強磁場科学研究会 / 東北大学金属材料研究所国際ワークショップ 「マルチプローブ強磁場測定が解き明かす強相関物性」

01-1

ブリージングパイロクロア磁性体 CuInCr₄S₈における 強磁場誘起有限温度相の発見とその正体解明に向けて

厳 正輝 A,B,C

^A理化学研究所創発物性科学研究センター,^B東京大学新領域,^c東京大学物性研究所

Discovery and toward identification of a high-field-induced finite-temperature phase in a breathing pyrochlore magnet CuInCr₄S₈

Masaki Gen^{A,B,C}

^ARIKEN CEMS, ^BDept. Adv. Mat. Sci., Univ. Tokyo, ^CISSP, Univ. Tokyo

S= 3/2 の Cr³⁺がブリージングパイロクロア格子を形成する磁性絶縁体 CuInCr₄S₈は、 大小の四面体内でそれぞれ強磁性と反強磁性の最近接交換相互作用が働く[1,2]。低温で は大きい四面体内のスピンが強磁性クラスターを組むことにより、有効的に *S*=6 の面 心立方格子反強磁性体と見なすことができる[3]。したがって、本物質は面心立方格子 に内在する幾何学的フラストレーションとクロムスピネル系に特有の強いスピン-格子 結合が絡み合って、非自明な磁気秩序相を発現することが期待される。

我々は、CuInCr₄S₈ 多結晶に対してパルス強磁場下での物性測定を行なってきた。一 巻きコイル装置を用いた誘導法磁化測定により、60~110 T という広い磁場領域にわた って 1/2 磁化プラトーが観測された[4]。さらに、非破壊型パルスマグネットを用いた詳 細な磁化、磁歪、誘電率、磁気熱量効果測定によって、有限温度・磁場中においてポケ ット状の相(A 相)が存在する特異な温度-磁場相図を見出した[5]。A 相では、異常な 磁歪・誘電応答が観測され、相図の特徴も鑑みるとスキルミオン相を発現している可能 性がある。フラストレート磁性絶縁体における熱揺らぎ駆動のスキルミオン相は、理論 予測はあるものの[6]、実験観測例はない。A 相の正体を解明するには、最終的には強磁 場下での量子ビーム実験が必要であり、チャレンジングではあるものの取り組み甲斐の ある課題である。

本講演では、CuInCr₄S₈の物性を概観した上で、A 相の正体解明に向けた最新の研究 状況についても紹介する。具体的には、(i) CuInCr₄S₈単結晶の育成法と試料評価、(ii) 類 縁物質 CuMCr₄S₈(M = Al, Ga) 多結晶に対する強磁場物性測定について言及する。

- [1] Y. Okamoto *et al.*, JPSJ **87**, 034709 (2018).
- [2] P. Ghosh et al., npj Quantum Mater. 4, 63 (2019).
- [3] S. Gao et al., PRB 103, 214418 (2021).
- [4] M. Gen et al., PRB 101, 054434 (2020).
- [5] M. Gen et al., PRR 4, 033148 (2022).
- [6] T. Okubo *et al.*, PRL **108**, 017206 (2012).

スピンギャップ系 CsFeCl₃の強磁場磁性とその圧力効果

<u>二本木克旭</u>^A,木田孝則^A,鳴海康雄^A,栗田伸之^B,田中秀数^B, 上床美也^c,金道浩一^c,萩原政幸^A ^A阪大先端強磁場,^B東工大理学院,^c東大物性研

High-field magnetism and its pressure effect of the spin-gap system CsFeCl₃

K. Nihongi^A, T. Kida^A, Y. Narumi^A, N. Kurita^B, H. Tanaka^B, Y. Uwatoko^C, K. Kindo^C, M. Hagiwara^A

^AAHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ., ^BSch. Sci., Tokyo Inst. Tech, ^CISSP, Univ. Tokyo

CsFeCl₃は Fe²⁺イオン(擬スピン J = S' = 1)が c 軸方向に強磁性的な相互作用を持つ一 次元鎖を、ab 面では反強磁性的な相互作用を有する三角格子を形成するフラスレート 磁性体である。容易面型の大きな磁気異方性により、非磁性の一重項基底状態と磁気を もつ二重項の間にスピンギャップを持つ。このスピンギャップは圧力印加により小さく なり、1.8 K の温度において臨界圧力 $P_c \sim 0.90$ GPa 以上で非磁性状態から磁気秩序状態 へ量子相転移を起こす[1]。一方、磁場中においても、 $H \ge 4$ T(= H_{c1})でスピンギャップが 小さくなり、磁気秩序状態に相転移する[2]。この時、磁化(T = 1.3 K)は $H_{c1} = 4$ T 以降で 急激に増大し、 $H_{c2} = 11$ T 以上で平坦になった後に、33 T 付近で二段のメタ磁性を示す [2]。メタ磁性の発現は基底状態(J = 1)と励起状態(J = 2)のレベルクロスに起因すると考 えられている[3]。本研究では、誘導法及びインダクタンス-キャパシタンス(LC)法を用 いた CsFeCl₃ の高圧力下強磁場磁化測定を行い、メタ磁性の圧力効果を調べた。

Figure 1(a)に CsFeCl₃の誘導法による常圧下の 磁化及び dM/dH (H || c, T = 1.4 K)を示す。これら は先行研究の結果とよく一致した[2]。Figure 1(b)に LC 法で得られた強磁場・圧力下の周波数 応答(-ムf/f_0)を示す。常圧下では、-ムf/f_0 は誘導法 による dM/dH と同様の振る舞いを示しているこ とがわかる。圧力を印加すると、H_{cl}は低磁場側 に移動して Pc以上で消失した。一方、Hc2 は圧 力とともに高磁場側に移動した。メタ磁性転移 磁場 H_{m1}, H_{m2} は圧力とともに低磁場側に移動し、 1.97 GPa で H_{m1}-H_{m2}間に新たなピークを観測し た。講演では、CsFeCl₃のメタ磁性の圧力依存性 について考察した結果を報告する。[1] N. Kurita and H. Tanaka, PRB 94, 104409 (2016). [2] M. Chiba et al., Solid State Commun. 63, 427 (1987). [3] 伊達 宗行, 堀秀信: 固体物理 23, 698 (1998).



Fig. 1. (a) Magnetization curve and dM/dH. (b) $-\Delta f/f_0-H$ curves under various pressures.

Observation of Entire Magnetization Process of Star Lattice Quantum Spin Liquid Candidate in Pulsed High Magnetic Field

^A<u>Hajime Ishikawa</u>, ^AYuto Ishii, ^BYusei Shimizu, ^ATakeshi Yajima, ^COleg Janson,
 ^AYasuhiro H. Matsuda, ^AKoichi Kindo¹
 ^AISSP, University of Tokyo, ^BTohoku University, ^CIFW, Dresden

We have synthesized and investigated the organic-inorganic copper sulfate with spin-1/2 star lattice [1] by using pulsed high magnetic field. Strong bond alternation produces coupled triangular trimers arranged on honeycomb lattice. Magnetization measurements up to 120 T revealed the 1/3 magnetization plateau, which corresponds to saturation of the effective honeycomb lattice, and full saturation at around 105 T. Magnetic susceptibility exhibits large anisotropy at low temperature without magnetic order down to 0.3 K, which is approximately 1/20 of the inter-trimer interaction estimated by the first principles calculations. We argue the realization of spin-1/2 star lattice near the trimer limit, where the emergence of unconventional resonating valence bond state [2] is discussed.



- M. Sorolla, X. Wang, H. J. Koo, M. H. Whangbo, A. J. Jacobson, Synthesis of the Elusive S= 1/2 Star Structure: A Possible Quantum Spin Liquid Candidate, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 5013 (2020).
- [2] S. S. Jahromi and R. Orús, Spin-12 Heisenberg antiferromagnet on the star lattice: Competing valence-bond-solid phases studied by means of tensor networks, *Phys. Rev. B* 98, 155108 (2018).

低次元量子スピン系の磁場誘起スピンネマティック液体

<u>坂井徹</u>^{A, B},中野博生^A,古内理人^A,岡本清美^A ^A兵庫県立大学大学院理学研究科,^B量研 SPring-8

Field-Induce Spin Nematic Liquid of Low-Dimensional Quantum Spin Systems

<u>T. Sakai</u>^{A, B}, H. Nakano^A, R. Furuchi^A, K. Okamoto^A

^AUniversity of Hyogo, ^BQST SPring-8

近年、スピン多極子秩序としてのスピンネマティック相が注目されている。多くのス ピンネマティック秩序の理論では、この秩序を直接安定化する biquadratic 相互作用、あ るいはスピン・フラストレーションに基づくメカニズムが提唱されている。本研究では、 biquadratic 相互作用もフラストレーションも無い系で起きる磁場誘起スピンネマティッ ク液体相を紹介する。このメカニズムでは、量子効果の強い低次元量子スピン系におい て、容易軸異方性がある場合に、その容易軸に平行に外部磁場をかけると、磁場に垂直 なスピンネマティック相関が準長距離秩序を示す。容易軸異方性の効果により、磁場中 で2マグノンの束縛状態が準粒子となる朝永・ラッティンジャー液体相が実現するが、 この相中では、磁場に平行な SDW 相関と磁場に垂直なネマティック相関がともに準長 距離秩序を形成する。最近の共型場理論と有限系の数値対角化を用いた解析により、こ の2つの相関のうち、ネマティック相関が優勢となるパラメータ領域があることが示さ れ、鎖間相互作用により、これが長距離秩序として観測される可能性が示唆された。

本研究の解析により磁場誘起スピンネマティック相が理論予測された系としては、 S=1 反強磁性鎖、S=1/2 強磁性桁相互作用のスピンラダー系、S=1/2 強磁性・反強磁性 ボンド交代鎖系、S=1/2 Δスピン鎖系、S=1/2 歪んだダイアモンドスピン鎖系等がある。 一例として、桁が容易軸型異方性を持つ強磁性相互作用、足が桁と同じ大きさの反強磁 性相互作用となる S=1/2 スピンラダー系における、容易軸異方性 λ と外部磁場 H につい ての相図を図 1 に示す。



図1. *J***rung**=-1, *J***leg**=1, 桁に *XXZ* 異方性 λ を 入れたスピンラダー系の λ と外部磁場 *H*の相図。 TLL は朝永・ラッティンジャー液体。CTLL は conventional TLL、NTLL はネマティック TLL, H は Haldane 相。

- [1] T. Sakai, H. Nakano, R. Furuchi and K. Okamoto, J. Phys.: Conf. Ser. 2164, 012030 (2022).
- [2] T. Sakai et al., Phys. Rev. B 106, 064433 (2022).
- [3] R. Nakanishi et al., arXiv:2209.09740, to appear in JPS Conf. Proc.

01-5

三次元ベクトル強磁場計測の多角化

<u>木俣基</u>

東北大金研

Diversification of 3D vector high magnetic field experiments

M. Kimata

IMR, Tohoku Univ.

近年、対称性の破れた様々な電子状態に対する興味から、磁場方位の精密制御の必要 性が増していると考えられる。限られた磁場方位でのみ出現する磁場誘起超伝導相[1,2] や電子状態の回転対称性を破るネマティック秩序[3]などの研究には、磁場方位の三次 元的な制御が必要である。

三次元的な磁場方位制御については、ベクトルマグネットの利用やソレノイドマグネ ットと二軸回転機構を組み合わせた手法が従来から知られており、様々な研究が行われ てきた。特に二軸回転機構はサイズさえ適合すればあらゆるマグネットとの組み合わせ が可能であり、20T以上の強磁場をベクトル的に利用する「三次元ベクトル強磁場」が 実現できる。一方、計測技術としては、主に電気抵抗測定に限られていたのが現状であ る。

今回の発表では東北大金研の定常強磁場マグネットと二軸回転機構を組み合わせた 研究の進展を紹介する。現状、東北大金研で二軸回転機構が利用可能な測定条件は最高 27 T (ハイブリッドマグネット利用)、最低温 0.5 K である。最近我々は従来の抵抗測定 [4,5]に加えて同軸ケーブルを導入し、超音波、交流磁化率[6]、NMR[7]等の高周波を用 いる実験にも応用している。また、熱測定用断熱セルや圧力セルを用いた実験セットア ップも開発中である。発表では更なる小型化を行った例として、PPMS への適用[Fig.1] や、より高磁場を意識した小口径二軸回転機構の開発についても紹介したい。

[1] S. Ran, et al., Nat. Phys. 15, 1250 (2019).

[2] G. Knebel, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 063707(2019).

[3] S. Kasahara, et al., Nature 486, 382 (2012).

[4] K. Hoshi, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 033704(2019).

[5] M. Kimata, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116** 192402 (2020).

[5] H. Sakai, et al., arXiv:2210.05909.

[6] K. Kinjo, et al., arXiv:2206.02444.



Fig. 1. Two axes rotator designed for PPMS. The outer diameter is approximately 25 mm.

パルス強磁場下における複数金属試料の磁気抵抗同時測定

<u>三田村裕幸</u>^A ^A東大物性研

Simultaneous magnetoresistance measurements of multiple metallic samples in pulsed high magnetic fields

<u>H. Mitamura^A</u>

^AISSP, Univ. Tokyo

パルス磁場下での純良金属の磁気抵抗測定は、信号が小さくノイズを平滑化するには長 時間のデータの積算が必要であり、これまで難しいと考えられてきた。そのため、半導体 や半金属など元々の電気抵抗が高い物質かあるいは微細加工によって信号を大きくするこ とが可能な試料に限られていた。登壇者らは、パルス磁場中での有線測定に特有な主たる ノイズが、不均一な磁場を持つ電磁石やプローブ等の機械的振動によって引き起こされた 電磁誘導であることを突き止めた[1]。これにより、機械的振動を抑制できれば、データの 積算時間は従来考えられていたものに比べれば短くても良いことが導かれ、むしろ試料へ の通電時間及び磁場発生時間が短くなることで、1)電流値を大きくしても試料の発熱の総 量が抑えられる.2)電磁石自体も小型になり機械的振動の抑制も容易になる.という利点 が生まれた。他方、これに見合う高速測定が必要となり、そこで生まれた新しい信号処理 技術[2-4]は、複数試料の同時測定による信号の干渉効果を除去する場合(図1)も有効で、 現在、放送・通信で使われているOFDM方式より短時間のデータで複数の周波数成分の

信号が分離できる。信号検出の時 間分解能を上げるには変調に用い る周波数を上げるのが常道である が、それが出来ない測定手法では、 本方式はとりわけ効力を発揮する [5]。講演ではその理論と測定結果 について報告する。

 H. Mitamura *et al.*, Rev. of Sci. Instrum. 91, 125107 (2020).
 特許 7062302 三田村裕幸
 特許 6905265 三田村裕幸
 特許 7024983 綿貫竜太、 三田村裕幸
 日本物理学会 2021 年秋季大会
 23aC2-2 三田村裕幸、綿貫竜太



図1 2つの試料を異なる周波数(20 kHz と 31.25 kHz) で同時に測定した場合の一方の試料(銀線、31.25 kHz で変調)の(a)1周期、(b)2周期で積算した場合の解析 結果。どちらも相手の試料から来る干渉信号(11.25 kHz) が重畳している。(c)は(a)と(b)の結果を適切な重み付け で足し合わせたもの。干渉効果による振動が首尾よく消 えている。(d)は各々の測定に於いて干渉効果の除去に必 要な積算時間を示す。

λ型有機導体の温度磁場相図と絶縁体金属転移

<u>福岡脩平</u>^A, 今城周作^B, 岡太耀^A, 井原慶彦^A, 河本充司^A, 金道浩一^B ^A北大院理, ^B東大物性研

Phase diagram and insulator-metal transition in λ -type organic conductors

S. Fukuoka^A, S. Imajo^B, T. Oka^A, Y. Ihara^A, A. Kawamoto^A, K. Kindo^B
^AGrad. Sch. Sci., Hokkaido Univ., ^BISSP, Univ. Tokyo

Mott 転移に対する磁場効果は実験、理論の両方面から精力的に研究が行われている。有 機導体においては、例えば隣接絶縁相が反強磁性相であるκ-(ET)₂Cu[N(CN)₂]Cl では金属絶 縁体転移型の磁場誘起 Mott 転移が観測され、また、valence bond solid 相を隣接相とする EtMe₃P[Pd(dmit)₂]₂では絶縁体金属転移型の磁場誘起 Mott 転移が観測されている[1,2]。これ らの磁場応答には隣接絶縁相の磁性が関係していることが議論されている。

Mott 転移に対する磁場効果の研究対象として我々は λ 型有機導体(λ -(BETS)₂GaCl_{4-x}Br_x)に 着目した。 λ 型有機導体は x = 0 で基底状態は超伝導状態であるが、アニオンに含まれる Br 量を増加させることで基底状態を超伝導状態から Mott 絶縁体状態まで連続的に変化させる ことができる[3]。故に Mott 境界近傍の電子状態を常圧条件で実現できる利点があり、パル ス磁場との組み合わせにより広い磁場範囲での様々な物性測定が可能である。

 λ -(BETS)₂GaCl_{3.35}Br_{0.65}の電気抵抗の温度依存性と磁気抵抗測定の結果を Fig. 1 に示した。 電気抵抗は Mott 境界近傍を横切ることに起因して絶縁体-金属-絶縁体と変化し、低温で超 伝導状態に転移する。金属的挙動を示す 40 K から 15 K の範囲では巨大な負の磁気抵抗が観 測された。さらに 15 K 以下の絶縁体的挙動を示す温度域では、高磁場領域でヒステリシス を伴う抵抗の不連続な減少が観測された。これらの結果は λ 型有機導体では磁場により金属 状態が安定化され、特に低温領域では絶縁体金属転移型の Mott 転移が誘起されたことを示 している。講演では Mott 境界近傍の広範囲(0.65 \leq x \leq 0.8)で行った測定結果を紹介する。ま た、 λ 型有機導体での Mott 転移に対する磁場効果について、これまでの λ 型有機導体の温度

圧力相図の研究結果にも 触れながら議論したい。

F. Kagawa et al., Phys.
 Rev. Lett. **93**, 127001 (2004).

[2] Y. Shimizu et al., Phys.Rev. Lett. **99**, 256403 (2007).

[3] H. Tanaka, et al., J. Am.Chem. Soc. **121**, 760 (1999).



Fig. 1. (a) Temperature dependence of the resistivity of λ -(BETS)₂GaCl_{3.35}Br_{0.65} at 0 T. (b) Magnetic field dependence of magnetoresistance at each temperature.

線形分散に由来する負の磁気抵抗

<u>伏屋雄紀</u>^A,粟島裕大^A,山田暉馨^B ^A電通大基盤理工,^B東大物性研

Negative magnetoresistance originated from the linear dispersion

Y. Fuseya^A, Y. Awashima^A, A. Yamada^B

^ADept. Engineering Science, Univ. Electro-Communications, ^BISSP, Univ. Tokyo

磁場により電気抵抗が変化する磁気抵抗現象は,電磁気学の一側面として 19 世紀よ り研究され始め,21 世紀の固体物理学においてもまだなお主要な課題の一つである. その長い研究の歴史ゆえ,磁気抵抗の基本的な性質はほとんど分かっているかに思わ れる.しかし,非常に単純な系でさえ,磁気抵抗の"教科書的理解"から大きく外れ たふるまいを見せることは,あまり知られていない.例えば,「縦磁気抵抗は横磁気抵 抗よりはるかに小さい」ことが教科書的理解である.しかし単純な複数キャリア系で も,電流方位によって,縦が横よりずっと大きくなることが古典論でも示せる[1].単 ーキャリア系であっても,フェルミ面がわずかに球状から歪むと,横だけでなく縦磁 気抵抗も生じる[2].こうした教科書的理解から外れる磁気抵抗現象では,共通して 「有効質量の非対角成分」が鍵になっていることが分かってきた.

本研究では、有効質量の非対角成分が鍵となる、非従来型磁気抵抗の新たな例を報

告する. ボルツマン方程式に基づく半古典 論を用いて, ワイル半金属, ディラック電 子系, ノーダルライン半金属における磁気 抵抗を計算した[3,4]. その結果, 負の磁気 抵抗(あるいは磁場により減少する磁気抵 抗)を示す結果を得た. こうした負性磁気 抵抗は, 電子のエネルギー分散が線形であ ることに由来して, 有効質量の非対角成分 が負になることによって生じていることが 分かった. これら具体例の積み重ねから, 線形分散を持つ系では, 一般に, 負性磁気 抵抗を示しうると結論した.



- [1] Y. Mitani, Y. Fuseya, J. Phys.: Condens. Matter, 32, 345802 (2020)
- [2] Y. Awashima, Y. Fuseya, J. Phys.: Condens. Matter, 31, 29LT01 (2019)
- [3] A. Yamada, Y. Fuseya, Phys. Rev. B, 105, 205207 (2022)
- [4] Y. Awashima, Y. Fuseya, to be submitted.

01-9

定常および準定常強磁場中での高温超伝導体における パルス電流を用いた臨界電流輸送測定

<u>土屋雄司</u>^A, 小濱 芳允^B, 水野 謙一郎^C, 坂井 厳^D, 神田 朋希^B, 岡田 達典^A,

吉田隆^D,淡路智^A

^A東北大金研強磁場,^B東大物性研,^C株式会社 MTL,^D名大

Transport Critical Current Measurements in High-Temperature Superconductors at Steady and Quasi-Steady High Fields by using Pulsed Current

<u>Y. Tsuchiya</u>^A, Y. Kohama^B, K. Mizuno^C, I. Sakai^D, T. Kanda^B, T. Okada^A, Y. Yoshida^D, S. Awaji^A ^AHFLSM, Tohoku Univ. ^BISSP, Univ. Tokyo, ^CMTL Corp.

高温超伝導体は、線材として市販されており、30T級の強磁場超伝導マグネットや、液体 水素冷却(20K)核融合炉などへの応用が期待されている。それらの設計には、線材の強磁場 中の臨界電流が重要であり、物質の異方性に起因する磁場印加角度依存性や、磁場および温 度依存性を測定する必要がある。近年、高温超伝導線材の臨界電流が向上しており、20Kで の臨界電流は、典型的な形状の幅4mm、厚み2-3µmの断面積に対して5kA程度に達して いる。しかし、温度可変の低温かつ強磁場のスペースが限られているため、直流通電の輸送 測定は困難である。それに対し、微小ブリッジにより臨界電流を抑制する手法があるが[1]、 正確な値が得られないという欠点がある。そこで我々は、パルス通電法[2]に着目した。パル ス通電による臨界電流測定は、測定系および試料での発熱が抑制され、大電流の通電測定が 可能である。さらに、パルス通電法は、超伝導マグネットを用いた定常強磁場中での測定に 加えて、比較的長時間のフラットトップ磁場[3]との組み合わせが可能である。以上の背景 のもと本研究では、パルス通電と定常強磁場、準定常強磁場を組み合わせることで、高温超 伝導線材における強磁場中での臨界電流測定手法の開発を目的とした。

実験は、パルス通電測定に向けた低インピーダンスプローブ作製、超伝導マグネットを用いた定常強磁場中パルス通電測定、フラットトップパルス磁場を用いた準定常磁場中パルス通電測定を行なった。具体的には、各種市販および自作ケーブルのインピーダンス測定を行い、低インピーダンスプローブを作製した。電流容量 1,000 A パルス幅 1 ms のパルス電流源を作製し、試料電圧をプリアンプおよび絶縁オシロスコープを用いて測定し、パルス通電測定法を開発した。この装置と、東北大強磁場センターの 20 T 無冷媒超伝導マグネット、18 T 超伝導マグネット、東大物性研の 10 T フラットトップパルスマグネットを組み合わせ、高温超伝導線材における 4 K-77 K、0-19 T での臨界電流を測定した。

本講演では、測定装置の詳細、強磁場中での電磁力に対するノイズ低減手法、発熱の影響について報告する予定である。

[1] S. Fujita et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 18466670 (2019).

[2] F. Sirois et al., Supercond. Sci. Technol. 23, 034018 (2010).

[3] Y. Kohama, K. Kindo, Rev. Sci. Instrum. 86, 104701 (2015).

強磁場,ミュオン,放射光 X 線でプローブする 電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体の電子状態

<u>足立匡</u> 上智大理工

Electronic states of the electron-doped high-*T*_c cuprate superconductors probed by high magnetic field, muon, synchrotron X-ray

T. Adachi

Department of Engineering and Applied Sciences, Sophia University

電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体には、キャリアをドープしない母物質で現れるノンドープ超伝導[1,2]、マルチキャリアの存在[3]、超伝導が抑制される過剰ドープ領域で 発達する Cu スピン相関[4]など、多くの未解明な問題がある。我々は、マルチキャリア と Cu スピン相関について調べるために、電子ドープ型 Pr_{2-xy}La_yCe_xCuO₄の単結晶を用 いて東北大金研強磁場センターでのホール抵抗率、J-PARC 等の大型加速器を用いたミ ュオンスピン緩和、大型放射光施設 SPring-8 での X 線吸収分光の測定を複合的に進め ている。これらの測定から、(i) Ce 置換によって電子をわずかにドープした試料では室 温でマルチキャリアが存在するものの、低温で反強磁性転移が起こると電子のシングル キャリアに変化する、(ii)電子を過剰にドープして超伝導が消失した試料では、低温で ホールのシングルキャリアが存在する、(iii)電子を適度にドープしてバルク超伝導が発 現する試料では、室温から低温までマルチキャリアが存在することがわかってきた。理 論研究[5]からマルチキャリアは反強磁性スピンゆらぎによって生成すると提案されて いることから、反強磁性スピンゆらぎと超伝導の発現に密接な関わりがあると思われる。

講演では、電子ドープ型銅酸化物の電子状態の全貌を明らかにするために、強磁場下 での物性測定へのさらなる展開と期待についても述べたい。

本研究は,永久保侑祐,小宮山陽太,田島一輝,石本奨,桑原英樹(以上,上智大), M.A. Baqiya (ITS Surabaya, Indonesia),扇太郎,高橋晶,今野巧也,小池洋二(以上, 東北大応用物理),川股隆行(東京電機大),渡邊功雄(理研),幸田章宏,門野良典(以 上,KEK)岡田達典,淡路智,高濱元史,谷口貴紀,浅野駿,藤田全基(以上,東北大 金研),石井賢司(量研機構),松村大樹,辻卓也(以上,原子力機構)の諸氏との共同 研究によるものである。

- [1] A. Tsukada et al., Solid State Commun. 133, 427 (2005).
- [2] T. Adachi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 063713 (2013).
- [3] P. Li et al., Phys. Rev. Lett. 99, 047003 (2007).
- [4] M. Fujita et al., Phys. Rev. Lett. 101, 107003 (2008).
- [5] H. Kontani, Rep. Prog. Phys. 71, 026501 (2008).

02-2

スピン三重項超伝導体 UTe2の磁場誘起超伝導とフェルミ面

青木大

東北大学金属材料研究所

Field-induced superconductivity and Fermi surface properties in the spin-triplet superconductor UTe₂

D. Aoki

IMR, Tohoku Univ.

UTe2は 2018 年末に発見された常磁性の重い電子系超伝導体である[1]。空間群 Immm の直方晶の結晶構造を持ち、反転中心が原子サイトに無く局所的に空間反転対称性が破 れた系である。最も特徴的な点は、Tc=1.6-2 K であるにもかかわらず、メタ磁性磁場 Hm~35T までの磁場再突入型(リエントラント)超伝導を示すことである。低温で大き な磁気異方性を伴い、磁化困難軸方向に磁場を加えた時にリエントラント超伝導を示す ことから、URhGeや UCoGe などウラン化合物の強磁性超伝導体との類似性が指摘され ている。強磁性超伝導体では、磁場によってチューニングされる強磁性ゆらぎが超伝導 発現機構に関わっていると考えられ、実際にそのような実験結果が得られている。とこ ろが UTe2は、強磁性ゆらぎが実験的に明らかにされておらず、その代わりに非整合の qベクトルを持つ反強磁性ゆらぎが非弾性中性子散乱実験により明らかにされている。 UTe2は、強磁性超伝導体よりも複雑で、強磁性、反強磁性、価数、フェルミ面の不安 定性など様々なゆらぎが超伝導に関与して、さらに多彩な物性を生み出していると考え られる。UTe2のもう一つの特徴は、高圧下で現れる超伝導多重相である。0.3 GPaとい う比較的低い圧力で超伝導転移温度が分裂し、超伝導多重相が出現することが圧力下の 比熱測定などから明確に見出されている。さらに、その状態でa軸方向に磁場を加える と、超伝導多重相の磁場応答を反映して、超伝導上部臨界磁場 Hc2(T)が低温で急激に増 大する。それぞれの超伝導相で異なった秩序変数を持っていると考えられる。このよう な中、我々は RRR が 200 を超える UTe2の超純良単結晶育成に成功し、ドハース・ファ ンアルフェン効果を観測した[2]。強磁場中の角度依存性とバンド計算との比較からフ ェルミ面の形状を決定し、30-60m0もの重い有効質量を直接観測することに成功した。 UTe2の物理は、強磁場、極低温、高圧、純良単結晶という高い実験技術が求められる が、それだけに得られる実験結果は多彩で魅力的である。本講演ではその魅力を伝えた い。本研究は、酒井宏典、Petr Opletal,常盤欣文、石塚淳、柳瀬陽一、播磨尚朝、仲村 愛、李徳新、本間佳哉、清水悠晴、Georg Knebel, Jacques Flouquet、芳賀芳範各氏らとの 共同研究である。

[1] レビュー論文として例えば D. Aoki *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **34**, 243002 (2022). [2] D. Aoki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **91**, 083704 (2022). 02-3

電気抵抗および「その場」交流帯磁率同時測定による スピン三重項超伝導体 UTe2 の超伝導相図の決定

<u>酒井 宏典</u>^A, 常盤 欣文^A, Petr Opletal^A,

木俣 基^B, 淡路 智^B, 佐々木 孝彦^B, 青木 大^B,

神戸 振作 A, 徳永 陽 A, 芳賀 芳範 A

^A日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター,^B東北大学 金属材料研究所

H-T phase diagram for spin triplet superconductor UTe₂ investigated by simultaneous measurements

of electric resistivity and "in-situ" AC magnetic susceptibility

H. Sakai^A, Y. Tokiwa^A, P. Opletal^A, M. Kimata^B, S. Awaji^B, T. Sasaki^B, D. Aoki^B,

S. Kambe^A, Y. Tokunaga^A, Y. Haga^A

^A Advanced Science Research Center, JAEA, ^B Institute for Materials Research, Tohoku Univ.

常磁性体のウラン二テルル化物 UTe₂ が $T_c = 1.6$ K で 超伝導を示し、スピン三重項超伝導の有力候補である と 2018 年末に報告[1]されて以降、磁場誘起超伝導[2] や多重超伝導相[3]、マヨラナエッジ状態[4]など、刺 激的な報告が相次いでいる。最近我々は溶融塩フラッ クス法という手法で超純良単結晶育成に成功し、不純 物散乱抑制により T_c は 2.2 K と上昇し[5]、de Haas–van Alphen 振動観測にも成功した[6]。

磁化困難 b 軸方向に「正確に」磁場をかけると、15 T 以上で T。が磁場とともに上昇する「磁場増強超伝導状 態」が現れる[2]。この強磁場超伝導(HFSC)相を調 べるために、東北大学金属材料研究所強磁場施設の無 冷媒 25 T 超伝導磁石(25T-CSM)を用い、超純良単結晶 による磁場—温度相図を決定することを試みた。二軸 回転可能な試料台に、電気抵抗測定用の四端子を付け、 簡易的に交流帯磁率を測定するためのコイルを巻い た細長い単結晶をセットした。当日は、得られた結果 について報告したい。



Fig. 1. Schematic illustration of the simultaneous measurement of ρ and Δ_{XAC} . The RF circuit comprises a solenoid coil filled with the sample and two variable capacitors placed at room temperature. The definitions of angles θ and ϕ with the external field (*H*) are also presented here.

[1] S. Ran et al., *Science* 365, 684 (2019). [2] S. Ran et al., *Nature Physics* 15, 1250 (2019).; G. Knebel et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* 88, 063707 (2019). [3] D. Braithwaite et al., *Communications Physics* 2, 147 (2019).; D. Aoki et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* 89, 053705 (2020).; S. M. Thomas et al., *Science Advances* 6, eabc8709 (2020). [4] L. Jiao et al., *Nature* 579, 523 (2020). [5] H. Sakai et al., *Phys. Rev. Materials* 6, 073401 (2022). [6] D. Aoki et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* 91, 083704 (2022).

UTe₂における強磁場下の ¹²⁵Te-NMR

石田憲二,金城克樹,藤林裕己 北川俊作,徳永陽^A, 酒井宏典^A,神戸振作^A,清水悠晴^B, 仲村愛^{B,}李徳新^B,本間佳哉^B,本多史憲^{B,C},青木大^{B,D}開康一^E,木俣基^B,佐々木孝彦^B 京大院理,^A原子力機構先端研,^B東北大金研,^C九大アイソトープセンター,^DCEA-Grenoble,

E福島県立医大物理 E

¹²⁵Te-NMR Studies on UTe₂ under High Magnetic Fields

K.Ishida, K. Kinjo, H. Fujibayashi, G. Nakamine, S. Kitagawa, Y. Tokunaga^A, H. Sakai^A, S. Kambe^A, Y. Shimizu^B, A. Nakamura^B, D. Li^B, Y. Homma^B, F. Honda^B, D. Aoki^{BC}, K. Hiraki^E, M. Kimata^B, and T. Sasaki^B

Dep.of Phys. Kyoto Univ., JAEA^A, IMR. Tohoku Univ.^B, Kyushu Univ. RIC^C, CEA-Grenoble^D, Fukushima Med. Univ.^E

S. Ran et al.による UTe₂の超伝導発見以降[1]、この物質の超伝導状態は大いに注目を集めて いる[2]。これは各軸の超伝導上部臨界磁場がパウリ対破壊効果の磁場を上回り、特に磁場 を b 軸に印加した場合、超伝導転移温度が 15 T 以上で上昇する磁場誘起超伝導の振舞いが 見られたことによる[3]。我々は、Te を核磁気共鳴(NMR)可能な¹²⁵Te に置き換えた UTe₂単 結晶を準備し、超伝導状態の実験を行なっている[4]。

今回、東北大学金属材料研究所強磁場施設の無冷媒超伝導磁石を用い、H//bの15T以上 に見られる高磁場超伝導の物性を、交流磁化率と¹²⁵Te-NMR 測定から調べた。高磁場超伝 導は磁場角度に敏感なため、2軸ローテーターを用い磁場を0.5度以内の精度でb軸に印加 できるように調整し測定を行った。その結果、

交流磁化率によるマイスナー信号の磁場変化 は、超伝導内の16Tで磁場依存性の符号が変 化すること、マイスナー信号から決めた超伝 導転移温度も16Tから24.5Tまで上昇し続け ることを見出した。これらの結果は、高磁場 超伝導もバルクの性質であり、この超伝導は 磁場印加により強められていることを示して いる。これらの実験結果から作成された超伝 導相図を図1に示す。この相図は比熱測定か ら作成された相図[5]とよく一致している。

さらに各相の超伝導状態を調べるために磁 場1~24Tまで、最低温0.5Kまでの¹²⁵Te-NMR 測定を行った。この実験結果に基づき、考え



図 1: 25 T CSM による交流磁化測定から作成 された UTe₂の超伝導相図[6]

られる高磁場超伝導相の超伝導状態について議論する[6]。

[1] S. Ran et al., Science 365, 684 (2019). [2] D. Aoki et al. J. Phys. Soc. Jpn. 88, 043702 (2019)

[3] G. Knebel et al., J. Phys. Soc. Jpn. 88, 063707 (2019).

[4] G. Nakamine et al., Phys. Rev. B 103, L100503 (2021).

[5] A. Rosuel et al., arXiv: 2205.04524v3 [6] K. Kinjo et al. arXiv:2206.02444v2

100 テスラ X線自由電子レーザー実験に向けた開発の現状と展望

<u>池田暁彦</u>^A,田中智也^A,野田孝祐^A,松田康弘^B,周旭光^B,彭詩悦^B, 石井悠人^B,矢島健^B,久保田雄也^C,井上伊知郎^C,犬伏雄一^{C,D},登野健介^{C,D}, 矢橋牧名^{C,D},内藤智之^E,佐藤桂輔^F

電通大,^B東大物性研,^C理研放射光,^DJASRI,^E岩手大理工,^F茨城高専

Developments for the experiments at 100 T using x-ray free electron laser

<u>A. Ikeda</u>^A, T. Tanaka^A, K. Noda^A, Y. H. Matsuda^B, X. Zhou^B, S. Peng^B, Y. Ishii^B, T. Yajima^B, Y. Kubota^C, I. Inoue^C, Y. Inubushi^{C, D}, T. Kensuke^{C, D}, M. Yabashi^{C, D}, T. Naito^E, K. Sato^F ^AUEC Tokyo, ^BISSP UTokyo, ^CRIKEN, ^DJASRI, ^EIwate Univ., ^FIbaraki Nat. Col. Tech.

世界の強磁場施設において 100 テスラに至る磁場領域で多くの磁場誘起相転移が発見されている。マクロ磁歪計測により格子の異常が発見されている例も偏在している。 また、固体酸素の超強磁場 θ 相に代表されるように、100 テスラ領域においてはスピン 格子結合を介して固体の構造相転移がユビキタスに引き起こされる期待がある。しかし これをミクロに検証するために必要な 100 テスラ磁場領域での X 線構造観察は従来不 可能であった。

近年我々はポータブル超強磁場発生装置 PINK-01 をつくり、2.5mm 小径一巻きコイルによる 77 テスラ発生に成功した。これを、X 線自由電子レーザー(XFEL)施設 SACLAに搬入しX線レーザーを利用することで磁場頂上 77 テスラにおける X線回折データの取得に成功した[1]。これまでに寒剤吹きつけ法により 78 ケルビン 65 テスラにおける Pr 系コバルト酸化物の相転移、および 20 ケルビン 77 テスラにおける LaCoO3の相転移の観測に成功しており、実際にミクロな強磁場物性探索を開始している。

課題としてはより安定的な低温環境の実現と、100テスラ強磁場を両立することであ

る。このため、2 倍の電流容量を持つ PINK-02 および、内径 4mm の一巻き コイルに挿入できる X 線用クライオ スタットを開発している。これらによ り 100 テスラ超強磁場かつ極低温中で X 線回折実験を可能とする計画であ る。発表ではこれまでの進捗を報告し 展望を述べる。



図 超強磁場X線自由電子レーザー実験の様子

問い合わせ先:池田暁彦(電気通信大学) a-ikeda@uec.ac.jp [1] A. Ikeda, Y. H. Matsuda, X. Zhou, S. Peng, Y. Ishii, T. Yajima, Y. Kubota, I. Inoue, Y. Inubishi, K. Tono, M. Yabashi, Appl. Phys. Lett., **120**, 142403 (2022)

O2-6

定常強磁場下偏光顕微イメージングシステムの開発

木下 雄斗

東大物性研

Development of polarized microscopy system under steady high magnetic field

Y. Kinoshita

ISSP, Univ. Tokyo

偏光顕微鏡は対称性の破れに伴う双晶や強誘電ドメイン、磁気ドメインといったミクロな構造を簡便に実空間観察するツールとして物質科学分野で広く用いられている。また、磁化、電気分極、電気抵抗といったマクロな物理量は物質全体の平均値として測定されるため、ミクロな構造との関係を明らかにするには物理量の測定と同時にその場観察を行うことが求められる。特に電場や磁場のような外場下で測定を行うことは基礎・応用の両側面において重要である。電場の場合、試料と電源間に配線を施せば容易に印加可能であるが、磁場の場合、磁石やコイルを試料位置に導入する必要がある。これまでに磁場中での偏光顕微鏡観察はいくつか報告されているが[1,2]、液体へリウム温度以下の低温環境かつ10T以上の強磁場下でその場観察を行うこと、さらにマクロな物理量の同時測定を実現することは困難であった。そこで本研究では、これらの課題を解決するために新たな磁場下偏光顕微観察装置を開発した[3]。図に実験装置全体の写真を示す。無限遠補正対物レンズを、磁場中での物性測定に広く用いられる物理特性測定システム(Quantum design, PPMS)に直接挿入し、PPMS上部に設置した偏光顕微鏡によって観察を可能にしている。また試料固定に PPMS の標準サンプルパックを用いることで、

温度制御、および抵抗等の物理量の同時測定 が可能であり、2-400 K の温度範囲にわたって 最大 14 T の磁場中で観察できる。講演では、 本装置を利用した実際の観察例として、磁性 形状記憶合金の磁場誘起マルテンサイト逆変 態観察、オルソフェライトにおける磁気ドメ イン観察、さらに LED を用いた透過配置での 磁気光学結晶の磁気光学イメージングの結果 等を紹介し、今後の展望についても議論する。 [1] I. Katakura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 043701 (2010).

[2] Y. Tokunaga *et al.*, Phys. Rev. B **71**, 012408(2005).

[3] Y. Kinoshita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93**, 073702 (2022).



図装置全体の写真。

相競合を有する系でのドメイン成長と低温ヒステリシス拡大

松浦慧介^A,西澤葉^B,木下雄斗^C,三宅厚志^C,徳永将史^{A,C},

車地崇 D, 大池広志 E, 十倉好紀 A, B, F, 賀川史敬 A, G

▲理化学研究所創発物性科学研究センター,^B東京大学大学院工学系研究科,^C東京大学物性研究所,^D東京大学大学院新領域創成科学研究科,^E科学技術振興機構 さきがけ

研究者, 『東京大学 東京カレッジ, 『東京工業大学理学院

Domain-growth dynamics in a system with a two-phase competition and low-temperature hysteresis broadening

<u>K. Matsuura</u>^A, Y. Nishizawa^B, Y. Kinoshita^C, A. Miyake^C, M. Tokunaga^{A,C}, T. Kurumaji^D, H. Oike^E, Y. Tokura^{A,B,F}, F. Kagawa^{A,G}

^ARIKEN CEMS, ^BDept. Appl. Phys., Univ. Tokyo, ^C ISSP, Univ. Tokyo, ^DDept. Adv. Matter. Sci., Univ. Tokyo, ^EPRESTO, JST, ^FTokyo College, Univ. Tokyo, ^GDept. Phys., Tokyo Tech.

一次相転移は、二つの異なる熱力学相が相共存したヒステリシス領域によって特徴づけ られる。一次相転移は、必ずしも熱平衡一次相転移線上で起こるものではなく、そこから 離れた温度や外場のパラメータ領域で起こる。これは、一次相転移が核生成や核成長とい った非平衡過程を含んでいることに起因し、結果として温度-外場平面上ではヒステリシ ス境界が実験的には描かれることが多い。二つの熱力学相が競合する系では、低温におい てしばしば超線形的にヒステリシス境界が広がる。この低温でのヒステリシス領域の拡大 は、超巨大磁気抵抗効果を示すマンガン酸化物やマルテンサイト物質などで観測されてい

たが、その起源はこれまで明らかではなかった。

本研究では、磁気力顕微鏡及び磁気光学カー効果顕 微鏡を用いて、(Fe_{1-y}Zn_y)₂Mo₃O₈(y=0.05)[1]における磁 気ドメインの実空間観測を行い、ヒステリシス拡大の 起源に迫った。この物質は、ゼロ磁場で反強磁性(AFM) 相、磁場印加に伴いフェリ磁性(FRI)相となり[1]、低温 において上述のヒステリシス拡大が起こる。AFM 相側 のヒステリシス境界付近で、AFM 相の核成長過程の観 測に成功し、核成長速度の温度・磁場依存性を明らか にできた(図1)。核成長速度は、熱活性的な振る舞いを 示し、強磁性体や強誘電体のドメイン壁のクリープ運 動の解析で用いられる式[2,3]でよくフィットできた。



図 1. 反強磁性ドメインの核成長 速度. 青線+白丸は、フェリ磁性相 から反強磁性相への転移磁場.

当日は、クリープ的な挙動とヒステリシス領域の広がりの関係も議論する。

[1] T. Kurumaji *et al.*, Phys. Rev. X 5, 031034 (2015). [2] P. Chauve *et al.*, Phys. Rev. B 62, 6241 (2000). [3] W. Kleemann, Anuu. Rev. Mater. Res. 37, 415 (2007).

02-8

横断型強磁場実験による マルチフェロイック系の磁気熱量効果の研究 <u>木原工</u> 岡山大学異分野基礎科学研究所

Study on Magnetocaloric Effects in Multiferroic Materials by the Cross-Facility-High-Field Experiments Takumi Kihara

Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University

一般的な磁性体の磁気熱量効果(MCE)では、外部磁場に対し電子スピンが磁場方向に配向 することで磁気エントロピーが変化する。それに対し、電気分極や結晶歪などが磁性と強く結合し たマルチフェロイック系では、磁場に対し熱力学的に非共役な物理量が磁場に応答する。従って その結果として得られる MCE は、電子スピンに起因する磁気エントロピー変化と非共役応答に起 因するそれとの総和となり複雑な磁場変化が予想される[1]。また、複数の自由度に起因するエント ロピーが同時に変化するとき、結果として巨大なエントロピー変化が得られる場合があり巨大磁気 熱量効果(Giant MCE)と呼ばれている[2]。このように外場に対する非共役応答を示すマルチフェ ロイック系は、磁気冷凍材料探索の舞台としても注目を集めている。

本講演では、複数の自由度が同時に磁場に応答するマルチフェロイック系がどのような MCE を 示すかについて、磁性と結晶歪が結合した NiMn 基ホイスラー合金、および磁性と電気分極が結 合したオケルマナイト酸化物のそれぞれに対するパルス強磁場実験の結果を用いて議論する。パ ルス強磁場は、磁場が高速で変化するため、断熱的な測定を容易に実現できる。これを利用 することで、物質の MCE を断熱磁化(消磁)過程における試料温度の変化として直接測定す ることができる[3]。従って、磁気冷凍材料の評価に極めて有効な実験手法である。更に、高磁 場中の比熱測定と組み合わせることで、異なる自由度におけるエントロピー変化をある程度個 別に評価できるという利点がある。

ホイスラー合金 Ni₄₅Co₅Mn_{36.7}In_{13.3}は、磁場誘起マルテンサイト変態に伴い巨大な負の MCE が発生する[4]。これは構造相転移に伴う格子エントロピーの急激な増大が原因であると理解 されている。これに加え我々は、Ni₄₁Co₉Mn_{31.5}Ga_{18.5}を用いたパルス強磁場 MCE 測定と定常磁 場中の比熱測定によって、状態密度の磁場変化に起因した新しいタイプの Giant MCE を見 出した[5]。

上記のホイスラー合金では、磁場誘起マルテンサイト変態によって磁化や体積などが不連続に 変化するため、それに付随するエントロピー変化も不連続かつ巨大なものになる。一方で、二次相 転移の場合の MCE は、マクスウェルの関係式を通じて磁化の温度、磁場依存性で決まると考えら れる。しかしマルチフェロイック系では、従来のマクスウェルの関係式に、交差相関に起因する項が 現れると報告されている[1]。我々は、この効果の検証を目的として、オケルマナイト酸化物 Sr₂CoGe₂O₇の MCE をマクロな電気分極が消失する B||[100]と、有限の電気分極が残る B||[110]と の比較を行た。当日は理論計算との比較を通して、実験結果を議論する。

[1] M. M. Vopson, J. Phys. D: Appl. Phys., 46, 345304 (2013), and A. Planes et al., Philos. Mag. 94, 1893 (2014).

[2] N. A. Zarkevich and V. I. Zverev, Crystals, 10 815 (2020).

- [3] T. Kihara et al., Rev. Sci. Instrum., 84, 074901 (2013).
- [4] T. Kihara *et al.*, *Phys. Rev. B*, **90**, 214409 (2014).
- [5] T. Kihara et al., Phys. Rev. Mater., 5, 034416 (2021).

High-field magnetization and magnetoelectric effect of polar

magnet Fe₂Mo₃O₈

Chen Qian^A, 徳永将史^A, 三宅厚志^A, 車地崇^B, 賀川史敬^{C,D}, 松浦慧介^D, 十倉好紀^{D,E} ^A東京大学物性研究所,^B東京大学大学院新領域創成科学研究科, ^C東京工業大学理学院, ^D理化学研究所 創発物性科学研究センター, ^E東京大学 東京カレッジ

We report high-field studies of magnetization (M) and electric polarization (P) on a polar magnet, Fe₂Mo₃O₈. The tetrahedral and octahedral sites of 3d transition metal ions host both antiferromagnetic (AFM) and ferrimagnetic (FM) orders [1]. We clarified the phase diagram in the temperature (T) – field (H) plane up to 56 T along the crystallographic polar axis using pulsed magnetic fields. Hysteresis of the field-induced transition reveals the comparable relaxation time of the first-order transition to the pulsed-field period of about 36 ms. At temperatures below 3 K, we observed distinctions between virgin and secondary traces of M-H and P-H curves. In addition, step-like structures appeared in the FM phase above 38 T within the same temperature region as shown by vertical arrows in Fig. 1. In order to obtain a complete phase diagram, magnetization measurements in higher magnetic fields will be performed in the near future.



Figure 1 The magnetization curves of $Fe_2Mo_3O_8$ in magnetic fields along the *c* axis applied up to 56 T. Step-like structures are observed in the curves in the FM phase. The 1st and 2nd captions denote the virgin and secondary traces. Numbers in parentheses are offsets from 0. At 4.2 K, there is almost no different between virgin and secondary traces.

[1] T. Kurumaji et al., Phys. Rev. X 5, 031034 (2015).

Development of pulsed magnet system up to 35 Tesla at MLF in J-PARC

Masao Watanabe^A, Hiroyuki Nojiri^B

^A J-PARC Center, JAEA, ^BInstitute for Materials Research, Tohoku Univ.

In J-PARC MLF, we have been developing a transportable pulsed magnet system for high magnetic field as one of the sample environment equipment so that it can be used in various beamlines.

In the 1st step, we have installed a compact capacitor bank of 16 kJ and combined it with the a mini-horizontal solenoid magnet. It generates magnetic field of up to 30 T and the scattering angle, 2θ , preserves up to 30.6° for forward scattering. A sample is cooled down to 2 K using a commercial liquid helium flow cryostat.

As the 2nd stage of the development, we have changed the sample cryostat from a bath type cryostat to a closed-cycle Gifford–McMahon (GM) refrigerator. This change enables us to increase the scattering angle, 2θ , to 42° by keeping the maximum field 30 T and to operate the system automatic with minimum maintenance. Generally, equipment using liquid helium flow cryostat can achieve low temperatures down to 2 K, handling liquid helium is relatively difficult for users. This is the reason why we have developed a new pulsed magnet system using a closed-cycle refrigerator. Figure 1 shows the cross-section of the pulsed magnet equipment.

A new coil has developed to perform neutron scattering experiments with high magnetic pulsed fields of up to 35 T. The coil was wound with 1*1.5 mm square wire, which is made of a high-tensile strength Cu–Ag alloy. Figure 1 shows a photograph of the coil. It has inner and outer diameters of 14 and 50 mm, respectively, with the axial length of 21 mm. The inductance and resistance of it immersed in liquid nitrogen are 369 μ H and the resistance and 58 m Ω at 77 K, respectively. Figure 2 shows the example of the output waveform of the coil. The coil produces 35 T with 6.6 kA at 18.1 kJ charged energy of the capacitor of the power supply.

In this presentation, we will report on the characteristics and current status of the pulsed magnet system.



Fig.1. Photograph of the coil.



Fig. 2. Example of the output waveform of the coil.

P-03

GGG 基板の磁気熱量効果を用いた SQUID 磁束計用冷凍機の開発

<u>三川基</u>^A,鳴海康雄^A,高阪勇輔^B,萩原政幸^A ^A阪大先端強磁場,^B大阪公大院工電子物理

Development of refrigeration system for a superconducting quantum interference device magnetometer using magnetocaloric effect of GGG substrates

<u>M. Mikawa^A, Y. Narumi^A, Y. Kousaka^B, M. Hagiwara^A</u>

^AAHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ., ^BDep. Phys. Electro., Osaka Met. Univ.

低温環境の実現は、熱力学・統計力学と、その実演の舞台である物性物理学の発展に 大きく貢献してきた。そして今なお新奇現象が発見される極低温の世界は、物性物理学 の研究において重要な測定環境の一つであり、特に強相関電子系物質の超伝導やフラス トレート系物質の量子スピン液体といった量子物性現象の解明には、1 K 以下の極低温 が不可欠ある。

我々の研究室はカンタム・デザイン社製の SQUID 磁束計という、手軽に精度の高い 磁気測定ができる装置を所有しているが、到達可能な最低温度 1.8K は量子物性研究を 行う上で十分な値ではない。そこで、現在とても高価で入手が困難な³He を使わない極 低温環境実現方法として断熱消磁法を利用した、SQUID 磁束計に組み込み可能な冷凍 機の開発を行った。今回、磁気冷却材料および磁気温度計として用いた GGG(Gd₃Ga₅O₁₂) は、古くから磁気冷却のために使用されている物質の一つで、小さな体積で比較的大き なエントロピー変化を得ることができるのが特徴である。特に本研究では、高い冷却能 力と、後に述べる高感度な磁化検出を両立するために、高品質な単結晶が容易に入手可 能な GGG 単結晶基板を利用した。具体的には、サイズ 10×5×0.5mm の GGG 基板 10 枚を縦に一様にサファイア板上に固定し、その中心部に測定試料を配置して磁気測定を 行った。このように一様にまんべんなく配置された GGG の全長(100 mm)は MPMS のピ ックアップコイルの長さ(30 mm)より十分長いため、 GGG の信号はほとんど検出され ずにバックグラウンドとして無視することができる。測定試料として、もう一つ追加し た GGG、および高純度の亜鉛(Tc=0.85 Kの超伝導体)を用い、その磁化過程と超伝導特 性の磁場温度依存性から温度評価を行った。その結果、最低到達温度 0.27 K を確認し た。本講演では、開発した SQUID 磁束計用断熱消磁冷凍器の詳細と、さらなる低温を目 指すための装置開発の進捗状況について紹介する。

パルス強磁場を用いた YBCO バルク超伝導磁石の着磁特性

<u>新正朋暉</u>^A,三川基^A,鳴海康雄^A,内藤智之^B,金道浩一^C,萩原政幸^A ^A阪大先端強磁場,^B岩手大理工,^C東大物性研

Magnetization of the YBCO bulk superconducting magnet by pulsed high magnetic fields

<u>T. Aramasa</u>^A, M. Mikawa, Y. Narumi^A, T. Naito^B, K. Kindo^C, and M. Hagiwara^A ^AAHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ., ^BFac. Sci. Eng., Iwate Univ., ^CISSP, Univ. Tokyo

バルク超伝導磁石とは、超伝導転移温度以下でみられる磁場捕捉能力により、超伝導物質 に外部から侵入した磁場が、外部磁場をゼロにした後も超伝導体内部に残留することによ り実現する、超伝導永久磁石である。広く使用されている強磁性体の永久磁石では、含まれ る磁性元素に固有の磁気モーメントによって発生可能な磁場の上限(約1T)が決まってい る。しかし、臨界磁場に依存するものの、バルク超伝導磁石が捕獲できる磁場は遙かに大き く、パルス強磁場を用いた着磁方法(パルス法)では、GdBCOバルク超伝導磁石において 5.2 T[1]、定常強磁場を用いた手法(FC法)により17.6T[2]の捕捉磁場が報告されている。一 般的なコイルタイプの電磁石と比較すると、コンパクトで外部電源を持たないバルク超伝 導磁石の特徴を生かし、超伝導フライホールを浮上させる超伝導軸受けとしての産業応用 が進んでいる一方で、小型で可搬型のMRI装置や大型の電磁石の導入が困難な実験装置な ど、基礎研究分野への応用も期待されている。

前述のように FC 法とパルス法による捕捉磁場には大きな差が存在する。しかし、印加磁 場の大きさ、持続時間、時間構造や、試料冷却方法などを工夫することで、パルス法による 捕捉磁場を FC 法の磁場に近づけることが出来るのではと我々は考えている。そこで、大阪 大学先端強磁場科学研究センターが保有するパルスマグネット群と磁場波形の時定数を決 める素子の切換が容易に可能な 10 MJ コンデンサ電源を組み合わせ、バルク超伝導磁石の 着磁特性を調べる実験を行った。今研究では Seeded melt growth 法で育成した円盤状(14 Φ) の YBCO (CAN SUPERCONDUCTORS, s.r.o.)を測定物質として用いた。また、磁場とと もに重要となる安定した温度制御を実現するために、ヘリウム連続フロー型のクライオス タットを新たに開発した。補足磁場の測定には YBCO の中央表面に設置したホール素子 (OECO, BHT-921)を使用した。最初に行った液体窒素温度中の 77K での実験では、最大 0.6 T の磁場捕捉を記録し、温度を 50 K まで下げることで、捕捉磁場が 2 T に向上することを 確認した。本講演では、様々な磁場印加条件における着磁特性の詳細と、バルク超伝導磁石 を利用した物性研究に向けた展望について紹介する。

[1] H. Fujishiro et al., Physica C 445, 334 (2006).

[2] J. H. Durrell et al., Supercond. Sci. Technol. 27, 082001 (2014).

UTe2のメタ磁性転移近傍での電子状態の研究

<u>須藤健太^A</u>, T. Helm^{B,C}, 木俣基^A, 宮田敦彦^C, J. Stirnat^{C,D}, T. Förster^C, J. Hornung^{C,D}, M. König^B, I. Sheikin^E, A. Pourret^F, G. Lapertot^F, 青木大^A, J.-P. Brison^F, G. Knebel^F and J. Wosnitza^{C,D}

▲東北大金研,^Bマックスプランク固体化学物理研,^Cヘルムホルツセンター強磁場研, ^Dドレスデン工科大固体物質物理研,^E国立強磁場研グルノーブル,

Fグルノーブル・アルプ大学際研

High-magnetic-field investigation of electronic state across the metamagnetic transition in the spin-triplet superconductor UTe₂

K. Sudo^A, T. Helm^{B,C}, M. Kimata^A, A. Miyata^C, J. Stirnat^{C,D}, T. F[•]orster^C, J. Hornung^{C,D},
M. K[•]onig^B, I. Sheikin^E, A. Pourret^F, G. Lapertot^F, D. Aoki^A, J.-P. Brison^F, G. Knebel^F and J. Wosnitza^{C,D}

^AIMR, Tohoku University, ^BMPI for Chem. Phys. Sol., ^CHLD-EMFL, HZDR, ^DInst. für Fest. -und Mat. Phys., TU Dresden, ^ELNCMI-EMFL, CNRS, UGA, ^FUniv. Grenoble Alpes, CEA, Grenoble-INP, IRIG, PHELIQS,

重い電子系のスピン三重項超伝導体 UTe2の強磁場中での超伝導相が、近年注目を集めている[1,2,3]。これまで、*B*//b 軸でのメタ磁性転移が起きる 35T まで続く超伝導相や[2,4]、磁場を b 軸から c 軸方向へ 30° 傾けたときのメタ磁性転移(40T)直後に現れる リエントラント超伝導相が報告されている[1]。この強磁場中での超伝導状態の機構に は、メタ磁性転移近傍の磁気揺らぎが深くかかわっていると考えられているが、明確な 起源は明らかになっていない。

本研究では集東イオンビーム(FIB)で作製した UTe2の微細加工デバイスを用い、強磁 場中での精密電気輸送特性の測定を試みた。実験では回転プローブを用い *b-c* 面内で磁 場方向を変化させ、最大 70T のパルス強磁場での磁気トルク、磁気抵抗、ホール効果の 測定を行った。

磁場を c 軸方向へ 30° 傾けた状態での磁気抵抗の温度依存性の実験結果から、リエントラント超伝導の記録的な上部臨界磁場 B_{c2} ~75T を見積もった。さらに、ホール効果の磁場角度依存性が、このリエントラント超伝導相近傍で異常な振る舞いを示すことを発見した。発表では、実験結果の詳細を示し UTe₂の高磁場超伝導相の電子状態について議論する。

[1] S. Ran, et al., Nature Physics. 15, 1250-1254 (2019).

[2] G. Knebel, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 88, 063707 (2019).

[3] W. Knafo, et al., Communications Physics 4, 40 (2021).

[4] A. Rosuel, et al., Arxiv.2205.04524 (2022).

直交ダイマー系物質 SrCu₂(BO₃)₂における巨大弾性異常

<u>野村肇宏^A</u>, 宮田敦彦^B, S. Zherlitsyn^B, 石井裕人^A, 小濱芳允^A, 松田康弘^A, 池田暁彦^C, C. Zhong^D, 陰山洋^D, P. Corboz^E, F. Mila^F

^A東大物性研, ^BHLD-HZDR, ^C電通大, ^D京大工, ^EUniv. of Amsterdam, ^FEPFL

Elastic anomalies of the plateaus of the orthogonal-dimer system SrCu₂(BO₃)

T. Nomura^A, A. Miyata^B, S. Zherlitsyn ^B, Y. Ishii^A, Y. Kohama^A, Y. H. Matsuda^A,

A. Ikeda^C, C. Zhong ^D, H. Kageyama^{D,} P. Corboz^E, F. Mila^F

^AISSP Utokyo, ^BHLD-HZDR, ^CUniv. of Electro-Communications, ^DKyoto Univ., ^EUniv. of Amsterdam, ^FEPFL

二次元直交ダイマー系物質 SrCu₂(BO₃)₂の磁化過程は多彩な磁化プラトーを示し、 多くの研究者を魅了してきた。これまでの研究で118 T までの磁化曲線[1]が報告されて いたが、飽和磁場までの研究は過去に例がない。本研究では150 T 級の超音波測定およ び磁歪測定から、飽和磁場までの格子物性測定に成功したので報告する。

実験結果を右図に示す[2]。いずれも磁 場は c 軸に平行で、測定温度は 2-4 K であ る。上段から、超音波音速、磁歪、磁化の 磁場依存性に対応する。超音波測定は面内 の縦波モード(c₁₁)と横波モード(c₆₆)の 実験を行った。1/2 プラトー相で横波音速が 半分となる、極めて大きな弾性異常が観測 された。1/2 プラトー以降で 3 つの異常(矢 印)が観測され、磁歪の結果とも整合して いる。理論計算との比較から、140 T の異常 が磁化の飽和に対応すると結論した。講演 では、50% という巨大な音速の変化の起源 について自由エネルギーの微分量という観 点から議論する。

[1] Y. H. Matsuda *et al.*, PRL 111, 137204(2013).

[2] T. Nomura et al., arXiv:2209.07652, (2022).



Fig: (a) Relative change of the ultrasound velocity(b) magnetostriction (c) magnetization.

強磁場下における CeCoSi の新奇秩序状態の研究

<u>神田朋希</u>^A,石川孟^A,今城周作^A,谷田博司^B,小濱芳允^A ^A東京大学物性研究所,^B富山県立大学工学部

Novel Ordered state of CeCoSi observed under High Magnetic Fields

<u>T. Kanda^A</u>, H. Ishikawa^A, S. Imajo^A, H. Tanida^B, Y. Kohama^A ^AISSP, Univ. of. Tokyo, ^BLiberal Arts and Sciences, Toyama Pref. Univ.

CeCoSi は $T_N = 9.4 \text{ K}$ で反強磁性秩序を示す近藤格子系化合物である。近年本物質では、 $T_0 = 13 \text{ K}$ で反強磁性状態とは別の秩序状態となることが報告された[1]。II 相と呼ばれ るこの秩序状態は、磁場の印加によって転移温度が増大していくという性質を示し、 何らかの多極子の秩序が疑われている。II 相に注目した研究は現在までに複数報告さ れているが[2-4]、磁化測定に関しては 7 T までの測定しか行われていない。更に多極 子秩序を特徴づける結晶場パラメータも、磁場下の物性測定に基づいた報告はなされ ていない。

我々は CeCoSi の強磁場下における物性を明らかにするために、パルス強磁場下での 磁化、比熱測定、磁気トルクを行った。磁化測定では、図 1(a)に示すように反強磁性秩 序相から II 相への転移を磁化の肩構造として観測した。また低温における比熱は一般 に電子比熱に対応する係数 γ と格子比熱に対応する係数 α を用いて $C_p = \gamma T + \alpha T^3$ と表わ

されるが、CeCoSiではII相への転移に伴って、図1(b) における線の傾きに対応する係数αが増大する様子 が観測された。格子比熱が磁気秩序や多極子秩序に 伴って変化することは考えにくく、この結果はII相 の反強的な秩序に由来するGoldstoneモードの増強を 反映していると考えられる。

本講演では、強磁場下における物性測定の結果から、CeCoSiのII相における秩序変数を議論する。また結晶場効果を取り入れて磁化曲線の計算を行ったので、実験結果との比較を通して結晶場パラメータも議論する。

- [1] H. Tanida et al., J. Phys. Soc. Jpn. 88, 054716 (2019).
- [2] M. Manago et al., J. Phys. Soc. Jpn. 90, 023702 (2021).
- [3] T. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 064704 (2022).
- [4] H. Hidaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 094701 (2022).



I (a): Magnetization Curves at 1.5 K. (b): Specific heat plotted as C_p/T vs T^2 at 0 T and 27.4 T.

P-08

空間反転対称性の保たれたスキルミオン物質 GdRu,Si,における量子振動

松山直史, 野村肇宏, 今城周作, 野本拓也^A, 有田亮太郎^{A,C}, 須藤健太^B,木俣基^B,

N. D. Khanh^C, 高木里奈^D, 十倉好紀^{C,D,E}, 関真一郎^D, 金道浩一, 小濱芳允 ^A阪大先端強磁場, ^B東大物性研, ^C阪大極限セ

Quantum oscillations in a centrosymmetric skyrmion host GdRu₂Si₂

N. Matsuyama, T. Nomura, S. Imajo, T. Nomoto^A, R. Arita^{A,C}, K. Sudo^B, M. Kimata^B,

N. D. Khanh^C, R. Takagi^D, Y. Tokura^{C,D,E}, S. Seki^D, K. Kindo, Y. Kohama

ISSP, Univ. of Tokyo, ^ARCAST, Univ. of Tokyo, ^BIMR, Tohoku Univ., ^CRIKEN CEMS,

^DDept. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo, ^ETokyo College, Univ. of Tokyo

磁気スキルミオンはトポロジカルに保護された粒子性を持つ渦状のスピン構造であ り、次世代磁気メモリの情報担体の候補として注目されている。スキルミオンは元来ジ ャロシンスキー・守谷相互作用が働く、空間反転対称性の破れた系において発見されて きた。一方、近年では空間反転対称性の保たれた希土類合金において、スキルミオンの 観測が報告されており[1,2]、磁性を担う Gd³⁺イオンが正方格子を組んだ正方晶物質で ある GdRu₂Si₂はそれらの一つである[2]。これらの系におけるスキルミオン安定化の起 源についてははっきりしていない。遍歴電子が媒介する相互作用のフラストレーション による新たな形成機構が理論的に提唱されているが[3,4]、第一原理計算によればこの相 互作用は小さく、Gd 原子内の強磁性・反強磁性的な異なる相互作用の競合が主要因で あると提案されている[5]。

本研究では、空間反転対称性の保たれたスキルミオン物質の一種である GdRu₂Si₂に おいて磁気トルク・抵抗の測定を行い、その両方で強制強磁性相において量子振動を観 測した。詳細な角度依存性の測定と第一原理計算との比較により、フェルミ面を決定し た。また、磁気トルクの量子振動は低磁場側の磁気相でも異なる振動数で観測され、伝 導電子と局在スピンの相互作用を示唆する。

講演ではこれら量子振動の振る舞いから本系における主要な相互作用について議論 し、スキルミオン形成機構に迫る。

[1] T. Kurumaji et al., Science 365, 914-918 (2019).

[2] N. D. Khanh et al., Nat. Nanotech. 15, 444-449 (2020).

[3] R. Ozawa et al., Phys. Rev. Lett. 118, 147205 (2017).

[4] S. Hayami et al., Phys. Rev. B 95, 224424 (2017).

[5] T. Nomoto et al., Phys. Rev. Lett. 125, 117204 (2020).

Development of thermoelectric measurements in pulsed magnetic

fields

Zhisheng Wu^A, Qian Chen^A, Yuto Kinoshita^A, Atsushi Miyake^A, Masashi Tokunaga^A ^AThe Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Kashiwa 277-8581, Japan

The thermoelectric effect has been attracting significant attention as an essential phenomenon supporting the energetic utilization of waste heat [1]. In order to put this effect into practical use, the development of materials with a high figure of merit, which determines energy conversion efficiency, has been underway. On the other hand, recent theoretical study proposed that application of high magnetic fields increases the thermopower of Dirac/Weyl semimetals. In their quantum limit state, the thermopower is expected to be linearly increased with the applied field without showing saturation [2]. Therefore, corresponding measurements up to high-enough magnetic fields are crucially important.

In this context, we developed a system to measure the Seebeck effects in pulsed magnetic fields with duration of 36 ms. We applied temperature gradient in a sample using a small resistive heater. The temperature gradient and thermoelectric voltage are measured by two pairs of chromelconstantan thermocouples connected to the sample. To remove the background voltage, we measured the difference in voltage with and without heat current to evaluate the Seebeck effect. Efficiency of the measurement system was first examined by measuring Seebeck effects in single crystals of bismuth. For the heat current applied along the c axis, we obtained the Seebeck coefficients at a zero-field that shows consistent values with literature [3]. Then we studied the effect of magnetic fields using this setup under pulsed magnetic fields. The results of magneto-Seebeck effects in bismuth and tellurium will be presented.

[1] A. Shakouri, Annu. Rev. Mat. Res. 41, 399 (2011).

- [2] B. Skinner B and L. Fu, Sci. Adv. 4, eaat2621 (2018).
- [3] B. S. Chandrasekhar, J. Phys. Chem. Solids, 11, 268 (1959).

P-10

光造形 3D プリンターを用いた 55T パルス強磁場 ESR 装置の開発

瀬川和磨^A, 原茂生^B, 櫻井敬博^B, 大久保晋^{A,C},

太田仁 A.C, 松本正茂 D, 栗田伸之 E, 田中秀数 E

^神戸大院理, ^B神戸大研究基盤セ, ^C神戸大分子フォトセ, ^D静岡大理, ^E東工大院理

Development of 55T Pulsed High Field ESR System using SLA 3D Printer

K. Segawa^A, S. Hara^B, T. Sakurai^B, S. Okubo^{A,C},

H. Ohta^{A,C}, M. Matsumoto^D, N. Kurita^E and H. Tanaka^E

^AGrad. Sch. of Sci., Kobe Univ., ^BCSREA, Kobe Univ., ^CMPRC, Kobe Univ.,

^DDept. Phys., Shizuoka Univ., ^EGrad. Sch. of Sci. and Eng., Tokyo Inst. of Tech.

パルス強磁場 ESR 装置のインサーション[1]は、高電圧の電極が近くにあるため、絶縁に配慮した設計が必要であるが、金属製で銀ロウによる接着や加工の困難さから形状の自由度が少なく、製作には高い工作技術が必要だった。近年登場した光硬化型 3D プリンターは、ABS 樹脂系のレジンに紫外線を照射して硬化させることで造形する。樹脂は絶縁性であり、0.1mm 程度の精度で自由な形状の立体を作ることができる。本研究では、3D プリンターの造形物の耐久性に関して調査し、インサーションを製作した。

光硬化型 3D プリンターとして、Formlabs 社-Form 2、ELEGOO 社-Mars 3 を用いてテ ストおよびインサーション製作を行った。設計には Autodesk 社 Fusion360 を使用した。

Formlabs 社タフ 2000 レジン、ELEGOO 社水洗レ ジンで NW16 フランジを作成し、ロータリーポンプ で減圧テストを行った結果、ポンプの到達真空度 10⁻¹Pa の真空保持が可能であった。また同じ造形物 を液体窒素に投入しても低温の熱収縮で壊れないこ とを確認した。室温空間となるキャップ部を光造形 3D プリンターで作り (Fig. 1)、導波管はステンレス 製のライトパイプで作ることで、光を伝達できるよ



Fig. 1. 光造形 3D プリンターで作 ったインサーションのキャップ部

うにしている。常圧部分とインサーション内部は、Oリングを用いたポリエチレン窓に よって真空止めを行っている。プリンターの造形精度により、ライトパイプは高精度に 鉛直に配置している。また、電極端子は樹脂で絶縁されたまま引き出せている。

本発表では、圧力下で興味深い振舞いが報告がされている量子スピン系物質 CsFeCl₃ [2,3]の ESR 測定を行なったので、合わせて報告する。

[1] H. Ohta et al., J. Phys. Conf. Serie. 51, 611 (2006).

[2] M. Chiba et al., Solid State Commun. 63, 427 (1987)

[3] 二本木克旭 他、日本物理学会第77回年次大会(2022年)概要集、17aT11-3

フィードバック回路を用いた力検出型ジャイロトロン ESR 測定

<u>増田祥大</u>^A,高橋英幸^B,廣澤康平^c,伊藤丈朗^c,石川裕也^c,藤井裕^c, 光藤誠太郎^c,大道英二^A,太田仁^{A,B}

▲神戸大学大学院理学研究科, ^B神戸大学分子フォトサイエンス研究センター, ^C福井大学遠赤外領域開発研究センター

Force-detected electron spin resonance spectroscopy using a gyrotron and a feedback circuit

<u>S. Masuda</u>^A, H. Takahashi^B, K. Hirozawa^C, T. Ito^C, Y. Ishikawa^C, Y. Fujii^C, S. Mitsudo^C, E. Ohmichi^A, H. Ohta^{A,B}

^AGraduate School of Science, Kobe University

^BMolecular Photascience Research Center, Kobe University

^CResearch Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

電子スピン共鳴(ESR)測定法では、一般に測定周波数が高周波域になるほど高分解 能となり、測定感度は光源の出力が大きいほど向上する。したがって高出力・高周波光 源であるジャイロトロン[1]を用いることで高い感度と高分解能を両立することが可能 となる。実際、我々の研究グループではメンブレンを用いた力検出型 ESR 測定にジャ イロトロン光源を組み合わせることにより、室温下において微小試料の高周波 ESR 分 光測定が可能になることを報告してきた[2]。しかし、これまでの測定では高出力光源 のパルス発振によりメンブレンが振動しベースラインが不安定となる課題があったた め、本研究ではフィードバック回路を用いてベースラインを安定化する手法を開発した。

開発した装置では、メンブレンの変位を検出す るファイバー光学干渉計の干渉強度を一定に保つ ようにピエゾ素子を用いてフィードバックを加え た。図1は本研究で得られた DPPH の 206 GHz、 293 K における ESR 測定結果である。7.346 T にお いて明瞭な ESR 信号を観測することに成功した。 また、173 GHz においても同様に ESR 信号の観測 に成功した。今後は 2 次高調波をはじめとした高 次高調波における ESR 信号の観測が期待される。 そのため、ベースラインのさらなる安定化や高次 高調波発生などを進めていく必要がある。



[1] T. Idehara et al., J. Infrared. Millim. Terahrtz Waves, 33, 724 (2012)

[2] H. Takahashi et al., Appl. Phys. Lett. 118, 022407 (2021)

異種イオンからなる S=1/2 スピンダイマー物質

CuVOF4(H2O)6·H2Oの多重極限 ESR

西口律輝^A, 櫻井敬博^B, D. Kamenskyi^C, 大久保晋^D, 太田仁^D, S. P. M. Curley^E ^A神戸大学院理,^B神戸大研究基盤セ,^Cアウクスブルク大 ^D神戸大分子フォトセ,^Eウォーリック大

ESR measurement under Multi-extreme Conditions of S=1/2 Spin Dimer Composed of Two Different Ions CuVOF4(H2O)6·H2O

<u>R. Nishiguchi^A</u>, T. Sakurai^B, D. Kamenskyi^C, S. Okubo^D, H. Ohta^A, S.P.M. Curley^E

^AGraduated School of Science, Kobe Univ., ^BResearch Facility Center for Science and

Technology, Kobe Univ., ^CCenter for Electronic Correlations and Magnetism, University of

Augsburg, Univ.,^DMolecular Photoscience Research Center, Kobe Univ., ^EDepartment of Physics, University of Warwick

異種磁性イオン Cu²⁺と V⁴⁺からなる S=1/2 反 強磁性ダイマー物質 CuVOF₄(H₂O)₆·H₂O の多重 極限 ESR 測定を行った。本系は、V⁴⁺イオンを 囲む八面体と Cu²⁺イオンを囲む八面体が頂点 共有で形成する反強磁性ダイマーを基本構造 とする。本系の特徴は二つある。一つ目が、異 種イオンからなるダイマーであるため、ユニッ ト内に反転対称性がなく DM 相互作用が存在す る点である。これにより、ESR 測定では本来禁 制遷移である基底一重項から励起三重項への 直接遷移が観測される[1]。二つ目は、圧力下の X 線回析から 2.3GPa 程度の圧力下で構造相転



Fig.1. Frequency-field diagram obtained at several pressures.

移する点である[2]。そこで転移圧力前後でのスピン状態を調べることを目的に、本系の 多重極限 ESR 測定を行った。Fig.1 はいくつかの圧力下で得られた電磁波の周波数と共 鳴磁場の関係である。まず、圧力下でも直接遷移を観測することができた。またゼロ磁 場でのエネルギーギャップが圧力の増加に伴い大きくなり、さらに構造相転移後に急激 に大きくなる事が分かった。

[1] S. P. M. Curley et al., Phys. Rev. B 104, 214435 (2021).

[2] S. P. M. Curley, *Exotic ground states and excitations in quantum magnets*, University of Warwick, 2021, Ph. D. thesis

P-13

ワイル反強磁性体 EuMg₂Bi₂における巨大異常ホール効果と パルス強磁場による量子振動観測

<u>近藤雅起</u>^A,酒井英明^A,越智正之^{A,B},栗原綾佑^{C,D},三宅厚志^C,山崎裕一^{E,F}, 徳永将史^C,中尾裕則^G,黒木和彦^A,木田孝則^H,萩原政幸^H,村川寛^A,花咲徳亮^{A,I} ^A阪大院理,^B阪大院理付属フォアフロント研究センター,^C東大物性研,^D東京理科大, ^E物材機構,^F理研 CEMS,^GKEK 物構研,^H阪大先端強磁場,^I阪大先導的学際研究機構スピ ン学際研究部門

Large anomalous Hall effects and quantum oscillations with field-tunable Weyl points in antiferromagnetic degenerate semiconductor EuMg₂Bi₂

M. Kondo^A, H. Sakai^A, M. Ochi^{A, B}, R. Kurihara^{C, D}, A. Miyake^C, Y. Yamasaki^{E, F},

M. Tokunaga ^C, H. Nakao ^G, K. Kuroki ^A, T. Kida ^H, M. Hagiwara ^H, H. Murakawa ^A and N. Hanasaki ^{A, I} ^A Department of Physics, Osaka Univ., ^B Forefront Research Center, Osaka Univ., ^C The Institute for Solid State Physics, The Univ. of Tokyo, ^D Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ.

of Science, ^E NIMS, ^F RIKEN CEMS, ^GKEK IMSS, ^HAHMF, Graduate School of Science, Osaka Univ.,

¹Spintronics Research Network Division, Institute for Open and Transdisciplinary Initiatives, Osaka Univ.

ワイル磁性体では、ワイル点における大きなベリー曲率を反映して、巨大な異常ホール効果が発 現するため近年注目を集めている。しかしながら、これまでに見出されたワイル磁性体のほとんど が複雑なバンド構造であったため、更なるワイル磁性体の理解には、単純なバンド構造を有する系 の開拓が必須であった。そこで我々は、新たなワイル磁性体候補物質として、EuMg2Bi2に着目した。 過去の第一原理計算や ARPES 測定から、Γ点で小さなフェルミ面が形成されることが分かってい る[1]。しかし、詳細なバンド構造や、ワイル点を反映した輸送現象については不明であった。

本研究では、EuMg₂Bi₂の純良単結晶の合成に成功し、50T までの磁場下で様々な物性測定を行った。その結果、磁化が飽和する $B_c = 4 \text{ T}$ 付近にて、磁化曲線を反映した異常ホール効果を観測した。 B_c 以上の強制強磁性 (f-FM) 領域での異常ホール角 Θ_{AH} は、他のワイル強磁性体に匹敵する大きさであった (図 1(a))。さらに 10 T 以上の強磁場領域では、磁気抵抗及び弾性定数にて量子振動が観測された (図 1(c))。この結果と第一原理計算の比較により、フェルミエネルギー E_F を実験的に決定

することに成功した。その結果、f-FM 領 域では、*E_F*のごく近傍にワイル点が形成さ れることが明らかになった(図 1(b))。巨大 な異常ホール角はこのワイル点を反映し たものと思われる[2]。当日はネルンスト効 果測定の結果等、最新のデータも交えて議 論を行う。

[1] M. Marshall *et al.*, J. Appl. Phys. **129**, 035106 (2021).
[2] M. Kondo *et al.*, arXiv:2206.04577 (2022).



図 1: (a) 異常ホール角 Θ_{AH} の磁場依存性。(b) 反強磁性相及び 強制強磁性相における E_F 付近のバンド構造。(c) 抵抗率 ρ_{xx} の 磁場依存性。黒い三角は量子振動のピーク位置を示す。

直流電流下における反強磁性金属 EuMnBi₂の量子振動測定

宮本雄哉^A, <u>酒井英明</u>^{A,B}, 木俣基^B, 近藤雅起^A, 村川寬^A, 花咲徳亮^A ^A大阪大学大学院理学研究科,^B東北大学金属材料研究所

Measurement of quantum oscillations

in antiferromagnetic metal EuMnBi2 under DC current

Y. Miyamoto^A, <u>H. Sakai^{A,B}</u>, M. Kimata^B, M. Kondo^A, H. Murakawa^A and N. Hanasaki^A ^ADept. of Phys., Osaka Univ., ^BIMR, Tohoku Univ.

近年、磁気秩序によって空間反転対称性と時間反転対称性が破れる金属において、圧 電効果の金属版となる磁気圧電効果が発現することが、対称性による拡張多極子の理論 から予測された[1]。さらに、実験的に反強磁性金属 EuMnBi₂(図 1(a))において磁気圧電 効果に由来する電流誘起の格子歪みがレーザーのドップラー効果から観測され、注目を 集めている[2]。

本研究では、電流誘起の格子歪みをフ エルミ面歪み(図 1(b))から検出するこ とを目的に、EuMnBi2の層間方向の抵抗 率 ρzzの磁場依存性を様々な大きさの直 流電流下で測定した(図 1(c))。ρzzの量子 振動の電流依存性を調べることで、磁気 圧電効果を電子状態から観測すること を目指した。

直流電流下での測定では、試料を超流 動状態となった液体 He に完全に浸すこ とで、電流によるヒーティングを大きく 抑えることができた。この結果、先行研 究[2]の約 180 倍の電流密度(=2×10⁶ A/m²)に対応する 120 mA までの直流電 流を印加することに成功し、電流増加 に伴う磁気抵抗効果の変化を観測し た。さらにこれらの変化は温度上昇に 伴う変化(図1(d))とは一致しない部分 が見られた。

発表では量子振動の詳細な解析を もとに電流の効果について議論する。



図1:(a)EuMnBi₂の*T*_N(Eu)以下での磁気構造。 (b)フェルミ面の模式図。赤い矢印の方向は、 予想される歪みの方向。

ρzz の磁気抵抗効果における(c)印加電流依存 性、(d)温度依存性。試料の断面積 0.06 mm²。

[1] H. Watanabe et al., Phys. Rev. B 96, 064432(2017).

[2] Y. Shiomi et al., Phys. Rev. Lett. 122, 127207(2019).

スピン 1/2 二本足ラダーCu(DEP)Cl₂の強磁場磁性

<u>森本大幹</u>^A,木田孝則^A,鳴海康雄^A,本多善太郎^B,金道浩一^C,萩原政幸^A ^A阪大先端強磁場,^B埼玉大院理工,^C東大物性研

High-field magnetism of the spin-1/2 two-leg ladder Cu(DEP)Cl₂

T. Morimoto^A, T. Kida^A, Y. Narumi^A, Z. Honda^B, K. Kindo^C, M. Hagiwara^A

^AAHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ., ^BGrad. Sch. Sci. & Eng., Saitama Univ., ^CISSP, Univ. Tokyo,

Cu(DEP)X₂(X=Br,Cl)は、磁性イオン Cu²⁺が二本足梯子の構造を成す物質で、横木(rung)の方向を X、足(leg)の方向を DEP(2,3-ジエチルピラジン)が架橋する[1]。先行研究により、Cu(DEP)Br₂は低温で非磁性基底状態と磁気的な第一励起状態の間にエネルギーギャップ(Δ)を持ち[2]、磁化測定から[3]ギャップは H_{c1} = 8.0 Tの磁場で閉じ、 H_{c2} = 24 T で磁化が飽和することが分かっている。これらの磁場から、Cu²⁺イオン間の横木と足方向の相互作用がそれぞれ J_{rung} = 18.9 K, J_{leg} = 7.1 K と見積もられている。さらに、ESR 測定で決定された g 値(g = 2.09)と H_{c1} を用いて Δ = 11.8 K と求められている。

本研究では、同様な結晶構造を有する Cu(DEP)Cl₂の強磁場磁化、磁化率、ESR 測定 を行い、Cu(DEP)Br₂の実験結果と比較して考察を行った。図1に Cu(DEP)Cl₂の粉末試 料の磁化過程とその微分を示す。微分磁化のピークから $H_{c1} = 7.5 \text{ T}$ と $H_{c2} = 20 \text{ T}$ が分か り、これらの値と ESR 測定で決定した g 値(g=2.11)を用いて相互作用($J_{rung} = 16.5 \text{ K}$, $J_{leg} = 5.9 \text{ K}$)と、エネルギーギャップ($\Delta = 10.6 \text{ K}$)を求めた。Cu(DEP)Br₂に比べてこれらは小さ いことが分かり、結晶構造からの予想とも一致した[4]。

Cu(DEP)Cl₂の磁化率に関して、1000 Oe の磁場 下ではCu(DEP)Br₂の磁化率と類似して10 K あた りにピークを持ち、それ以下の温度で指数関数的 に減少する振る舞いが観測されたが、印加磁場を 小さくして 500 Oe 以下にすると、17 K から 15 K にかけて急激に増大してそれ以下の温度での振 る舞いは 1000 Oe の磁化率が上にシフトしたよ うな異常が見られた。磁化率や ESR 測定をより 詳細に行い、Cu(DEP)Cl₂で観測されたこの異常 について考察した結果を発表する予定である。 [1] S. Lindroos *et al.*, Act. Cryst. C **46**, 2039(1990). [2] Z. Honda *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 113710 (2012). [3] E. Morikawa, Master thesis 2021 FY, Osaka Univ. [4] T. Morimoto *et al.*, to appear in the proceedings of LT29



Fig.1: Magnetization (*M*) curve (red line) of a powder sample of Cu(DEP)Cl₂ as a function of magnetic field (*H*) and its dM/dH (blue line).

Observation of topological Hall effect dependent on antiferromagnetic order in EuAu₂Ge₂

<u>N. Yuasa^A</u>, H.Sakai^{A,B}, M. Kimata^B, A. Miyake^C, M. Tokunaga^C,

T. Kida^D, M. Hagiwara^D, R. Kurihara^E, H. Murakawa^A and N. Hanasaki^A

^A Department of Physics, Osaka University, ^B Institute for Materials Research, Tohoku University,

^C The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo,

^D Center for Advanced High Magnetic Field Science, Graduate School of Science, Osaka University,

^E Department of Physics, Tokyo University of Science

Eu-based intermetallic compounds have long attracted attention due to the interplay of magnetic order, heavy fermion behavior and valence fluctuation [1]. In general, these materials exhibit complex magnetic phase diagram arising from the interaction between the itinerant electrons and Eu 4f electrons. More recently, magnetic skyrmions were also observed in Eu-based and Gd-based compounds, and intriguing transport phenomena such as the topological Hall effect (THE) were reported [2-5]. In contrast to these materials, EuAu₂Ge₂ with the ThCr₂Si₂ structure (Fig. 1(a)) has relatively simple magnetic phase diagram consisting of two antiferromagnetic phases (AFM1,2) (Fig. 1(b)). We succeeded in synthesizing single crystals of EuAu₂Ge₂ and found that the resistivity ρ_{xx} and the Hall resistivity ρ_{yx} within the *ab* plane change significantly at the boundary between AFM1 and AFM2 (B^*), where no clear change in magnetization is discernible. In this study, to reveal its origin, we measured the resistivity and magnetization up to ~18 T, which is sufficient to achieve the forced ferromagnetic state(f-FM), and investigated the transport properties in the two antiferromagnetic phases in detail.

As the magnetic field along the *c*-axis increases at the lowest temperature of 1.4 K, ρ_{xx} (Fig. 1(c)) and ρ_{yx} (Fig. 1(d)) show a marked hysteretic jump at B^* , followed by a kink at the transition to the forced ferromagnetic state (B_C). In combination with the magnetization measurements (Fig. 1(e)), we fitted ρ_{yx} above B_C assuming the anomalous Hall effect of extrinsic skew-scattering origin, which reveals significant contribution from the topological Hall

term in both antiferromagnetic phases (Fig. 1(d), vertical arrows). Importantly, the magnitude of THE is strongly enhanced in the AFM2 phase. In this presentation, we will discuss the relation between THE and magnetic order in this material.

- Y. Ōnuki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 89, 102001 (2020).
- [2] T. Kurumaji *et al.*, *Science* **365**, 914-918 (2019).
- [3] N. D. Khanh *et al.*, *Nat. Nanotechnol*.**15**, 444-449 (2020).
- [4] R. Takagi *et al.*, *Nat. Commun.* **13**, 1472 (2022).
- [5] J. M. Moya et al., Phys. Rev. Mater. 6, 074201 (2022).



Fig.1 : (a)Crystal structure of EuAu₂Ge₂(b)Magnetic phase diagram (only field up sweep data are plotted) Field dependence of (c) resistivity ρ_{xx} (d)Hall resistivity ρ_{yx} and fitting (e)magnetization *M* at 1.4 K

熱的検出による多重極限下における角度回転 ESR 測定手法の開発

<u>長澤直生</u>^A,櫻井敬博^B,高橋英幸^c,大道英二^A,太田仁^c ^A神戸大院理,^B神戸大研究基盤セ,^c神戸大分子フォトセ

Development of field-angle-dependent ESR spectroscopy under multiextreme conditions based on thermal detection

N. Nagasawa^A, T. Sakurai^B, H. Takahashi^C, E. Ohmichi^A, H. Ohta^C

^AGrad. School of Sci., Kobe Univ., ^BRes. Facility Center for Sci. and Tech., Kobe Univ., ^CMolecular Photosci. Res. Center, Kobe Univ.

我々は、共鳴時の試料の温度上昇を検出することに よって ESR を観測する、熱検出型 ESR 測定手法[1]を 圧力下での測定に拡張した。試料の温度は、熱電対を 用いることで測定する。本技術の利点の一つは、プロ ーブがコンパクトに構成されることである。この利点 により、横磁場印加可能なスプリットペア型マグネッ トと組み合わせることができ、圧力下かつ強磁場の下 で角度回転 ESR 測定が可能になる。

Fig.1は圧力セル内の試料のセッティングの模式図 である。試料空間内に FRP の板を設置し、その FRP の板に銅板を貼り付け、試料は銅板上に接着した。熱 電対と銅板はインジウムで半田付けされているため、 緩和過程での試料の温度上昇は銅板を介して熱電対 に伝わる。また、試料は固定されていることから、圧 力を印加した際にも方位が不変に保たれ、試料の圧力 依存性を正確に評価することができる。Fig.2はこの セッティングを用いて測定した、典型的な常磁性塩で あるコバルト Tutton 塩[(NH₄)₂Co(SO₄)₂·6H₂O]単結晶 試料の常圧下での ESR スペクトルの角度依存性であ る。コバルト Tutton 塩に特徴的な2つのピークと、そ のピークの非常に異方的な角度依存性が明らかであ る。このように本研究では、高圧下、強磁場下での角 度回転 ESR 測定を可能にする手法を確立することに 成功した。

[1] H. Takahashi et al., Rev. Sci. Instrum. 92, 083901 (2021).



Fig. 1 Schematic diagram of sample setting.



Tutton salt.

P-18

Vector Pulse Magnet を用いた磁気異方性物質の測定方法の提案

<u>野田孝祐</u>^A,田中智也^A,池田暁彦^A

^A電気通信大学

Proposal of a Method for Measuring Magnetically Anisotropic Materials Using a Vector Pulse Magnet

<u>K. Noda</u>^A, T. Tanaka^A, A. Ikeda^A

^AThe University of Electro-Communications

通常、固体のマクロ物性は一般的に、その結晶構造が属する点群の有する対称性を持つ [ノイマンの原理]。一方で、相互作用の強い磁性体や電子系においては自発的に対称性が破れる結果、そのマクロ物性の対称性が低下する場合がある。近年ではネマティック相転移のような結晶中の回転対称性を自発的に破った異常電子磁気物性が注目 されている。

このような物性の対称性を測定する上で、ベクトル場であり磁気モーメントに直接 結合する磁場はとても有用な外場である。従来、サンプルに回転磁場を与えるために は、ベクトルマグネットや、回転プローブを利用する方法が用いられてきた。私たち は第3のアプローチとして、パルスマグネットとベクトル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する。

このマグネットを利用し、二つのパルス磁場の位相差を π /2 ずらして発生させるこ とで 360 度回転磁場をシングルショットで発生させることができると考えている。よ って磁気異方性のある物質に対して強磁場での測定を数ミリ秒で行うことができるよ うになる可能性がある。



Fig. 1. Vector Pulse Magnet の 3D デザイン



Fig. 2. 実際に巻いた Vector Pulse Magnet のコイルの一部

発表では製作中のコンデンサーバンクとパルスマグネットのデザインについて説明 し、現状の進捗と今後のスケジュールについて述べる。

P-19

ポータブル 100 テスラ装置で利用する超小型非金属 He フロー

クライオスタットの開発

<u>田中智也</u>^A,野田孝祐^A,池田暁彦^A 電気通信大学基盤理工専攻

Development of an ultra-compact non-metallic He flow cryostat for use in a portable 100 Tesla device

<u>T. Tanaka</u>^A, K. Noda^A, A. Ikeda^A ^AThe University of Electro-Communications

近年 100 テスラにおけるミクロな物性計測手段を実現するために、ポータブル 100 テスラ発生装置 PINK-01 が開発され、X 線自由電子レーザーなどの量子ビームを組み 合わせた室温での実験が既に成功されている。興味のある物質の多くは低温で量子物性 を発現するが、PINK の発生磁場体積は 2.5 mm³ と小さいため、低温実験のためには専 用の超小型クライオスタットが必要であった。

今回私たちは超小型クライオスタットの開発を行い、従来の FRP クライオスタット の¢5 mm から¢2.6 mm まで小型化することに成功した。真空層を含めた外径は 3.6 mm であり、内径 4.0 mm の一巻きコイルに挿入可能である。クロメルコンスタンタン熱電 対を用いたクライオスタット出口付近での計測で約 10 K を確認することが出来、FRP クライオの先端のサンプルを置く部分は 50 µm のカプトンシートを用いることで X 線 を透過させることを可能にした。また真空チャンバーを 3D プリンターで作成し、チャ ンバー内側にニトフィックスを薄く塗ることによって室温(低温)状態で 10⁻² (10⁻³) Pa 領域まで真空を引く事が可能であることが分かった。

超小型クライオスタットの開発はまだ発展途上であり、実際の実験での使用を通じて 幾つかの問題や課題を発見する事ができた。それらを今後解決していくことで、安定的 に信頼度の高い低温環境を利用可能にする事が目標である。





図 1. \$4 mm の一巻きコイル内に収まるクライオスタットの先端部分(左図)と 3D プリンターで製作した真空チャンバー(右図)

定常強磁場 NMR 測定による Ni₂InSbO₆の磁場誘起磁気状態の研究

<u>井原慶彦</u>^A,日吉竜冴^A,下橋正和^A,平田倫啓^B,佐々木孝彦^B, 荒木勇介^C,徳永祐介^C,有馬孝尚^{C,D} ^A北大院理,^B東北大金研,^C東大新領域,^D理研 CEMS

High steady field NMR study for field-induce magnetic structure in Ni₂InSbO₆

Y. Ihara^A, R. Hiyoshi^A, M. Shimohashi^A, M. Hirata^B, T. Sasaki^B,

Y. Araki^C, Y. Tokunaga^C, T. Arima^{C,D}

^ADepartment of Physics, Hokkaido Univ., ^BIMR, Tohoku Univ.,

^CDepartment of Advanced Materials Science, Univ. of Tokyo, ^DRIKEN CEMS

空間反転対称性をもたない結晶構造中での反強磁性秩序により引き起こされる電気 一磁気交差応答が興味深い。本研究ではカイラル反強磁性体 Ni₂InSbO₆ [1,2] に注目し その磁気構造を¹¹⁵In-NMR 測定により調べた。Ni₂InSbO₆ は *T*_N = 78 K で反強磁性転移を 示し、伝播ベクトル *q* = 0.029*b**で特徴づけられる長周期のヘリカル構造を取る[1]。ゼロ 磁場では磁気転移に伴い明確な誘電異常が観測されており、ヘリカル構造に起因する電 気-磁気応答の存在が示されている[2]。これに強磁場を印加すると、*c*方向では 19 T、 *ab* 面内方向では 14 T で磁気構造転移を起こす[2]。臨界磁場においても電気一磁気効果 に起因する異常が観測されているが、14 T を超える強磁場中において実施可能なミクロ 測定は限られているため、磁場誘起相の磁気構造は明らかになっていない。そこで、本 研究では東北大学金属材料研究所の 25T-CSM マグネットを用いて、臨界磁場を超える 磁場領域までの NMR 測定を行い(Fig. 1)、¹¹⁵In-NMR スペクトルの構造変化から磁場 誘起相における磁気構造を明らかにした。

[1] S. A. Ivanov, et al, Chem. Mater. 25, 935 (2013).

[2] Y. Araki, et al., Phys Rev. B 102, 054409 (2020).



Fig. 1: Magnetic field dependence of ¹¹⁵In-NMR spectra measured in field perpendicular to c (a) and parallel to c (b) direction. These spectra were measured at 4 K. Clear change in spectrum shape was observed at critical fields.

ビスマス薄膜における強磁場サイクロトロン共鳴

<u>今中康貴</u>^A,谷内息吹^B,秋山了太^B,長谷川修司^B,Yang Zhuo^C,小濱芳允^C,松田康弘^C ^A物質・材料研究機構,^B東大理,^C東大物性研

Cyclotron Resonance in Bi thin films at high magnetic field

Y. Imanaka, I. Taniuchi^B, R. Akiyama^B, S. Hasegawa^B, Z. Yang^C, Y. Kohama^C, Y. H. Matsuda^C ^ANIMS, ^BUniv of Tokyo, ^C ISSP

ビスマスの物性研究の歴史は古く、シュブニコフドハース振動やパルス磁場による巨大磁 気抵抗の発見など、強磁場計測とも縁の深い物質である。また 80 年代には BiSb における 強磁場物性計測が各種行われ、バンドパラメーターの同定と共に、特に超強磁場領域での 遠赤外透過測定により半金属・半導体転移の兆候が明らかになるなど、強磁場研究がビスマ スの電子状態の研究に大きく寄与してきた[1]。また近年では薄膜試料による光電子分光の 研究により金属的な表面状態や膜厚制御による半金属・半導体転移といった知見が得られ [2]、またバルク試料でもパルス強磁場下での各種精密実験が進んだことにより[3]、実験と 理論の両面から再びビスマス関連物質の研究が注目を集めている。

我々はこれまでテラヘルツ領域での分光の観点から、一般的には高いプラズマ周波数のた め難しいサイクロトロン共鳴の測定を、「薄膜」を用いることで超強磁場を含む広い磁場-周波数領域で行っている。

今回、膜厚の異なるビスマス薄膜の強磁場透過測定について遠赤外から中赤外(30~2500cm⁻¹)領域にて行い、サイクロトロン共鳴およびバンド間遷移の詳細な磁場依存性や 薄膜特有の変化について明らかにした。光学遷移エネルギーについては、低磁場領域では

電子系は拡張ディラックモデルで記述でき、 厚い膜についてはバルク試料と近いバンドパ ラメータが得られているが、超強磁場領域に おいては正孔系も含め、上記モデルからの逸 脱が観測されている。その他、膜厚依存性や 表面状態が期待される BiSb におけるプレリ ミナリーな結果についても議論を行う。

N. Miura, K. Hiruma, G. Kido and S.
 Chikazumi, Phys. Rev. Lett. 49, 1339 (1982).
 T. Hirahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 106803 (2015).

[3] A. Iwasa *et al.*, Scientific Reports **9**, 1672 (2019).



Fig: Bi 薄膜の遠赤外分光スペクトル (B=12T)