造の対称性は、物質の磁気構造や電子構造を理解する上で重要なファクターである。近年では、トポロジカル物性や多極子物性に代表されるように、結晶と外場の対称性由来する異方的な物性の研究が活発に行われている。また、マルチフェロイクスやアルターマグネットのように、時間反転対称性や空間反転対称性を破る物質群に関する研究も進展している。磁場は、ベクトル場として結晶構造、スピン、キャリア密度に現れる対称性を解明するための有力な外場として用いられてきた。特に、磁気異方性の測定においては、ベクトルマグネットや二軸回転プローブといった手法がこれまでに開発されている。

我々は、磁気異方性の測定のための回転磁場の新たな発生手法として、ベクトルマグネットとパルスマグネットを組み合わせたベクトルパルスマグネットを提案し、作成を進めている。ベクトルパルスマグネットの利点としては、瞬時に磁場を回転させる「パルス磁場回転モード」が利用可能であること、プローブが不動のため光プローブとの併用が容易であること、が挙げられる。

これまで、ベクトルパルスマグネットの原理検証としてコイルテストを行い、HOPGの測定を行ってきた。今回我々は、6Tでの90°パルス回転磁場の発生に成功した。

今回の発表では新たに作成したFRP グランジのベクトルパルスマグネットを用いたコイルテストの結果と、Graphiteの低温測定結果について報告する。



- [1] 野田孝祐 他, 日本物理学会第78回年次大会, 16aPS-81.
- [2] A. Ikeda, *et al. J. Appl. Phys.* **136**, 175902 (2024)
- [3] K. Noda, *et al. arXiv:2504.14896*

## BaTiO<sub>3</sub> の超強磁場超音波測定

<sup>A</sup> 静大理、<sup>B</sup> 東大物性研

野村肇宏 <sup>A</sup>、邱柏霖 <sup>B</sup>、巖正輝 <sup>B</sup>、石井裕人 <sup>B</sup>、松田康弘 <sup>B</sup>

BaTiO<sub>3</sub> (BTO)は最も有名な強誘電体材料であり、その優れた誘電特性は多様な応用分野において重要な役割を果たしている。最近、Chiu らによって 100 T までの誘電率測定の結果[1]が報告され、強誘電転移温度 (cubic-tetragonal,  $T_c \sim 393$  K) 付近における誘電率の磁場依存性が確認された。この実験結果は非磁性体である BTO において、 $T_c$  が磁場依存することを示唆している。BTO の物性が磁場依存する物理的機構として、軌道混成の影響[2]などが指摘されているが詳細は不明である。本研究では、cubic-tetragonal 転移を高感度に検出するプローブとして超音波測定を採用し、BTO の超強磁場物性を調べることを目的とした。

超音波測定は連続励起法[3]を用い、105 T までの超音波物性を測定した。連続励起法では高次のエコーがノイズとして重畳するため、音速の変化も音波強度に影響してしまう。裏を返せば、結晶構造もしくはドメイン構造に何かしらの変化が起これば、超音波信号の位相もしくは強度に異常が検出されるはずである。

図1は  $T_c$  直上 ( $\Delta T \sim 0.1$  K) で行った実験結果である。0 - 2  $\mu$  秒の範囲で、位相および強度が変化しており、誘導起電力によるドメイン整列の影響が示唆される。磁場のピーク付近で超音波物性が磁場依存している様子は観測されなかった。

本発表では誘電率測定で観測された磁場依存性が超音波測定で観測されなかった原因について議論する。

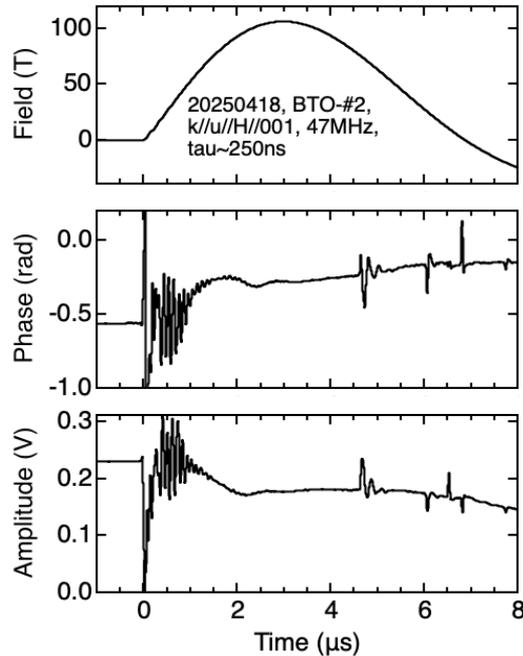


図1. BTO の超音波測定結果

[1] Polin Chiu, Yuto Ishii, and Yasuhiro H. Matsuda, J. Appl. Phys. 137, 155903 (2025).

[2] I. B. Bersuker, Ferroelectrics 536, 1-59 (2018).

[3] T. Nomura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 92, 063902 (2021).

## Investigation of time-reversal symmetry breaking in $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ by magneto-optical Kerr effect

<sup>A</sup>京大院工、<sup>B</sup>University of Minnesota、<sup>C</sup>Columbia University

山根 聡一郎<sup>A</sup>、中村 颯汰<sup>A</sup>、池田 敦俊<sup>A</sup>、Sudarshan Sharma<sup>B</sup>、  
Xing He<sup>B</sup>、Dayu Zhai<sup>B</sup>、Siddarth Gorregattu<sup>B</sup>、Yipeng Cai<sup>C</sup>、  
Yasutomo Uemura<sup>C</sup>、Martin Greven<sup>B</sup>、米澤 進吾<sup>A</sup>

磁気光学 Kerr 効果測定法は、結晶表面からの反射光の偏光角の変化(Kerr 角度)を通じて、物質の自発的時間反転対称性の破れの有無を検出できる測定手法である[1]

(図1)。時間反転対称性が破れる典型的な例として、鉄などの強磁性体が挙げられる。強磁性体中に存在する磁化の存在によって、時間反転対称性の破れが発現し、Kerr 効果測定で大きな Kerr 角度を生み出す。他方で、カイラル超伝導体のような時間反転対称性を破る状態には、非常に小さな Kerr 角度が現れることが知られている[1]。そのため、このような測定においては、相対論的効果に起因する微小なノイズ等をも排除できる zero-area-loop Sagnac 干渉計が用いられている[2]。我々はこの手法の安定性や操作性を格段に向上した、「全ファイバー型」の超高感度 Kerr 効果測定法 (AFZALS) の装置開発を行い、非自明な時間反転対称性の破れの有無を探っている[3]。

非磁性であるペロブスカイト型酸化物  $BaBiO_3$  は、単調なバンド理論から金属的な振る舞いが期待されるが、実際は整合した電荷密度波状態を発現する絶縁体である[4]。この絶縁体で、 $BiO_6$  の八面体が交互に膨張と収縮を繰り返す歪み (breathing distortion) が電荷密度波状態と共に秩序し[4]、それに加え、ドーピングをすることで金属・絶縁体転移、超伝導など強い電子格子相互作用が支配する系となっている。Ba を K で化学置換した  $Ba_{1-x}K_xBiO_3$  は、breathing distortion が消えた近傍で転移温度が最大 30 K の超伝導を実現する[5]。この超伝導機構は、さまざまな実験結果から BCS 理論と辻褃の合う従来型の s 波超伝導であると知られてきた[6, 7]。しかし、 $Ba_{1-x}K_xBiO_3$  が局所的に空間反転対称性を破っていると近年指摘されており、エキゾチックな超伝導状態の可能性も示唆されている[8]。我々は AFZALS を使用し、この  $Ba_{1-x}K_xBiO_3$  の超伝導状態に対し Kerr 効果測定を行った。本発表では、この測定結果について報告をする。

[1] J. Xia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).

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

[3] Y. Hu *et al.*, arXiv:2208.08036 (2022).

[4] R. L. Bouwmeester *et al.*, Rev. Phys. **6**, 100056 (2021).

[5] L. F. Mattheiss *et al.*, Phys. Rev. B **37**, 3745 (1988).

[6] Q. Huang *et al.*, Nature **347**, 369–372 (1990).

[7] M. Kim *et al.*, Nat. Mater. **21**, 627–633 (2022).

[8] S. Griffitt *et al.*, Nat. Commun. **14**, 845 (2023).

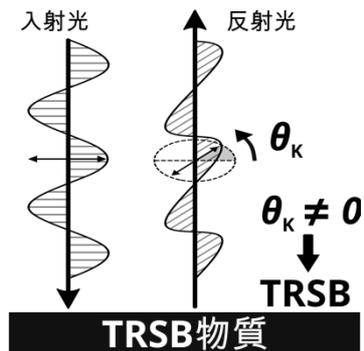


図1. 磁気光学 Kerr 効果測定法の概念図

## フォトニック結晶中空ファイバーを用いた 磁場中磁気光学 Kerr 効果測定手法の開発

<sup>A</sup> 京都大学 工学研究科、<sup>B</sup> 電気通信大学 情報理工学研究科  
鈴木 秀弥<sup>A</sup>、山根 聡一郎<sup>A</sup>、中村 颯汰<sup>A</sup>、池田 敦俊<sup>A</sup>、  
野田 考祐<sup>B</sup>、池田 暁彦<sup>B</sup>、米澤 進吾<sup>A</sup>

磁気光学 Kerr 効果とは、物質表面で光が反射する際に、光の偏光状態が変化する効果のことである。類似の効果として、磁場中の物質を光が透過する際に偏光が変化する効果である Faraday 効果が知られている。物質内を光が伝搬する間に効果が蓄積される Faraday 効果に対して、物質表面付近でのみで起こる磁気光学 Kerr 効果がもたらす偏光への影響は非常に小さい。

我々のグループでは、いくつかの強磁性体を対象としたパルス磁場下での磁気光学 Kerr 効果の測定にはすでに成功している[1,2]が、現在使用している光学系ではファイバーやレンズなどの Faraday 効果に由来する磁場に線形なバックグラウンドが信号に乗ってしまう。今後、より強い磁場での測定や、Kerr 回転シグナルの小さい物質の測定をするうえで、このバックグラウンドの低減は非常に重要である。

そのため、我々はフォトニック結晶中空ファイバーに注目している。このファイバーは、図1のようなコア周囲の微細な周期構造によってフォトニックバンドギャップを作り出し、コアに光を閉じ込めることができる。このファイバーでは光の大部分が真空中を通るため、光学系由来のバックグラウンドの低減が期待できる。

そこで我々は、フォトニック結晶中空ファイバーを用いて、磁気光学 Kerr 効果測定のためのバックグラウンド低減に向けた取り組みを進めている。このファイバーを簡易な光学系に組み込んで Ni 箔の反射率を測定したところ、十分な反射光強度を確認できた。また、1/4 波長板、円偏光保持ファイバーとともに[1,2]で用いている Loop less Sagnac 干渉計に組み込んだところ、理論通りの動作が確認できた。本発表では、これらの結果を含めた最新の進捗状況について報告をする。

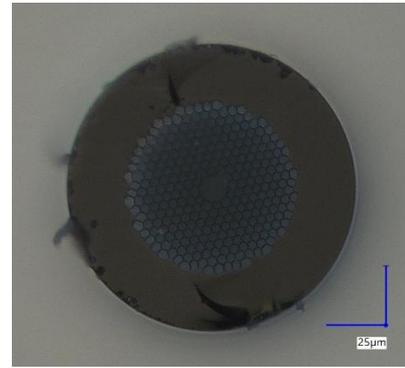


図1: フォトニック結晶中空ファイバーの端面の写真

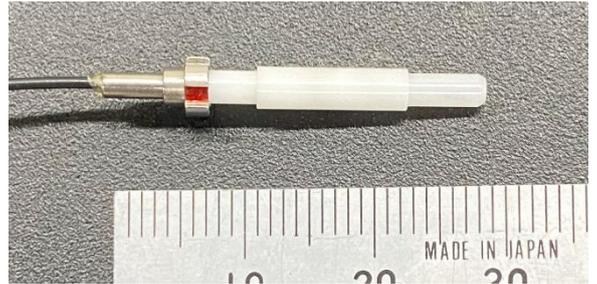
[1] 米澤ら、本研究会口頭発表。

[2] 中村ら、本研究会ポスター発表。

# パルス磁場下や超低温下での測定に向けた 磁気光学カー効果測定セットアップの開発

京大工 中村颯汰

Loop-less Signac 干渉計[1]を用いた磁気光学カー効果測定方法は、実験室レベルで、ナノラジアン級のカー回転角分解能を持った測定を可能にする優れた手法である。物体表面の磁化の非接触な測定方法であり、磁場中の物性の理解に大きく貢献する。パルス磁場下や液体窒素温度下、液体ヘリウム温度下で安定した測定を行うことは現在の大きな目標である。



我々は、試料表面に光を当てる光ファイバー終端部分のフェルールに、波長板やレンズなどの測定に必要な素子を埋め込む構造を利用し、直径 3 mm、長さ 3 cm 程の試料空間での測定を可能とした(図 1)。この方法ではフェルールスリーブを用い、光ファイバーの反対側からもう一つのフェルールで試料を押し込むことで、試料表面に垂直に光が当たるよう容易にセットアップを行うことができる。

この新しいセットアップを用いて、常温下、液体窒素温度下、パルス磁場下で、鉄などに対してカー効果の測定を行った。常温下での測定では電磁石による静的磁場へのカー効果応答を確認することができ、その定量性について、文献値とオーダーが一致することを確かめた。液体窒素温度下での測定について、測定系試料固定部分を完全に液体窒素に浸しても測定が可能であることを確認し、光の強度などの温度依存性について評価した。また、強磁性体である鉄を用いたパルス磁場下での測定では、3 T, 1 ms 程度のパルス磁場下で、カー回転角が飽和することを確認することができた。この飽和は、鉄の磁化が飽和していることと対応していると考えられる。本発表では、新しいセットアップや、これらの測定結果についてより詳細に発表し、今後の展望についても説明する。

[1] Jing Xia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).

## ピエゾ磁気効果を示す交替磁性体 CrSb の単結晶育成

広島大院先進理工

二宮 大翔、松下 真大、野原 実

交替磁性体におけるピエゾ磁気効果が注目を集めている [1]。これは、歪 $\epsilon_{jk}$ によって磁化 $M_i$ が生じる現象で、ピエゾ磁気テンソル $q_{ijk}$ を用いて $M_i = q_{ijk}\epsilon_{jk}$ と表される。この効果を示す物質では、磁場に比例して歪が生じると考えられる。これは、磁場の二乗に比例する従来の磁歪とは異なる。

本研究で着目した交替磁性体 MnTe と CrSb は、結晶構造は同じ六方晶 NiAs 型 (結晶点群  $6/mmm$ ) であるが、磁気構造は異なる。すなわち、図 1 に示すように MnTe では、Mn のスピンの配列が  $ab$  面内で共線的に配列し、磁気点群は  $m'm'm$  であるのに対して、CrSb では Cr のスピンの配列が  $c$  軸方向に共線的に配列し、磁気点群は  $6'/m'mm'$  である。したがって、両者は以下のように異なるピエゾ磁気効果を示す。

$$\text{MnTe} : M_x = q_{xxz}\epsilon_{zx}, M_y = q_{yyz}\epsilon_{yz}, M_z = q_{zxx}\epsilon_{xx} + q_{zyy}\epsilon_{yy} + q_{zzz}\epsilon_{zz}$$

$$\text{CrSb} : M_x = q_{xxx}(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}), M_y = -q_{xxx}\epsilon_{xy}, M_z = 0$$

本研究の目的は、MnTe と CrSb の単結晶を育成し、ピエゾ磁気効果を測定することである。Sn フラックスを用いて、CrSb の単結晶育成をおこなった。Cr、Sb、Sn を 1:1:15 の割合でアルミナるつぼに入れ、石英管に真空封入し、900°C で 2 日間保持した。400°C まで 4°C/h で徐冷した後、遠心分離と塩酸処理によりフラックスを除去した。図 2 に得られた単結晶の写真を示す。 $c$  軸方向に伸びた針状の結晶であった。ピエゾ磁気効果で期待される歪が  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xy}$  であるため、今後  $ab$  面が現れた板状の結晶育成をおこなう。

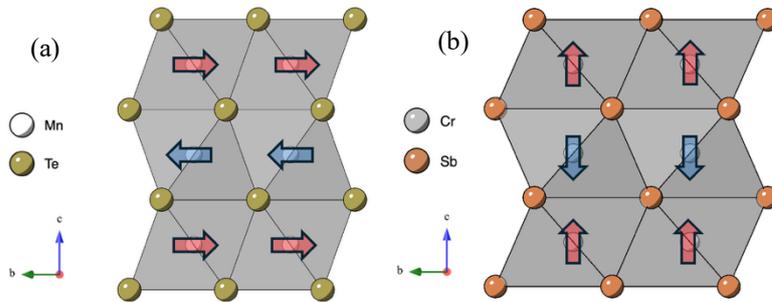


図 1. (a)MnTe の磁気構造 (b)CrSb の磁気構造

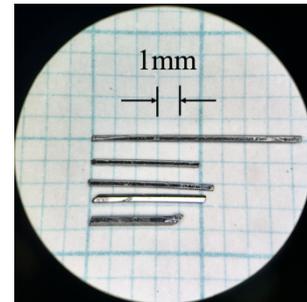


図 2. 単結晶 CrSb の写真

[1] T. Aoyama *et al.*, Phys. Rev. Materials **8**, L041402(2024).

## フル 3 次元有限要素法マルチフィジクスシミュレータによる一巻き コイル法の磁場発生ダイナミクスの解析と磁場増大法の提案

電気通信大学 池田研究室

小林 秀彰

100T を超える強磁場を発生させるためには、一巻きコイル法でコイルに大量の電流を流して強磁場を発生させる必要がある。しかし、この方法の欠点として数  $\mu\text{s}$  でコイルが変形し、破壊されることで磁場を安定的に発生させられる時間が限られることがある。そこで、電流密度分布、圧力変化、およびコイルの変形などをシミュレーションで調査し、その結果に基づき、より強い磁場を安定的に発生させることのできるコイル形状の最適化、研究結果の実験での実用化を目指す。

手法としては、電気エネルギーを蓄積したコンデンサから銅の一巻きコイルに 700kA の電流を瞬時に流し、電磁誘導を起こすことで磁束を高速で濃縮して強磁場を発生する一巻きコイル法を取り入れたコイルモデルを要素で分割し、要素ごとに LS-DYNA で解析を行うこの計算によって得られた一巻きコイルの変形の様子、温度、電流密度、電気伝導率、磁束密度をもとに実験の再現性の評価や考察を行う。また、コイル形状の最適化を目指しコイルの幅、厚みの異なるモデルを複数用意し、比較した。

コイル幅を変化させた結果、図 2 のように幅を狭めることでコイルでの電流量を平均的に大きくすることができ、磁束密度を大きくすることができることがわかった。また、コイルの厚みを外側面から削ることで薄くすることで、コイルの内径が大きくなるように変形するのを緩和することで磁束密度を大きくすることができることが図 3 よりわかった。

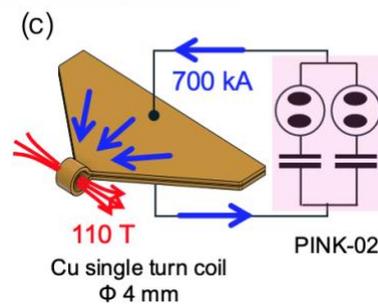


図 1. 使用する一巻きコイルの図[1]

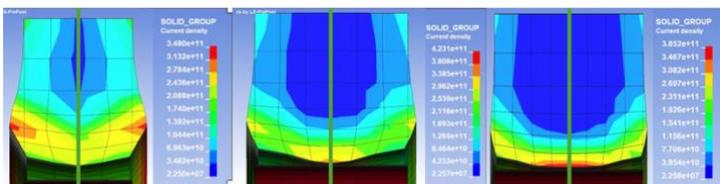


図 2. コイル幅ごとの  $1.3\mu\text{s}$  での電流密度分布

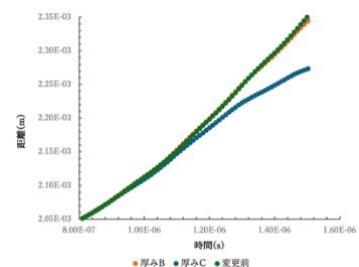


図 3. 厚みごとのコイル内径の時間変化

[1] A. Ikeda et al., in preparation.

## 超強磁場による秩序破壊を予測する磁化率変化と相転移

広島大学先進理工系科学研究科

野原 実

超強磁場によって結合破壊転移や金属-絶縁体転移 (MI 転移) を引き起こす物質の探索を目的として、図 1 に示すように、いくつかの物質の転移温度  $T_c$  と転移に伴う磁化率変化  $\Delta\chi$  を整理した。各物質の相転移の特徴は以下のとおりである：

1. テトラヘドライト  $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  : 金属-絶縁体転移を示す [1]。
2. 鉄系超伝導体  $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{As}_2$  ( $x \sim 0.03$ ) :  $\text{As}_2$  分子の形成を伴う構造相転移 [2]。
3. 層状化合物  $\text{LiVS}_2$  : V 三量体の形成を伴う構造相転移 [3]。
4.  $\text{BaNi}_2\text{As}_2$  : Ni ジグザグ鎖の形成を伴う構造相転移 [4]。
5.  $\text{IrTe}_2$  : Ir の電荷分離・電荷秩序・Ir 二量体形成および Te のポリマー化が複合適に起こる相転移[5]
6.  $\text{Au}_{1-x}\text{Pd}_x\text{Te}_2$  : Te 二量体の形成を伴う構造相転移[6]

磁化率の変化  $\Delta\chi$  が大きいほど、磁場印加時のエネルギー利得が大きくなり、磁場誘起相転移を実現できる可能性が高いと考えられる。すでに磁場誘起 MI 転移が報告されている  $\text{VO}_2$  よりも  $\Delta\chi$  が大きい  $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  と  $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{As}_2$  に着目し、今後の実験を重点的に進めたい。

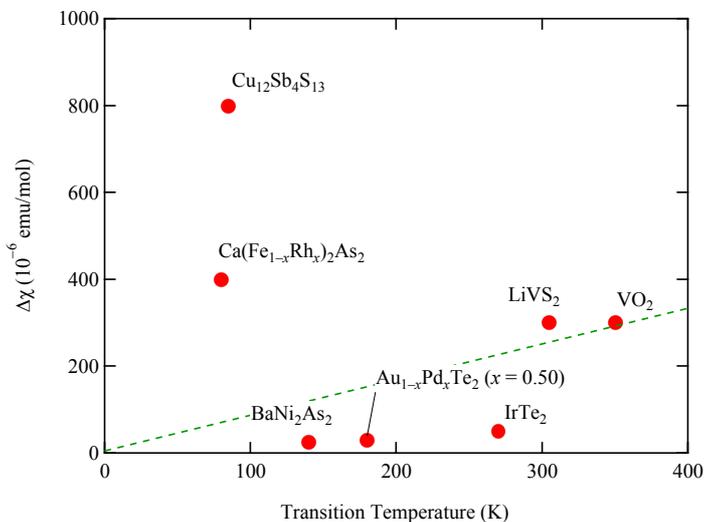


図 1. 一次相転移を示す物質の転移温度  $T_c$  と磁化率の変化  $\Delta\chi$  .

- [1] S. Kitagawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 093701 (2015).
- [2] M. Danura et al., J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 103701 (2011).
- [3] N. Katayama et al., Rev. Lett. **103**, 146405 (2009).
- [4] K. Kudo et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 097002 (2012).
- [5] S. Pyon, K. Kudo, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 053701 (2012).
- [6] K. Kudo, H. Ishii, and M. Nohara, Phys. Rev. B **93**, 140505(R) (2016).

## メタルリッチ化合物 $Zr_6FeSb_2$ における Fe 1次元ネットワークに由来するフェルミ面

広島大先進理工

松本 峻平, 野原 実

本研究では、第一原理計算により、メタルリッチ化合物超伝導体  $Zr_6FeSb_2$  [1]の、バンド構造とフェルミ面の形状を調べた。 $Zr_6FeSb_2$  は、図 1(a)に示すように、六方晶  $Zr_6CoAl_2$  型構造 (空間群  $P\bar{6}2m$ ,  $D_{3h}^3$ , #189) を有し、Zrが3次元的なネットワークを形成する。このネットワークは、2つのプリズム型の間隙を有し、1bサイトをFeが、2cサイトをSbが占有する。その結果、FeおよびSbの1次元ネットワークがc軸方向に形成される。

図 1(b)に、WIEN2k で計算したフェルミ面を示す。多数のフェルミ面が存在し、特に図 1(c)に示したフェルミ面が強い1次元性を示している。バンドのキャラクターの解析から、このフェルミ面は主にFe 3d軌道によることが示された。以上のように、 $Zr_6FeSb_2$  では、Zrの3次元的なネットワークの存在にもかかわらず、Feの1次元ネットワークに起因する1次元的なバンド構造が現れる。

今後、フェルミ面毎に超伝導ギャップが異なるか (マルチギャップ)、また1次元的なフェルミ面で生じると考えられる超伝導上部臨界磁場  $H_{c2}$  の異方性などを調べたい。

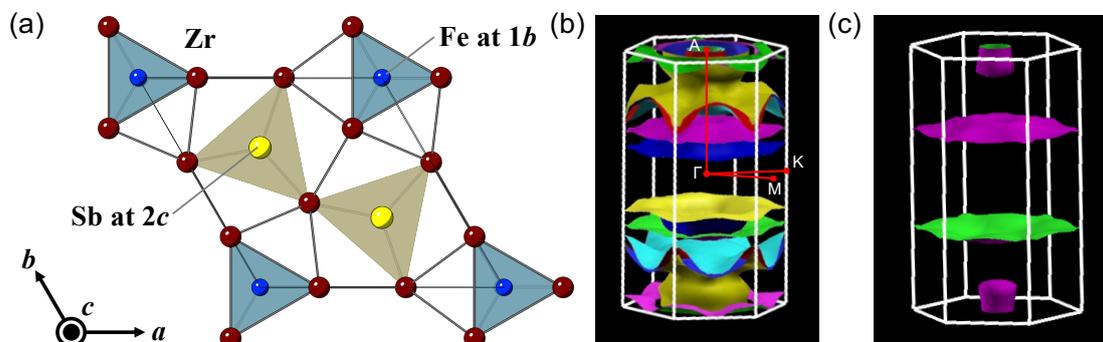


図1  $Zr_6FeSb_2$ における (a)結晶構造、(b)フェルミ面、  
 (c) Fe 1次元ネットワークに由来するフェルミ面

[1] R. Matsumoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 065001 (2024).

## 希土類ジルコン $\text{TmPO}_4$ における電気四極子転移の磁場角度依存性

広島大院先進理工

松下真大, 野原実

希土類ジルコン  $\text{TmPO}_4$  は、磁場誘起のリエントラント電気四極子転移を示すことが提案されている [1]。図 1 に提案された磁場  $H \parallel \langle 100 \rangle$  を印加したときの  $H$ - $T$  相図を示す。 $T=0$  では第一の臨界磁場  $H_{c1} \approx 10 \text{ T}$  で  $O_{xy}$  の電気四極子転移を示し、 $\varepsilon_{xy}$  歪が現れる。さらに磁場を強くすると、第二の臨界磁場  $H_{c2} \approx 35 \text{ T}$  で電子四極子秩序と  $\varepsilon_{xy}$  歪が消える。また温度を上昇させると転移温度は最高で 16 K に達する。

$T=0$  における  $H_{c1}$  と  $H_{c2}$  は、磁場による量子臨界点であると考えられる。ここでの量子ゆらぎは、磁場方向を変化させたとき  $H_{c1}$  と  $H_{c2}$  で発散する回転グリュナイゼン比  $\Gamma_\phi$  で捉えることができる [2]。  $\Gamma_\phi$  は磁場の印加方向 (角度) を変化させたときの磁気熱量効果で測定する。

本研究では、結晶場計算を用いて  $H_{c1}$  および  $H_{c2}$  の磁場方位角依存性を調べた。図 1(a) に ab 面に磁場を印加した場合の角度相図を示す。磁場が  $\langle 100 \rangle$  方向から  $\langle 010 \rangle$  方向にわずか 7 度傾くと、四極子秩序が消失する。図 1(b) に ac 面に磁場を印加した場合の角度相図を示す。こちらは  $\langle 100 \rangle$  方向から  $\langle 001 \rangle$  方向に最大 45 度傾いても、四極子秩序が現れる。さらに秩序変数  $J_z$  のメタ磁性が現れることが明らかになった。このように電気四極子秩序  $O_{xy}$  の磁場角度相図を明らかにした。これをもとに回転グリュナイゼン比  $\Gamma_\phi$  を調べたい。

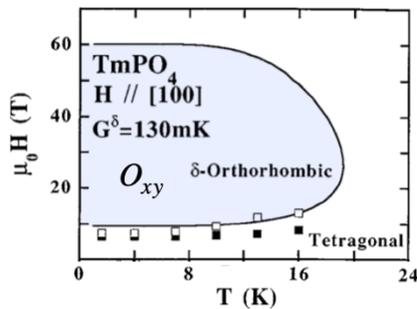


図 1. 電気四極子秩序  $O_{xy}$  の  $H$ - $T$  相図

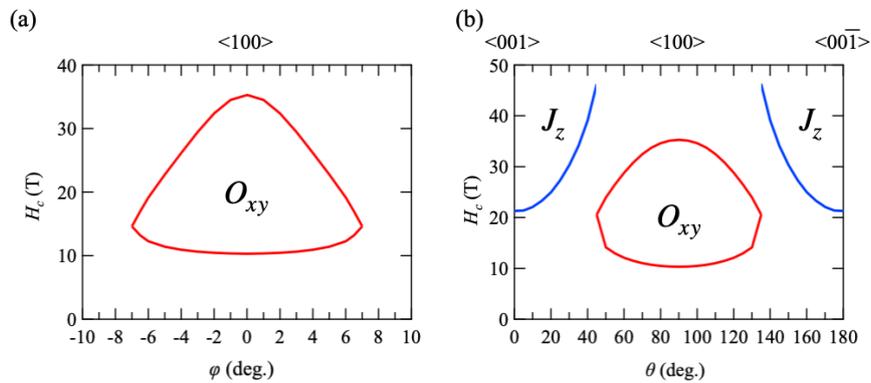


図 2. 電気四極子秩序  $O_{xy}$  の磁場角度相図

## 微細加工デバイスを用いた 極性縮退半導体 SnTe のパルス強磁場精密磁気抵抗測定

東大物性研

近藤雅起、須藤健太、徳永将史

運動量に線形なバンド分散を持つディラック電子系では、通常電子系と異なる量子化を示す量子振動や巨大磁気抵抗といった特異な強磁場物性が数多く報告されている。我々はディラック電子状態に起因した新奇強磁場物性の探索を目的に、単体ビスマス類似のディラック電子状態を示すナローギャップ半導体 SnTe に注目している。SnTe は 100 K 程度の低温で NaCl 型の正方晶(空間群  $Fm\bar{3}m$ )から、極性を持つ菱面体(空間群  $R3m$ )へと構造相転移することが知られている[図 1(a)]。この構造相転移はスピン軌道相互作用を介して電子状態と密接に関連していると考えられ、強磁場中ではゼーマン相互作用によるバンド変調に伴って格子が不安定化すると予想される。我々は格子不安定性に起因する新奇物性の探索のため、SnTe 単結晶試料に対してこれまでに 60 テスラまでのパルス強磁場中で超音波測定を行ってきた。その結果、弾性定数において、構造相転移温度  $T^* = 85$  K 近傍で振幅が増大する特異な温度依存性を示す量子振動を観測した[1]。

本研究では、この量子振動の特異な温度依存性の起源解明を目的に、SnTe 単結晶におけるパルス強磁場中の磁気抵抗測定を試みた。これまでにを行ったバルク形状の SnTe 試料を用いたパルス強磁場測定では、抵抗率が非常に小さいために解析に耐える十分な S/N 比のデータを得ることが困難であった。そこで今回我々は、集積イオンビーム(FIB)を用いて SnTe 単結晶を微細デバイスに加工し、電流密度の増強を狙った[図 1(b)]。その結果、信号強度が著しく向上し、パルス強磁場中においても非常に高い S/N 比での測定に成功した[図 1(c)]。これにより可能になった精密周波数解析の結果、 $T^*$ 以下の低温では量子振動の周波数が複数成分に分裂することを見出した。また本測定で得られたパラメータを用いて弾性定数の量子振動を再度解析した結果、フェルミ面の格子歪感受率が  $T^*$  近傍で著しく増大し、量子振動の振幅に影響を及ぼしていることが明らかになった。本講演ではこれらの詳細に加え、最近測定に成功した SnTe の非相反伝導についても併せて報告する予定である。

[1] M. Kondo *et al.*, in preparation.

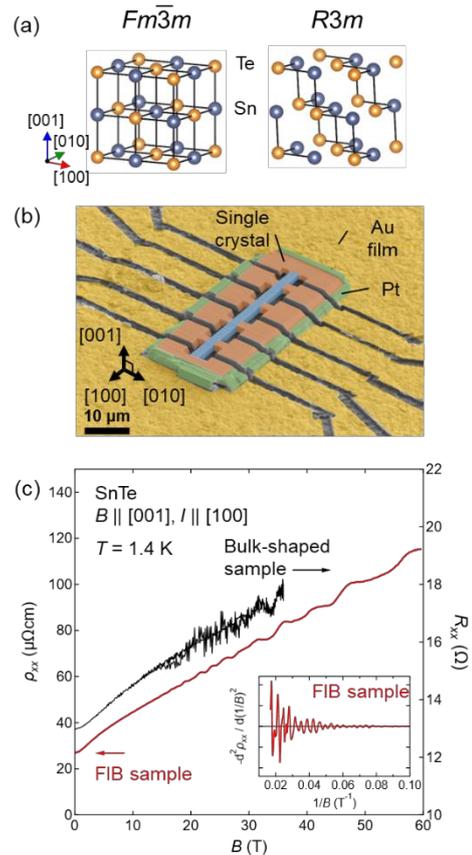


図 1: (a) SnTe の結晶構造。(b) FIB 微細加工した SnTe 単結晶。(c) SnTe バルク試料と微細加工試料の磁気抵抗。内挿図は 2 回微分により抽出した量子振動。

## 電場と温度勾配に誘起される非線形輸送現象の微視的理論

<sup>A</sup>神戸大理、<sup>B</sup>理研 RQC、<sup>C</sup>名大理

山口 皓史<sup>A</sup>、仲澤 一輝<sup>B</sup>、山影相<sup>C</sup>

非線形輸送現象は線形応答では記述できない新しい現象を含むことから近年盛んに研究が行われている。通常は同種の駆動力に対する2次の応答が中心であり、電場の2次応答から非相反伝搬や非線形 Hall 効果、最近では温度勾配の2次応答による非線形 Nernst 効果などが調べられてきた。一方で、非線形応答として異なる種類の駆動力の組み合わせによっても生じて良い。特に電場と温度勾配の外積に比例する応答は単一の駆動力では現れない質的に異なる現象であり興味深いものとなっている[1,2]。

本発表では、電場と温度勾配の外積に比例する電流（図1、以下では非線形ジャイロトロピック熱電気(NGTE) Hall 効果と呼ぶ）についての微視的理論を紹介する[3]。非平衡(Keldysh) Green 関数を用いることで微視的に定式化をする。NGTE Hall 効果は対称性の観点ではカイラルな系で生じることから具体的にカイラルな系、特に有効模型における解析や、第一原理計算と組み合わせて Te[4]や CoSi[5]などで NGTE Hall 効果が生じることを示す。

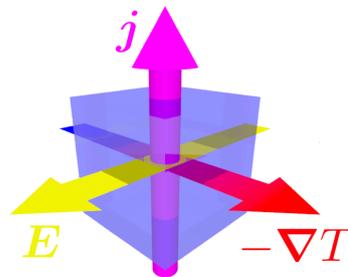


図1. NGTE Hall 効果の概念図[]

- [1] R. Nakai and N. Nagaosa, Phys. Rev. B **99**, 115201 (2019).
- [2] R. Toshio, K. Takasan, and N. Kawakami, Phys. Rev. Res. **2**, 032021 (2020).
- [3] T. Yamaguchi, K. Nakazawa, and A. Yamakage, Phys. Rev. B **109**, 205117 (2024).
- [4] K. Nakazawa, T. Yamaguchi, and A. Yamakage, Phys. Rev. Mater. **8**, L091601 (2024).
- [5] K. Nakazawa, T. Yamaguchi, and A. Yamakage, Phys. Rev. B. **111**, 045161 (2025).

## 超量子極限における磁気抵抗：磁場誘起のユニタリティ極限へのクロスオーバー

<sup>A</sup>神戸大理

多湖 崇人<sup>A</sup>、山田 暉馨<sup>A</sup>、伏屋 雄紀<sup>A</sup>

金属に非常に強い磁場を印加すると、電子が最低ランダウ準位のみを占有する量子極限に到達する。量子極限以降、キャリア密度一定条件の下で化学ポテンシャルは磁場の増加に伴ってバンド端に漸近し、 $z$ 方向の電子の運動エネルギーは減少する。さらに強い磁場領域（超量子極限）では、サイクロトロンエネルギーが運動エネルギーを大きく上回り、状態密度や散乱機構に特異な変化が現れる。このような運動エネルギーが小さくなる領域では、多重散乱の効果を反映させる必要がある。

本研究では、有効質量近似が成り立つ系を対象に、久保公式に基づいて超量子極限における磁気抵抗を定式化した。またキャリア密度一定条件を課して化学ポテンシャルの磁場依存性を決定し、不純物散乱による自己エネルギーには  $T$ -matrix 近似を用いて多重散乱効果を取り入れた。

計算の結果、量子極限到達後、電子の運動エネルギーは磁場  $B$  に対して $-2$ 乗に比例して減少することがわかった。またバンド端近傍では状態密度が発散的に増大するため、散乱率が増大してボルン近似が破綻することがわかった。 $T$ -matrix 近似を用いた結果、散乱率はボルン近似が成立する範囲の上限値に達した後、運動エネルギーと同様に $B^{-2}$ に比例して減少することが示された。またこのとき磁場のない場合のユニタリティ極限と同様に[1, 2]、不純物散乱の強度依存性が消失する。したがって、磁場によってボルン領域からユニタリティ極限へのクロスオーバーが誘起されることが本研究において新たに示された。さらに、得られた化学ポテンシャルおよび散乱率を用いて磁気抵抗を求めたところ、超量子極限において横磁気抵抗では線形磁場依存性（図1）が、縦磁気抵抗では $B^{-2}$ に比例した負の磁気抵抗が現れることがわかった。また超量子極限においても弱磁場領域[3]と同様に量子-古典対応が示され、古典表式に状態密度の増大の効果を含んだ量子補正項と散乱率の磁場依存性を加えることで、これらの特異な振る舞いを説明できることも明らかにした。

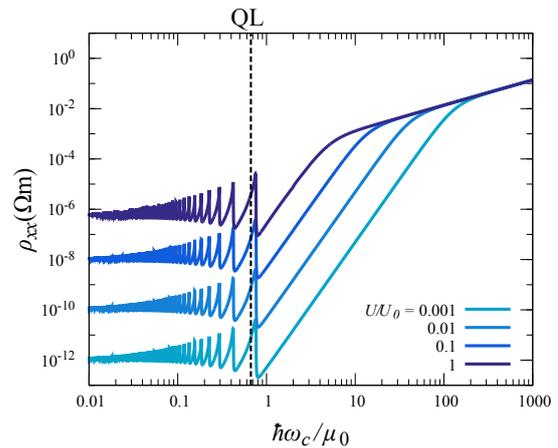


図1. 超量子極限における線形磁気抵抗

[1] M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. **63** 239 (1991)

[2] T. A. Costi, Phys. Rev. Lett. **85** 1504–1507 (2000)

[3] A. Yamada and Y. Fuseya, J. Phys: Condens. Matter **36**, 245702 (2024).

## FIB 微細加工デバイスを用いた強磁場輸送測定

東大物性研

須藤 健太、近藤 雅紀、徳永 将史

オームの法則は、電気伝導現象において最も基本的な経験則であり、物質に加えられた電圧とそれに応じて流れる電流が比例することを示している。ただし、これは低電圧領域で成立する近似であり、印加電圧が大きくなると、この比例関係は一般に破綻する。一方、物質の時間反転対称性や空間反転対称性が破れた場合、あるいは電荷密度波 (CDW) のような電荷秩序相においては、特異な電子状態に起因して、低電圧・低電流領域においてもオームの法則からの逸脱が生じることが知られている。このとき、電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性は非線形を示し、前者は「非相反伝導」[1,2]、後者は「非線形伝導」[3]と慣習的に呼称されている。

本研究では、集束イオンビーム(FIB)微細加工技術を用いて作製した単結晶デバイスを用い、強磁場中における非相反伝導および非線形伝導の測定を実施した。非相反伝導は電流密度に比例するため、試料の断面積を縮小することで信号強度が向上し、高精度な測定が可能となる。また、CDWのスライディングに必要な閾電場(または閾電流密度)を越える電場(電流密度)の印加も、微細化によって容易に実現できるため、非線形伝導の観測にも有効である。

本発表では、グラファイトにおける非線形伝導の測定結果について詳述する。グラファイトは、 $c$  軸方向の磁場中において、 $c$  軸方向の波数ベクトルを持つ密度波の形成が示唆されている[4]。しかし、共有結合により形成されたグラフェン層が積層した構造を持つため、グラファイトは電気伝導に強い異方性を示し、 $c$  軸方向の4端子抵抗測定は従来困難であった。本研究では、FIB デバイスを用いて  $c$  軸方向に沿った4端子抵抗測定を実現し、さらに  $B \parallel c$  の磁場中における  $I$ - $V$  測定により、密度波形成に伴う非線形伝導の検出を試みた。

[1] T. Ideue et al., Nat. Phys. 13, 578 (2017).

[2] K. Sudo et al., Phys. Rev. B 108, 125137 (2023)

[3] R. M. Fleming et al., Phys. Rev. Lett. 42, 1423 (1979)

[4] H. Yaguchi et al., J. Phys. Soc. J. 68, 181 (1999)

## Paschen-Back-like crossover in the magneto-transport phenomena

神戸大学

山田 暉馨、伏屋 雄紀

古典的な磁気輸送理論から導かれる磁気伝導度テンソルは、明快かつパラメータフィットの簡便さから磁気抵抗測定の解析に広く供されている。一方で、ランダウ量子化が顕になる強磁場においてこの古典公式は修正を必要とする。最近、我々はランダウ量子化された自由電子について、平衡流・非平衡流の分類に基づいて磁場中の伝導度テンソルを計算し、古典理論との対応関係およびホール伝導度における磁場誘起の非平衡流-平衡流クロスオーバーを見出した[1]。

今回、空間反転対称性の破れにより異方的なスピン・軌道相互作用を持つ3次元ラッシュバ電子系[2]を例に強磁場輸送理論を複数バンド系に拡張し、輸送係数テンソルを導出した。ランダウ量子化したラッシュバ電子系の準位は弱磁場において顕著な $B^{1/2}$ の依存性を示し、強磁場極限ではすべてのランダウ準位が自由電子的すなわち磁場に対して線形なふるまいを示すようになる(図1)。

久保公式を用いた解析計算の結果、伝導度テンソルの各成分には軌道角運動量由来の項(自由電子項)に加え、結晶内部の有効電場によって増強されるスピン・軌道結合由来の項が含まれる事が分かった。このスピン関連項は自由電子項と同様の非平衡流-平衡流クロスオーバーを示すとともに、希薄キャリア領域においてホール伝導度の発散的増強や符号反転をもたらす[3]。一方で、強磁場ではこの項は顕著ではなくなり、自由電子的なふるまいに転ずることが分かった。これはラッシュバ型のスピン軌道相互作用の効果が強磁場極限で無視できることに対応しており(図2)、原子軌道におけるパッシェンバック効果[4]と類似の起源によって理解することのできるクロスオーバー現象である。発表では、2種類の磁場誘起クロスオーバーとホール効果の符号の関係について紹介する。

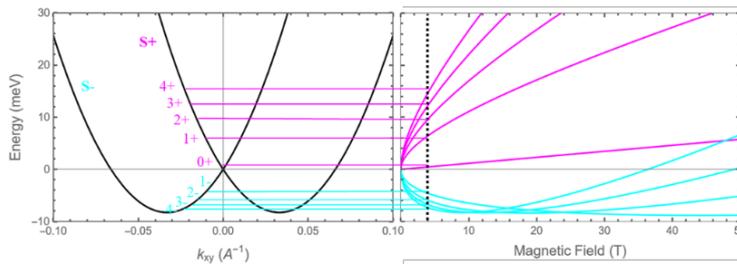


図1. (左) ラッシュバ電子の面内分散  
(右) 面直磁場によるランダウ準位

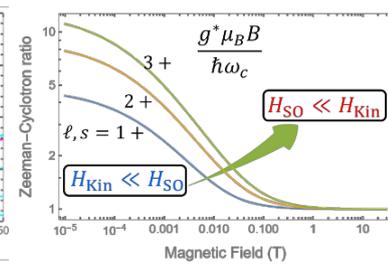


図2. 磁場によるスピン軌道結合のクロスオーバー

[1] AY and Y. Fuseya, J. Phys.: Condens. Matter 36, 245702 (2024).

[2] E. I. J. S. P. Rashba, Sov. Phys.-Solid State 2, 1224 (1960).

[3] H. Suzuura and T. Ando, Phys. Rev. B 94, 035302 (2016).

[4] F. Paschen and E. Back, Physica 1, 261 (1921).

## Type IIディラック電子状態を有するフェリ磁性体 $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$ の量子振動測定

阪大院理<sup>A</sup>, 原研先端基礎研<sup>B</sup>,  
 山下淳志<sup>A</sup>, 酒井英明<sup>A</sup>, 水野竜太<sup>A</sup>, 越智正之<sup>A</sup>, 木俣基<sup>B</sup>,  
 村川寛<sup>A</sup>, 花咲徳亮<sup>A</sup>

$RT\text{Bi}_2$  ( $R$ : 希土類、アルカリ土類元素、 $T$ : 遷移金属元素) は Bi 正方格子層と  $RT\text{Bi}$  磁性層が積層した構造 ( $\text{HfCuSi}_2$  型構造) を持つ。Bi 正方格子層では 2 次元ディラック電子状態が実現するため、磁性層の変化によって多彩な磁性トポジカル半金属が開拓できる系として注目されている。これに対し、 $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  は従来とは異なる構造の磁性層と Bi 正方格子層が積層した構造を持つ (図 1(a))。実際に  $\text{HfCuSi}_2$  型構造の  $\text{CeAuBi}_2$  と比較すると、 $\text{CeAuBi}_2$  では  $T_N = 19$  K で反強磁性的な磁気秩序を示すのに対し[1]、 $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  では  $T_C = 5$  K においてフェリ磁性的な磁気秩序を示すことがこれまでの研究で明らかとなった。さらに

第一原理計算から、Bi 正方格子のディラックバンドと Ce バンドの混成により、ディラックコーンが大きく傾いた type II型に変形していることが示唆された (図 1(b)(c)) [2]。

本研究では、 $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  の電子状態のさらなる解明を目指し、強磁場下での電気抵抗率測定を行い、type IIディラックバンド由来と考えられる SdH 振動を観測した (図 1(d))。発表では SdH 振動の測定結果と第一原理計算の結果を比較し、 $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  の電子状態について議論する。

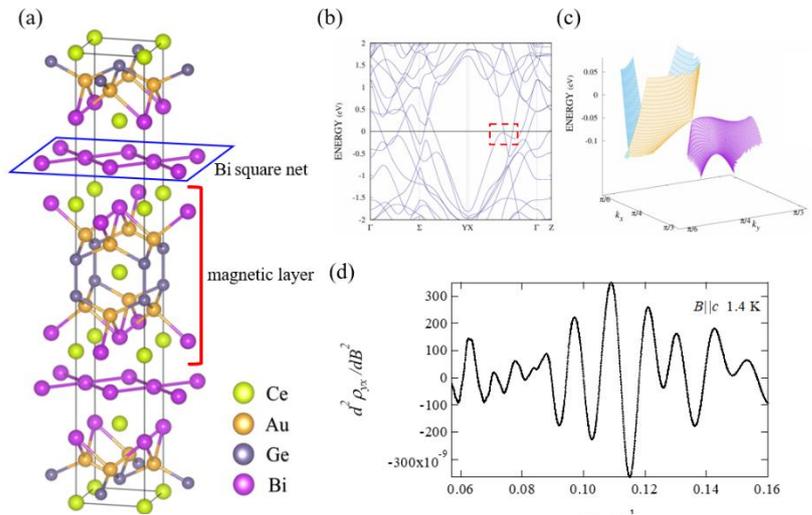


図 1: (a)  $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  の結晶構造。(b)  $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  のバンド構造と(c)  $\Gamma$ -X 上に見られる傾いたディラックコーン型分散。(d)  $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  のホール抵抗率の SdH 振動。

[1] M. M. Piva et al., Phys. Rev. B 101, 214431 (2020).

[2] A. Yamashita H. Sakai et al., 日本物理学会 2025 年春季大会 (2025).

## 磁場印加による $ZrTe_5$ の熱電変換効率向上に関する理論研究

神戸大学大学院 理学研究科 物理学専攻

廣田 碩人

熱電効果は、 $CO_2$  排出を伴わないこと、排熱を用いることができること、稼働部がないことなどから、新規な発電機構として注目されている。現在、実用化されている材料は複数存在するが、より広範な場所での実用のため高い熱電性能を示す材料や熱電変換効率向上の方策の探索などが国際的に盛んに行われている。変換効率向上の方策の一つとして、磁場の印加による方法は古くから知られている。例えば、ビスマスアンチモン ( $Bi_{88}Sb_{12}$ ) は、温度 160 K において性能指数が 0.5 T 程度で最大値をとることが報告されている [1]。

そこで本研究では、磁場中の熱電効果について、熱電変換に対する磁場効果を明らかにすることを目的とした。まず、前述の磁場中電気抵抗の理論に温度勾配を加えることで磁場中の熱電効果に関する理論に転用し、任意の電子状態に対して磁気熱電効果の計算のできる方程式を導出した。具体的には、半古典論の輸送方程式であるボルツマン方程式を電場・温度勾配の二つの外場で解いた形式 [2] から、テンソル表現を用いることで磁場下に適用し、三つの外場がかかった系において任意のフェルミ面に対応できる表式に拡張した。

導いた理論を用いて、1~4 楕円体近似において輸送係数を計算し、熱電性能を示す指標であるゼーベック係数及び性能指数 ( $ZT$ ) を求めた。その結果、2~4 楕円体近似では磁場の影響が小さかったのに対し、1 楕円体模型においてのみ磁場印加で、0 磁場で 0.7 程度だった性能指数が 1.5 程度まで倍増した。なお、 $ZT > 1$  が実用化の目安とされている。これは、一方向にのみ異方性を持たせることで状態密度が低次元（この場合は二次元）に近い状態になり、状態密度に急峻な変化が見られるようになることによると考えられる [2]。

さらに、ある一方向に極端な異方性のある単一楕円体フェルミ面を持つ  $ZrTe_5$  において計算を行った結果、この低次元性がさらに顕著に現われる ( $ZrTe_5$  の場合は一次元性が顕著になると考えられる) 振る舞いが見られた。

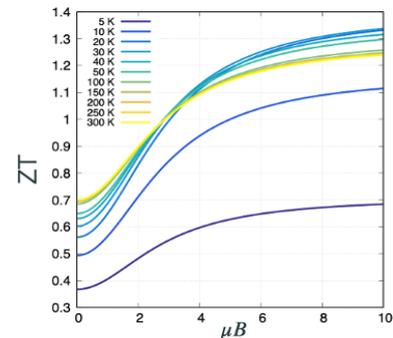


図 1. 性能指数の磁場依存性

[1] R. Wolfe and G. E. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **1**, 5 (1962).

[2] J. M. Ziman, *Electrons and Phonons*, Clarendon Press, Oxford (1967).

[3] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* **47**, 16631 (1993).

## The optical absorption spectra of a microbial rhodopsin and the transient absorption of a microbial rhodopsin in ultra-high magnetic field

ISSP, Univ. Tokyo

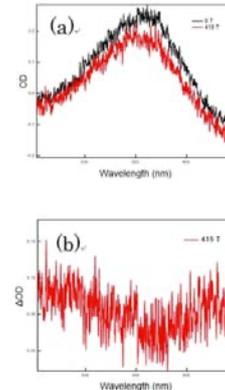
Y-L.Guo, Y.Ishii, X-G.Zhou, M. Konno, T.Nagata, K.Inoue, Y.H.Matsuda

Although the magnetic field effect on biological function is generally believed to be small or negligible because the field-induced energy change in the electronic state is small: It is roughly 0.1 meV at 1 T which is available using the world's strongest permanent magnet. However, significant magnetic field induced effects may appear in some biological materials when the magnetic field is strong enough. Since the 1000 T class magnetic field has recently become available [1], a new research frontier can be developed using such a strong magnetic field. In the present work, we focus on microbial rhodopsins which have been intensively studied because

they are photoreceptive membrane proteins showing biological functions. Schizorhodopsin (SzR1) is an inward H<sup>+</sup> proton pump protein on the membrane. After being stimulated by light, a reaction called photo-isomerization takes place in SzR1 which only takes 10<sup>-13</sup>~10<sup>-12</sup> s to complete works.[2] From this reaction, all-trans retinal transform to 13-cis retinal.[2] The electronic state and its change by photo-isomerization can be investigated with optical absorption spectroscopy. An ultrahigh magnetic field can not only influence the process of photo-isomerization but also the electronic state of SzR1, which can also lead to a change in the absorption spectrum.

Fig.1(a) shows the absorption spectra at 0 and 415 T. Although the spectra look similar to each other, there is a small but distinctive change in the spectrum by applying 415 T. The difference absorption spectrum is shown in Fig. 1(b). Because such a change is not observed when the magnetic field is smaller than 300 T, there can be some critical magnetic field. The magnetism of SzR1 is also an interesting topic in this research. Recently, faraday rotation experiment of SzR1 is done in the condition of 120 T, with the reference of nutrition and empty cell by using horizontal single turn coil system. By checking the faraday rotation angle  $\theta_F$ , the empty cell, which has two 0.3mm glass and the nutrition, are thought to be diamagnetism, comparing with the  $\theta_F$  of SzR1, the magnetism of it can be discussed.

Recently we are building a transient absorption experiment in HSTC system, we used Yag laser to stimulate the SzR1 and get the spectra of it. We saw the effect of the laser and we will apply magnetic field on the transient absorption experiment.



[1] Nakamura, Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression. Rev. Sci.Instrum. 89(9), 095106, (2018)

[2] Inoue, Keiichi, et al. "Schizorhodopsins: A family of rhodopsins from Asgard archaea that function as light-driven inward H<sup>+</sup> pumps." Science Advances 6.15 (2020): eaaz2441.

## 機械的刺激で発生したラジカル種の発光特性に対する磁場効果

<sup>A</sup> 阪大院基礎工, <sup>B</sup> 東北大金研, <sup>C</sup> JST 創発, <sup>D</sup> OTRI-Spin 阪大  
吉田 峻<sup>A</sup>, 松岡 亮太<sup>A</sup>, 木村 尚次郎<sup>B</sup>, 草本 哲郎<sup>A, C, D</sup>

発光性有機ラジカルはその閉殻電子状態に由来し、磁場による発光スペクトル変化 (マグネトルミネッセンス, MagLum) など、スピンと発光が協奏したラジカルならではのユニークな物性を示す<sup>[1]</sup>。また近年、外部刺激に応答して発生したラジカル種の発光が数多く報告され<sup>[2]</sup>、発光性ラジカルの研究範囲が広がりつつある。外部刺激に伴う閉殻分子の結合開裂や電子移動は通常2つのラジカル種 (ラジカル対) を発生させるが、それらの相互作用に基づくスピン-発光相関物性は未開拓のままである。本研究では、結合開裂に伴い2つの中性ラジカル種を発生させるテトラアリアルスクシノニトリル (TASN) 誘導体 ***αH-1*** (図 a) を合成した。これをすり潰すと、***αH-1*** の約3% が解離し、発光性のジアリアルアセトニトリル (DAAN) ラジカル誘導体 ***αH-2*** が発生した。また ***αH-1*** をすり潰した固体からは、MagLum が観測された (図 b)。これは、***αH-1*** の解離率の高さに基づき、発生したラジカル ***αH-2*** の一部が部分的に集合し、ラジカル間に有効な磁氣的相互作用が働いているからであると考えられる。当日はその詳細や発現メカニズムについて発表する。

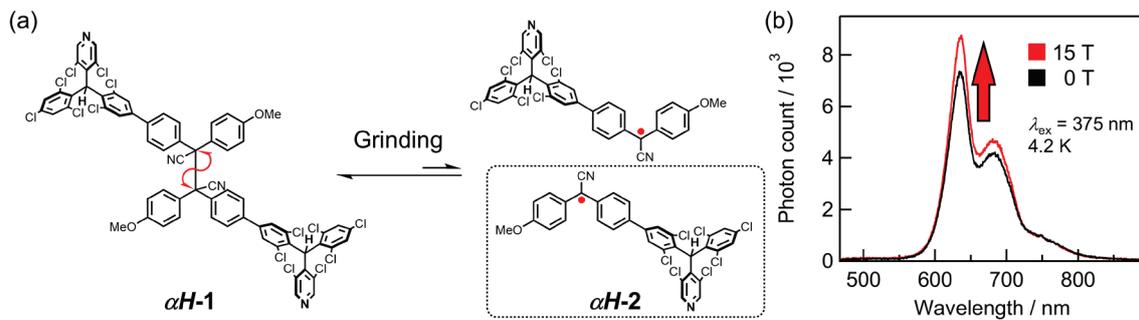


図 (a) Equilibrium of ***αH-1*** and ***αH-2***. (b) Emission spectra of the ground solid of ***αH-1*** under magnetic fields at 4.2 K ( $\lambda_{\text{ex}} = 375 \text{ nm}$ ).

[1] S. Kimura, T. Kusamoto, S. Kimura, K. Kato, Y. Teki, H. Nishihara, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 12711–12715.

[2] T. Yamamoto, A. Takahashi, H. Otsuka, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2024**, 97, 1–12.

## 五配位 $\text{Mn}^{\text{II}}$ 錯体を示すマグネトルミネッセンス

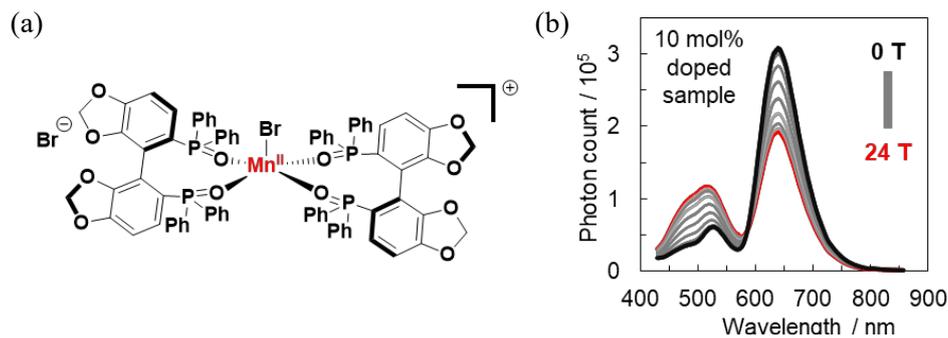
<sup>A</sup> 阪大院基礎工、<sup>B</sup> OTRI-Spin 阪大、<sup>C</sup> 東北大金研、<sup>D</sup> JST 創発

樋川 岳真<sup>A</sup>、松岡 亮太<sup>A</sup>、水野 麻人<sup>A,B</sup>、木村 尚次郎<sup>C</sup>、草本 哲郎<sup>A,B,D</sup>

外部磁場の印加によって発光が変化するマグネトルミネッセンス (MagLum) は、従来の分子性物質ではラジカルペアや三重項対、ラジカル分子集積系で観測されてきた興味深い現象である。当研究室では、ラジカル分子集積系が示す MagLum が、外部磁場による基底状態分子のスピンの状態変調に起因することを明らかにした<sup>[1]</sup>。分子集積系中のラジカル二量体が磁場印加によるゼーマン分裂の影響を受けることで、ボルツマン分布に従って一重項-三重項占有率が変わることが MagLum 発現の鍵となることが確認されている。

一方で、ラジカル分子集積系よりも大きなスピン多重度を有する分子が、どのような MagLum を示すのかについてはほぼ未解明である。これに対して当研究室では、基底六重項状態を示す  $\text{Mn}^{\text{II}}$  錯体に着目した。六配位  $\text{Mn}^{\text{II}}$  錯体  $[\text{Mn}^{\text{II}}(\text{dppmO}_2)_3](\text{BF}_4)_2$  では、ホスト-ゲスト間のエネルギー移動過程に磁場が作用するという、従来のラジカル分子集積系とは質的に異なる MagLum が観測された<sup>[2]</sup>。しかしながら、この MagLum が  $\text{Mn}^{\text{II}}$  錯体において一般的であるか、また詳細なメカニズムがどのようなものであるかについては明らかになっていない。

そこで本研究では、五配位  $\text{Mn}^{\text{II}}$  錯体  $[\text{Mn}^{\text{II}}\text{Br}(\text{R-SEGPHOSO})_2]\text{Br}$ <sup>[3]</sup> の MagLum について調査を行った (Figure 1a)。ホストである SEGPHOS oxide (= SEGPHOSO) に本  $\text{Mn}^{\text{II}}$  錯体をドープした試料において、 $\text{Mn}^{\text{II}}$  中心の発光強度変化が 24 T までの磁場印加条件で観測された (Figure 1b)。またその変化挙動から、外部磁場がホスト-ホスト間またはホスト-ゲスト間のエネルギー移動過程に主に作用していることが示唆され、 $[\text{Mn}^{\text{II}}(\text{dppmO}_2)_3](\text{BF}_4)_2$  と似た MagLum を示すことが明らかになった。



**Figure 1.** (a) Chemical structure of  $[\text{Mn}^{\text{II}}\text{Br}(\text{SEGPHOSO})_2]\text{Br}$ . (b) Emission spectra of 10 mol%  $[\text{Mn}^{\text{II}}\text{Br}(\text{SEGPHOSO})_2]\text{Br}$  dispersed in SEGPHOSO under magnetic fields of up to 24 T at 4.2 K ( $\lambda_{\text{ex}} = 340 \text{ nm}$ ).

[1] S. Kimura, S. Kimura, K. Kato, Y. Teki, H. Nishihara, and T. Kusamoto, *Chem. Sci.* **2021**, *12*, 2025–2029. [2] T. Mibu, R. Matsuoka, and T. Kusamoto, *CSJ Annual meeting 2024*, F1233-3vn-03, Funabashi. [3] Z. Zhou, T. Jiang, Y. Yang, Y. Deng, M. Wang, Y. Ma, S. Liu, and Q. Zhao, *Adv. Opt. Mater.* **2024**, *12*, 2302185.

## 紫外光吸収型チャネルロドプシンの発見

東大物性研 永田 崇

微生物や動物の細胞の脂質膜上に存在する光受容タンパク質・ロドプシンは、光のエネルギーを利用してイオン輸送や細胞内シグナル伝達などを行い、細胞のエネルギー代謝や光応答に重要な役割を果たす。ロドプシンは主に7本の膜貫通ヘリックス構造を持ち、光を吸収する発色団であるレチナールをタンパク質内部に共有結合している。これまでにアミノ酸配列の違うロドプシン分子が数万種類同定されており、幅広い生物種にわたる多様な生理現象に関与することから、生物学的に重要なタンパク質と位置づけられる。典型的な微生物ロドプシンでは、発色団レチナールが光子を吸収して励起状態になると1ピコ秒程度で異性化反応が生じ、これが引き金となってイオン輸送などの機能が発現する。この光異性化に伴いタンパク質に構造変化が生じ、複数の反応中間体が形成される。これらの過程は可視光領域における吸収変化として捉えることができるため、ロドプシンはパルス磁場下での光反応研究に適したモデルタンパク質と考えられる。

ロドプシンの光反応に対する磁場効果はこれまで報告されていないが、理論的には強磁場が光反応に影響を与える可能性が指摘されている。特に、発色団レチナールが脱プロトン化状態にある場合、光異性化反応に三重項状態が関与する可能性が示唆されている[1]。このような状態では発色団は紫外領域に吸収を示すが、通常条件で顕著な紫外吸収を示す微生物ロドプシンは非常に限られている。これまでに私たちは、一部の発色団が脱プロトン化する性質を持った Twin-peaked Rhodopsin (TwR) の新奇分子の発見やそれらの分光学的特性など[2]を報告した。そして最近、原生生物 Apusomonad に由来し、通常条件下において発色団がほぼ完全に脱プロトン化状態をとる初めての微生物ロドプシン ApuR を発見した (図 1 A, B) [3]。さらに ApuR は TwR と異なり、紫外光で励起されると陰イオンを透過する性質を持つ (図 1 C)。本発表では ApuR が持つ、磁場効果の研究において有用な特性について議論したい。

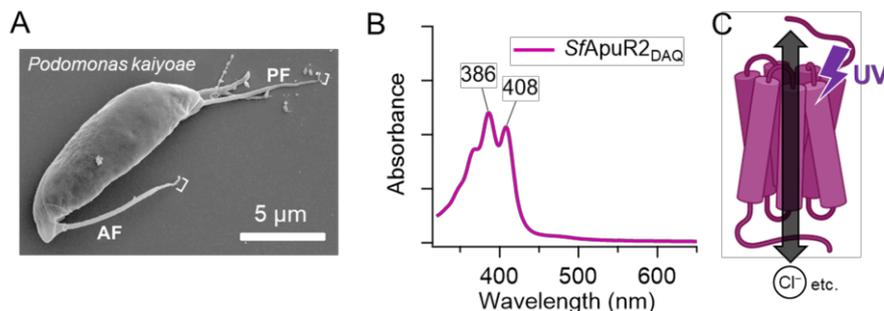


図 1. (A) ApuR を持つ Apusomonad の走査電子顕微鏡像[4]。(B) ApuR (SfApuR2<sub>DAG</sub>) の吸収スペクトル。(C) ApuR は紫外光を吸収し Cl<sup>-</sup>などの陰イオンを透過する光開閉チャネルロドプシンとして機能する。

[1] Filiba et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022; [2] Mannen et al., *J. Mol. Biol.* 2024

[3] Galindo et al., *bioRxiv* 2025; [4] Yabuki et al., *J. Eukaryot. Microbiol.* 2022

## Spinless Hubbard 模型におけるフラストレーションと超強磁場効果

東北大理

太田那生也, 那須讓治

電子相関が重要な役割を果たす強相関電子系では電子間相互作用に由来して新奇的な量子相が発現することが知られている。励起子絶縁体はそのような量子相のひとつとして知られており、これは、価電子・伝導体のバンドが Coulomb 相互作用によって変形および混成することで絶縁体となるものである。この状態は、伝導帯の電子と価電子帯のホールの対である励起子が Bose-Einstein 凝縮した描像で説明される。近年、ペロブスカイト型コバルト酸化物  $\text{LaCoO}_3$  において、励起子凝縮相や励起子超固体相が数百 T 程度の超強磁場を印加することで実現している可能性が報告されており[1]、理論計算からも Zeeman 効果が励起子凝縮状態の安定化に重要な役割を果たすことが指摘されている。一方で、電子に対するローレンツ力の効果を考慮すると、Hofstadter's butterfly と呼ばれる、バンドがフラクタルに分裂したエネルギー構造が生じる。この効果は格子上の電子系において数千 T の磁場領域で現れる効果であり、超強磁場下における物質の性質に影響を与えうると考えられる。

そこで我々は正方格子を対象として、励起子凝縮を記述する最も簡単な模型である spinless Hubbard 模型(拡張 Falicov-Kimball 模型)に対し、Peierls 位相により磁場効果を取り入れ、Hartree-Fock 近似によって解析した[3]。その結果、モデルパラメータに依存して、励起子秩序の磁場による変調や、励起子秩序の抑制による励起子超固体相から軌道秩序相への転移が生じることを示した。また、励起子凝縮の秩序変数が消失し、無秩序絶縁体相が生じることを明らかにした。これは、Hofstadter's butterfly の特異なバンド分裂が要因であると考えられる。

本研究では、格子構造に由来した新規現象の提案を目指して、幾何学的フラストレーションを有する三角格子に注目して計算を行った。三角格子においては、幾何学的フラストレーションに加えて、そのバンド構造に電子正孔対称性を持たないため、価電子帯と伝導帯のバンドの凝縮によって生じる励起子凝縮相に対して、正方格子と異なる特異な現象が期待される。当日は、我々の研究[3]のように磁場によるバンドの分裂に起因した無秩序絶縁体相・励起子秩序変数の変調と、正方格子と異なるバンド構造・フラストレーションによる秩序状態に対して超強磁場が与える影響について議論する予定である。

[1] A. Ikeda et al., Nat. Commun. **14**, 1744 (2023).[2] D. R. Hofstadter, Phys. Rev. B **14**, 2239 (1976).[3] N. Ohta and J. Nasu, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 054702 (2025).

## 面内磁場下における二層銅酸化物の可能なトポロジカル超伝導体

<sup>A</sup> 東大物性研、<sup>B</sup>Ecole Polytechnique

王 子瑜 <sup>A</sup>、Olesia Dmytruk<sup>B</sup>、岡 隆史 <sup>A</sup>

二次元材料を中心とするトポロジカル相の研究は、近年目覚ましい進展を遂げている。とりわけグラフェンや銅酸化物などの層状二次元物質では、隣接する単層結晶構造を特定の回転角（魔法角）で重ね合わせることで相転移を誘起できることが実験的に示された[1-3]。一方で、魔法角はわずか $0.1^\circ$ のずれでも成立しなくなるため、本研究ではより簡易に実現できる外場を利用したトポロジカル超伝導相転移を提案する。ここでは層内・層間の電子相互作用に注目し、外場と結合するd波超伝導二層系の性質を解析した。外部ゲージは最小結合で導入し、その結果として各層の運動量空間が異なる方向へシフトされる。このシフトは通常は考慮されない超伝導秩序パラメータとの結合にも及ぼし、同一のゲージ場であっても各層に現れる効果が異なるため、層ごとに異なるトポロジカル構造が実現し得る。さらに層間ホッピングを導入すると、バルクハミルトニアンバンド構造が一段と変調され、エネルギーギャップが開閉する可能性がある。同時に、外部磁場とのスピン結合によるゼーマン効果が時間反転対称性を破る。ギンツブルグ＝ランダウ理論の枠組では、二層が持つ超伝導秩序パラメータ間の位相差もトポロジカル相を制御する重要な自由度となる[図1]。ここでは、外場と層間位相差という二つの効果が二層二次元結晶のエッジモードに及ぼす影響を数値的に解析し、その相図を明らかにする。

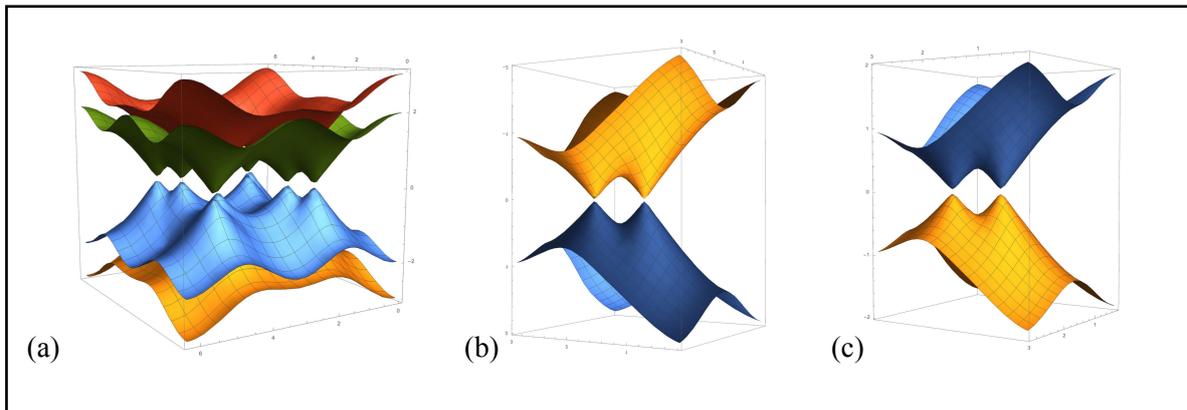


図1. 外部磁場下におけるバルク・ハミルトニアンのバンド構造: (a)(b)層間の超伝導秩序パラメータに位相差がない場合、(c)位相差がある場合。

[1] Y. Cao et al., Nature **556**, 43 (2018).

[2] M. Yankowitz et al., Science **363**, 1059 (2019).

[3] O. Can, T. Tummuru, R. P. Day, I. Elfimov, A. Damascelli, and M. Franz, Nature Physics **17**, 519 (2021).

## RuP の強磁場印加による電子状態変化の XAFS 測定

<sup>A</sup> 名大院工、<sup>B</sup> 電気通信大学、<sup>C</sup> 兵庫県立大、<sup>D</sup> 東大物性研

大橋 翼<sup>A</sup>、江見 方敏<sup>A</sup>、伊藤 大悟<sup>A</sup>、下條 裕生<sup>A</sup>、平井 大悟郎<sup>A</sup>、

池田 暁彦<sup>B</sup>、野田 孝祐<sup>B</sup>、新堀 琴美<sup>B</sup>、河智 史朗<sup>C</sup>、

石井 裕人<sup>D</sup>、林 浩章<sup>D</sup>、松田 康弘<sup>D</sup>、片山 尚幸<sup>A</sup>

遷移金属化合物には、構成元素が自発的に集合して「分子」を形成するものが存在する。こうした分子を形成する化学結合をパルス強磁場で切断しようという研究が VO<sub>2</sub> など様々な物質に対して試みられている[1]。我々が着目するのは、こうした分子形成が生じる直前の電子相である。たとえば、層状三角格子系 LiVS<sub>2</sub> では、低温で V が自発的に寄り集まり、三角形の三量体分子を形成する。しかし、高温相では、ジグザグ鎖状の分子が短距離秩序として形成され、短い時間スケールで形成と切断を繰り返す不安定な状態を持つことが示唆されている[2]。こうした短距離秩序状態をパルス磁場で切断し、その様子を放射光 X 線で捉えたいというのが研究のモチベーションである。

研究のターゲットとする RuP は MnP 型の結晶構造を持ち、高温では金属である。温度を下げていくと Ru が直鎖状の三量体分子を形成し、絶縁体化する[3]。高温相で X 線回折を行うと、等間隔に並んだ Ru が観測される。しかし、二体相関分布関数(PDF)解析では、低温相の三量体分子が短距離的に生き残っている様子が観測される[4]。我々は、この RuP の高温相で現れる短距離的な三量体分子を最大 30 T 程度のパルス強磁場で破壊し、新たな電子状態を生み出すことを試みた。

実験は SPring-8 の BL39XU で行った。エネルギーを固定して X 線の吸収量をモニタリングし、パルス強磁場を印加した際の X 線吸収量に現れる変化を記録した。実験は様々なエネルギーで行ったが、図 1 にはその一つを示す。赤線で示したパルス磁場の印加に 100 μs 程度の時間遅れを伴って追従し、黒線で示した X 線吸収量が大きく変化している。このことは、強磁場の印加により、新たな電子状態へ遷移したことを示している。印加磁場を弱めていくと、ある閾値を境に、変化は全く観測されなくなった。興味深いのは、図 1 に示したような吸収量の変化には高い再現性があるものの、その変化量には測定に応じていくらかのばらつきがあることである。RuP の短距離的な秩序状態が、LiVS<sub>2</sub> のように時間・空間的に揺らいで生じており、その揺らぎが影響している可能性を思わせる。詳細な電子状態の変化については現在解析中である。当日はそれらの解析結果について報告する。

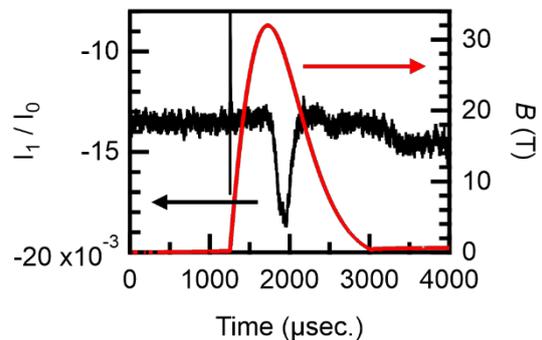


図 1. 磁場印加時の X 線吸収量変化

[1] Y.H. Matsuda *et al.*, Nat. Commun. **11**, 3591 (2020). [2] K. Kojima *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 235120 (2019). [3] D. Hirai *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **144**, 17857 (2022). [4] R.J. Koch *et al.*, Phys. Rev. B **106**, 214516 (2022).

## 高強度 X 線照射による $\text{CuIr}_2\text{S}_4$ の逐次相転移現象

<sup>A</sup>名大院工、<sup>B</sup>東大物性研、<sup>C</sup>東大新領域、<sup>D</sup>Science Tokyo、<sup>E</sup>室蘭工大  
大橋 翼<sup>A</sup>、小島 慶太<sup>B</sup>、江見 方敏<sup>A</sup>、小山 千翔<sup>C</sup>、橋本 賢太<sup>D</sup>、気谷 卓<sup>D</sup>、  
川路 均<sup>D</sup>、鈴木 博之<sup>B</sup>、永田 正一<sup>E</sup>、片山 尚幸<sup>A</sup>

遷移金属化合物では、複数の電子自由度が協奏することにより多彩な物性が現れる。 $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  は室温で立方晶スピネル型の結晶構造を持つ。温度を下げていくと 230 K で電荷・軌道自由度が秩序化し、Ir が二量体分子を形成する[1]。この秩序状態では特有の不安定性の存在を示唆するような現象が数多く報告されている。例えば、高圧力印加による異なる相への相転移現象[2]や、70 K 以下での X 線照射による、電荷秩序の解消および二量体分子の消失を伴う相転移現象[3]がある。我々は、X 線照射による相転移現象に着目し、放射光 X 線を用いた回折実験を行ってきた。第 3 回領域会議では、SPring-8 のベンディングマグネットビームラインでの実験結果について報告し、X 線照射による相転移現象が X 線強度に依存するという結果を示した。これを踏まえて、我々は、先行研究よりも約 3 桁高強度の X 線を利用することができる BL13XU で回折実験を行った。

実験には透過率の異なる複数のアッテネーターを使用し、様々な強度の X 線を照射した。その結果、X 線強度を 0.8% に減衰させた場合、以前の報告と同様に、試料全体で徐々に電荷秩序が融解し、二量体分子が消失していく様子が確認された。一方、アッテネーターを使用せず、強度 100% の X 線をそのまま照射した際には、予想に反して、以前の報告で観測された変化は確認されなかった。しかし、温度低下の過程で、これまで注目しなかった位置に新たなピークが出現した(図 1. 40 K)。40 K のデータを解析したところ、新たに出現したピークは、高温相と同じ結晶構造を持つ、立方晶相に由来することが判明した。つまり、40 K という低温にも関わらず、高強度 X 線の照射によって、低温相の一部が立方晶へと転移したことを示している。さらに温度を低下させると、このピークは 2 本に分裂した(図 1. 15 K)。15 K のデータを解析したところ、ピークの分裂は、立方晶相が格子定数の異なる 2 相に分裂したためであることがわかった。X 線強度によって遷移する相が変化する現象や、現れた相が複数に分裂する現象は、これまで報告されていない新しい知見である。 $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  の背景に存在する特有の不安定性が寄与している可能性がある。当日は、これらの実験結果に基づき、 $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  の相転移について議論する。

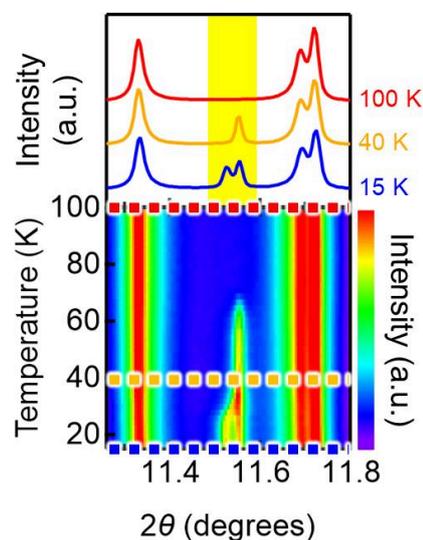


図 1. 回折パターン温度変化のカラーマップ

[1] T. Ohashi *et al.*, Phys. Rev. B submitted, P.G. Radaelli *et al.*, Nature **416**, 155-158 (2002).

[2] 江見, 大橋 他, 日本物理学会 2025 年春季大会 20aH1-9.

[3] H. Ishibashi *et al.*, Phys. Rev. B **66**, 144424 (2002).

## ジフルオロフェニレン架橋かご型化合物の強磁場下の誘電緩和

<sup>A</sup> 都立大院都市環境、<sup>B</sup> 東北大金研

瀬高 渉<sup>A</sup>、木村 尚次郎<sup>B</sup>

磁場内を運動する荷電粒子はローレンツ力を受け、その運動方向が変化する。したがって、磁場は荷電粒子の運動に摂動を与える。2008年にBrooksらは、軽ドーピングシリコン中の束縛自由電子に起因する誘電緩和を強磁場下で測定し、磁場が緩和挙動に影響を与えることを実験的に明らかにするとともに、観察された誘電緩和がローレンツ力を含む運動方程式から導かれた理論式に従うことを報告した[文献1]。一方で、電気双極子（以下、単に“ダイポール”と表記する。）の配向分極に関する磁場依存性については、詳細が不明である。そこで本研究は、このような回転軸固定型ダイポールにおける配向分極の磁場摂動効果の有無を明らかにすることを目的とした実験を実施した。

これまでに分子内極性部分構造が結晶内で1軸回転可能な有機化合物、すなわち、1,2-ジフルオロフェニレン固体分子ローターC14PhF2について、その合成とゼロ磁場における誘電緩和を報告していた[文献2]。図2(a)および(b)に、それぞれ粉末試料の誘電率実部および虚部の周波数依存性を測定した結果を示す。強磁場下(12 T)での測定結果は●で示した。実線はCole-Cole式によるフィッティング結果である。誘電率虚部のピーク周波数は既報の結果[文献2]と一致した。つまり240 Kにおいて誘電率虚部が $10^3$  Hz付近に極大を示し、配向分極に伴う典型的なDebye型緩和が観察された。なお、10 kHz以上の高周波領域で見られる偽ピークは、電極や電極近傍の配線の影響によるもので、試料由来の信号ではない。(図1)。この結果を、○で示したゼロ磁場(○: 0 T)での測定結果と比較した。その結果、12 Tでの測定値と一致し、この実験では磁場摂動効果は認められなかった。

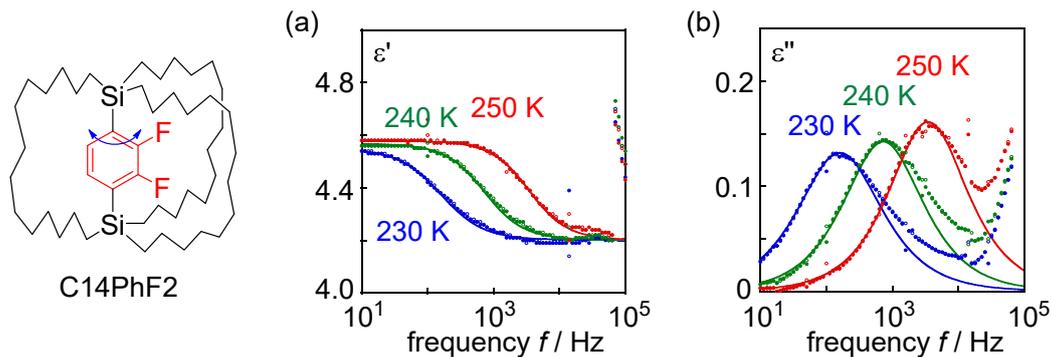


図1. Dielectric spectra of powdered C14PhF2 (●: under 12 T; ○: under zero magnetic field; solid lines: fitting curves using the Cole–Cole equation): (a) real part of the permittivity; (b) imaginary part of the permittivity.

[1] J. S. Brooks, R. Vasic, A. Kismarahardja, E. Steven, T. Tokumoto, P. Schlottmann, and S. Kelly, *Phys. Rev. B* 78 (2008), 045205.

[2] W. Setaka et al., *J. Org. Chem.* 86 (2021), 2423-2430.

キタエフスピン液体候補物質  $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$  単結晶の磁気トルク測定

<sup>A</sup> 東北大院理, <sup>B</sup> 東大物性研

今井良宗<sup>A</sup>, 永田珠己<sup>A</sup>, 佐藤楓貴<sup>A</sup>, 今城周作<sup>B</sup>, 金道浩一<sup>B</sup>, 大串研也<sup>A</sup>

ハニカム格子物質  $\alpha\text{-RuCl}_3$  は、キタエフ量子スピン液体の最有力候補物質の一つとして盛んに研究が行われている。  $\text{RuBr}_3$  や  $\text{RuI}_3$  は通常、直鎖状の結晶構造をとるが、高圧合成法を用いることで、ハニカム格子を有する結晶構造 (空間群  $R\bar{3}$ ) を得ることができる [1-3]。ハニカム格子物質  $\text{RuBr}_3$  は  $\alpha\text{-RuCl}_3$  と同様、反強磁性転移温度  $T_N = 34\text{ K}$  以下でジグザグ反強磁性秩序を形成するスピン軌道モット絶縁体であり、  $\text{RuI}_3$  は半金属である。今回我々は、この系の磁気異方性や磁場誘起相転移について調べるために、  $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$  単結晶試料を用いた磁気トルク測定を行なった。

測定に用いた単結晶は高圧合成法により作製した [1]。図 1(a) はハニカム面に平行に磁場を印加したときの  $\text{RuBr}_3$  単結晶の磁気トルク  $\tau$  の角度 ( $\theta$ ) 依存性である。測定は、メンブレン型メカニカルセンサーを用いて、物理特性測定装置 (PPMS) 内で行った [4]。  $T_N$  よりも高温では二回対称だが、低温ではより複雑な角度依存性を観測した。この角度依存性を評価するために、  $\tau = \tau_0 + \sum_n A_n \sin(n\theta + \theta_0)$  ( $n = 1, 2, 4, 6$ ) でフィットした結果を図 1(b) に示す。  $T_N$  よりも低温で、4, 6 回対称の成分が発達しており、これは先行研究 [5] と一致した振る舞いである。当日は、東京大学物性研究所で行ったパルス強磁場下の測定結果も示しながら、この系の磁気相図について議論したい。

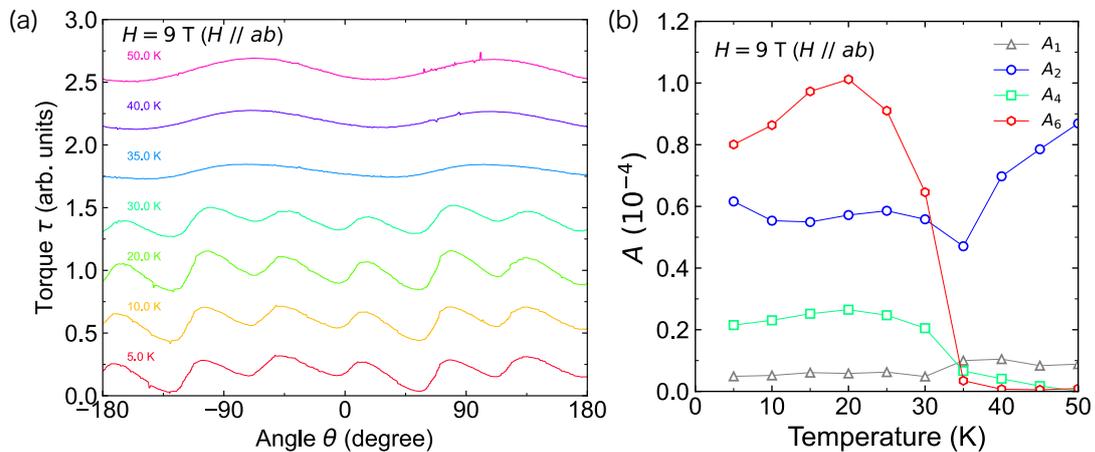


図 1. ハニカム格子物質  $\text{RuBr}_3$  に対して、ハニカム面に平行磁場を印加したときの (a) 磁気トルクの角度依存性と、 (b) 1, 2, 4, 6 回対称成分の振幅の温度依存性。

[1] F. Sato, Y. Imai *et al.*, Phys. Rev. B 109 (2024) 035154.

[2] Y. Imai *et al.*, Phys. Rev. B 105 (2022) L041112.

[3] 今井良宗ら, 固体物理 57 (2022) 725.

[4] H. Takahashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 86 (2017) 063002.

[5] J. S. Pearce *et al.*, Phys. Rev. B 110 (2024) 214404.

## 立方晶らせん磁性体 SrFeO<sub>3</sub> における磁気異方性の解明と相図の再検討

東大物性研 廠 正輝

ペロブスカイト型酸化物 SrFeO<sub>3</sub> は、空間反転対称性が保たれた立方晶構造を有する遍歴磁性体である。単純な結晶構造にも関わらず、 $\mathbf{Q} = (\delta, \delta, \delta)$  ( $\delta \sim 0.13$ ) のらせん磁気変調が安定化し[1]、複雑な温度-磁場相図を示す[2]。特に、ゼロ磁場低温相 (I 相) では  $2\mathbf{Q}$  の stripe 相、ゼロ磁場中間温度相 (II 相) では  $4\mathbf{Q}$  のヘッジホッグ格子相の発現が中性子散乱実験から確認されており[3]、II 相ではトポロジカルホール効果を示唆する特異な輸送現象が観測されている[2]。他方で、本物質におけるこれまでの物性測定は全て磁場方向  $H // [111]$  に限られており、磁気異方性は明らかにされていなかった[4, 5]。

本研究では高压合成法により純良な SrFeO<sub>3</sub> 単結晶を合成し、 $H // [111]$  と  $H // [100]$  の2方向に対してパルス強磁場下での精密磁化測定を行った。その結果、 $H // [100]$  の方が  $H // [111]$  の場合に比べて飽和磁場がわずかに低く、ヘッジホッグ格子相が安定化する磁場領域が拡大することが明らかになった (図1)。また、最低

温度において先行研究では同定されていなかった中間磁場相 (VI 相) の存在が明らかになった。また、 $H // [111]$  と  $H // [100]$  いずれの場合も強制強磁性相への転移はシャープなメタ磁性を伴う一次転移であることが確認され、磁歪・超音波測定によっても特徴的な磁気弾性応答が観測された。本実験結果をもとに、ハミルトニアンベースでの相図の理論再現を現在試みており、SrFeO<sub>3</sub> における多重  $\mathbf{Q}$  秩序発現の微視的起源の解明を目指している。

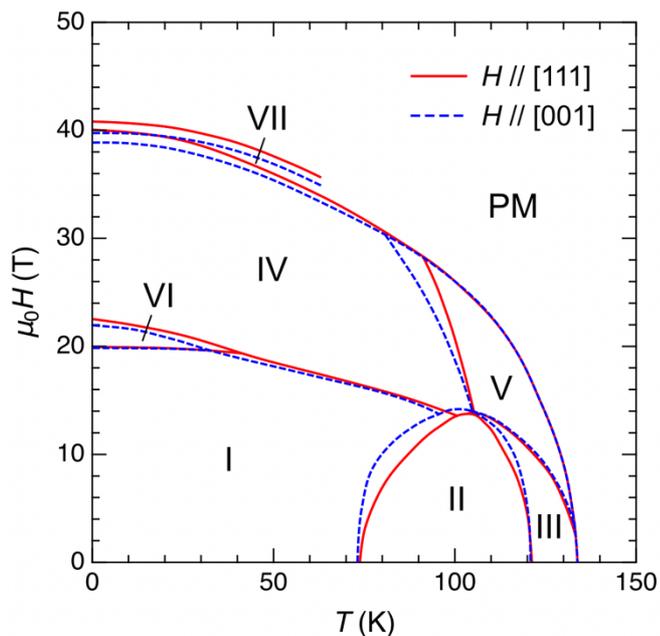


図1: SrFeO<sub>3</sub> の温度-磁場相図。 $H // [111]$  と  $H // [100]$  の場合の相境界をそれぞれ赤色実線と青色点線で示した。

### 参考文献

- [1] T. Takeda *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **33**, 967 (1972).
- [2] S. Ishiwata *et al.*, Phys. Rev. B. **84**, 054427 (2011).
- [3] S. Ishiwata *et al.*, Phys. Rev. B. **101**, 134406 (2010).

## 放射光 X 線を用いたスピネル型化合物 $\text{CuIr}_2\text{S}_4$ の高圧下構造の同定

名大院工,<sup>A</sup>ISSP,<sup>B</sup>慶大理工,<sup>C</sup>JASRI,<sup>D</sup>Science Tokyo

江見方敏, 大橋翼, 小島慶太<sup>A</sup>, 杉本高大<sup>B</sup>, 岡健太<sup>C</sup>,

門林宏和<sup>C</sup>, 河口沙織<sup>C</sup>, 橋本賢太<sup>D</sup>, 気谷卓<sup>D</sup>, 川路均<sup>D</sup>, 片山尚幸

スピネル型化合物は、対称性の高いパイロクロア格子上で多彩な基底状態が現れる系として注目を集めてきた。 $\text{CuIr}_2\text{S}_4$ はCuが1価、Irは3.5価となっており、電荷に自由度を持つ。常圧で温度を下げると、230 K で立方晶から三斜晶への構造相転移が生じ、 $\text{Ir}^{3+}/\text{Ir}^{4+}$ の電荷秩序と、隣り合う  $\text{Ir}^{4+}$ イオン間での二量体形成が同時に生じる[1]。静水圧を印可すると、図1のように多段階の相転移が誘起され、低温では最高  $T_c \sim 18.2$  K の超伝導が生じることが最近報告された[2]。しかし、高圧下構造や多段階相転移の起源は明らかになっていない。本研究では、高圧下で生じる構造相転移について調べるため、SPring-8 のBL10XUにおいて25 GPa までの高圧下 X 線回折実験を行った。

300 K で圧力を印加した際の回折パターンの変化を図2にカラープロットとして示す。回折パターンの特徴に応じて I-IVの領域に分けている。これは図1の I-IVと大まかに対応していると考えられる。IIの領域の回折データは常圧低温で現れる三斜晶構造を仮定することでフィッティングすることができた。さらに圧力を印可すると、10 GPa 程度で再び構造相転移が生じ、IIIで示す二相共存領域を経て、II相の成分がないIV相へと変化した。IV相では単斜晶のユニットセルが実現している。格子定数の特徴に基づいて初期構造を構築し、構造最適化計算で軽元素を含めた原子変位を推定した。得られた構造モデルは回折データをほぼ再現し、IV相ではII相とは異なる電荷秩序-量体化パターンが実現していることが分かった。II相の電荷秩序パターンは軌道誘起 Peierls 転移のシナリオを満足する一方で Anderson 条件を満たしていない特徴があるが[3]、IV相の電荷秩序パターンは Anderson 条件を満たす一方で軌道誘起 Peierls 転移のシナリオには従わない。こうした電荷秩序/二量体パターンの違いが、高圧下で生じる構造相転移の背景にあると思われる。

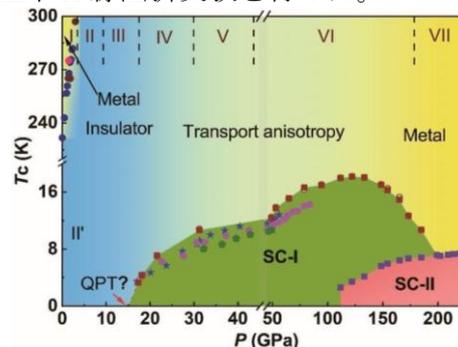


図1  $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  温度圧力相図[2]

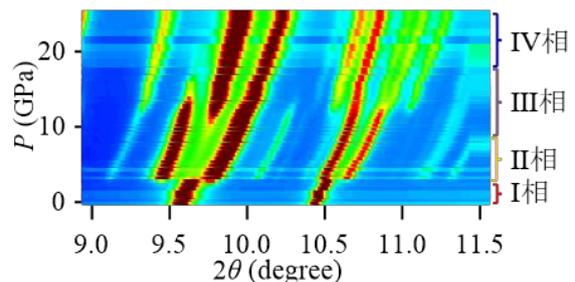


図2 室温における高圧下 X 線回折パターンのカラープロット

- [1] T. Ohashi, M. Emi *et al.*, Phys. Rev. B submitted, P. G. Radaelli *et al.*, Nature **416** (2002) 14  
 [2] B. Chen *et al.*, arXiv:2411.04407  
 [3] D. I. Khomskii and T. Mizokawa, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 156402

## カゴメ金属における分子軌道形成による連続的な斜方歪み

<sup>A</sup> 東大物工、<sup>B</sup> 東大新領域、<sup>C</sup> ノースカロライナ州立大、

<sup>D</sup> 理研 CEMS, <sup>E</sup> JASRI, <sup>F</sup> プリンストン大

三澤 遼<sup>A</sup>、山田 林介<sup>A</sup>、Tobi Gagg<sup>A</sup>、鬼頭 俊介<sup>B</sup>、Olajumoke Kalejaiye<sup>C</sup>、

中野 遼太<sup>A</sup>、竹中 涼<sup>A</sup>、岡村 嘉大<sup>A</sup>、Markus Kriener<sup>D</sup>、中村 唯我<sup>E</sup>、

高橋 陽太郎<sup>A</sup>、有馬 孝尚<sup>B,D</sup>、Milena Jovanovic<sup>C</sup>、

Leslie Schoop<sup>F</sup>、Max Hirschberger<sup>A</sup>

カゴメ金属では、幾何学的フラストレーションに由来して  $3Q$  電荷密度波など多彩な電荷・格子不安定性が生じる。しばしば斜方歪みを示すことも知られているが、その起源は未だ理解されていない。

我々は、あるカゴメ金属において、散漫散乱の臨界領域を經由した六方晶から斜方晶系への相転移を放射光 X 線回折によって観測した。構造解析の結果、低温相ではカゴメ格子上的原子が層間で 2 量体を形成することが分かった。そこで、2 量体が短距離相関したモデルを構成し、散漫散乱の再現に成功した。この振る舞いは、相転移の起源がカゴメ  $4d_z^2$  軌道の分子軌道形成であることを示唆しており、実際、第一原理計算によって裏付けられた。電気陰性度と格子定数の情報からカゴメ金属の構造安定性を評価する枠組みを提案し、本研究の知見を他の系にも展開する。

この分子軌道形成による転移温度は 700 K であり、1000 T のエネルギースケールに相当するため、非摂動磁場誘起の構造相転移が期待される。

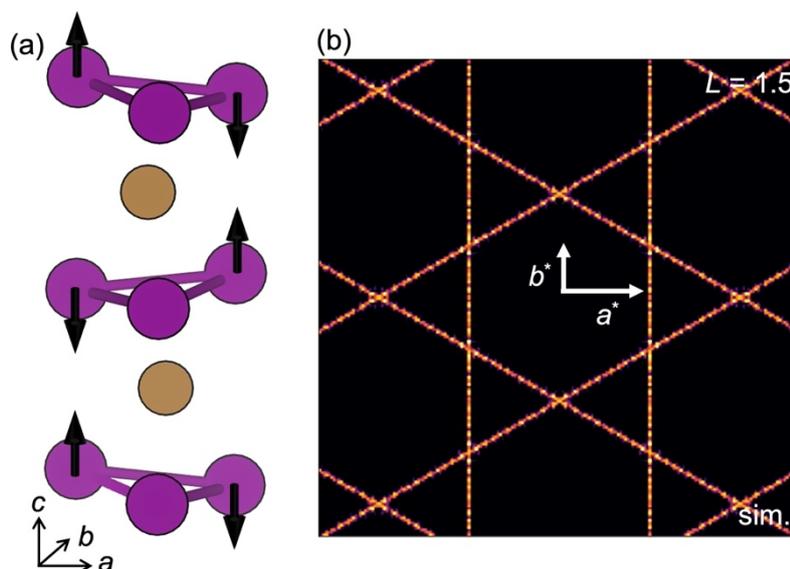


図1 短距離相関 2 量体モデル (a) カゴメ格子を組む原子が  $c$  軸方向に 2 量体を形成する。(b) 2 量体が  $b$  軸方向に不規則に並んだ短距離相関構造の X 線回折シミュレーション。

## 放射光 X 線を用いた分子ジャイロコマ C14PhF2 の構造研究

<sup>A</sup>名古屋大学、<sup>B</sup>東北大学、<sup>C</sup>東京都立大学

砂田龍太郎<sup>A</sup>、原武史<sup>B</sup>、瀬高渉<sup>C</sup>、片山尚幸<sup>A</sup>

カゴ型分子骨格内に回転子を架橋した物質系は固体状態で回転運動を示し、分子ジャイロコマと呼ばれる(図 1(a))。この物質系は回転子を化学修飾し回転運動を変化させることで異なる性質を示すことが知られ、昇温過程で結晶の複屈折が変化していく物質や [1]、カゴ型分子骨格が膨らみ体積膨張を示す物質 [2] が報告されている。本研究では、結晶状態で双極子回転運動を示す C14PhF2 という物質に着目した。この物質は回転子に安定な配向が 2 つ存在し、2 つの配向の間で回転運動を示すことが先行研究にて報告されている [3]。また、200 K ~ 290 K で誘電スペクトルに顕著な温度依存性があり、回転運動の周波数が温度に伴い低下していくことが明らかにされている [3]。こうした回転運動の変化がどのようにして生じているか、構造解析という観点から知見を得ることを目指して、SPring-8 の BL02B1 ビームラインにおける単結晶 X 線回折実験を行った。

300 K、200 K、100 K と温度を下げて回折実験を行ったところ、既報の空間群  $C2/c$  に対して、 $c$  グライドの対称性を破るピークや、 $b$  軸方向への倍周期を示す位置にブロードなピークが出現し、凝集していく傾向を示した。これは、温度低下に伴って  $bc$  面内に配列した回転子の配向に図 1(b) のような反強的な秩序が生じ、その相関が徐々に発達していることを示している。こうした秩序化の発達は、上述の誘電スペクトルの結果とも対応していると考えられる。一方で、図 1(c) に示すように、 $a$  軸方向に沿った回転子の配向には 2 パターンが考えられるが、温度を下げてこれらパターンが 1 通りに秩序化していく兆候は観測されなかった。 $bc$  面内方向に整列した回転子の配向には反強磁性相互作用をもつ三角格子上的イジングスピンのような配向のフラストレーションが実現しており、これが回転子配向の秩序化を妨げている原因であると考えられる。

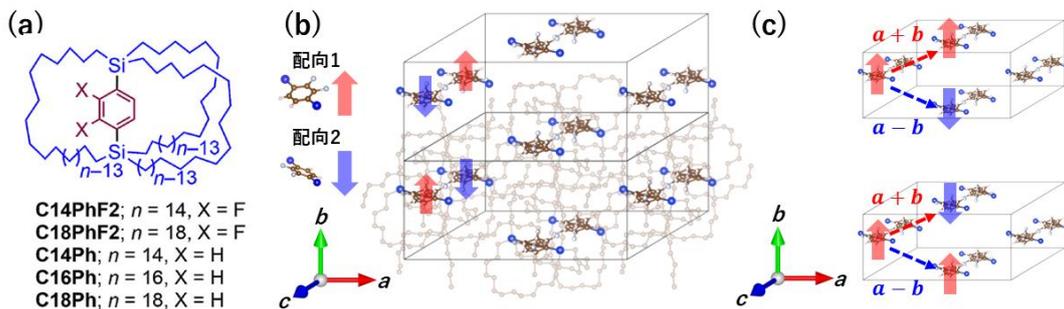


図 1 (a) 分子ジャイロコマ  $C_nPhX_2$  の概念図。 (b)  $bc$  面内における回転子配向の整列の様子。 青矢印と赤矢印は回転子がとりうる 2 種類の配向を模式的に示している。 (c)  $a$  軸方向に沿って現れる 2 通りの回転子の配向のパターン。

[1] W. Setaka and K. Yamaguchi, PNAS **109**, 9271 (2012).

[2] W. Setaka and K. Yamaguchi, J. Am. Chem. Soc. **134**, 12458 (2012).

[3] T. Tsuchiya *et al.*, Journal of Organic Chemistry **86**, 2423 (2021).

## Tl<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> の Ru<sub>2</sub>O 分子形成と強磁場による分子結合破壊の可能性

<sup>A</sup> 名大院工、<sup>B</sup> 東大物性研、<sup>C</sup> 東大新領域、<sup>D</sup> 芝浦工大、<sup>E</sup> 三重大院工  
 伊藤大悟<sup>A</sup>、小島慶太<sup>B</sup>、小山千翔<sup>C</sup>、山本文子<sup>D</sup>、村瀬公俊<sup>D</sup>、中村浩次<sup>E</sup>、  
 片山尚幸<sup>A</sup>

A サイトに 3 価のカチオンを持つパイロクロア型ルテニウム酸化物では、高い格子の対称性と Ru の 4d 電子が持つ軌道自由度の絡み合いにより多彩な物性が現れる[1]。たとえば、Tl<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> では 120 K で金属-非磁性絶縁体転移を伴う構造相転移を生じる。低温相では、*Pnma* の空間群をもつ直方晶構造が実現しているとされており、2 サイトに分かれた Ru が作り出す次元鎖上で Haldane 鎖状態を形成していると議論されている[2]。しかし、この議論の元となっている *Pnma* の空間群は、構造解析から実験的に明らかにされたものではなく、NH<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub>F<sub>4</sub> という類縁物質の空間群を当てはめただけにすぎないという致命的な問題があった[3]。本研究では、この Tl<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> の見直しを行い、正しい低温基底状態を明らかにすることを目指して放射光 X 線回折実験を行った。

高圧合成により準備された Tl<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> の粉末試料と単結晶試料を用いて、SPring-8 の BL02B2 および BL02B1 ビームラインにて放射光 X 線回折実験を行った。粉末回折実験では低温で超格子ピークの出現は観測されたものの、相転移に伴う格子の歪は極めて小さいことが明らかになった。単結晶 X 線回折実験では、得られたデータの消滅則を検証することにより、先行研究で報告されていた *Pnma* の空間群は実現しておらず、代わりに *P4<sub>1</sub>2<sub>1</sub>2* の正方晶空間群が実現していることが明らかになった。この空間群では Ru は 1 サイトしか存在しないことから、これまでに議論されてきたような Haldane 鎖は形成できない。内部構造に着目すると、図 1 に示すように、Tl に配位していた 8 個の O 原子の内、1 個が Tl との結合を切断して Ru 側に大きく変位していることが明らかになった。Ru-O-Ru 分子軌道を形成し非磁性絶縁体化したものと考えられる。

こうした分子軌道の形成は In<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> でも報告されている[4]。A サイトにイオン性の高い元素を用いた場合にはより絶縁体的な電気伝導率が現れ、低温物性に大きな違いが現れることから、こうした分子軌道の形成は A サイトに Tl や In などの *p* ブロック元素を用いたパイロクロア型ルテニウム酸化物に特有の性質であると考えている。当日はこうしたパイロクロア型ルテニウム酸化物の多様性について議論を行い、Tl<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> で現れる非磁性状態を強磁場下で抑制するための戦略と実験の現状について紹介する。

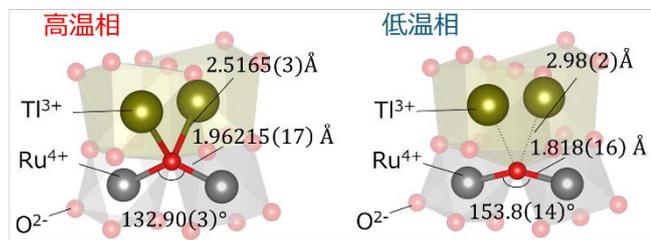


図 1 Tl<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> の原子変位

- [1] J. S. Gardner *et al.*, Phys. Mod. Rev. **82**, 53 (2010)  
 [2] T. Takeda *et al.*, J. Solid State Chem. **9**, 215 (1999)  
 [3] S. Lee *et al.*, Nat. Mater. **5**, 471 (2006)  
 [4] A. Krajewska *et al.*, Sci. Adv. **10**, eadn3880 (2024)

## クリーンな 3D ディラック半金属 $Y_8CoIn_3$ の実現

<sup>A</sup> 東京大学、<sup>B</sup> 理化学研究所

田中 優樹<sup>A</sup>、山田 林介<sup>A</sup>、佐藤 真武<sup>A</sup>、平山 元昭<sup>A</sup>、マックス バーチ<sup>B</sup>、  
 ヒルシュベルガー マックス<sup>A,B</sup>

$Na_3Bi$  や  $Cd_3As_2$  などの 3 次元ディラック半金属は、高い移動度や線形な磁気抵抗、カイラルアノマリーといった特徴的な輸送特性に加え、外場によってワイル半金属やトポロジカル絶縁体など様々なトポロジカル相にチューニングすることができるというユニークな性質によって注目を集めている[1~5]。こうした 3 次元のディラック半金属状態を実現するために通常の物質ではスピン軌道相互作用が必要とされていたが、スピン軌道相互作用を必要としない 3 次元ディラック半金属である  $R_8CoX_3$  ( $R$ : Y or rare earth/ $X$ : Al, Ga, In) が近年理論的に提案された[6]。中でも  $Y_8CoIn_3$  は、Cr-In-Bi-Sb-Te と同様に他のバンドがゼロエネルギー準位に存在しないクリーンなバンド構造を有している[7]。

本研究では、理論的に提案された  $Y_8CoIn_3$  の合成および抵抗測定によって、 $Y_8CoIn_3$  がクリーンなディラック半金属状態を実現していることを実験的に確かめた。クリーンな 3 次元ディラック半金属の実現は、スピン軌道相互作用を必要としないものとしては初である。

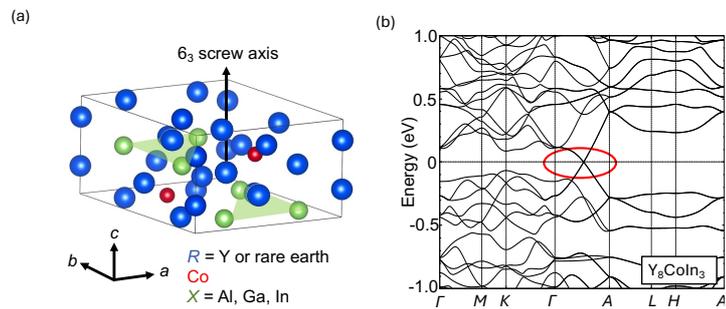


図 1 (a)  $R_8CoX_3$  の結晶構造。(b)  $Y_8CoIn_3$  のバンド構造[6]。

- [1] S. M. Young *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 140405 (2012)
- [2] Z. K. Liu *et al.*, Nature Materials **13**, 677 (2014)
- [3] T. Liang *et al.*, Nature Materials **14**, 280 (2015)
- [4] Z. K. Liu *et al.*, Science **343**, 6173 (2014)
- [5] J. Xiong *et al.*, Science **350**, 6259 (2015)
- [6] M. Sato *et al.*, Communications Materials **5**, 253 (2024)
- [7] I. Belopolski *et al.*, Nature **637**, 1078-1083 (2025)

## 面内異常ホール効果の強磁場応答

<sup>A</sup> 東京科学大理, <sup>B</sup> 東北大金研,

<sup>C</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>D</sup> 東大物性研, <sup>E</sup> 豊田理研

中村彩乃<sup>A</sup>, 赤木暢<sup>B</sup>, 木俣基<sup>C</sup>, 須藤健太<sup>D</sup>, 西早辰一<sup>A</sup>, 出口裕暉<sup>A</sup>,

Hsiang Lee<sup>A</sup>, 米田忠司<sup>A</sup>, 近藤雅起<sup>D</sup>, 石塚大晃<sup>A</sup>, 徳永将史<sup>D</sup>, 打田正輝<sup>A,E</sup>

正常・異常ホール効果では、電流・電圧方向に垂直な面直磁場・磁化の存在が考えられてきた。一方で、ベリー曲率に基づく理論的な定式化により、対称性の条件を満たす場合には、垂直成分を持たない面内磁場によっても異常ホール効果が生じ得ることが示されている。こうした面内異常ホール効果は、結晶の対称性を反映した独自の角度応答や外部磁場との非自明な相互作用が期待される現象であり、より強い磁場環境での応答を調べることは、発現機構の理解に向けた重要な手がかりとなる。

我々は、磁性ワイル半金属  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  薄膜において面内異常ホール効果の観測に初めて成功したことを報告した[1]。  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  は、低エネルギー領域にワイル点を形成するバンドのみを持ち、ワイル点に由来した磁気輸送現象を解明する上で理想的と考えられる磁性ワイル半金属物質である[2]。分子線エピタキシー法により作製した  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  単結晶薄膜を用いて、様々な磁場下で電流に対する磁場の角度  $\varphi$  を連続的に変化させながらホール抵抗を測定したところ、面内異常ホール抵抗は結晶の対称性を反映して  $\varphi$  に対して明確な3回回転対称性を示した。また、代表的な角度において、スピン飽和磁場 1.8 T 以上でも抵抗が増大または減少し続けている様子を確認した。

本発表では、この振る舞いが強磁場中でどのように変化するかに着目し、二軸回転プローブを用いて最大 25T の静磁場下で磁場依存性を評価した結果について報告する。図 1. (a) のように、  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  の(001)面内において  $\varphi = 30^\circ$  および  $90^\circ$  方向に磁場を印加したところ、

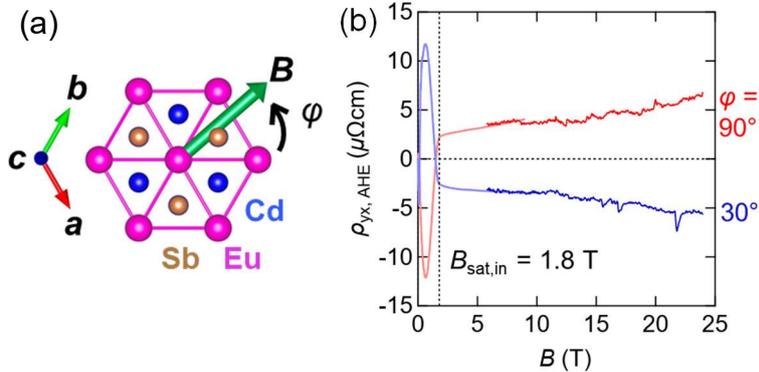


図 1. (a)  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  の(001)面における結晶構造と面内回転磁場の概略図。(b)  $\text{EuCd}_2\text{Sb}_2$  薄膜における面内異常ホール抵抗率の磁場依存性。

図 1. (b) に示すように 3 回回転対称性に対応する符号反転が観測され、さらに抵抗率が磁場に対して線形に増加する様子が確認された。

[1] A. Nakamura *et al.*, Physical Review Letters **133**, 236602 (2024) Selected for Editors' Suggestion.

[2] M. Ohno *et al.*, Phys. Rev. B **105**, L201101 (2022), A. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **109**, L121108 (2024).

## フラストレート格子を有する強誘電体 $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ の 局所構造と磁場応答に関する研究

<sup>A</sup> 阪大理、<sup>B</sup> 東大物性研、<sup>C</sup> KEK 物構研

松林 龍<sup>A</sup>、花咲 徳亮<sup>A</sup>、松田 康弘<sup>B</sup>、城戸 大貴<sup>C</sup>、仁谷 浩明<sup>C</sup>

近年、強磁場によって物質の化学結合に変化をもたらす研究が注目されており、超強磁場を用いて固体中の二量体を融解させた例も報告されている[1]。一般に、物質を構成する基本的な化学結合の融解には膨大な磁場が必要であると考えられるが、フラストレート格子系物質は原子が変位する状態について競合があるため、強磁場の印加によって原子変位に変化が生じる可能性が期待される。本研究対象であるパイロクロア型ニオブ酸化物  $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  は強誘電性を持ち、201 K において誘電異常が見られ、これは常誘電-強誘電転移によるものであると指摘されている[2]。また、約 175 K において周波数依存性を持つブロードなピークが報告されている。

本研究では原子変位を伴うフラストレート格子系物質の強磁場効果の観測を目指し、 $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  単結晶試料を用いて誘電率の温度変化を測定した。結果、202 K 付近において常誘電-強誘電転移に由来すると思われる肩状のピークを観測した(図 1)。この温度領域では EXAFS 測定のスเปクトルでピークシフトも観測されており(図 2)、原子の変位が示唆された。また 202 K 近傍の非常に狭い温度領域において、9 T の定常磁場の印加によって誘電率がわずかに減少することが確認された。このことから磁場によって原子変位が変化している可能性が示唆される。今後、この温度帯において破壊型パルスマグネットを用いた超強磁場による実験を進めていきたい。当日は結果の詳細を述べ、物質の磁場応答と局所構造の関係について議論したい。

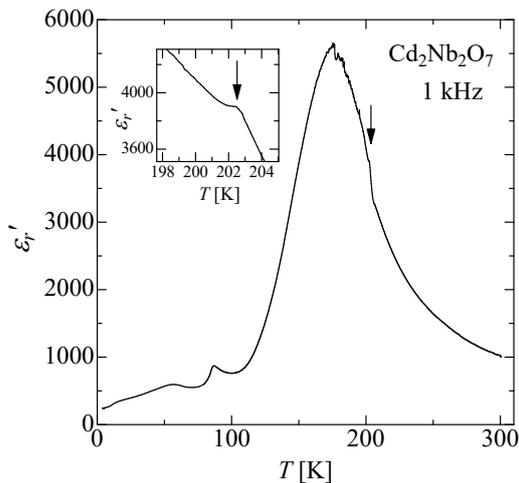


図 1.  $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  の誘電率の温度変化

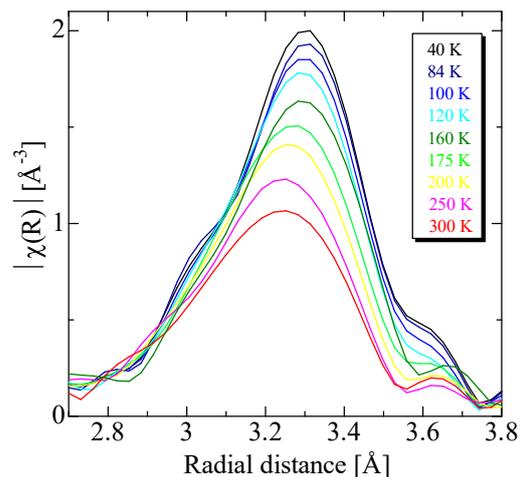


図 2. Nb K 吸収端の EXAFS より求めた動径分布関数

[1] Y. H. Matsuda et al., Nat. Commun. 11 (2020) 3591.

[2] C. Ang and Z. Yu, Phys. Rev. B 70 (2004) 134103.

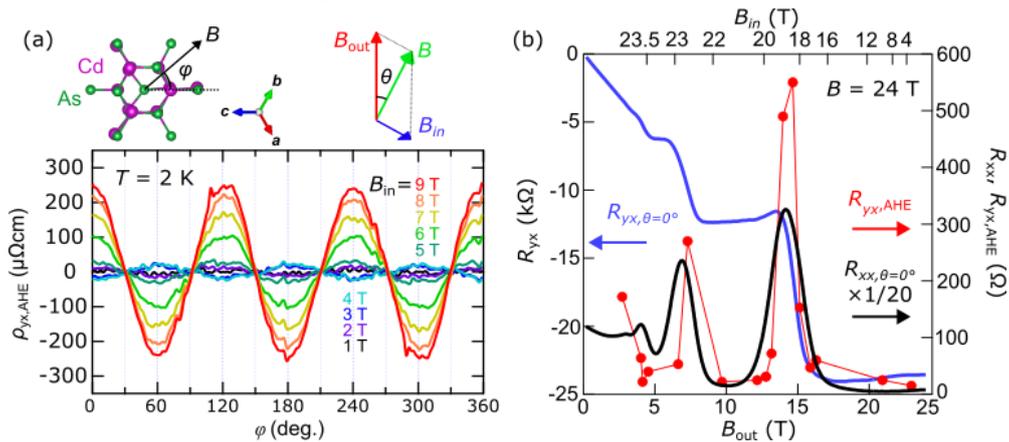
## ディラック半金属 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 薄膜における 面内異常ホール効果の強磁場測定

<sup>1</sup>東京科学大理, <sup>2</sup>原子力機構, <sup>3</sup>東北大金研, <sup>4</sup>豊田理研

出口裕暉<sup>1</sup>, 西早辰一<sup>1</sup>, 木俣基<sup>2</sup>, 赤木暢<sup>3</sup>, 中村彩乃<sup>1</sup>, 米田忠司<sup>1</sup>, Hsiang Lee<sup>1</sup>,  
石塚大晃<sup>1</sup>, 打田正輝<sup>1,4</sup>

バンド構造の幾何学的性質によって生じる内因性異常ホール効果は、非磁性体においても外部磁場で時間反転対称性を破ることで許容される。しかしながら、磁場によって誘起される異常ホール効果は、ローレンツ力による正常ホール効果に比べて応答が小さいため、検出が困難であった。我々は、図(a)に示すように面内磁場に対するホール応答に注目することで異常ホール効果と正常ホール効果を分離することに成功し、理想的なディラック半金属物質である  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  薄膜において結晶の対称性を反映した3重回転対称成分を持つ面内異常ホール効果の観測に成功した[1]。

一方で、小さな有効質量を持つ  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  は面直磁場下で巨大なランダウ分裂を示し、量子ホール効果が観測される[2][3]。すなわち傾斜磁場下で面内異常ホール効果を測定することにより、ランダウギャップの形成やホールプラトー間転移時のフェルミレベルの変化によるベリー曲率の急峻な変調を検出できると期待される。本発表では、二軸回転プローブを用い24T 静磁場下で磁場方位角依存性を測定した結果について図(b)に示すように、 $\text{Cd}_3\text{As}_2$  薄膜における面内異常ホール応答がプラトー間遷移状態で増幅されることが明らかになった。



図(a)  $\text{Cd}_3\text{As}_2(112)$  薄膜に面内異常ホール効果。図(b) 量子ホール効果 (黒線：縦抵抗、青線：ホール抵抗) と傾斜磁場方位角依存性の測定による面内異常ホール抵抗の振幅 (赤線)。

[1] S. Nishihaya *et al.*, arXiv:2503.04195 (2025)

[2] M. Uchida *et al.*, Nat. commun. **8**, 2274 (2017)

[3] S. Nishihaya *et al.*, Nat. commun. **10**, 2564 (2019)

## ワイル磁性体 GdAlSi における 歪みなしサイクロイドらせん磁性とマルチ Q 構造の発見

<sup>A</sup> 東大物工、<sup>B</sup> 東大理物、<sup>C</sup> カールスルーエ工科大学 (KIT)、<sup>D</sup> 理研 CEMS、  
<sup>E</sup> 東大物性研、<sup>F</sup> 理研 SPring-8、<sup>G</sup> 高エネ機構物構研、<sup>H</sup> 東大新領域、  
<sup>I</sup> 東京カレッジ、<sup>J</sup> 北海道大学理物

中野 遼太<sup>A</sup>、山田 林介<sup>A</sup>、Juba Bouaziz<sup>B</sup>、Maurice Colling<sup>C</sup>、巖 正輝<sup>D,E</sup>、  
吉川 明子<sup>D</sup>、大隅 寛幸<sup>F</sup>、田中良和<sup>F</sup>、佐賀山 基<sup>G</sup>、中尾 裕則<sup>G</sup>、  
田口康二郎<sup>D</sup>、徳永将史<sup>D,E</sup>、有馬孝尚<sup>D,H</sup>、十倉好紀<sup>A,D,I</sup>、有田亮太郎<sup>B,D</sup>、  
Jan Masell<sup>B,C</sup>、速水賢<sup>J</sup>、Max Hirschberger<sup>A,D</sup>

多体効果がトポロジカル電子構造に及ぼす影響という非自明な問題に対峙するにあたり、磁性ワイル半金属は格好の舞台として注目されている。これらの物質系では、周期的秩序によりワイル電子が折り畳まれ、アキシオン絶縁体や三次元分数量子ホール効果といった新奇な量子状態の実現が理論的に提案されている[1,2]。一方でワイル半金属状態と共存する磁気構造は限られており、特に歪みのないらせん磁気構造の報告例はない。

本研究では、極性磁性ワイル半金属 GdAlSi において、定量的な偏光解析を用いた共鳴 X 線散乱実験によって、歪みのないサイクロイドらせん磁気構造を明らかにする[3]。このサイクロイド構造は、極性結晶由来のジャロシンスキー守谷 (DM) 相互作用によってシンプルに説明可能である。当日は、磁場下で観測された新奇マルチ Q 構造を示し、異方的交換相互作用を加えたモデルが実験をよく再現することを示す。

- [1] Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. B (2013)  
[2] J. Yi *et al.*, Phys. Rev. B (2023)  
[3] R. Nakano *et al.*, arXiv (2025)

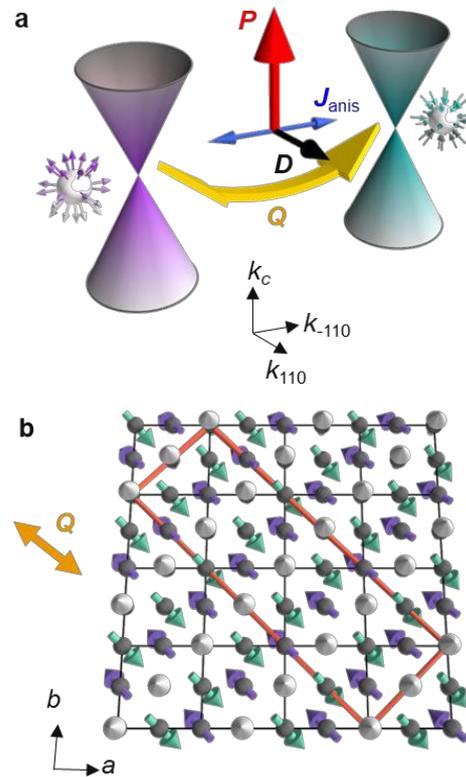


図 1. a, 極性ワイル磁性体 GdAlSi における主たる磁気相互作用。 b, GdAlSi において実現するサイクロイドらせん磁気構造。

## 鉄系超伝導体 Fe(Te,S)における横波弾性定数の磁場依存性

<sup>A</sup> 東理大院創域理工、<sup>B</sup> 東大物性研

袴田 怜志<sup>A</sup>、栗原 綾佑<sup>A</sup>、近藤 雅起<sup>B</sup>、徳永 将史<sup>B</sup>、矢口 宏<sup>A</sup>

Fe(Te,S)は鉄 11 系に属する超伝導体である。母物質である FeTe は超伝導を示さず、約 60 K で正方晶( $P4/nmm$  No. 129)から単斜晶( $P2_1/m$  No. 11)への構造相転移を伴う反強磁性転移を起こす[1]。また、Te サイトを S で置換することで、構造相転移及び反強磁性転移が抑制され、超伝導が発現する量子臨界性がみられる[2]。このような量子臨界性に由来し、鉄系超伝導体では構造揺らぎや反強磁性揺らぎを媒介とした超伝導の発現が議論されている。特に  $Ba(Fe,Co)_2As_2$  超伝導体では、構造相転移に伴う弾性定数のソフト化と超伝導の発現や[3]、弾性ソフト化の磁場鈍感な性質から[4]、電子系がもつ非磁性自由度の寄与が議論されてきた[4]。一方で、Fe(Te,S)においてはスピンネマティックによる構造相転移の駆動[5]などの提案から、磁気自由度の寄与を考えることができる。

本研究では、Fe(Te,S)における構造相転移・反強磁性の秩序変数を調べるため、弾性定数の温度依存性を網羅的に測定した。その結果、すべての弾性定数において、高温から構造相転移温度に向かってソフト化を示し、横波弾性定数 $C_{66}$ にソフトモード挙動が現れることを明らかにした(図 1)。これらのソフト化の起源を調べるため、物性研究所の非破壊パルスマグネットを用いて、磁場中の横波弾性定数を系統的に測定した。その結果、 $C_{66}$ において、磁場による顕著なソフト化の抑制を見出した(図 1)。講演では、磁場中での横波弾性定数の温度依存性について、詳細を報告する。

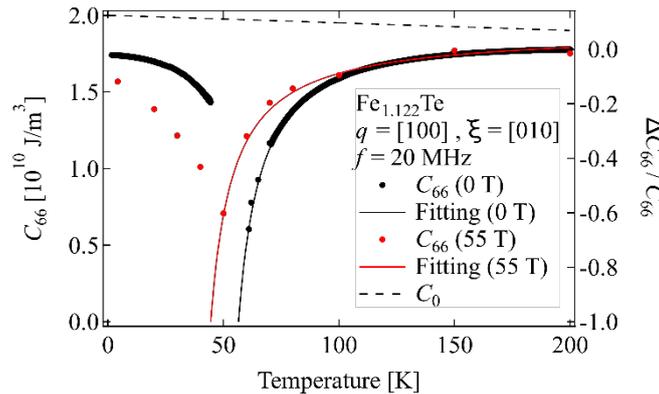


図 1 FeTe における面内横波弾性定数 $C_{66}$ の温度依存性(0 T: 黒、55 T: 赤)。  
 超音波の伝搬方向は[100]、変位方向は[010]、磁場方向は[100]である。

- [1] C. Koz *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 094509 (2013).
- [2] C. Dong *et al.*, J. Phys: Condens. Matter **25**, 385701 (2013).
- [3] M. Yoshizawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 024604 (2012).
- [4] J. A. W. Straquadine *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 125147(2019).
- [5] C. B. Bishop *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 117201 (2016).

# 中性イオン性転移系物質 TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA の電子物性

北大院理

岡 真史、福岡 脩平、河本 充司

電荷移動錯体 TTF-CA (テトラチアフルバレン-*p*-クロラニル) は、中性イオン性 (N-I) 転移を示す代表的な物質である。TTF-CA は、ドナー分子(TTF)とアクセプター分子 (CA)が *a* 軸に沿って交互に積み重なった一次元構造を持ち、室温では中性の絶縁体である。転移温度  $T_{NI} = 81$  K で二量体化を伴いながら TTF から CA への電荷移動が起こり、中性相からイオン性相に転移 (N-I 転移) する。中性相もイオン性相も絶縁体であるが、転移温度付近で電気抵抗の減少が観測される。これは、二量体を形成できなかった分子によるソリトン伝導や、中性領域とイオン性領域を隔てるドメイン壁の移動に起因する。イオン化した分子は開殻構造となるため、スピン自由度を有しており、磁場印加による N-I 転移の誘起、スピンソリトン生成による伝導性の変化が期待できる系である。しかし、これらの実験には中性状態とイオン性状態が拮抗した加圧下での実験が必要であり、パルス磁場を用いた強磁場効果の実験を行うことが難しかった。

そこで我々は、1次元 TTF-CA カラム間に DAZP (1,3-ジアザピレン) がインターカレートされた TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA に注目した。TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA は 220 K で N-I 転移を示す[1]。この N-I 転移温度は、TTF-CA の約 0.6 GPa の圧力下での N-I 転移温度と一致している。故に常圧環境で中性状態とイオン性状態が拮抗しており、パルス強磁場と組み合わせた磁場効果の研究展開が期待できる。

図 1 は、TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA の圧力下電気抵抗の温度依存性を示している。常圧では 220 K の転移温度に向かって抵抗が減少している。圧力が高くなるにつれて、抵抗の減少はなくなり、低温に向かって抵抗が徐々に増加する振る舞いが観測された。これらの挙動は、圧力下での TTF-CA の挙動と一致しており、中性相とイオン性相のクロスオーバー領域に近い電子状態が常圧環境で実現していることを示唆している。講演では電気抵抗測定の際に NQR 測定、吸光度測定の結果についても紹介し、TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA の基礎物性について議論したい。

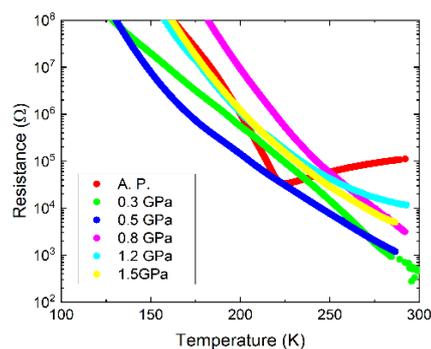


図 1. TTF(DAzP)<sub>2</sub>CA における圧力下電気抵抗の温度依存性。

[1] Y. Takahashi et al., J. Phys. Chem. Lett. **11**, 1336 (2020).

### 3D- $\Delta$ PDF 解析を用いた RuX(X=P, As)系に生じる短距離秩序の観測

<sup>A</sup>名大院工

久保 泰星<sup>A</sup>、平井大悟郎<sup>A</sup>、片山 尚幸<sup>A</sup>

遷移金属化合物では、遷移金属原子のもつ電荷や軌道の自由度が格子と結合することで、低温で原子が自発的に寄り集まって分子の周期配列を形成することがある。こうした分子は軌道自由度の生き残った高温相では現れないと考えられていた。しかし、近年 MnP 型構造を持つ RuP において、低温で生じる Ru の三量体分子が、高温においても短距離秩序的に現れることが明らかになった[1, 2]。これは、生き残っていると思われていた軌道自由度が、高温相でも局所的には秩序化していることを示しており、短距離秩序を通じて正しい軌道・電子状態を把握することが重要となっている。

高温相の短距離秩序構造は、これまで主に粉末試料を用いた EXAFS や二体相関分布関数(PDF)によって調べられてきた。短距離秩序の有無を簡便に調べることができる反面、原子変位に関する情報の欠落した一次元データでしか得られないという問題点があり、短距離秩序構造を同定するのが難しい。そこで我々は、単結晶試料を用いることで、方位を含めた局所変位情報を取り出すことができる 3D- $\Delta$ PDF 解析法の開発・整備を進めてきた。SPRING-8 の BL02B1 で使用可能な 3D- $\Delta$ PDF 解析ソフトウェアを開発し、3D- $\Delta$ PDF 解析の実施報告例がある RuP と、報告例のない RuAs の 2 試料を対象に、単結晶 X 線回折実験と 3D- $\Delta$ PDF 解析を行った。

図 1 に示すように、RuP は 270 K で金属絶縁体転移を示し、低温で三量体を形成する。一方で、RuAs は 250 K と 200 K の 2 度の相転移がある。低温相においては RuP と同様の三量体が現れるが、中間相では格子と非整合な電子状態が実現していると議論されている。今回、RuP 単結晶試料に対して 350 K で回折実験を行ったところ、短距離秩序の存在を示す強い散漫散乱が観測された。3D- $\Delta$ PDF 解析の結果、先行研究と同様に短距離秩序的な三量体分子の存在を示す結果が得られた(図 2 上)。RuAs 単結晶試料においても、300 K で現れる強い散漫散乱に対して 3D- $\Delta$ PDF 解析を行うことで RuP と同様の短距離秩序的な三量体分子の発達を観測した(図 2 下)。RuAs の中間相においては、高温相の散漫散乱が凝集して超格子反射を形成しており、高温短距離秩序と強い相関があると考えられる。当日は、RuP と RuAs の平均構造と短距離秩序構造を元に、これらの示す温度依存性の違いについて議論する。

[1] D. Hirai *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **144**, 17857 (2022)

[2] R. J. Koch *et al.*, *Phys. Rev. B* **106**, 214516 (2022)

[3] D. Hirai *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 140509(R) (2012).

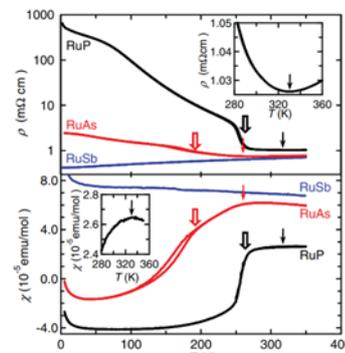


図 1. RuX(X=P, As, Sb)の示す電気抵抗率,磁化率の温度依存性[3]

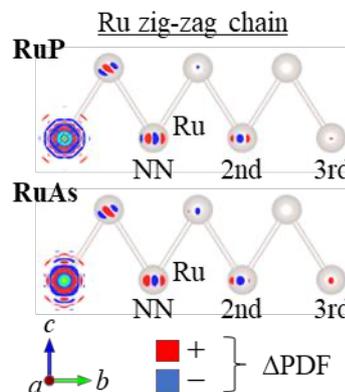


図 2. RuP と RuAs の示す  $\Delta$ PDF

## 蛍光生成プローブによる TiO<sub>2</sub> の光触媒反応に対する磁場効果の検討

<sup>A</sup> 崇城大工、<sup>B</sup> 信州大理、<sup>C</sup> 熊本大産業ナノマテリアル研

米村弘明<sup>A</sup>、浜崎亜富<sup>B</sup>、横井裕之<sup>C</sup>

我々は、反応速度制御、特に光反応に対する磁場効果に関する基礎研究や応用研究を行ってきた。一例として、有機分子であるドナー-アクセプター連結化合物などを中心に光誘起電子移動反応で生成するラジカル対に対する低磁場効果 (~1 T) または強磁場効果 (~15 T) に関する基礎研究と応用研究を行ってきた。また、三重項-三重項対に対する低磁場効果 (~1 T) に関して、三重項-三重項消滅に基づく光アップコンバージョン (PUC-TTA) と一重項分裂 (SF) を含めた光反応に対する磁場効果に及ぼす金属ナノ粒子の影響も研究してきた。

そこで、本研究では光触媒に対する非摂動磁場効果について、磁場の影響を高感度で評価できる手法を開発すると共に、磁場によるローレンツ力や原子欠陥によるスピン分極や負の磁気抵抗など活用して、光触媒反応の促進や光生成物の選択性向上を図る事を研究目的とした。

### TiO<sub>2</sub> Nanotube (TNT) の光触媒反応に対する磁場効果

TiO<sub>2</sub> Nanotube (TNT) 分散水溶液に蛍光生成プローブである Amplex Red の CH<sub>3</sub>OH 溶液を加え、UV 光 (360nm) を照射して O<sub>2</sub>•<sup>-</sup> を生成させた後、O<sub>2</sub>•<sup>-</sup> と Amplex Red を反応させ、強い蛍光性 Resorufin を生成させた。各反応条件 (磁場印加の有無など) で、この蛍光強度の時間経過によって光触媒反応を評価した。

TNT サンプル水溶液に UV 光 (360nm) を照射すると、照射時間に伴って蛍光強度は増加した。また、TiO<sub>2</sub> (P90) の場合に比較して、光触媒の反応速度は増加した。<sup>1)</sup> 加えて、磁場無印加時に比較して磁場印加時

(0.5 T) の方が、蛍光速度が増し、磁場によって光触媒反応が促進された (図 1)。

次に、超伝導マグネットを用いた強磁場効果 (~10 T) を実施するため、ボアに設置できるセルホルダーに蛍光セルを設置し、UV レーザー (380 nm) によって光ファイバーを通して TiO<sub>2</sub> (P90) を光励起し、同時に光ファイバーを通して蛍光生成プローブの蛍光強度を追跡できるシステムを構築中である。これによって、光触媒反応に対する強磁場効果が評価できると考えられる。すでに、この評価システムを用いて磁場無印加では、Resorufin 蛍光によって TiO<sub>2</sub> の光触媒反応が評価できることは確認した。上記の強磁場測定が間に合えば、結果を報告する予定である。

1) 米村弘明、第 4 回領域会議予稿集 (2024).

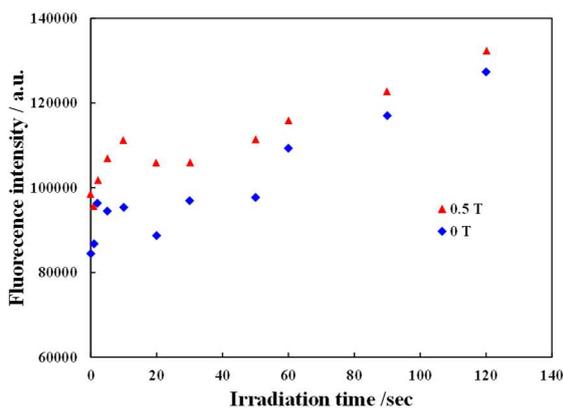


図 1. TNT 光触媒反応による Resorufin 蛍光強度 ( $\lambda_{\text{ex}}=561 \text{ nm}$ ) の UV 光 (360nm) 照射時間変化 [▲: TNT (0.5 T), ◆: TNT (0 T)]

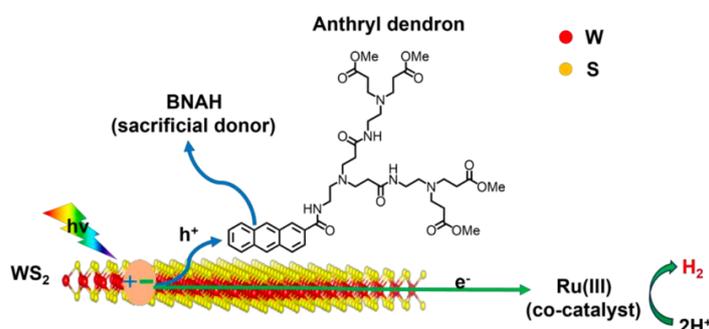
## WS<sub>2</sub>/アントラセン dendron ナノハイブリッドの合成と光触媒活性

富山大学

高橋 智哉、トラン バン ニン、高口 豊

単層 WS<sub>2</sub> は、外部磁場下でバレー（スピン）偏極励起子を制御できることから、スピントロニクスなどへの応用研究が進められているが、スピン選択的な光触媒反応系への応用例はほとんど無い。WS<sub>2</sub> は、300 meV を超える高い励起子束縛エネルギーを持つため、光照射下、室温で、電子と正孔を生じるためにはヘテロ接合界面が必要となる。最近、我々は、MoSe<sub>2</sub> のベール面を C<sub>60</sub>-dendron で物理修飾することで、MoSe<sub>2</sub>/C<sub>60</sub> ファンデルワールス (vdW) ヘテロ接合を構築し、水分解光触媒への応用が可能であることを明らかとした<sup>[1]</sup>。しかし、この手法では、得られる MoSe<sub>2</sub>/C<sub>60</sub>-dendron ナノハイブリッドに含まれる単層 MoSe<sub>2</sub> の割合がごく僅かで、バレー偏極励起子の検討をするには不向きである。そこで、本研究では、Coleman らの LCC 法<sup>[2]</sup>により単層剥離した WS<sub>2</sub> を用いた 2D/0D ナノハイブリッドの合成と光触媒への応用について検討することとした。ベール面の物理修飾には、我々が多層 MoS<sub>2</sub> で用い、長寿命の電荷分離状態の観測に成功している anthracene-dendron (**1**)<sup>[3]</sup>を用いることとした。

コール酸ナトリウムを分散剤として単層剥離した WS<sub>2</sub> のベール面を anthracene-dendron (**1**)を用いて物理修飾することで、水分散性 WS<sub>2</sub>/**1** ナノハイブリッドを調製した。単層 WS<sub>2</sub> の構造は、吸収スペクトル、Raman スペクトル、AFM、および、STEM 観察により確認し、蛍光消光により WS<sub>2</sub> 表面への anthracene の吸着を確認した。この WS<sub>2</sub>/**1** ナノハイブリッド分散液に犠牲剤 (1-ベンジル-1,4-ジヒドロニコチンアミド)、および、助触媒 (RuCl<sub>3</sub>) を加え、可視光 (λ > 422 nm) を照射したところ、0.145 μmol h<sup>-1</sup> の水素生成を観測した。さらに、波長 610 nm の単色光励起により WS<sub>2</sub> の A-exciton を生成したときの水素生成反応の量子収率 (AQY) は 0.0015 %であったことから、WS<sub>2</sub> 上の励起子の解離を経由した光触媒反応が進行していることが明らかとなった。今後、スピン選択的な電子移動反応にスピン偏極がどういった影響を及ぼすかについて、強磁場を用いた検討を進める予定としている。



[1] Y. Takaguchi et al., *Chem. Eur. J.* **2024**, e202402690.

[2] J. N. Coleman et al., *ACS Nano* **2016**, 10, 1589-1601.

[3] Y. Takaguchi et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2020**, 93, 745-750.

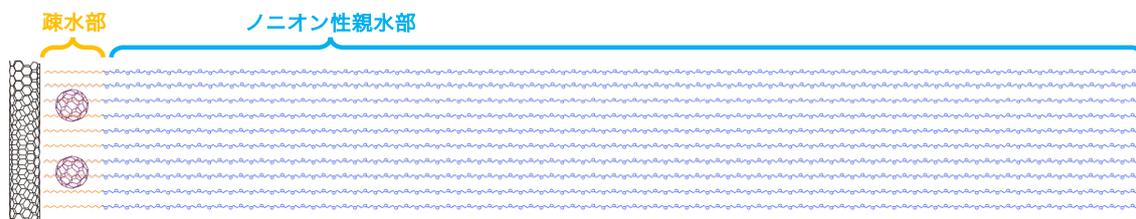
## ノニオン性界面活性剤を用いた CNT/C<sub>60</sub> 光機能界面の活性制御

富山大学

護摩堂 一鷹、李 維昊、高口 豊

半導体性カーボンナノチューブ (CNTs) と C<sub>60</sub> からなる 1D/0D ファンデルワールス (vdW) ヘテロ接合界面は、500 meV を超える高い励起子束縛エネルギーをもつ CNT 上の励起子からの電子抽出を可能とするうえ、電荷分離の再配向エネルギー (130 meV) が小さく、太陽電池への応用が検討されている<sup>[1]</sup>。また、Ren らは、CNT/C<sub>60</sub> フィルムが負の磁気抵抗を示すことを明らかとしており、CNT/C<sub>60</sub> 界面物性への磁場効果が高い関心を集めている<sup>[2]</sup>。一方、我々は、両親媒性 C<sub>60</sub>-dendron を用いた CNTs の物理修飾により、水分散性 CNT/C<sub>60</sub>-dendron ナノハイブリッドを合成し、水完全分解反応の水素発生光触媒として利用可能であることを明らかとしている<sup>[3]</sup>が、こうした CNT を光増感剤とする化学反応系への磁場効果の報告例は皆無である。CNT と C<sub>60</sub> の vdW ヘテロ接合における電子カップリングは、磁場の影響を受けやすいうえ、光照射により生成する電荷分離状態 (CNT<sup>+</sup>/C<sub>60</sub><sup>-</sup>) から反応基質へのスピン選択的電子移動の磁場による加速効果に興味もたれるが、一方で、従来の CNT/C<sub>60</sub>-dendron ナノハイブリッドは、そのヘテロ接合界面に水分子が侵入してしまうことや、水溶性の基質しか使えないという課題があった。そこで、本研究では、ノニオン性界面活性剤 (Brij S100) を用いる新たな CNT/C<sub>60</sub> 光機能界面構築法を開発し、vdW ヘテロ接合界面近傍を疎水的な環境とするとともに、電子移動反応場の粘度を高くすることで、磁場効果の検証を容易にすることを考えた。

新規に合成した CNT/C<sub>60</sub>-dendron/Brij S100 ナノハイブリッドの界面構造を下図に示す。ポリエチレングリコールからなる長いノニオン性親水部が界面への水の侵入を防いでいることを、蛍光スペクトルにより確認した。また、犠牲剤 (1-ベンジル-1,4-ジヒドロニコチンアミド) を用いた水素生成反応の進行を確かめ、従来と同様な光触媒活性を有することを確認した。興味深いことに、従来、界面の水分子の影響から明確な活性の違いを確認することが難しかった、CNT/C<sub>60</sub> と CNT/C<sub>70</sub> の光触媒活性の違いを調査したところ、C<sub>70</sub> の方が 1.7 倍高い活性を示すことが明らかになった。今後、スピン選択的な電子移動反応を用いた活性評価、および、強磁場中での暗い励起子の挙動解析により、vdW ヘテロ接合界面の光機能への磁場効果を明らかとしていきたい。



[1] J. L. Blackburn et al., *Nat. Chem.* **2016**, 8, 603-609.

[2] S. Rem et al., *Sci. Rep.* **2014**, 4, 6126.

[3] Y. Takaguchi et al., *Chem. Lett.* **2019**, 48, 410-413.

## 外部磁場を印加したレーザーイオン加速の最適化に関する研究

<sup>A</sup> 大阪大学大学院、<sup>B</sup> 電気通信大学、<sup>C</sup> 関西光量子科学研究所

内藤 佳輝<sup>A</sup>、玉城 直也<sup>A</sup>、二階堂 颯佳<sup>A</sup>、池田 暁彦<sup>B</sup>、野田 孝祐<sup>B</sup>、

福田 祐二<sup>C</sup>、蔵満 康浩<sup>A</sup>

超高強度レーザーを薄膜ターゲットに集光照射すると、その相互作用によりプラズマが生成され、イオンの加速が生じる。このレーザー駆動のイオン加速は、従来型の加速器と比較して短い加速長ながら圧倒的に大きな加速勾配を示し、加速器の小型化の方法として期待されている。医療分野では、加速器の小型化による低コスト化が陽子線治療の普及につながるとして注目されている。しかしながら、レーザーイオン加速で生み出される陽子のエネルギーはがん治療に必要とされる 200 MeV にはいまだ到達していない。このレーザーイオン加速の課題の原因の1つには、電子が発散による加速電場の減衰があげられる[1]。

そこで本研究では、さらなる高エネルギー化を目指して、外部磁場を印加することで電子の発散角を制御することを目的とした。レーザー磁場は数百 kT、プラズマ自身の作る磁場は数十 kT に上る。また、加速方向に印加した外部磁場では、加速に影響を与えることは難しいことが判明している。そこで、加速方向に垂直に外部磁場を印加し、電子の運動エネルギーにより外部磁場を押し曲げることで平行磁場を自発的に生成するモデルを考案した。先行研究により、0.7 T 程度の進行方向に垂直な外部磁場であっても、電子は磁化されることが確認されている[2]。

二次元 PIC コードを用いて、上述のモデルでのレーザーイオン加速の解析を行った。薄膜状のグラフェンターゲットを用い、レーザーの伝搬方向に垂直に外部磁場を仮定した状況を考えた。パルス幅を変化させて加速に影響を与えるパラメーターを探索した。

本解析の条件では、パルス幅が 320 fs 以上になると、外部磁場の有無により陽子の加速エネルギーに違いがみられるパラメーターが存在した。そのエネルギーは、最大で 30% 程度増加した。本発表では、加速電場や電子の発散角の評価を行うことで磁場の有無におけるレーザーイオン加速の違いに関して考察を行う。

また、このシミュレーション結果に基づいて 2025 年度に関西光量子科学研究所の J-KAREN-P レーザーを用いて実証実験を行う予定である。外部磁場は、電気通信大学の池田暁彦助教の作製したコイルとコンデンサバンクを用いる。

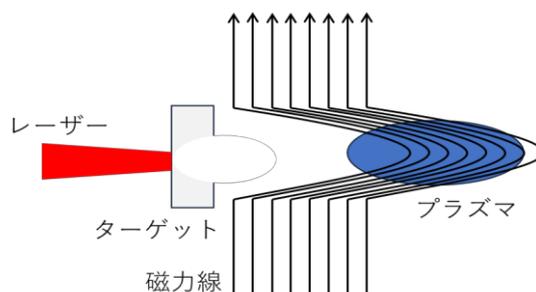


図1：平行磁場の生成

[1] T. Minami et al., High energy density physics 55, 101195(2025)

[2] K. Sakai et al., Sci.Rep. 12,10921(2022)

## パルス強磁場中での単体テルルの非相反電気伝導の観測

東大物性研

三田村裕幸

これまで f 電子系の孤立イオンの周りの量子論的電子状態を記述するために用いられてきた多極子の概念が、サイト間の効果も含めた拡張がなされ且つ完備直交基底が構築されたことで、あらゆる交差相関がこの枠組みの中で議論できるようになった[1]。とりわけ、カイラルの概念が量子論的な枠組みで扱えるようになり、カイラルな結晶構造に由来する様々な量子効果を定式化する上で非常に強力なツールになっている。そのような背景がある中で、登壇者はカイラルな結晶構造を持つ（半金属・半導体を含む）電気伝導物質における非相反電気伝導[2]に関心を持ち、これをパルス強磁場中で観測する方法を開発してきた。単体テルルは登壇者がパルス強磁場中で非相反電気伝導の連続測定を行った最初の物質である。単体テルルに関する先行研究[3]では準定常磁場で 14 T までの測定が行われ、低磁場での磁場に対して線形的な応答を示したのち数 T 程度の比較的低い磁場でピークアウトしている傾向が報告されている。一方、この度の測定で 55 T までの測定に成功し、ピークアウトの後は緩慢な変化に終始している傾向が新たに観測された（図 1 参照）。低磁場での磁場に対して線形的な応答については、摂動の次数を考慮するとゼロ磁場でのバンドのパラメータで規定されるが、より高次の応答については有限磁場中のバンドの様子を反映していると考えられる。そういった意味で、比較的低い磁場で非相反成分が線形的な応答から外れてピークアウトしているのは、キャリアドーピングされた半導体ではフェルミ準位がバンド端に近いたため比較的弱い磁場による Lifshitz 転移によりフェルミ面の消失が起きるといった描像と整合している。今回実験で明らかになったのは、（測定のバックグラウンドの不確定要因を考慮しても）データを  $\pm 100$  T 程度まで外挿したところで到底値がゼロになる傾向にないことである。これをどう解釈するかが当座の課題である。

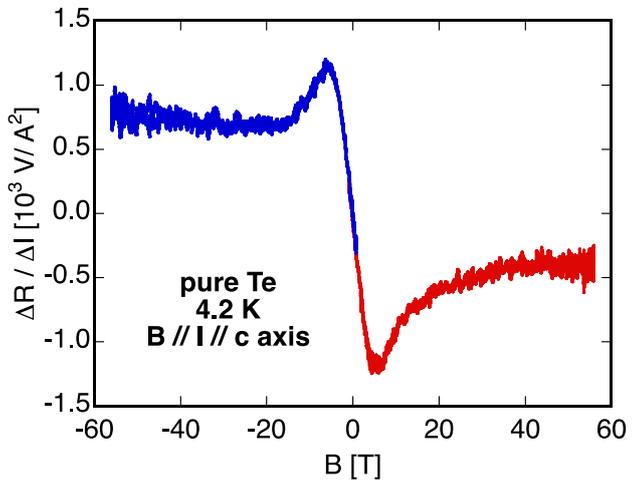


図 1. 単体テルルの  $B // I // c$  軸, 4.2 K における非相反磁気抵抗の実測データ

[1] J. Kishine *et al.*, *Isr. J. Chem.*, 62, (2022)e202200049.

[2] G. L. J. A. Rikken *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 87, (2001)236602.

[3] K. Sudo *et al.*, *Phys. Rev. B* 108, (2023)125137.

## ブリージングカゴメ反強磁性体における磁場中量子多体状態の探索

<sup>A</sup> 北大院理, <sup>B</sup> 東大物性研, <sup>C</sup> 阪大先端強磁場, <sup>D</sup> NIMS

加藤 萌結<sup>A</sup>, 石井 裕人<sup>B</sup>, 鳴海 康雄<sup>C</sup>, 山浦 一成<sup>D</sup>, 萩原 政幸<sup>C</sup>, 吉田 紘行<sup>A</sup>

カゴメ反強磁性体は、量子多体状態探索の良いモデル物質である。零磁場基底状態における量子スピン液体のみならず、磁場中においても磁場中量子スピン液体 (1/9 磁化プラトー) やマグノン結晶 (1/3, 5/9, 7/9 磁化プラトー) など多彩な量子多体状態の実現が予想されている [1]。これまで主に基底状態における量子スピン液体探索研究が推進されてきたが、カゴメ構造は歪みや乱れを内包しやすいため、零磁場極低温における精密物性評価は難しい。一方で、近年ではエネルギースケールが大きく構造乱れの影響が比較的少ない強磁場下における量子多体状態探索が活発に行われている。

特に、ブリージングカゴメ反強磁性体は、ブリージング異方性と量子性の協奏により、興味深い磁場中量子多体状態が発現する可能性があり、注目を集めている。先行研究では、モデル物質として  $\text{Li}_2\text{Cr}_3\text{SbO}_8$  が開発されており、粉末試料における基本物性が測定されている [2]。本物質では、図 1 に示すように、 $\text{Cr}^{3+}$  イオンが大きさの異なる正三角形を頂点共有することでブリージングカゴメ構造を形成する。興味深いことに、123 T までの磁化測定では、カゴメ反強磁性体として初めて 1/9 磁化プラトーが観測され、さらに強磁場下では 1/3 磁化プラトーが発現することも見出されている。本物質の磁場中量子多体状態解明のため、単結晶を用いたより精密な磁場中物性測定が強く望まれていた。今回我々は、高温高压合成法を工夫することにより、 $\text{Li}_2\text{Cr}_3\text{SbO}_8$  の単結晶育成に初めて成功した。磁化率、比熱測定の結果、4 K で反強磁性的な長距離秩序の形成を示唆する鋭いピークが観測された。また、21 K で磁化率が上昇する振る舞いが観測され、比熱でも小さなピークが観測された。50 T までの磁化測定では、1/9 磁化プラトーの入り口と考えられる異常が確認された。

さらに我々は、高温高压合成法により新しいブリージングカゴメ反強磁性体  $\text{LiInMo}_3\text{O}_8$  の開発と単結晶育成にも成功した。本物質は、図 1 に示すようにブリージング性が強く、 $\text{Mo}^{4+}$  イオンが三量体を形成すると考えられる。

講演では、これらの物質の測定結果について報告し、ブリージングカゴメ反強磁性体の磁性について議論する。

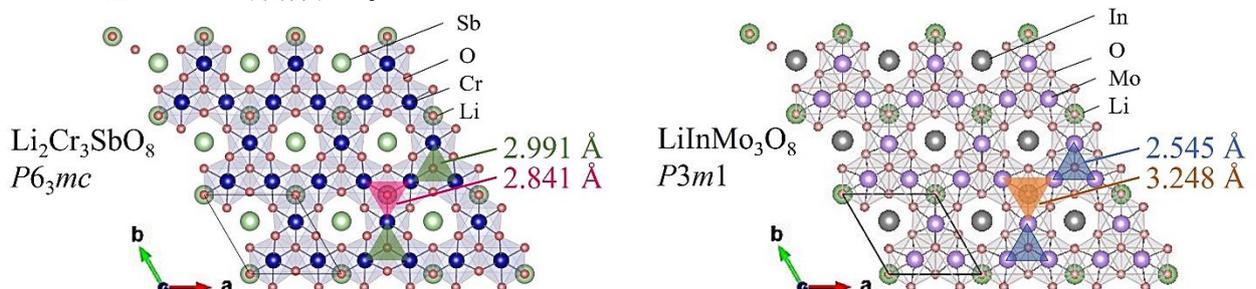


図 1.  $\text{Li}_2\text{Cr}_3\text{SbO}_8$  と  $\text{LiInMo}_3\text{O}_8$  の結晶構造。図中の長さは磁性イオン間の距離。

[1] S. Nishimoto et al., Nat. Commun. **4**, 2287 (2013).

[2] 石井裕人他, 日本物理学会 2019 年年次大会, 14aF303-2.