第2回東西日本強磁場科学研究会

(第11回西日本強磁場科学研究会)

Schedule of the 2nd meeting on high magnetic field science in east & western Japan

(The 11th meeting on high magnetic field science in western Japan)

概要集

Abstract book

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル: 強磁場領域における熱力学の理解を目指して-磁場発生技術の開発から その応用まで-

講演者:小濱 芳允

所属:東京大学物性研究所

要旨: 金属の低温比熱は $C = \gamma T + \beta T^3$ と近似できる。ここで はゾンマーフェルト係数と呼ばれ る値であり、 β は結晶格子の固さや密度に関わる値である。一般には、 γ は電子状態密度を直接的 決定する物性値として、50年以上の昔から N. E. Philips 博士らによってアルカリ金属から遷移 金属、半金属に至るまで広く調べられてきた [固体物理学入門, C. Kittele 第8版, p.156]。このよ うに比熱の温度変化 C(T)は古くから調べられ、ほぼ理解されたが、温度以外のパラメータを変 化させたとき(例えば比熱の磁場変化:C(H))、どのような情報が得られるのかは未だ不明であった。 C(H)測定手法とその解析法の確立は、強磁場領域における熱力学の理解に必須の課題であった。

我々は磁場発生手法の改良をバックボーンに、強磁場下での比熱の温度・磁場変化 C(T,H)の 測定法の確立、そして比熱と同様にエントロピー測定である磁気熱量効果(MCE)の測定手法をパ ルス・定常磁場において開発してきた[1 など]。これにより過去には、35T までの高精度 C(T,H) 測定により、グラファイトにおける磁場誘起相転移の臨界指数を決定している[2]。近年になって、 MCE 測定と C(H)を比較し、電子がフェルミ統計に従う結果として C(H)のみに特徴的な二重ピー ク構造が誘起され(Fig.1(右))、ここからフェルミエネルギーの磁場変化を直接観測できることを 証明した[3]。更に近藤絶縁体である YbB₁₂においても、電子以外のフェルミ粒子の存在を示唆す る二重ピーク構造を観測した(Fig.1(左))[4]。このフェルミ粒子の起源として、過去に存在が予言 された複合エキシトンが考えられ[5]、本発表ではこれらの詳細を議論する。

本研究は東大物性研の Zhuo Yang 特任研 究員、フランス原子力庁の C. Marcenat 教 授、コーネル大学の D. Chowdhury 准教授ら との共同研究の成果である。

- Y. Kohama, C. Marcenat, T. Klein, and M. Jaime, *Rev. Sci. Instrum.* 81, 104902 (2010).
- [2] C. Marcenat, T. Klein, D. L. Boeuf, A. Jaoui,
 G. Seyfarth, J. Kacmarcik, <u>Y. Kohama</u>, H. Aubin, K. Behnia, and B. Fauqué, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 106801 (2021). Editors'Suggestion
- [3] Z. Yang, B. Fauqué, T. Nomura, T. Shitaokoshi, S. Kim, D. Chowdhury, Z. Pribulová, J. Kačmarčík, A. Pourret, G. Knebo



Pribulová, J. Kačmarčík, A. Pourret, G. Knebel, D. Aoki, T. Klein, D. K. Maude, C. Marcenat, and <u>Y. Kohama</u>, *Nature Communications* **14** 7006 (2023). Editor's Highlighted

- [4] Z. Yang, C. Marcenat, S. Kim, S. Imajo, M. Kimata, T. Nomura, A. Muer, D. K. Maude, F. Iga, T. Klein, D. Chowdhury, and <u>Y. Kohama</u>, *Nature Communications* Accepted.
- [5] D. Chowdhury, I. Sodemann, and T. Senthil, Nature Communications 9, 1766 (2018).

パルス磁場中 NMR 測定により拓かれる量子磁性体の強磁場磁性

講演者:井原 慶彦

所属:北海道大学大学院理学研究院

要旨:局在スピンS = 1/2 から構成される量子磁性体では、強磁場中で磁化プラトー状態に代表 される多彩な量子状態が出現する。最近の研究では磁化プラトー状態のごく近傍で、磁化ステッ プや、スピンネマティック状態などさらに興味深い量子現象が現れる可能性が示されており、強 磁場により形成される多彩な量子磁性の解明が興味深い。特異な強磁場磁性を示す現実物質の代 表格としてカゴメネットワークを形成する 2 次元反強磁性体があげられる。中でも CdCu₃(OH)₆(NO₃)₃ H₂O では、破壊型パルス磁場を利用して到達した 150 テスラまでの強磁場ま でに多段の磁化プラトーを示し、段階的なマグノン結晶化として理解されている[1]。また、最近 は YCu₃(OD)_{6.5}Br_{2.5}において、初めて 1/9 磁化プラトーが観測されたとして注目を集めている[2]。 この他にも、1 次元イジング磁性体 BaCo₂V₂O₈ では、磁化が完全に飽和する直前に量子臨界現象 が出現することが示唆されている[3]。

磁気的相互作用のエネルギースケールが数十ケルビンに相当する多くの磁性体では、興味深い 量子磁性を誘起するために必要となる磁場も数十テスラに及ぶ。このような強磁場は定常的に発 生させることが不可能であり、パルス磁場を利用する必要がある。磁場が急激に時間変化するパ ルス磁場と相性の良い測定手法として、磁化測定が利用されている。実際、強磁場中に現れる興 味深い量子現象は主に磁化測定により検出されてきた。磁場誘起量子磁性の起源をさらに深く理 解するには、ミクロな実験手法が必要となるが、パルス磁場中で利用可能なミクロ測定はまだ限 られている。本講演では、パルス磁場中で実現可能なミクロ測定として最近開発が進んでいるパ ルス磁場中 NMR 測定について、まずは技術的側面から紹介する[4,5]。さらに、パルス磁場中 NMR スペクトル測定を利用した磁場中の多段磁気構造転移の研究例として、四角台塔型反強磁性体 Pb(TiO)Cu₄(PO₄)₄のパルス磁場中 NMR 測定について議論する。Pb(TiO)Cu₄(PO₄)₄は磁気四極子型 の磁気配置に起因する電気一磁気交差応答を示す[6]が、強磁場を印加することで磁気構造が変 化し、これに伴い電気-磁気応答も変化する。磁場誘起磁気構造の中でも磁場を c 方向に印加し たときに 26 テスラ以上で現れる磁気構造は、その詳細が明らかになっていなかった。c 軸磁場 中では、磁化に大きな飛びは見られない一方で、誘電率に鋭い異常を示すという興味深いふるま いが観測されている[7]。本研究では、26 テスラを超える磁場までの NMR スペクトル測定を行 い、さらに理論研究[8]との比較から強磁場磁気相の磁気構造を提案する。

- [1] R. Ohkuma et al., Nature Communication 10, 1229 (2019).
- [2] S. Jeon et al., Nature Physics 20, 435-441 (2024).
- [3] Z. Wang et al., Physical Review Letters 120, 207205 (2018).
- [4] Y. Ihara et al., Review of Scientific Instruments 92, 114709 (2021).
- [5] H. Kuhne et al., Contemporary Physics, 1-22 (2024).
- [6] K. Kimura et al., Nature Communication 7, 13039 (2016).
- [7] A. Miyake et al., Review of Scientific Instruments 91, 105103 (2020).
- [8] Y. Kato, et al., Physical Review Letters 118, 107601 (2017).

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:キラル磁性体 TTa₃S₆におけるキラル磁気ソリトン格子の観測 講演者: 高阪 勇輔

所属:大阪公立大学 工学研究科 電子物理系専攻 電子物理工学分野

要旨:

キラリティ (カイラリティ) とはギリシア語で掌を意味し、右手と左手の関係のように鏡像関 係を示し、対掌体と呼ばれる。キラリティという概念は有機化学の分野では大変重要な研究対象 であるが、キラルな結晶構造を有する無機化合物は天然には稀にしか存在しない。キラルな結晶 構造を有するキラル磁性体において、交換相互作用と Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の競合を起 因として、片巻のみの単一磁区を有するキラルらせん磁気構造が自発的に生成され、結晶構造と 磁気構造のキラリティが結合する。また、磁場中でスキルミオン格子やキラル磁気ソリトン格子 といった特異な磁気構造を形成することから近年多くの注目を集めている [1,2]。

*TM*₃S₆(*T*=3*d* 遷移金属元素,*M*=Nb もしくは Ta) は、2*H*-*M*S₂構造に 3*d* 遷移金属元素をインタ カレートすることにより空間群 *P*6₃22 に属するキラルな結晶構造を形成する。また、CrNb₃S₆は キラルらせん磁気構造及びキラル磁気ソリトン格子を形成することから多くの研究が行われて いるが、Cr のインタカレート量の制御が難しく、僅かなインタカレート量のズレで強磁性秩序 が安定化する[3]。よって、本物質群をキラル磁性体として物性評価を行うためには、インターカ レート量がよく制御された良質な単結晶を育成することが重要となる。

そこで、強磁性体として報告されてきた CrTa₃S₆及び MnTa₃S₆に着目し、キラルらせん磁気構 造及びキラル磁気ソリトン格子形成の検証を本研究の目的とした。

CrTa₃S₆ について、粉末中性子回折測定、バルク単結晶及びマイクロサンプルによる磁化測定 及び電気抵抗測定の結果を報告する[4-5]。また、MnTa₃S₆について、バルク単結晶による中性子 回折測定、磁化測定及び電気抵抗測定の結果を報告する[6]。これらの実験結果を基に、CrTa₃S₆ 及び MnTa₃S₆ のキラルらせん磁気構造及びキラル磁気ソリトン格子形成について議論する予定 である。

本研究は大阪公立大学の姜佳良、水谷圭吾、宮城悠也、門田健太、島本雄介、戸川欣彦、 CROSSの大石一城、河村光将、鈴木淳市、サラゴサ大学の Javier Campo との共同研究である。

- [1] S. Muhlbauer et al., Science 323, 915 (2009).
- [2] Y. Togawa et al., Phys. Rev. Lett. 108, 107202 (2012).
- [3] Y. Kousaka et al., APL Mater. 10, 090704 (2022).
- [4] Y. Kousaka et al., J. Phys.: Conf. Ser. 746, 012061 (2016).
- [5] K. Mizutani et al., AIP Adv. 13, 095125 (2023).
- [6] Y. Miyagi et al., APL Mater. 11, 101105 (2023).

1-3

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:パルス強磁場下での高圧力物性測定の現状と展望

講演者:木田 孝則

所属:大阪大学理学研究科附属先端強磁場科学研究センター

要旨:強磁場,高圧力及び極低温などを組み合わせた複合極限環境下で、物質は様々な新奇現象 を示す。例えば、高温超伝導体や重い電子系化合物に代表される強相関電子系物質の圧力誘起量 子臨界現象[1]や、スピンギャップを持つ量子磁性体の圧力誘起磁気秩序あるいは新奇な磁気励 起状態の発現[2]である。我々は、パルス強磁場・高圧力下での物性測定、特に磁化測定の装置開 発を進めてきたが、従来の誘導法では、パルス強磁場掃引中の電磁ノイズや圧力セル (NiCrAl 合 金製ピストンシリンダー型、最高圧力1GPa)に誘起される渦電流及び検出コイルに対する試料 充填率の低さが大きな問題となっていた[3]。そこで、試料を内包した検出コイルを圧力セル内部 に配置して試料充填率を稼ぎ、シリンダーの外径を拡張し、さらにインダクタンスーキャパシタ ンス共振回路を用いた LC 法を導入することでノイズの低減を図り、パルス強磁場・高圧力下磁 化率測定の圧力範囲を 2 GPa 程度まで拡大させた(図 1)。図 2 は液体 ⁴He 中に浸された状態の 初期温度 1.4 K での、最高磁場: 50 T、パルス幅:約 36 msの磁場掃引中における圧力セル内の 温度の時間変化である。試料(今の場合、温度センサー)まわりの圧力媒体が熱伝達を阻害して おり、パルス強磁場発生時から 6.5 ms まで温度上昇が抑えられている。これは、50 T のパルス 強磁場発生の場合、約40Tまでは渦電流によるジュール発熱の影響がないことを示している。

本研究における装置開発は、主に二本木克旭博士(理研 CEMS)、鳴海康雄准教授、萩原政幸 教授(阪大先端強磁場)と共同で実施したものである。講演では、最近の研究成果[4-6]を示すと ともに、今後の展望について述べる。



図 1:パルス強磁場中磁化率測定が 可能な磁場と圧力の範囲。



図2:パルス強磁場掃引中における圧力セ ル内の温度変化。磁場波形も同時にプロッ トしている。

- [1] P. Gegenwart et al., Nat. Phys. 4, 186 (2008).
- [4] K. Nihongi et al., Phys. Rev. B 105, 184416 (2022).
- [2] Ch. Rüegg et al., Phys. Rev. Lett. 100, 205701 (2008). [5] K. Nihongi et al., Rev. Sci. Instrum. 94, 113903 (2023).
- [3] T. Matsunaga et al., J. Low Temp. Phys. 159, 7 (2010). [6] K. Nihongi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 93, 084704 (2024).

タイトル:高出力波光源ジャイロトロンを用いたミリ波帯磁気共鳴装置の開発 講演者:石川 裕也

所属:福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨:電子スピン共鳴(ESR)の分解能は用いる光源の高周波化によって向上し、その測定感度 は励起光の出力に依存することが一般的に知られている。そのため測定の感度及び分解能は用い る光源に強く依存する。ESR には一般的に Gunn 発振器や BWO 発振器等が用いられるが、それ らの出力は数十 mW 程度である。一方、ジャイロトロン光源はテラヘルツ帯で発振可能な kW ク ラスの大出力波光源であることから ESR への応用が期待されている[1]。これまでに我々は ESR 測定の高分解能及び高感度化を目指し、ジャイロトロン光源による磁気共鳴装置開発を行ってき た[2-3]。

近年、我々は新たな光源として 108-394 GHz の領域で多周波発振が可能なコンパクトジャイロ トロン (FU CW CI) と 5-300 K の温度範囲で使用可能な温度可変クライオスタットを組み合わ せた力検出型 (Force Detection) DESR システムを構築し、ジャイロトロンの基本発振となる 108-206 GHz において常温での DPPH 測定に成功した[3]。本研究では、さらに発振出力が基本波発振 の1桁下がる二次高調波での ESR 信号検出に挑戦し、13 K において 294-394 GHz の 6 つの周波 数で信号観測に成功した。講演ではその詳細について述べる。

本研究はテクノアシスト有限会社の高橋英幸、神戸大院理の大道英二、太田仁、福井大遠赤センターの伊藤丈朗、川喜田圭祐、福成雅史、山口裕資、立松芳典、藤井裕との共同研究である。



図 1.13 K における DPPH のジャイロトロン二次高調 波による ESR スペクトル

図 2. 室温及び 13 K における DPPH の周波数-磁場ダイアグラム

T. Idehara, et. al., J. Plasma Fusion Res. S. 8 (2009).
 H. Takahashi, et. al., Appl. Phys. Lett. 118 022407 (2021).
 Y. Ishikawa, et. al., JPS Conf. Proc. 38 011192 (2023).

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:正方晶 FeSe1-xSx の渦糸液体状態と超伝導揺らぎ

講演者:田中 薫

所属:岡山大学大学院環境生命自然科学研究科

要旨:第二種超伝導体で形成される渦糸格子は、熱揺らぎや量子揺らぎにより融解転移を起こす。 融解転移により秩序を失った状態を渦糸液体状態と呼び、特に量子揺らぎにより誘起されるもの は量子渦糸液体状態と呼ばれる。これまで量子渦糸液体状態が観測された例は少なく、特にバル ク結晶における観測は非常に稀である。最近、正方晶 FeSe_{1-x}S_xにおいて、強磁場中での電気抵抗 測定が行われ、極低温領域で量子渦糸液体状態が実現していることが示唆され、注目を集めてい る[1]。しかし現時点では、この系の磁場-温度相図上での熱的渦糸液体状態領域から量子渦糸液 体状態領域、および超伝導揺らぎ領域への変化や、系に存在する超伝導揺らぎについての詳細は 明らかにされていない。

我々は、x~0.20の純良単結晶試料を作製し、東北大金属材料研究所の超伝導マグネットを用いて 0-25 T の定常磁場下での電気抵抗の温度依存性を測定した。その結果に対し Arrhenius プロット等を用いた解析を行うことで、各温度領域で支配的な揺らぎを決定し、系の磁場-温度相図における渦糸液体状態領域の詳細を調べた。また、系に存在する超伝導揺らぎの詳細を調べるために、揺らぎ伝導度の解析を行った。発表では、これらの解析結果に基づき、系における渦糸液体状態と超伝導揺らぎについて議論する。

[1] M. Čulo et al., Nat. Commun. 14, 4150 (2023).

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:ウルトラノーダル状態を示す鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}S_xの超伝導ギャップ 構造

講演者:北西 優弥

所属:岡山大学大学院環境生命自然科学研究科

要旨:鉄系超伝導体 FeSe は、常圧下において $T_s \sim 90$ K で正方晶から直方晶へ構造相転移し、 更に $T_c = 9$ K で超伝導に転移する。また、その Se サイトを S で置換した FeSe_{1-x}S_x では、 $x \ge$ 0.17 において構造相転移は完全に抑制され、正方晶相での超伝導が実現する[1]。 $x \sim 0.17$ におい てギャップ構造は劇的な変化を示し[2]、正方晶相では巨大な残留状態密度や広い温度領域にわ たる比熱のなだらかな立ち上がりといった特異な性質が見られる[3]。この大きな残留状態密度

は凝縮しない準粒子の存在を示しており、理 論面からはボゴリューボフ・フェルミ面と呼 ばれる二次元的に準粒子フェルミ面が出現す る新しい超伝導ギャップ構造が提案されてい る[4]。実験的には、µSR を用いた実験から時 間反転対称性の破れた超伝導状態が実現して いるとの報告や ARPES の結果から面上でギャ ップがゼロとなるウルトラノーダル状態が報 告されており[5,6]、これらはボゴリューボ フ・フェルミ面を持つ超伝導状態の特徴と一 致する。しかしながら、現在のところ、正方 晶相 FeSe_{1-x}S_xでこのボゴリューボフ・フェル ミ面となだらかな比熱の立ち上がりとの関係 は明らかになっていない。

我々は、正方晶が十分に安定した x~0.2 の単 結晶を作製し、磁場中比熱を詳細に調べた。 ゼロ磁場下における低温比熱の結果は、大き な残留状態密度を示し、T_c直下からのなだら かな立ち上がり(図1)は特異な超伝導ギャップ の発達を示唆する。本発表では12 T までの比 熱の温度・磁場依存性(*H* || *ab* 面)から、この系 の超伝導ギャップの発達について議論する。



図 1. FeSe_{1-x}S_x (x~0.2)のゼロ磁場中における (a) 電子比熱、(b) 電気抵抗、および (c) 電 気抵抗の温度微分。

- [1] S. Hosoi et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 8139 (2016).
- [2] Y. Sato et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115, 1227 (2018).
- [3] Y. Mizukami et al., Commun. Phys. 6, 183 (2023).
- [4] C. Setty et al., Nat. Commun. 11, 523 (2022).
- [5] K. Matsuura et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 120, e2208276120 (2023).
- [6] T. Nagashima et al., https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2224728/v1 (2022).

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:ハニカム格子反強磁性体(Cu_{1-x}Zn_x)₂(pymca)₃(ClO₄)の強磁場磁性

講演者:井上祥^A,木田孝則^A,本多善太郎^B,下川統久朗^C,鳴海康雄^A,金道浩一^D,萩原政幸^A 所属:阪大先端強磁場^A,埼玉大院理工^B,沖縄科技院大^C,東大物性研^D

要旨:

Cu₂(pymca)₃(ClO₄)は pymca (pyrimidine-2-carboxylate) で架橋された Cu²⁺イオン(S = 1/2) がハニ カム格子を組む金属錯体化合物である[1]。この物質は、等しい反強磁性相互作用を有するボンド で構成されると考えられていたが[1]、詳細な構造解析により異なる 3 種類の反強磁性ボンドで 構成されることがわかった[2]。また、比熱測定から 0.6 K まで磁気秩序が観測されていない[3]。 Figure 1 の赤線で示すように、約 15 T までほぼ磁化が出ず、約 20 T から 1/3 磁化プラトー、55 T

付近に2/3 磁化プラトーが観測されている [3]。低磁場での振る舞いは、3 種類の反強 磁性ボンドのうち大きさがほぼ等しい2 種類のボンド(Fig.1 の挿入図)でシングレ ットを組むヘキサゴナルシングレット状 態を考慮することで説明することができ る[4]。本研究では、この物質の非磁性基底 状態や磁化プラトーの起源を詳細に調べ るために、 Cu^{2+} イオンを非磁性の Zn^{2+} イ オンで置換した $(Cu_{1-x}Zn_x)_2(pymca)_3(ClO_4)$ 粉末試料の磁化率、強磁場磁化、電子スピ ン共鳴の測定を行った。



Figure 1 \mathbb{C} 1.4 K \mathbb{C} \approx 10, 0.034, 0.053, 0.085,

0.163 の強磁場磁化の実験結果を示す。母物質(x = 0)に比べ Zn²⁺で置換した試料は、ゼロ磁場近 傍で急激な磁化の立ち上がりが観測され、1/3 磁化プラトーが不明瞭になった。ゼロ磁場近傍で の磁化の振る舞いについては、非磁性不純物によりハニカムのネットワークが部分的に切れた際 に出てくるフリースピンとこれらフリースピン同士のネットワークにより説明できることが明 らかになった。講演では、これらの実験結果および数値計算の詳細について報告する。

[1] Z. Honda et al., J. Phys. Soc. Jpn. 84, 034601(2015).

[2] K. Sugawara et al., J. Phys. Soc. Jpn. 86, 123302 (2017).

[3] A. Okutani et al., J. Phys. Soc. Jpn. 88, 013703 (2019).

[4] T. Shimokawa et al., Phys. Rev. B 106, 134410 (2022).

タイトル:らせん磁気構造を示す三角格子磁性体 NiBr2の強磁場磁性 講演者:山下慧^A,木田孝則^A,鳴海康雄^A,金道浩一^B,萩原政幸^A 所属:阪大先端強磁場^A,東大物性研^B

要旨: NiBr₂ は三方晶系の CdCl₂型の層状の結晶構造を持ち、*ab* 面で Ni²⁺ が三角格子を形成する。Ni²⁺ (*S*=1) が磁性を担い、 T_N =44K 以下では、面内で共線的な強磁性、面間で反強磁性秩序を示す。 T_{IC} =22.8K 以下で ($\delta \delta$ 32) 方向へ伝播する非整合なサイクロイド磁気秩序 (IC 相) を示し (*T*=4.2K では δ =0.027)、自発電気分極が観測される。これは、Inverse DM model と Spindependent *p-d* hybridization model の 2 つの機構に由来しており、面内らせん磁気構造の存在を示唆している[1,2]。強磁場磁化 (*T*=1.3K, $H \perp c$) は、 H_1 =2.6T で IC 相から反強磁性 (AFM) 相 への相転移に対応した跳びを示し、 H_2 =31.5 T で Fan 相への相転移を示すと考えられており、

その後 $H_3 = 32.9 \text{ T}$ で磁化が飽和する [3,4]。 一方、c軸の磁化 (T=1.4 K) は、ゼロ磁場か ら直線的に増加し、34.1 T で飽和する。本研 究では、これらの相の性質を明らかにするた めに、ブリッジマン法により合成した NiBr₂の 単結晶試料を用いて、様々な温度での強磁場 磁化および電気分極測定、定常磁場下での磁 化率および電子スピン共鳴 (ESR) 測定を行っ た。

図 1 は NiBr₂ のパルス強磁場電気分極測定 (H/c, $P \perp c$)の結果である。34.3 T (1.4 K) まで面内の電気分極が観測され、高磁場まで 面内はらせん磁気構造を示すことが明らかに なった。本講演では、 $H \perp c$, H//c での磁化 および ESR 測定の結果を示すとともに、 この物質の強磁場磁性について議論する。



図 1. NiBr₂の電気分極の磁場依存性(H//c) (*E_P*はポーリング電場)

- [1] A. Adam et al., Solid State Commun. 35, 1 (1980).
- [2] Y. Tokunaga et al., Phys. Rev. B. 84, 060406(R) (2011).
- [3] K. Katsumata et al., J. Phys. Soc. Jpn. 52, 3313 (1983).
- [4] H. Yoshiyama et al., J. Phys. C: Solid State Phys. 17, 713 (1984).

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:ニトロキシドラジカル量子スピン系の40T、1.2Kにおけるパルス強磁 場磁化測定

講演者: 辻林実莉^A, 野口悟^{AB}, 新井野修二郎^A, 林伸行^A, 細越裕子^{AB} 所属:^A大阪公立大学大学院理学研究科,^B大阪公立大学強磁場環境利用研究センター

要旨:我々は同軸型ピックアップコイルを用いて補償コイルを省略した 40 T、1.2 K における高 精度なパルス強磁場磁化測定装置を開発し、図1のようなニトロキシドラジカル量子スピン系の 強磁場磁化測定を行っている。前回は 4-Cl-2-NN-BIP について 1.2 K において 15 T で小さなそり 上がりがあり、25 T 以上でほぼ飽和する磁化曲線が得られた[1]。

今回は 2-F-5-NN-BIP 及び 2-F-5,4'-BNN-BIP の磁化測定を行った。図 2 は 2-F-5-NN-BIP の 40 T、1.2 K におけるパルス強磁場磁化測定の結果である。3.6 T までは緩やかに磁化が増大し、3.6~4.4 T にかけて直線的な磁化の増大があり、3.5 T 以下と 4.5~25 T でヒステリシスがみられる。 これらのヒステリシスの起源についてはよくわかっていない。磁場増加過程では 8.4 T で小さな とびがあり、25 T 以上で一定値となる。磁化曲線における直線的な磁化の増大は、磁化率の温度 依存性における 3.2 K でのブロードピークに対応している[2]。

発表では実験の詳細について議論し、さらに 2-F-5,4'-BNN-BIP の測定結果も合わせて発表す る予定である。

[1] 辻林、他 日本物理学会 2024 年春季大会 18pC2-10

[2] 林、他 日本物理学会 2024 年春季大会 18pPSC-12



図1. 測定した磁性体の分子構造



図 2.40 T, 1.2 K での磁化曲

タイトル : フラストレート磁性体 MCu₃(OH)₆C1₂(M=Cu, Ni)の磁性 講演者 : 小島駿平 所属 : 福井大工

要旨: ZnCu₃(0H)₆Cl₂ は S=1/2 の銅イオンが完全なカゴメ格子を形成する。その基底状態は スピン液体であると考えられており、磁気的性質が注目されている物質である。

MCu₃(OH)₆Cl₂(M=Ni, Co)は ZnCu₃(OH)₆Cl₂と同様の結晶構造を持ち、後者の非磁性イオン Zn²⁺が磁性イオンに置換されたような物質である。Cu²⁺イオンで形成されたカゴメ格子の磁 気状態に対して、磁性イオンにより印加される局所的な磁場が与える影響について興味が 持たれているが、研究はほとんどなされていない [1, 2]。

今回、我々は水熱合成を用いて MCu₃(OH)₆Cl₂(M=Ni, Co)の粉末試料を合成し、磁化率、比 熱及び高磁場磁化の測定を行った。試料評価には粉末 X 線回折を用いた。NiCu₃(OH)₆Cl₂ で はワイス温度 θ =-34.0 K で、5 K において磁気秩序が生じた。また、磁化率には7 K にお いてスピン凍結を示唆する小さい異常が見られた。CoCu₃(OH)₆Cl₂ ではワイス温度 θ =-20.2 K で、4.5 K において磁気秩序が生じた。磁気秩序に伴う磁気エントロピーを評価したとこ ろ、Ni、Co のスピンのみが秩序していることを示唆する結果となり、既報の結果[2]と整 合した(図 1, 2)。約 50 T までの強磁場磁化を 4.2 K で測定したところ、 M=Ni, Co の場合と もに約 3 $\mu_{\rm B}$ で飽和するような振る舞いを示した。MCu₃(OH)₆Cl₂の磁気的性質に対して、磁 性イオン(Ni, Co)が与える影響について議論したい。



[1] Y. Li and Q. Zhang, J. Phys. Condens. Matter, 25 (2013) 026003.
[2] Y. Li *et al.*, Chem. Phys. Lett., 570 (2013) 37-41.

タイトル:クロミック材料 CuMoO4のマイクロ波加熱合成と強磁場磁化過程 講演者:岩本 拓馬

所属:福井大学大学院工学研究科知識社会基礎工学専攻電磁工学コース

要旨:本研究において着目するモリブデン酸銅(CuMoO4)は、温度や圧力により色 が変化するサーモクロミズムとピエゾクロミズムの両機能を有する材料である。 我々のグループでは、クロミック無機磁性材料である CuMoO4 に注目し、広範な温 度、磁場領域での各種実験手段を駆使して研究を実施してきた[1]。その結果、CuMoO4 のクロミズムの起源である結晶構造の変化と同時に巨大な体積収縮に伴う自発的な 結晶粉砕が磁気的性質に多大な影響を及ぼしていることを明らかにした。そこで、 CuMoO4の人為的な結晶粒径の制御として、遊星ボールミルによる粉末試料の粉砕を 試みた結果、結晶粒径の制御は可能であったが、ボールミル粉砕時の加圧により結 晶構造が新たな高圧相へ変化し、本来の目的である磁気的性質の解明を実現するこ とができなかった[2]。

そこで、本研究では、遊星ボールミルにより粒径を制御した CuMoO4 の出発物質 である酸化銅(CuO)と酸化モリブデン(MoO3)を用いて粉末試料を合成し、その

結晶粒径の制御を目的とした。 合成には、マイクロ波照射によ る加熱を使用し、特に、電場と 磁場を分離して照射可能なシン グルモードマイクロ波加熱装置 (周波数 5.8 GHz)を使用した (図 1)。電場と磁場強度最大の 位置における出発物質の加熱特 性や合成試料の各種物性測定の 結果については、当日発表する 予定である。



図1 5.8 GHz シングルモードマイクロ波加熱装置

[1] T. Asano *et. al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 093708.
[2] 浅野貴行 *et al.*, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年) 22aPS-126.

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:電子スピン共鳴測定のための超小型共振器の開発

講演者: 倉知 豊

所属:福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨:従来の(誘導検出型)電子スピン共鳴(ESR)測定システムでは、共振器の特性が測定感度に大 きく影響する。一般的な X-band (~10 GHz) ESR システムでは、高い品質係数(Q~10⁴)とかなり 大きな体積(~10 cm³)を持つ空洞共振器が使用されている。その感度は $\sqrt{V/\omega_0Q_u}$ に比例すること が知られている(ここで、 Q_u は無負荷時の品質係数、Vは共振器の有効体積、 ω_0 は共振周波数であ る)[1]。共振器の小型化によって、空間分解能を向上させるだけでなく、Vを桁違いに小さくす ることによる感度の向上が期待される。近年、新たなマイクロ波共振器の候補としてループギャ ップ共振器「パックマン型」や ParPar 共振器「ディアボロ型」(図 1)が提案されている[1]。ルー プギャップ共振器は、ループがインダクタ、ギャップがキャパシタとして機能する共振器で、マ イクロ波の電界をギャップに閉じ込め磁束をループの中心に集中させる構造となっている。 ParPar 共振器では、中央の接続部で電流密度が高まりその周囲に強い磁場が発生する。どちらの 共振器も磁束密度を微小領域に閉じ込めることで大きな振動磁場を発生させることができる。ル ープギャップ共振器と ParPar 共振器の共振周波数は、ループ径やギャップ幅といった共振器の 形状によって決まる。

我々は COMSOL Multiphysics を用いて、共振周波数などの共振器の特性を解析した[2]。これ らの計算に基づき、X-band 周波数用にサイズの異なる複数の共振器を作製した。本稿では、ネッ トワークアナライザによる共振器特性の測定結果も報告する。



図 1: 製作した(a)ループギャップ型共振器と(b)ParPar 型共振器。

Y. Twig, E. Suhovoy, and A. Blank, Rev. Sci. Instrum., 81 (2010) 104703.
 COMSOL Multiphysics[®] v. 6.2. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:ミリ波帯コンパクトジャイロトロン光源を用いたパルス磁場 ESR 装置の開発

講演者:川喜田 圭祐

所属:福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨:福井大学遠赤外領域開発研究センターではジャイロトロン光源の開発を行っており、ESR への応用に向けた研究開発を行っている。磁気共鳴測定には一般的に Gunn 発振器や AMC など の高安定な光源を用いられるが、その出力の上限は mW オーダーである。一般的に光源により 励起できる電子スピン数は光源の出力に依存するため、光源の高出力化が高感度化の鍵となる。 我々は 100 GHz 以上の周波数領域で数百 W クラスの発振出力を持つジャイロトロンを光源とし て用い、磁気共鳴装置開発による高感度・高周波の ESR 測定を目指している。

ジャイロトロン光源には高出力という特徴がある一方、発振出力の時間的な揺らぎによるノイ ズが高感度化や高分解能化への課題となっていた。そこで我々は発振出力が比較的安定となる ms オーダーの短時間で測定可能な ESR 測定を目指し、ジャイロトロンとパルス強磁場マグネッ トを組み合わせた磁気共鳴装置の開発を試みた。大阪大学先端強磁場科学研究センターが開発し た 30 T パルス強磁場マグネットを福井大へ移設し、107-394 GHz において複数周波数発振が可 能なコンパクトジャイロトロン FU CW CIA[1,2]を光源として、ESR 用標準試料として知られる DPPH の ESR 測定を行った。この光源は発振周波数によって出力は異なるが、その範囲は 9.4 – 600 W である。図 1、図 2 に示すように 77 K において 142、162、205 GHz の三つの周波数にお いて DPPH の ESR 信号の検出に成功した。

本研究は、東北大学金属材料研究所の赤木暢、大阪大学先端強磁場科学研究センターの萩原政 幸、鳴海康雄、福井大学遠赤外領域開発研究センターの伊藤丈朗、石川裕也、藤井裕との共同研 究である。



[1] T. Idehara et al., J. Infrared, Milli., Terahz. Waves. 33, 724-744 (2012).

[2] Y. Ishikawa et al., JPS Conf. Proc. 38, 011192 (2023).

3-9

タイトル:ミリ波パルス ESR によるエコー測定のための

ダブルパルス成形システムの設計と評価

講演者:片山 大和

所属:福井大学遠赤外領域開発研究センター

福井大学遠赤外領域開発センターでは、テラヘルツ帯で高出力の電磁波を発生するジャイロト ロン光源の開発と応用研究を進めている。ジャイロトロン光源を用いた応用研究として、電子ス ピン共鳴(ESR)計測は福井大学が世界に先駆けて取り組み、多くの必要な技術開発を行ってきた。 それらの高周波高出力の要素技術や応用技術は、高周波の動的核偏極 NMR(DNP-NMR)の実現に 至り、世界的に注目されるに至っている。現在、我々はジャイロトロン光源を応用した ESR 計 測法の開発をさらに進めて、パルス ESR 法による THz 電子スピンエコー測定の実現を目指して 研究開発を進めている。THz 帯のパルス法による電子スピン共鳴は、上述の DNP-NMR ではより 大きな電子偏極の実現につながる。さらに、近年精力的に開発が進められている固体の電子スピ ンを用いた量子計算機において重要なデコヒーレンス時間の評価や電子スピンの初期化などへ の応用が期待される技術である。本研究室ではすでに、ジャイロトロン光源を用いた数十ワット の発振を、数十ナノ秒の単一パルスに形成し、それを励起パルスとして、BDPA ラジカルの FID 信号を観測し、その FT-ESR スペクトルの測定に成功している。

そこで、次のステップとして π/2 および π パルスと呼ばれる、コヒーレントなダブルパルスを 用いた ESR エコー測定の実現に取り組んでおり、図 1 のようなダブルパルス成形システムの開 発を進めている。図中 Si は二枚のシリコン板の干渉による反射防止効果を施した光駆動半導体 スイッチであり、これにナノ秒の Nd-YAG レーザーの SHG を照射することで電磁波の透過と反 射を切り替えてパルス波を成形する[1]。レーザー光のパルスはそれぞれが二つに分けられ一方

が適当な時間になるように光学遅延路 が設けてあり、それぞれ到達時間の異 なる4種類のレーザーパルスにより2 種類の THz パルスを成形してパルス ESR の励起を行う。発表ではこの開発 を進めている準光学伝送系を評価する とともに、成形したダブルパルスにつ いて報告する。

本研究は福井大学の高橋雅人、中根 直人、浅野貴行、石川裕也、藤井裕、 光藤誠太郎との共同研究である。



図1 パルス成形システム。EM:楕円ミラー、 FM:平板ミラー、Si:光駆動半導体スイッチ

[1] 高橋雅人、「ジャイロトロンを用いたパルス ESR 装置のための新しい光スイッチの特性評価」、 日本物理学会第78回年次大会、東北大学、2023年9月 3-11

第2回東西日本強磁場科学研究会 (第11回西日本強磁場科学研究会) (2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:廉価なベクトルネットワークアナライザを用いた摂動法による

誘電特性の評価

講演者:照井 大和

所属:福井大学大学院工学研究科

要旨:近年、持続可能な未来のために、環境保護と経済成長の両立を目指すGXの 技術開発が進められている。その中で、マイクロ波エネルギーの利用は材料に対し て選択的かつ効率的に働くことが出来、GX技術のひとつとして注目している。これ までに、主なマイクロ波エネルギーの利用は、水分を含んだ食品の加熱に用いられ てきた。一方、近年は材料合成や分解、および抽出の分野での利用も注目されてい る。マイクロ波を新しい材料開発に利用し、そのプロセスを理解するには、マイクロ 波領域における誘電特性の理解が重要である。これまで、誘電特性を測定するため には高価なベクトルネットワークアナライザが必要であった。しかし、ここ数年、数 万円で購入できる「nano VNA」と呼ばれるベクトルネットワークアナライザが販売 され、それを用いた研究成果が発表されている[1]。

そこで、我々はLite VNA(50 kHz-6.3 GHz)という3万円程度で購入できるベクト ルネットワークアナライザに注目し、それを用いた誘電特性測定装置の開発を行った。

VNAを用いた空洞共振器摂動法による測定を行うために、図1に示すようなTM₀₁₀ モードが 2.45 GHz と成る円筒空洞共振器を設計し製作した。Lite VNA を用いてこの 共振器の共振周波数と O 値を測定した

ところ、それぞれ 2.56 GHz と 8000 であった。まず初めに、摂動法での測定に適しているテフロンなどの低損失材料の 測定を行った。さらに、摂動法での測定 には適していないと言われている高損 失材料である水の誘電特性の評価を試 み、その限界を見積もった。また、我々 がマイクロ波加熱による合成を試みて いるハイエントロピー酸化物の出発物 質である 5 種類の酸化物について誘電 特性を評価した。

詳細については、当日発表する予定 である。

図1 開発した空洞共振器とLite VNA

[1]川嶋日菜子、吉富紗香、馬場龍之介、杉山順一、越村匡博、大内将吉、「リーズ ナブルなベクトルネットワークアナライザを利用した複素誘電率測定」、第17回日 本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム、北九州、2023年10月



(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:メタホウ酸銅 CuB₂O₄の ESR 測定

講演者:松村 高弥^A,原 茂生^B,櫻井 敬博^B,大久保 晋^{A,C},太田 仁^C,齋藤 充^D, 豊田 新悟^E,有馬 孝尚^{E,F}

所属:神戸大院理^A,神戸大研究基盤セ^B,神戸大分子フォトセ^C,株式会社ニコン^D, 理研 CEMS^E,東大新領域^F

要旨: CuB2O₄はメタホウ酸イオンと銅イオンからなる 物質で、正方晶の空間群 I4²d に属している[1]。銅イオ ンには4つの酸素が平面状の正方形を形成する4bサイ トと、6つの酸素が歪んだ八面体構造をとる8dサイト の2つの異なるサイトが存在する(図1)。本物質は、磁 化率の温度依存性から、20K で反強磁性状態に転移す ることが知られている。しかし、Dzyialoshinskii-Moriya 相互作用によりスピンは完全に反平行にならず、弱強 磁性を示す傾角反強磁性状態が秩序相であると考えら れている。さらに低温の9K 以下では磁化が突然減少 し[2,3]、スパイラル構造をとることが偏極中性子散乱



図1: CuB₂O₄の結晶構造

によって報告されている[4]。本物質はこれまでも ESR 測定による低温での基底状態や、相転移 についての研究が行われてきた[5]。しかし、傾角反強磁性状態の ESR 信号の由来が 4b サイトに よるものか 8d サイトによるものかなど、議論の余地がある。これは 2 つの Cu サイトが近接し ているのにもかかわらず、いずれの報告も相互作用を考慮していないためと考えられる。今回、 我々は傾角反強磁性状態における 2 つの Cu サイトの異方性や相互作用の様子をより詳細に調べ るため、傾角反強磁性状態の温度領域における高周波 ESR 測定を純良単結晶試料を用いて行っ た。詳細な実験結果は当日報告する。

文献

- [1] M. Martinez-Ripoll et al., Acta Crystallogr. B 27, 677 (1971).
- [2] Y. Kousaka et al., J, Phys. Soc. Jpn. 76, 123709 (2007).
- [3] M. Saito et al., Phys. Rev. Lett. 101, 117402 (2008).
- [4] M. Boehm et al., Phys. Rev. B 68, 024405 (2003).
- [5] T. Fujita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 77, 053702 (2008).

タイトル: S = 1/2 量子磁性体磁性体 C₉H₁₈N₂CuBr₄の ESR による研究 講演者:濱田 優翔^A,櫻井 敬博^B,嵯峨 慎^B,原 茂生^B,大久保 晋^{A, C},太田 仁^C, 萩原 政幸^D

所属:神戸大院理^A,神戸大研究基盤セ^B,神戸大分子フォトセ^C,阪大先端強磁場^D

要旨:近年、磁性体の量子揺らぎに起因する新奇な物理現象の探索が盛んに行われている。本 研究では、磁性イオンである $Cu^{2+}(S=1/2)$ がはしご状の格子を形成する (dimethylammonium)(3,5dimethylpyridinium)CuBr₄(以下 DLCB と略)という物質[1]に着目した。本物質は、はしご間の相互 作用が比較的大きいため $T_N = 1.99 \text{ K}$ で長距離磁気秩序を示す[3]が、スピンギャップ相との量子 臨界点近傍にあると考えられており、秩序状態において量子ゆらぎによる秩序モーメントの伸び 縮みに対応する Higgs モードの存在が報告される[2]等、興味深い現象が見出されている。

本研究では、この物質をミクロな観点から調べるため、強磁場 ESR 測定を行った。実験には 単結晶試料を用いた。図1は磁場をb軸方向に印加した場合の、240 GHz における温度変化のス

ペクトルである。共鳴磁場のシフトは 20 K 程度か ら明らかであり、この温度は磁化率がブロードなピ ークを示す 6 K 程度[3]よりも随分高い。このよう な振る舞いは他の軸に関しても同様であった。更 に、測定温度範囲内での最低温度である 1.9 K だけ でなく、 T_N よりも十分高い 4.2 K においても、共鳴 磁場の周波数依存生は明らかに原点を通過しなか った。これは 4.2 K においてでさえ、単純な常磁性 状態にはないことを意味する。現在、これら低温で の共鳴磁場と長距離磁気秩序の関連性を検討して いる。講演ではこれらの詳細について報告する。

文献

- [1] F. Awwadi et al., Inorg. Chem. 47, 9327 (2008).
- [2] T. Hong et al., Nat. Phys. 13, 638 (2017).
- [3] T. Hong et al., Phys. Rev. B 89, 174432 (2014).



図1: b 軸 240 GHz の温度変化

(2024年9月19日 北海道大学)

タイトル:ペロブスカイト酸化物 Bi_{0.5}Pb_{0.5}CoO₃ の ESR 測定 講演者:石井 俊介^A,大久保 晋^{A,B},原 茂生^C,櫻井 敬博^C,太田 仁^B, 酒井 雄樹^D,東 正樹^{E,F} 所属:神戸大院理^A,神戸大分子フォトセ^B,神戸大研究基盤セ^C, CROSS^D,東工大 IIR^E, 神奈川産技総研^F

要旨:スピン状態遷移と金属間電荷 移動は、材料の構造的・物理的性質を 変えることができる。しかし、特定の 物質において連続的にこれらの2つ の効果が起こることはほとんど知ら れていない。その唯一の例は単純な ABO3組成のペロブスカイト酸化物

 $Bi_{0.5}Pb_{0.5}MO_3$

Bi	Bi ³⁺	Bi ³⁺	Bi ³⁺ _{0.5} Bi ⁵⁺ _{0.5}	Bi ³⁺ _{0.5} Bi ⁵⁺ _{0.5}
Μ	Mn ^{3.5+}	Fe ³⁺	Co	Ni ²⁺
Pb	Pb ²⁺	$Pb^{2+}_{0.5}Pb^{4+}_{0.5}$	$Pb^{2+}_{0.5}Pb^{4+}_{0.5}$	Pb ⁴⁺

図1:3d 準位の変化に従う遷移金属 M の原子価の変化

PbCoO₃である[1]。PbCoO₃では Pb サイトは 2+, 4+、Co サイトは 2+, 3+の秩序電荷分布が存在し、 圧力に依存して Pb と Co 間で金属間電荷移動が起こると報告されている[1]。 さらに A サイトに 電荷自由度を持つ Bi と Pb が 1:1 で混合した Bi_{0.5}Pb_{0.5}MO₃では、3d 準位の変化に従い遷移金属 M の原子価が変化することが報告されている(図 1)[2]。

本研究では、M=CoのBi_{0.5}Pb_{0.5}CoO₃に焦点をあてる。Bi_{0.5}Pb_{0.5}CoO₃では、Co²⁺の高スピン(HS) 状態とCo³⁺の低スピン(LS)状態が混合している可能性があると考えられている。また、磁化率の 温度依存性から反強磁性転移温度が12Kと見積もられている。我々はCoのスピン状態を調べる 目的でテラヘルツ ESR 測定を行った。Bi_{0.5}Pb_{0.5}CoO₃は高圧合成法によって合成された粉末試料 を用いた[2]。テラヘルツ ESR 測定はパルス強磁場を用いて最大15T、温度範囲は1.8K から265K の範囲で行った[3,4]。テラヘルツ光源としてGunn発振器、BWOを用いて 80GHz-260GHz の周 波数範囲で測定を行った。検出器はバルク InSb と QMC 社製の磁場チューン InSb を用いた。

ESR の温度依存性測定では、1.8~265 K の温度領域で顕著な共鳴磁場のシフトは観測されなかった。しかし、4.2K における ESR の周波数依存性測定から得られた磁場-周波数プロットには低周波数領域で低磁場シフトが観測された。これらの結果については、学会当日に詳細に報告する。

文献

[1] Z. Liu, et al., J. Am. Chem. Soc. 142 (2020) 5731-5741.

- [2] S. Kihara, et al., Inorg. Chem. 61 (2022) 12822-12827.
- [3] M. Motokawa, et al., Int. J. Infrared Millimeter Waves 12 (1991) 149-155.
- [4] S. Kimura, et al., Int. J. Infrared Millimeter Waves 17 (1996) 833-841.

タイトル:黒リンの圧力下 THz サイクロトロン共鳴による研究 講演者:鍋田 百花^A,櫻井 敬博^B,大久保 晋^c,太田 仁^c,岡村 英一^D 所属:神戸大院理^A,神戸大研究基盤セ^B,神戸大分子フォトセ^c,徳島大院創成^D

要旨:

黒リンは常圧、バルクでエネルギーギャップが約 0.3 eV の半導体である。1.2-1.5 GPa 程度の 圧力をかけると半金属転移[1,2]し、近年、圧力下での系のトポロジカルな性質に大変注目が集ま っている[2,3]。圧力下 THz サイクロトロン共鳴(CR)[4]は、圧力下でのランダウ準位を直接的 に確かめる強力な実験手法である。本研究では系の圧力下での性質をミクロな観点から明らかに することを目的とする。

1 GPa 以下では、30 K 程度以下で CR が観測された。信号強度にピークを示す温度があり、こ れはキャリヤが熱的に励起されていることを示す。またこのことから少なくとも1 GPa 程度の圧 力では系のギャップが完全には消失していないことを示唆している。信号強度のピーク温度での 多周波数 CR から、有効質量 m*は 0 GPa、0.50 GPa、1.00 GPa でそれぞれ m* = 0.217 m₀、m* = 0.175 m₀、m* = 0.0717 m₀ と求められ、有効質量が半導体半金属転移に向かって小さくなってい ることが分かった。1.3 GPa より高圧では、4 K で振動的なスペクトルが観測された(図)。系の 抵抗値[3]と観測に用いた電磁波の周波数から表皮深さを求めると 2 µm となり、これは試料の厚 み(約 1 mm)に比べ十分小さいため、バルクに対しては電磁波はほとんど透過せず、通常の CR は観測されていないことを意味する。しかし外部磁場と電磁波の進行方向に平行な面である試料

側面においては、表皮深さ程度まで電磁波 が侵入し、その電場成分は、表皮深さ内に出 入りするサイクロトロン運動する電子と相 互作用し得る。これはアズベルカーナー型 CR と呼ばれ、共鳴は磁場の逆数に対して等 間隔に現れることが知られている。1.2 GPa において半金属転移することを考えると、 この様な共鳴が 1.3 GPa 以上で観測された ことと矛盾ない。講演ではこれらの詳細に ついて報告する。

Y. Akahama *et al.*, Physica B+C **139-140**,
 397 (1986). [2] Z. J. Xiang *et al.*, Phys. Rev. Lett.
 115, 186403 (2015). [3] K. Akiba *et al.*, J. Phys.
 Soc. Jpn., 84, 073708 (2015). [4] T. Sakurai *et al.*, J. Magn. Reson. **259**, 108 (2015).



図:半金属転移圧力前後でのスペク トルの変化