

パルス強磁場の発生手法とその特徴

小濱芳允, 松田康弘, 金道浩一

東大物性研

Pulsed-Field Generation Techniques and These Characteristics

Y. Kohama, Y. H. Matsuda, and K. Kindo,

ISSP, Univ. Tokyo

10 Tを超えるような強磁場の発生は、一般的に大がかりで高コストな実験となる。しかし近年の小型磁場発生装置の活躍を顧みるに[1,2,3,4]、小規模な研究グループにおいても、前人未到の強磁場環境で物性測定が執り行われている。Fig. 1に示すように多種多様の磁場発生手法がある中で、これらの研究は興味ある物性測定に最適となる磁場発生手法を選択しており、この選択が実験手法の性能を引き上げている。磁場発生手法の深い理解が、革新的な強磁場研究に必須であることを示す好例といえよう。

そこで本講演では、磁場発生手法への更なる理解を深めることを目的に、若手研究者を主たる対象とした“パルス磁場発生についてのチュートリアル”となる講演を行う。ここではパルス磁場発生の歴史から、これまで生み出されてきた幾つかのパルス磁場発生手法とその応用について紹介する。磁場発生手法の開発により拓かれた物理実験として、“安定化パルス磁場の発生”や“パルス磁場下熱測定技術の開発”、そして開発した装置により明らかにされた“隠れた秩序相の発見[5]”など、その応用事例も紹介する。

[1] H. Nojiri *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 237202 (2011).

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

[3] Y. Ihara *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 114709 (2021).

[4] T. Nakajima *et al.*, arXiv:2308.11097.

[5] Y. Kohama *et al.*, *PNAS* **116**(22) 1686-10690 (2019).

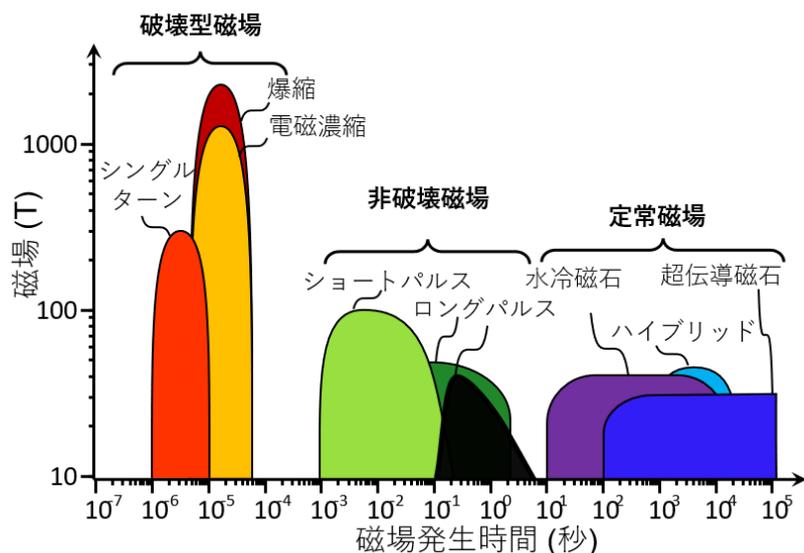


Fig. 1. 様々な磁場発生手法。縦軸；発生できる磁場強度、横軸；発生される磁場の時間スケール

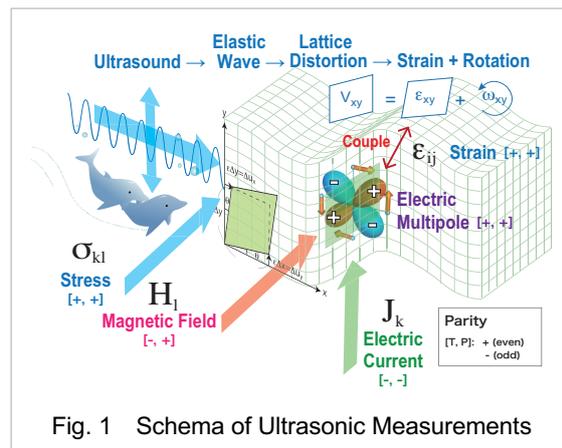
Advantages of Ultrasonic Measurements using High-Magnetic Field Environment

Tatsuya Yanagisawa

Department of Physics, Hokkaido University.

Ultrasonic measurement is one of the unique and powerful techniques to probe anisotropic local charge distributions and fluctuations in solids associated with the electric/magnetic-multipolar moments of d - or f -orbital, valence/charge fluctuations [1], atomic vacancy in Si [2], and atomic oscillation so called ‘rattling’ [3, 4]. These are difficult to be detected by a typical technique as electrical resistivity or magnetization. In general, the principle of the ultrasonic measurement in solids is based on motoring local strains of the lattice induced by a propagating elastic wave, which is coupled to the local charge distribution and interaction between charge and lattice vibration. As a result, the longitudinal and transverse acoustic waves can observe the multipolar responses of different symmetries “spectroscopically” (Fig. 1). Since the above-mentioned electric degrees of freedom cause a spontaneous symmetry breaking and induce lattice instabilities in some compounds of the strongly correlated electron systems, therefore, it is very important to get the information regarding physical acoustics when exploring a new material.

I would like to briefly introduce recent progress of the ultrasonic studies under high-magnetic fields: (i) Evidence for the quadrupolar Kondo effect in $Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ [5, 6], (ii) Exotic multipolar ordering in actinide compounds, for example UNi_4B and $URhSn$ [7, 8].



- [1] B. Lüthi, *Physical Acoustics in the Solid State* (Springer, Berlin, 2006).
- [2] T. Goto *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 044602 (2006).
- [3] T. Goto *et al.*, *Phys. Rev. B* **70**, 184126 (2004).
- [4] T. Yanagisawa, Y. Ikeda, H. Saito, H. Hidaka, H. Amitsuka, K. Araki, M. Akatsu, Y. Nemoto, T. Goto, P.-C. Ho, R. E. Baumbach, and M. B. Maple, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 043601 (2011).
- [5] T. Yanagisawa, H. Hidaka, H. Amitsuka, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, Y. Yamane, and T. Onimaru, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 067201 (2019).
- [6] R. Hibino, T. Yanagisawa, Y. Mikami, H. Hidaka, H. Amitsuka, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, Y. Yamane, and T. Onimaru, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 074708 (2023).
- [7] T. Yanagisawa, H. Matsumori, H. Saito, H. Hidaka, H. Amitsuka, S. Nakamura, S. Awaji, D. I. Gorbunov, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, K. Uhlířová, M. Vališka, and V. Sechovský, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 157201 (2021).
- [8] K. Tsuchida, R. Hibino, M. Matsuda, H. Hidaka, T. Yanagisawa, H. Amitsuka, C. Tabata, and Y. Shimizu, *JPS Annual Meeting*, 18aA205-4 (2023).

強磁場熱測定技術の現状と展望

木原 工

岡山大学 異分野基礎科学研究所

Current Status and Future Prospects of High Magnetic Field Calorimetry Techniques

Takumi Kihara

Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University,

比熱[1]や磁気熱量効果[2]などの磁場中の熱測定は、磁化では捉えることのできない相転移現象も観測できるため詳細な相図の決定を可能とする。また、エントロピーを正確に見積もれることから、基底状態付近の隠れた秩序探索などにも有効である[3]。従って、磁性体に限らず様々な物質の研究において、基本的かつ重要な計測と言える。しかしながら、磁場中熱測定は、使用する磁場の強度と共にその測定難度が上昇する。特に、磁場を一定に保つことが困難なパルス強磁場中では、短時間で完了する測定が求められるため、物質や試料セットアップ、測定手法などの最適化が必須となる。このような背景から、強磁場熱測定は、長らく定常磁場下に制限されてきたが、特に2000年以降のいくつかの進展によって、現在では60 T級のパルス強磁場下で比熱[1]、磁気熱量効果[2]、熱伝導[4]、熱電効果[5]などの熱測定が可能となりつつある。加えて、ロングパルス磁場[6]やフラットトップ[7]などの新たなパルス磁場の登場により、強磁場熱測定は今後更なる精密化や多様化が期待できる。

本講演では、パルスおよび定常強磁場中の熱測定技術開発の現状を温度、磁場、物質などにより分類し整理する。そして、そこから見えてくる課題や、今後の展望について議論する。

[1] Y. Kohama *et al.*, *Meas. Sci. Technol.*, **24**, 115005 (2013).

[2] T. Kihara *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**, 074901 (2013).

[3] S. Imajo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **129**, 147201 (2022).

[4] T. Nomoto *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, 054901 (2023).

[5] J. Wang *et al.*, *PNAS*, **129**, 147201 (2022).

[6] K. Matsui *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **92**, 024711 (2021).

[7] Y. Kohama *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 104701 (2015).

1000 テスラ領域における FBG 磁歪研究

池田暁彦

電気通信大学

FBG magnetostriction studies up to 1000 T range

A. Ikeda

University of Electro-Communications, Tokyo, Japan

The Fiber Bragg grating (FBG) technique has been shown useful for studying spin-lattice couplings up to the highest field of 600 T in combinations with the electro-magnetic flux compression method and the single-turn coil method [1]. Not only that, the FBG technique has been quite compatible with millisecond pulse magnets and DC magnets. We mainly show the application of the FBG technique to the case of LaCoO₃ up to 600 T [2, 3]. We also briefly introduce recent results on solid and liquid oxygen, SrCu₂(BO₃)₂, and Breathing Pyrochlore spin systems [4–6]. Further, we also try to figure out the future direction.

- [1] A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato, *Rev. Sci. Instrum.* 88, 083906 (2017).
- [2] A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, *Phys. Rev. Lett.* 125.177202 (2020).
- [3] A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, Y. Ishii, H. Sawabe, D. Nakamura, S. Takeyama, J. Nasu, *Nat. Commun.* 14, 1744 (2023)
- [4] T. Nomura, A. Ikeda, M. Gen, A. Matsuo, K. Kindo, Y. Kohama, Y. H. Matsuda, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, H. Tsuda and T. C. Kobayashi, *Phys. Rev. B* 104, 224423 (2021)
- [5] T. Nomura, P. Corboz, A. Miyata, S. Zherlitsyn, Y. Ishii, Y. Kohama, Y. H. Matsuda, A. Ikeda, C. Zhong, H. Kageyama, F. Mila, *Nat. Commun.* 14, 3769 (2023)
- [6] M. Gen, A. Ikeda, K. Aoyama, H. O. Jeschke, Y. Ishii, H. Ishikawa, T. Yajima, Y. Okamoto, X. Zhou, D. Nakamura, S. Takeyama, K. Kindo, Y. H. Matsuda, Y. Kohama, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 120, e2302756120 (2023)

Bi_{1-x}Sb_xの半金属半導体転移近傍における磁場誘起相転移徳永将史^A^A 東大物性研**Magnetic-field-induced transitions in Bi_{1-x}Sb_x at the vicinity of semimetal-semiconductor transitions**M. Tokunaga^A^AISSP, Univ. Tokyo

強磁場下において全てのキャリアが最低ランダウ準位だけを占有する量子極限状態では、キャリアの運動の自由度が抑制されて強相関状態になる。二次元電子系では強相関効果を反映した分数量子ホール状態の出現が知られているが、三次元系における強相関効果がどのような量子状態を実現するかは、未解明の問題である。量子極限状態における相転移を実現する舞台として半金属であるグラファイトの多段転移が研究されてきたが、磁場中で実現する絶縁相の起源は未だ議論の対象になっている [1-4]。

我々は量子極限状態における相転移現象探索の舞台として、グラファイトと並ぶ代表的半金属であるビスマスの強磁場物性に注目してきた。半金属であるビスマスの一部をアンチモンで置換すると約7%の濃度で半導体に転移する。この半金属半導体転移近傍では実験室で発生可能な磁場で量子極限状態の奥深くまで探索する事ができる。

我々は約10%の置換で半導体化したビスマス・アンチモン合金の単結晶試料に強磁場を印加し、磁場誘起半導体半金属転移を実現した。量子極限状態にある強磁場半金属相でさらに磁場強度を上げると、ある磁場領域で系が絶縁化することを見出した [5]。この絶縁体状態における試算の結果、絶縁化の起源として電子正孔対の Bose-Einstein 凝縮状態である励起子絶縁体状態の出現を提案している。この絶縁体状態は半導体半金属転移磁場を超えた半金属側で起こっている。この状態を系統的に調べるため約4%置換で半金属状態にあるビスマス・アンチモン合金についても強磁場物性を調べたところ、系が量子極限状態に到達した後、磁場誘起半導体転移を迎える手前で絶縁化する振る舞いを見出した [6]。本会ではビスマス・アンチモン合金の量子極限状態で観測されたこれらの絶縁体状態の起源について議論する。

[1] S. Tanuma *et al.*, in *Physics in High Magnetic Fields* (Springer, Berlin, 1981) p. 316.

[2] H. Yaguchi and J. Singleton, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5193 (1998).

[3] B. Fauqué *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 266601 (2013).

[4] Z. Zhu *et al.*, *Phys. Rev. X* **9**, 011058 (2019).

[5] Y. Kinoshita *et al.*, *Phys. Rev. B* **107**, 125140 (2023).

[6] Y. Yamaguchi *et al.*, in preparation

量子系有機物質群が創り出す新規スピンモデルの強磁場物性

山口博則

大阪公立大学

High-field magnetic properties of new spin models created by quantum organic materials

H. Yamaguchi

Osaka Metropolitan University

量子スピン系の研究は、1980年代以降、無機物を主体として精力的に取り組まれてきた。一方で無機物の対称性・安定性の制約により、未だに現実のモデル物質の多様性は乏しい。私たちはこれまでに、有機物の設計性・多様性に着目した独自の物質開発に試みてきた。Verdazyl ラジカルをベースとした量子系有機物質群 (V-QOM)を開拓し、量子スピン系の物質開発にブレイクスルーをもたらしている。

V-QOM におけるスピン配列制御という新たな設計技術と、有機分子特有の低対称性と分子軌道の柔軟性との融合により、今日まで報告されていなかった新たなスピンモデルを実現することができている。五角形モデル[1]、ランダムハニカム格子[2]、フラストレート正方格子系[3,4]等において、新たなトポロジーをベースとする量子現象の開拓へと繋がっている。最近新たに V-QOM を金属錯体系へと拡張することで、金属元素の配位環境を組み込んだ数万パターンの分子構造を基盤としたスピンモデル設計に取り組んできた[5,6]。それらのスピンモデルが形成する量子物性を対象に、強磁場物性測定を活用した最近の研究成果を紹介する。

- [1] H. Yamaguchi *et al.*, *Sci. Rep.* **5**, 15327 (2015).
- [2] H. Yamaguchi *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 16144 (2017).
- [3] H. Yamaguchi *et al.*, *Phys. Rev. B* **103**, L220407 (2021).
- [4] H. Yamaguchi *et al.*, *Phys. Rev. B* **104**, L060411 (2021).
- [5] H. Yamaguchi *et al.*, *Phys. Rev. B* **106**, L100404 (2022).
- [6] H. Yamaguchi *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **7**, L091401 (2023).

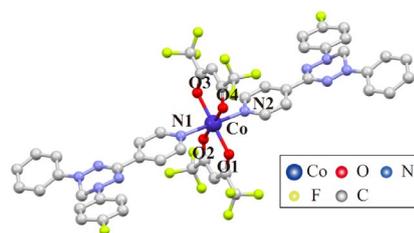


Fig. 1. Molecular structure of verdazyl-based complex (*p*-Py-V-*p*-F)[Co(hfac)₂].

阪大先端強磁場における複合極限環境の研究開発

鳴海康雄^A, 三川基^A, 二本木克旭^A, 木田孝則^A, 浅野貴行^B, 光藤誠太郎^B, 仲川晃平^C, 山本大輔^D, Julien Zaccaro^E, 高阪 勇輔^F, 井上 克也^G, 上床 美也^H, 千星聡^I, 合田翔^J, 平岡奈緒香^J, 北川健太郎^J, 高木英典^{J,K}, 金道 浩一^H, 萩原 政幸^A
^A 阪大先端強磁場, ^B 福井大工, ^C 福井大遠赤セ, ^D 日大文理, ^E 仏ネール研,
^F 阪公大工, ^G 広大院理, ^H 東大物性研, ^I 島大材エネ, ^J 東大院理, ^K MaxPlanck 研

Research and development of combined extreme conditions in AHMF, Osaka university

Y. Narumi^A, M. Mikawa^A, K. Nihongi^A, T. Kida^A, T. Asano^B, S. Mitsudo^B, K. Nakagawa^C,
 D. Yamamoto^D, Julien Zaccaro^E, Y. Kousaka^F, K. Inoue^G, Y. Uwatoko^H, S. Semboshi^I,
 K. Goda^J, N. Hiraoka^J, K. Kitagawa^J, H. Takagi^{J,K}, K. Kindo^H, M. Hagiwara^A

^AAHMF, Grad. Sch. of Sci., Osaka Univ., ^BGrad. Sch. of Eng., Univ. of Fukui, ^CFIR., Univ. of Fukui,
^DDept. of Phys., Col. Hum. and Sci., Nihon Univ., ^ECNRS, Institut Néel,
^FDept. of Phys. and Ele., Osaka Metro. Univ., ^GGrad. Sch. of Sci., Hiroshima Univ.,
^HISSP, Univ. of Tokyo, ^IFac. of Mater. Energy, Shimane Univ.,
^JDept. of Phys., Univ. of Tokyo, ^KMax Planck Institute

1987年の超強磁場実験施設と極限物質研究センターの改組統合から、2014年に先端強磁場科学研究センターとして再び独立し、そして現在に至るまで、大阪大学における強磁場研究の重要なミッションとして、磁場を基軸とした温度-圧力環境の極限的融合を目指した研究開発が脈々と受け継がれている。1990年代後半には、マルエージング鋼により補強された多層巻線コイルを特徴とする金道型パルスマグネット[1]の登場によって、磁場の長時間化と安定した磁場発生が実現し、パルス磁場環境への希釈冷凍機の導入が可能となった[2]。また、圧力環境開発は金属製圧力容器からの発熱とノイズとの戦いであったが、近年では、LC共振回路を利用した新しい信号検出方法(LC法)とピストンシリンダー型圧力セル(PCC)の組み合わせによって、低温が不可欠で信号強度も小さい量子磁性体の研究が2 GPaを越える圧力域でも可能となっている[3]。

本講演では、現在阪大先端強磁場が取り組んでいる複合極限環境実現のための研究開発として、1) LC法とPCCを組み合わせた高圧力-パルス強磁場下の磁気測定技術開発と量子磁性体への応用、2) 銅チタン合金を用いた新しい圧力セルの開発、3) SQUID磁束計用断熱消磁冷凍機の開発についてレビューするとともに、複合極限環境開発の展望について言及する。

[1] K. Kindo, *Physica B* **294-295**, 585 (2001).

[2] Y. Narumi, et al. : *Proceedings of the VIIIth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, World Scientific Pub., 262 (2004).

[3] K. Nihongi, et al. *Rev. Sci. Instrum.* **94**, 113903 (2023).

多重極限強磁場 THz ESR の開発と展望

太田仁^{A,B}, 櫻井敬博^C, 大道英二^B, 大久保晋^{A,B}
^A神戸大分子フォトセ, ^B神戸大理, ^C神戸大研基セ

Development and perspective of multi-extreme THz ESR under high magnetic fields

H.Ohta^{A,B}, T.Sakurai^C, E.Ohmichi^B, S.Okubo^{A,B}

^AMPRC, Kobe Univ., ^BGrad. Sch. Sci., Kobe Univ., ^CRFCST, Kobe Univ.,

Our multi-extreme THz ESR covers the frequency region between 0.03 and 7 THz,¹ the temperature region between 1.8 and 300 K,¹ the magnetic field region up to 55 T,¹ and the pressure region is extended from 1.5 GPa² to 2.5 GPa using the hybrid-type pressure cell.³ It also includes our mechanically detected ESR⁴ measurements using a commercially available membrane-type surface stress sensor, which is the extension from our micro-cantilever ESR.⁵ Our multi-extreme THz ESR and other related topics on THz ESR are summarized in the special issue "Terahertz Spectroscopy" of *Appl. Mag. Res.*⁶ Moreover, applications of our multi-extreme THz ESR can be found in a review article "Experimental Studies of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction in Quantum Spin Systems: High-frequency High-field Electron Spin Resonance (ESR) Measurements"⁷ in the JPSJ Special Topics "Dzyaloshinskii-Moriya Interaction: Physics of Inversion Symmetry Breaking".

Developments of our multi-extreme THz ESR are very much related to ISSP, for instance, our capacitor bank came from the old ISSP in Roppongi, our mechanically detected and high-pressure THz ESR measurements started from the collaborations with ISSP. Some history, the very recent achievements on high-pressure ESR and its perspective will be presented.

[1] H. Ohta et al., *J. Low Temp. Phys.* **2013**, 170, 511.

[2] T. Sakurai et al., *Rev. Sci. Instr.* **2007**, 78, 065107

[3] K. Fujimoto et al., *Appl. Mag. Res.* **2013**, 44, 893; H. Ohta et al., *J. Phys. Chem. B* **2015**, 119, 13755; T. Sakurai et al., *J. Mag. Res.*, **2015**, 259,108; T. Sakurai et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **2018**, 87, 033701.

[4] H. Takahashi et al., *Rev. Sci. Instrum.* **2018**, 89, 036108

[5] H. Ohta et al., *AIP Conf. Proceedings* **2006**, 850, 1643; E. Ohmichi et al., *Rev. Sci. Instrum.* **2008**, 79, 103903; H. Takahashi, E. Ohmichi, H. Ohta, *Appl. Phys. Lett.* **2015**, 107, 182405.

[6] H. Ohta and T. Sakai eds., *Appl. Mag. Res.* **2021**, 52(4), 263-564, Special Issue "Terahertz Spectroscopy".

[7] H. Ohta, *J. Phys. Soc. Jpn.* **2023**, 92, 081003.

パルス強磁場、断熱消磁、 ^4He 熱伝達による 強磁場超低温環境の構築と展望

野口悟^{AB}, 前川翔^A, 辻林実莉^A, 原正彦^A, 鳴海康雄^C, 萩原政幸^C

^A 大阪公大理, ^B 大阪公大強磁場セ, ^C 阪大先端強磁場

Construction of high magnetic field and ultra-low temperature environment by pulsed HMF, ADR, and ^4He heat transfer, and its prospects

S. Noguchi^{AB}, S. Maegawa^A, M. Tujibayashi^A, M. Hara^A, Y. Narumi^C, M. Hagiwara^C

^A Dept. Phys., Grad. Sch. Sci., Osaka Metro. Univ., ^B RC-UHMF, Osaka Metro. Univ., ^C AHMF,
Grad. Sch. Sci., Osaka Univ.

超低温、強磁場、超高压は非日常的な外部の極限環境であり、新しい物性発現は常にこのような極限環境下で発見される。これらを組み合わせた多重極限環境の構築は新たな物性探索のプラットフォームとして極めて重要である。さまざまな多重極限環境の中でパルス強磁場と超低温の組み合わせは開発が遅れている。そこで ^3He を使用しない常磁性塩断熱消磁法(ADR)を 50 T パルス強磁場(PMF)と組み合わせた超低温域パルス強磁場磁化測定の開発を進めている。この手法の実現には強磁場発生部と断熱消磁部を空間的に隔離し、かつその間の良好な熱伝達を確保することが要点で超流動 ^4He による熱伝達技術を導入し、0.5 K で 30 cm 隔てた両者間の熱伝達確保を確認している[1]。

パルス強磁場部は FRP を主とした非金属材料で構築する必要があり断熱真空の確保が技術的な困難点となる。また、熱伝達媒体の ^4He は上部からガスとして供給するため常に上部からの熱流入に留意する必要がある。詳細については講演で説明するが、図 1 に現在製作中のクライオスタットを示す。

超低温強磁場磁化測定の意味についてよく質問される。1 K 以下でも強磁場磁化曲線に大きな温度依存性があればそこに物理があるだろうと答えている。

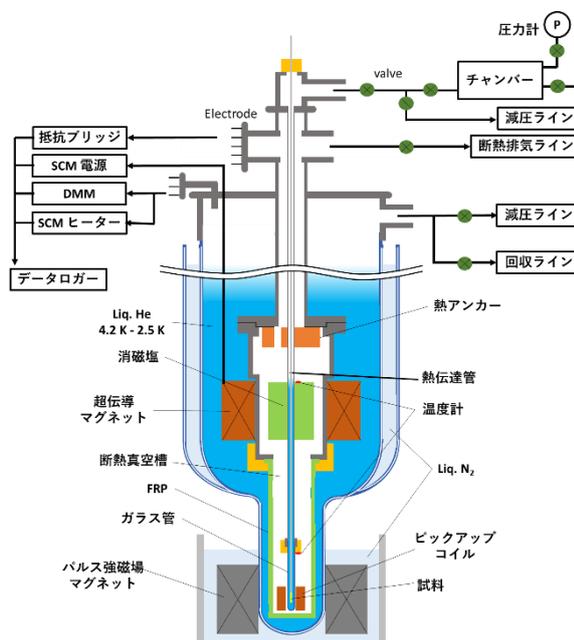


Fig. 1. Cryostat combining ADR and PMF

[1] S. Yoshida *et al.*, JPS Conf. Proc. **38**, 011193 (2023).

強磁場下での分光測定

木村尚次郎

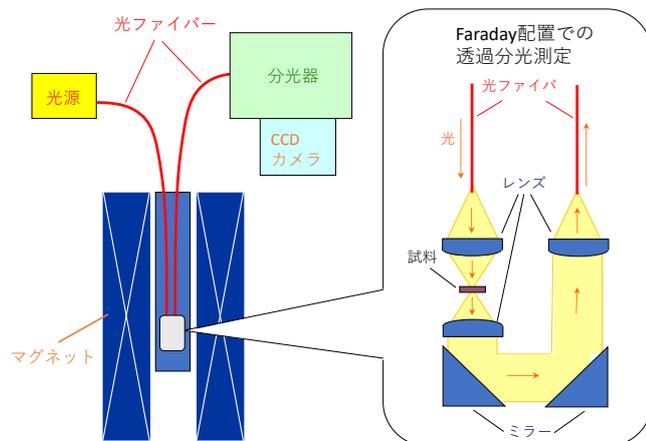
東北大金研

Optical spectroscopy measurements in high magnetic fields

S. Kimura

IMR, Tohoku Univ.

強磁場中で電磁波に対する物質の応答を測定する強磁場分光測定は、ラジオ波から X 線領域に渉る広い周波数領域で行われている。近赤外から紫外線領域では d 軌道状態間や $d-p$ 軌道間の光学遷移、赤外領域では主にフォノン、マイクロ波からテラヘルツ領域では磁気励起状態に関する知見が得られ、ラジオ波領域では核磁気共鳴や誘電率測定が行われている。近赤外から紫外線領域の強磁場分光測定では、図の様に光ファイバーを用いた測定が行われている。ランプ光源からの光を光ファイバーによって伝達し磁場中心付近に組んだ光学系を用いて試料に光照射する。その後、再び光ファイバーを用いてマグネット外部に光を取り出し分光器で光スペクトルを得る。光学系の組み方によって、光入射方向と磁場が平行な Faraday 配置と垂直な Voigt 配置で透過および反射測定を行うことができる。また光源としてレーザーを用い試料付近の光学系にビームスプリッターや光学フィルターを組み込んで、赤外領域のラマン散乱測定も可能である。マイクロ波からテラヘルツ領域では、発振器として Gunn 発振器、後進波管、遠赤外レーザーなどを用いた ESR 測定を講演者は行なっている。この場合、電磁波は金属パイプによって伝達し検出器としては InSb や Sb 等を添加した Ge などの半導体素子やショットキーダイオードを用いている。周波数一定の電磁波を試料に照射しながら磁場掃印し共鳴が起こった際の電磁波の吸収を観測する。またマイクロ波領域では、ネットワークアナライザを用いた周波数掃印による分光測定も可能である。この場合は同軸ケーブルで電磁波を伝達しコプレーナ回路上に試料を置いて回路近傍を伝搬する電磁波と試料との相互作用による電磁波の透過または反射量の変化を観測して分光測定を行う。本講演ではこれらの実験方法について、測定例を混じえて紹介する。



強磁場超伝導マグネット開発に向けた高温超伝導材料特性評価

土屋雄司^A, 岡田達典^A, Alexandre Zampa^A, 高橋弘紀^A, Arnaud Badel^B,

水野謙一郎^C, 小濱芳允^D, 淡路智^A

^A 東北大金研, ^B CNRS, ^C MTL Corp. ^D 東大物性研

Characterization of high-temperature superconducting materials for the development of high-field superconducting magnets

Y. Tsuchiya^A, T. Okada^A, A. Zampa^A, K. Takahashi^A, A. Badel^B, K. Mizuno^C, Y. Kohama^D, S. Awaji^A

^A HFLSM, IMR, Tohoku Univ., ^B CNRS, ^C MTL Corp. ^D ISSP, Univ. of Tokyo

近年、高温超伝導コイルを用いた強磁場超伝導マグネットの開発が精力的に開発されている。東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターでは、冷凍機冷却型の無冷媒超伝導マグネット(CSM)の開発を進めており、これまでに、Bi系高温超伝導線材を内挿コイルに用いた25T-CSMを開発し、ユーザーマグネットとして運用してきた[1]。一方、米国立高磁場研究所では、RE系高温超伝導(REBCO)線材を内挿コイルに用いて液体ヘリウム冷却型32T超伝導マグネットを開発し、運用している[2]。我々は現在、33T-CSMの開発をしており、14 Tを発生する外挿低温超伝導コイルと19 Tを発生するREBCO内挿コイルとを組み合わせる[3]。REBCO内挿マグネットは設計・実証段階であり、設計のための高温超伝導材料特性評価に向けて、kA級のパルス電流を用いた評価方法を開発している[4]。本講演では、高温超伝導コイルを用いた強磁場超伝導マグネットの開発状況について説明するとともに、材料特性評価方法について紹介する予定である。

[1] S. Awaji *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 065001 (2017). K. Takahashi, submitted to *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (2023).

[2] H. Weijers *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**, 4300807 (2016).

[3] A. Badel *et al.*, 27th International Conference on Magnet Technology. (2021).

[4] Y. Tsuchiya *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33**, 8001105 (2023).

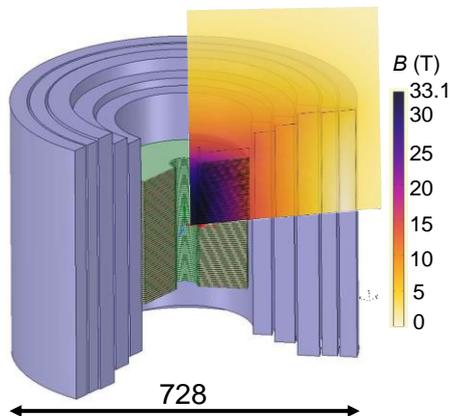


Fig. 1 Magnetic field strength distribution in the 33T-CSM under design.

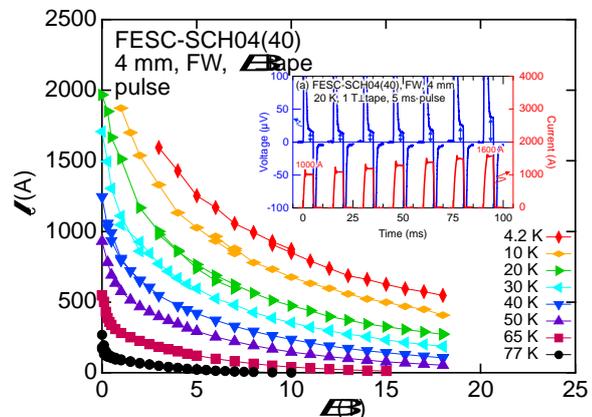


Fig. 2 Field dependence of the I_c in REBCO tapes at various temperatures and fields. Inset shows the waveforms of current and voltage during the pulse current measurement.

三次元ベクトル強磁場ならびに微細加工を用いた精密輸送測定

木俣基

東北大金研

Precise transport experiments by using 3D-vector high magnetic field and FIB microfabrication technique

M. Kimata

IMR, Tohoku Univ.,

磁場方位の精密制御は、電子状態のける対称性の破れの検出や異方的な磁気相図・超伝導相図の解明に不可欠である。我々は東北大学金属材料研究所の定常強磁場に二軸回転機構を組み込み、20 T以上の磁場をベクトル磁場的に用いた磁場角度分解物性計測を行っている。今回の発表では主に輸送現象に対象を絞り、強磁場下での輸送測定からどういった情報が得られるのか、基礎から最近の話題までを紹介する。

Fig. 1は我々が使用している二軸回転機構の写真である。一つの特徴として、低温部分の歯車に減速比の大きなウォームギアやスウェーデンギアを用いない構造としており、回転時の摩擦熱を軽減している。これにより ^3He 温度でも連続的な角度回転実験が可能となっている。また、ステージの上部に比較的大きな空間を有しているため、比熱セルや圧力セル等を乗せた実験が可能である。実際、比熱については最近種々の手法による測定を試行している。また、これまで主流であった輸送測定[1-3]に限らず、核磁気共鳴(NMR)[4]、交流磁化率[5]、超音波等の幅広い物性測定も行われている。

また、今回の発表では集束イオンビーム(FIB)による単結晶微細加工を用いた実験手法についても紹介する。FIBによる微細加工は、従来は透過電子顕微鏡用の薄片試料作製のために主に用いられてきたが、この技術を応用することで、数100 nm～数10 μm 程度の微細領域の輸送測定等が可能となる(Fig. 2)。通常、微細構造の作製は薄膜試料を用いて行われることが多いが、FIBを用いれば薄膜化が困難な様々な物質についても微細構造による実験が可能となる。利点としては、電気抵抗の精密測定、大きな電流密度を印加できることによる非線形・非相反伝導の観測、超伝導体のサイズ効果の観測等が考えられ、今後の特徴的な実験の進展が期待される。

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

[2] K. Nakagawa *et al.*, *Phys. Rev. B* **107**, L180405 (2023).

[3] K. Sugi *et al.*, *Phys. Rev. B* **108**, 064434 (2023).

[4] K. Kinjo *et al.*, *Phys. Rev. B* **107**, L060502 (2023).

[5] H. Sakai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 196002 (2023).



Fig. 1: A photograph of two-axis rotator for high-field magnets in IMR.

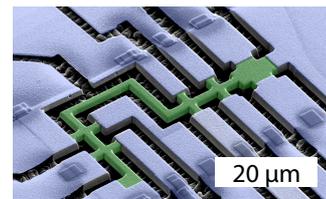


Fig. 2: An example of microfabricated transport device by using a FIB.

強磁場中の核磁気共鳴 - 膜試料への応用

山中隆義^A

^A 東北大金研

Nuclear magnetic resonance in a high field – an application to film samples

T. Yamanaka^A

^AIMR, Tohoku Univ.,

核磁気共鳴法(NMR)は原子核スピンをプローブとして、その核位置における内部磁場の変化を調べることが可能な手法である。この特徴により核サイトにおける局所磁化率に相当するナイトシフトや電子スピン揺らぎに応答する核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ などを通して、様々な物質の電子状態が明らかにされてきた。

NMR は電子物性研究において強力な研究手段であるが、直接検出する対象が核磁気モーメントであるので信号強度が弱い。そのため微小試料での測定は困難である場合がほとんどである。この問題を解決する手段の1つが強磁場の利用である。NMR の信号強度はゼーマン分裂による核スピン偏極率と歳差運動の角周波数に比例するため、強磁場と NMR は相性が良い。

近年、成膜技術の進歩によってさまざまな物質が薄膜状に生成されるようになり、物質の人工的な2次元化、表面・界面の効果の顕在化などの電子物性の制御が盛んにおこなわれている。このように電子物性の研究舞台として重要な膜試料であるが、これらも微量試料であるため NMR の研究例が少ない。しかし、信号の観測ができるならば、微視的なプローブという特徴がユニークな研究を可能とする。膜試料では体積の大部分を占める基板がバルク測定の大きな寄与を占めるが、NMR ならば膜試料の信号と基板の信号をスペクトル上で分離して測定できる。同様に2種の物質を積層したヘテロ構造においても層を区別した測定が可能である。例えば Nb と Cu を交互に積層した人工超格子において、Cu の NMR 信号について調べることで Nb 超伝導が Cu 層に近接効果で染み出していることが観測された研究もある[1]。このようにヘテロ界面の物理を明らかにするうえで NMR は有効な手段となり得る。

講演では著者が行ってきた重い電子系人工超格子の研究[2-4]を中心に、NMR による膜試料の研究手法について紹介する。

[1] R. Aoki, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **56** 4495 (1987).

[2] T. Yamanaka, *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 241105(R) (2015).

[3] T. Yamanaka, *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 060507(R) (2017).

[4] G. Nakamine, *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 081115(R) (2019).

磁気輸送現象における非平衡-平衡クロスオーバー

山田暉馨^{A,B}, 伏屋雄紀^A

^A電通大基盤理工, ^B東大物性研

Non-equilibrium to equilibrium crossover in the magneto-transport phenomena

A. Yamada^{A,B}, Y. Fuseya^A,

^AUniv. Electro-Commun. Tokyo, ^BISSP, Univ. Tokyo,

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 of 解析に広く供されている。一方で、ランダウ量子化の顕在化により高磁場ではこの古典公式が何らかの修正を必要とすることが考えられる。ランダウ量子化された自由電子に基づいて、いくつかの一般的な磁気伝導度が導出されていたが [1,2,3], 弱磁場から強磁場に至る全磁場領域に適用可能かつ古典論への対応が明確な公式が示されたことはなかった。

今回我々は、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、相互作用の十分小さい場合（緩和時間近似に対応）において古典理論に対応する公式を見出した [4]。本公式は古典論と同様パラメータが少ないため簡便であり、微視的なパラメータを含みつつも、これらは常に巨視的なパラメータに繰り込むことができる。また、ランダウ量子化の効果は常に横磁気伝導度における振動項に繰り込まれる。

我々の分類において、ホール伝導度が高磁場において非平衡流から平衡流へのクロスオーバーを起こすことが分かった (Fig. 1)。これは強磁場において非散逸な伝導が主要となることを意味する。この非散逸成分はフェルミ準位以下のエネルギーを持つ電子すべての寄与を含み、2次元系格子系ではチャーン数で与えられる非散逸な量子ホール効果の起源となっている [5]。本発表では、3次元系において伝導度の量子化は見られないものの、半金属の量子振動の位相ずれに非散逸クロスオーバーの情報が含まれていることを示す。

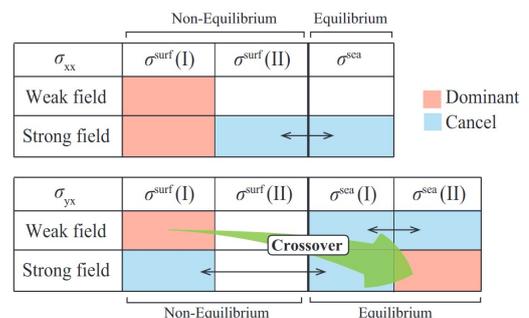


Fig.1 磁気伝導度における散逸・非散逸流の寄与

[1] H. Shiba, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 30, pp. 972-987 (1971).

[2] T. Ando and Y. Uemura. Journal of the Physical Society of Japan, 36(4) (1974).

[3] A. A. Abrikosov. Sov. Phys. JETP, 29(4) (1969).

[4] A. Yamada and Y. Fuseya, arXiv:2307.00763v1 (2023)

[5] D. J. Thouless, et al., Phys. Rev. Lett. 49, 405 (1982)

Hidden double-peak structure of quantum oscillations in the specific heat

Z. Yang^A, B. Fauque^B, T. Nomura^A, T. Klein^C, D. K. Maude^D, C. Marcenat^C, and Y. Kohama^A

^AISSP, Univ. Tokyo, ^BPSL Research Univ., ^CUniv. Grenoble Alpes, ^DLNCMI-T, CNRS

Quantum oscillation phenomenon is an essential tool to understand the electronic structure of quantum matter, and to reveal exotic quantum particles, e.g., Dirac, Weyl, and chargeless Fermions. After the first observation of the quantum oscillation in 1930 by W.J. de Haas and P.M. van Alphen, the quantum oscillations have been mainly investigated by magnetization (De Haas-Van Alphen effect) and resistivity measurements (Shubnikov-de Haas effect). Only limited number of results for the quantum oscillation in specific heat, the temperature derivative of the entropy, have been reported. These oscillations are generally discussed within the framework of Lifshitz – Kosevich (LK) theory [1].

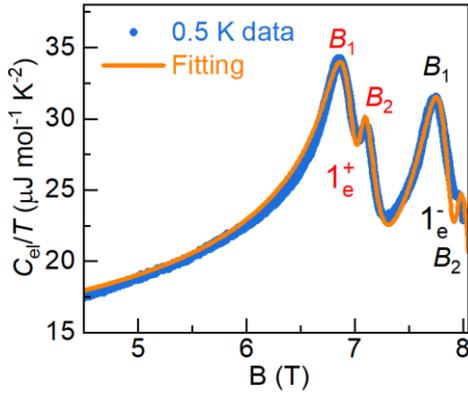


Fig. 1. Measured and calculated field sweep of C_{el}/T in graphite at $T = 0.5$ K.

Here, we report the first systematic study of quantum oscillations in specific heat using high quality natural graphite [2]. We found that the crossing of single Landau level with the Fermi energy gives rise to a double-peak structure in specific heat, in striking contrast to the single peak expected from LK theory. Intriguingly, the double-peak structure is predicted in the exact form of C_{el}/T in the free electron theory, as given below [3],

$$C_{el}/T = k_B^2 \int_{-\infty}^{\infty} D(E) \left(-x^2 \frac{dF(x)}{dx}\right) dx, \quad (1)$$

where $D(E)$ is the density of state of fermion, $F(x)$ is the Fermi-Dirac distribution function, $x = E/k_B T$. We demonstrate that the kernel term $(-x^2 dF(x)/dx)$ in Eq. (1) is responsible for the double-peak structure in C_{el}/T . In Fig.1, we show the field sweep of C_{el}/T on natural graphite (blue dots) highlighting the double-peak structure for $1e^+$ and $1e^-$ Landau levels. The solid orange line represents the calculated C_{el}/T data using Eq. (1). The excellent agreement between the experimental data and the calculation lend further support of our claim. Probably due to the lack of the present observation, the usual textbooks oversimplify the process of calculation to obtain the well-known formula $C_{el} = \pi D(E_F) k_B^2 T/3$ that actually misses the double-peak structure. The observation of such exotic phenomena pave a new way to estimate the g -factor and effective mass, and provide new insight to the Lifshitz-transition.

[1] I. Lifshitz *et al.*, Sov. Phys. JETP **2**, 636 (1956).

[2] Z. Yang *et al.*, Nat. Comm., accepted (2023)

[3] C. Kittel *et al.*, Wiley New York **8** (1996).

The Magnetoresistance of YBCO under High Magnetic Fields up to 103 T

S.Peng^A, X. Zhou^A, Y.H. Matsuda^A, S.Awaji^B, T.Arita^C, and Y.Yoshida^C

^AISSP, Univ. Tokyo, ^BIMR, Tohoku Univ., ^C Dept. of Energy Eng. and Sci., Nagoya Univ.

When the superconducting phase of high-temperature superconductors (HTSCs) is suppressed by temperature, the system enters the normal state, in which the temperature dependence of the resistance exhibits a strange linear relationship, that cannot be described by the traditional Fermi liquid theory [1]. Although the theoretical mechanism of high-temperature superconductivity remains one of the most controversial topics, this normal state with the so-called strange-metal properties is thought to be directly related to the ground state of superconductivity [2]. Similarly, when superconductivity is suppressed by a magnetic field, the system will also exhibit the characteristics of the strange metal in the normal state at low temperature. For $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, the measurements of magnetoresistance under ultrahigh magnetic field are still technically limited due to the issues such as short duration of the magnetic fields, electromagnetic interference and eddy currents.

In this work, the low temperature (from 52 K to 150 K) transport properties are measured in optimally-doped YBCO thin films under $B // \text{CuO}_2$ -layer direction up to 103 T by employing the single-turn coil technique and a radio frequency reflection method. The magnetoresistance exhibits unusual B -linear behavior in normal state at high magnetic field region, which is considered a signature of the strange metal characteristics [3]. The temperature dependence of the parameter $\beta = d\rho/dB$ in the normal state becomes convergence below T_c , which is similar to the high field behavior in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ [3] and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ [4] under $B \perp \text{CuO}_2$ -layer direction. This universal characteristic of HTSCs indicates that the quantum critical fluctuations may be responsible for the strange-metal behavior which is intertwined with the high-temperature superconductivity.

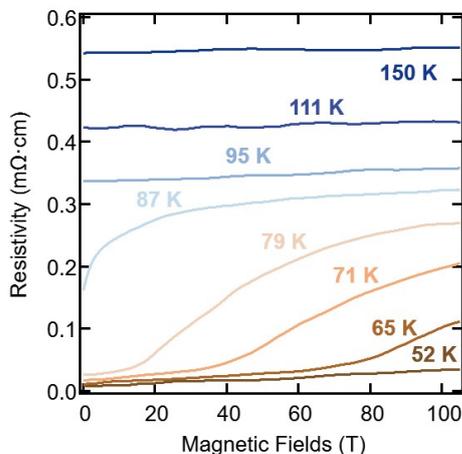


Fig.1 Magnetoresistance of YBCO up to 103 T.

- [1] N. E. Hussey, *Journal of Physics: Condensed Matter* **20**, 123201(2008)
- [2] P. W. Phillips *et al.*, *Science* **377**, eabh4273 (2022)
- [3] P. Giraldo-Gallo *et al.*, *Science* **361**, 479 (2018)
- [4] N. Miura *et al.*, *Physica B: Condensed Matter* **319**, 310 (2002)

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ のエキゾチック量子凝縮状態と強磁場相図

笠原成^A, 田中薫^B, 北西優弥^B, 大野満希^B, 藤井秀朗^B, 細田龍之介^B, 木原工^A,
秋葉和人^B, 小林達生^B
^A岡山大基礎研,^B岡山大理

Exotic superconducting state and high-field phase diagram of $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ superconductors

S. Kasahara^A, K. Tanaka^B, Y. Kitanishi^B, M. Ohno^B, H. Fujii^B, R. Hosoda^B, T. Kihara^A,
K. Akiba^B, T. C. Kobayashi^B

^ARIIS, Okayama Univ, ^B Department of Phys., Okayama Univ.

鉄系超伝導体 FeSe およびその等原子価置換系 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ は、多様なエキゾチック物性を示すことから大きな注目を集めている。 FeSe は約 90 K において電子系の回転対称性の破れを示すネマティック相転移を示し、低温では異常に小さなフェルミエネルギー ϵ_F と、これと同程度の超伝導ギャップ Δ を有する超伝導を示すことから、弱結合 BCS 状態から強結合 BEC 状態へのクロスオーバー領域に位置すると考えられる物質である[1-3]。またこの物質は Maki パラメータ $\alpha_M = 2^{1/2} H_{c2}^{\text{orb}}/H_{c2}^{\text{p}} \sim 2m^*/m_e \cdot \Delta/\epsilon_F$ が非常に大きな値をもつことから、FFLO 状態が実現する可能性のある有力な候補物質でもあり、これまで強磁場熱輸送測定により FFLO 超伝導と考えられる新たな超伝導状態が実現していることが見出されている[4,5]。一方 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ は、S 置換によりネマティック相を完全に抑制することが可能である[6]。興味深いことに、ネマティック相が完全に抑制される $x_c \sim 0.17$ 以上では、大きな残留状態密度を伴った特異な超伝導状態が実現することが明らかになっており[7,8]、Bogolubov-Fermi 面と呼ばれる準粒子フェルミ面を伴った新奇な超伝導状態の実現が議論されている[9]。我々は、この超伝導状態の詳細を明らかにするため、純良単結晶を用いた精密比熱測定と強磁場までの輸送現象測定、更には圧力中比熱測定を行ってきた。講演ではその結果に基づき、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ での ultra-nodal 状態について議論する。

[1] T. Shibauchi, T. Hanaguri, Y. Matsuda, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 102002 (2020).

[2] S. Kasahara *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **111**, 16309 (2014).

[3] S. Kasahara *et al.*, Nat. Commun. **7**, 12843 (2016).

[4] S. Kasahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 107001 (2020).

[5] S. Kasahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 257001 (2021).

[6] S. Hosoi *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **113**, 8139 (2016).

[7] Y. Sato *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **115**, 1227 (2018).

[8] T. Hanaguri *et al.*, Sci. Adv. **4**, eaar6419 (2018).

[9] C. Setty *et al.*, Nat. Commun. **11**, 523 (2020).

材料開発を促進する放射光実験の DX 化

松田 巖^A

^A 東大物性研

Digital Transformation of the Synchrotron Radiation Experiments to Promote Materials Development

I. Matsuda^A

^AISSP, Univ. Tokyo

材料科学において、X 線は試料の原子構造、化学的性質、電子状態を直接調べることができる重要なプローブである。このような X 線ビームを用いた実験は現在、放射光や X 線自由電子レーザー施設で誰でも利用が可能であり、さらに近年のビーム高輝度化によって測定データはより高分解能かつ多次元的になってきた。最近では測定技術の急激な進歩に伴って材料が実際に動作している様子を時空間分解で「その場」観察するオペランド測定も可能となった[1,2]。これら計測データを総合的にまとめることで物理と化学を展開し、材料の性能向上を図ることができるだけでなく、新物質の設計および合成も実施されている[3,4]。

このような放射光の先端計測手法に対して現在、さらにインフォマティクスやロボットなどの DX 技術との組み合わせたシステム開発に注目が集まっている。我々はこれまでプロセスインフォマティクスで動作する X 線ナノ分光の実験システムを開発してきた。本講演では先端放射光実験を解説すると共に、インフォマティクスやロボットなどの技術を組み合わせた我々の DX 化の取り組みについて紹介する。

[1] I. Matsuda, R. Arafune ed., *Nonlinear X-ray Spectroscopy for Materials Science, in press* (Springer, 2023).

[2] I. Matsuda ed., *Monatomic Two-Dimensional Layers: Modern Experimental Approaches for Structure, Properties, and Industrial Use*, (Elsevier, 2019).

[3] I. Matsuda, T. Kondo, J. M Oliva-Enrich ed. *New Science of Boron Allotropes, Compounds, and Nanomaterials* (Mdpi AG, 2023)

[4] I. Matsuda and K. Wu ed., *2D boron: Boraphene, Borophene, Boronene* (Springer, 2021).

近藤絶縁体 YbB_{12} の強磁場超音波再測定

栗原綾佑^A, 宮田敦彦^B, 荒木孝治^C, 日比野瑠央^D, S. Zherlitsyn^E, J. Wosnitza^E,
三宅厚志^F, 徳永将史^B, 矢口宏^A, 伊賀文俊^G, 松田康弘^B

^A東理大創域理工, ^B東大物性研, ^C防衛大理工, ^D北大院理, ^EHLD HZDR, ^F東北大金
研, ^G茨城大理

Revisit high-field ultrasonic study of Kondo insulator YbB_{12}

R. Kurihara^A, A. Miyata^B, K. Araki^C, R. Hibino^D, S. Zherlitsyn^E, J. Wosnitza^E,

A. Miyake^F, M. Tokunaga^B, H. Yaguchi^A, F. Iga^G, and Y. H. Matsuda^B

^AFac. of Sci. & Tech., TUS, ^BISSP, Univ. of Tokyo, ^CDept. of Appl. Phys. Nat. Def. Acad.,

^DGrad. of Sci. Hokkaido Univ., ^EHLD HZDR, ^FIMF, Tohoku Univ., ^GCol. of Sci, Ibaraki Univ.

YbB_{12} は、伝導電子と $4f$ 電子が混成する近藤効果により、低温でフェルミエネルギー近傍にギャップが形成される^[1]。これにより、電気抵抗は低温に向かって増大し絶縁体的な挙動を示す^[2]。他方、極低温付近では電気抵抗が一定値になることや^[3]、熱だけを顕著に伝導する新種粒子の可能性^[4]、また磁気抵抗や磁気トルク測定での量子振動の観測^[3]が報告されるなど、新奇な物理現象を実現する基底状態解明が期待されている。この量子振動の起源を明らかにするため、これまで我々は、バルク敏感な超音波に着目し、 YbB_{12} のパルス強磁場下超音波測定を遂行してきた^[6]。しかしながら、絶縁体相内での音響的量子振動の観測には至っていない。この結果は、量子振動の起源解明に重要な情報を与える可能性がある一方で、 YbB_{12} の顕著な試料依存性による量子振動の未観測も考えられる。

そこで本研究では、絶縁体相内で量子振動を示すことが確認されている YbB_{12} ^[4]を用いて、超音波を用いた弾性定数と超音波吸収係数の強磁場依存性を再び測定した。超音波測定は、ISSP および HLD それぞれのパルスマグネットと ^3He 冷凍機を用いて遂行した。その結果、どちらの実験施設で測定した弾性定数および超音波吸収係数の磁場依存性にも、実験精度の範囲内では絶縁体相内での音響的量子振動はみられなかった。他方、4.2 K 以下かつ 38 T 付近において明瞭な弾性異常を観測した。この異常による弾性定数の変化量は、Lifshitz-Kosevich 式で期待されるような温度変化を示さなかった。

講演では、超音波測定の結果について詳細を報告する。

[1] T. Saso and H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 1131 (2003).

[2] M. Kasaya et al., J. Magn. Magn. Mater. **177-181**, 337 (1985).

[3] Z. Xiang, et al., Science **362**, 65 (2018).

[4] Y. Sato et al., Nat. Phys. **15**, 954 (2019).

[5] R. Kurihara et al., Phys. Rev. B **103**, 115103 (2021).

遍歴型弱い強磁性体への現象論によるアプローチ

松元和幸^A

^A北教大旭川校

A phenomenological approach to itinerant weak ferromagnets

K. Matsumoto^A

弱い強磁性体の理論は、スピンの揺らぎを考慮する理論によって説明される。[1] しかし、ここでは単純に、ランダウの強磁性相転移理論を発展させて、簡単な現象論を展開したい。[2] 具体的には、筆者らが導入した非線形磁場項を負不符号へ拡張したものをかんがえる。自由エネルギーを書き下すと、

$$f = \left(\frac{T-J}{2T_C}\right)m^2 + \left(\frac{T+Q}{12T_C}\right)m^4 - hm + chm^3$$

である。ここで、 T , T_C , m , h は、温度、キュリー温度、規格化された磁化、規格化された磁場である。そして、 J , Q , c は実験より決める現象論のパラメータであり、 J はキュリー温度の値より、 Q は基底状態での磁化の大きさから決定される。

- 1) ZrZn_2 : c は高磁場極限の磁化の値より決定される。それにより基底状態のゼロ磁場磁化率がもとめられた。結果は実験値とコンシステントであった。
- 2) MnSi : c は拡張されたアロットプロットより決定される。具体的には $c \approx 5$ で、 $\chi_0(T=0) \cong 0.0$ となった。この値は実験値 0.13 に近い値である。ちなみに、拡張されたアロットプロットとは、 c 項の存在により、アロットプロットが直線より双曲線へと拡張されたものである。
- 3) Ni_3Al : $c \sim 0$ となりこの場合はオリジナルの直線アロットプロットでよく記述される。結果は、 $\chi_0(T=0) \cong 0.5$ となり実験値 0.5 との良好一致をみる。
- 4) Sc_3In : $c < 0$ となったので、以前の筆者らの理論より、高磁場下でのメタ磁性が期待される。しかし、実際にはメタ磁性の可能性は低いことが分かった。

さらに、ゾンマーフェルト係数の磁場変化量 $\Delta\gamma(H)$ の理論式もこの理論により得ることができた。それによると ZrZn_2 について、実験値が $\Delta\gamma(H) = -1.3 \text{ mJ/mol/K}^2$ であるところ、理論値は $\Delta\gamma(H) = -1.6 \text{ mJ/mol/K}^2$ となりよく一致した。一方、この量についての古い理論評価値はウォルファースによる $\Delta\gamma(H) = -6.4 \text{ mJ/mol/K}^2$ であった。[3] また、圧力を加えた場合には、自由エネルギーに磁化の対数項をさらに付け加えることがかんがえられる。

[1] T. Moriya, Spin Fluctuation in Itinerant Electron Magnetism (Springer, Berlin, 1985).

[2] K. Matsumoto, Eur. Phys. J. B **96**, 7 (2023).

[3] E. P. Wohlfarth, J. Appl. Phys. **39**, 1061 (1968).

新しい磁化プラトートの理論的・計算科学的研究

坂井徹^{A,B}, 岡本清美^A, 奥西巧一^C, 橋本理^A, 法田朋久^A, 古内理人^A, 中野博生^B

^A兵庫県立大院理, ^B量研 SPring-8, ^C新潟大理

Theoretical and Computational Study on Novel Magnetization Plateaux

T. Sakai^{A,B}, K. Okamoto^A, K. Okunishi^C, M. Hashimoto^A, T. Houda^A, R. Furuchi^A, H. Nakano^A

^AUniversity of Hyogo, ^BQST SPring-8, Osaka Univ., ^CNiigata University

磁化プラトー現象は、長年にわたり、強磁場科学の重要な研究対象となっている。量子スピン鎖における磁化プラトーは、磁場によって誘起される Haldane gap として取り上げられ、出現するための厳密な必要条件が以下の式であることが示されている[1]：

$$Q(S - m) = \text{integer}$$

ここで、 S, m はそれぞれユニットセルあたりの全スピン、磁化で、 Q は基底状態の周期である。 $Q=1$ 、つまり並進対称性の自発的破れを伴わない磁化プラトーは、様々な系で理論予測されたり、実験的に発見されたりしている。なかでも興味深いのは、近年提唱された、対称性に守られたトポロジカル相[2]としての磁化プラトーで、異方性のある $S=3/2$ あるいは $S=2$ 反強磁性鎖において理論予測されている[3,4]。この磁化プラトーは、開放端にエッジスピンの特徴を持っており、ESR 等による実験的検証に期待がかかる。

一方、 $Q=2$ あるいはそれ以上の磁化プラトーは、並進対称性の自発的破れを伴う必要がある。このような磁化プラトーも、次近接相互作用によるフラストレーション系において、いくつか理論的に予測されている[5,6]。最近、本研究グループによる有限系の数値対角化と密度行列繰り込み群法による解析により、二つの異方性が競合する場合に、並進対称性が自発的に破れて2倍周期構造を持つ磁化プラトーが出現することが示された[7]。このメカニズムは様々な系で可能であり、現在のところ、 $S=1$ 反強磁性鎖、 $S=1/2$ ボンド交代鎖、 $S=1/2$ スピンラダー等において、磁化プラトー相を含む基底状態相図が導かれている。これらの結果を紹介して、検証実験の可能性について議論する。

[1] M. Oshikawa, M. Yamanaka, I. Affleck, Phys. Rev. Lett **78**, 1984 (1997).

[2] F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg, M. Oshikawa, Phys. Rev. B **81**, 064439 (2010).

[3] A. Kitazawa, K. Okamoto, Phys. Rev. B **62**, 940 (2000).

[4] T. Sakai, K. Okamoto, T. Tonegawa, Phys. Rev. B **100**, 054407 (2019).

[5] K. Okunishi, T. Tonegawa, Phys. Rev. B **68**, 224422 (2003).

[6] H. Nakano, M. Takahashi, J. Phys. Soc. Jpn. **67**, 1126 (1998).

[7] T. Sakai et al., in preparation.

強磁場による均質な磁気異方性制御がもたらす磁場誘起磁気転移

井原慶彦^A, 日吉竜冨^A, Ramender Kumar^A, 平田倫啓^B, 佐々木孝彦^C,
荒木勇介^D, 徳永祐介^D, 有馬孝尚^{D,E}

^A 北大院理, ^B LANL, ^C 東北大金研, ^D 東大新領域, ^E 理研 CEMS

High-field magnetic state induced by the field-controlled magnetic anisotropy.

Y. Ihara^A, R. Hiyoshi^A, R. Kumar^A, M. Hirata^B, T. Sasaki^C,
Y. Araki^D, Y. Tokunaga^D, and T. Arima^{D,E}

^ADepartment of Physics, Hokkaido Univ., ^BLANL, ^CIMR, Tohoku Univ.,

^DDepartment of Advanced Materials Science, Univ. of Tokyo, ^ERIKEN CEMS,

結晶構造に空間反転対称性を持たない反強磁性体では通常の対称な交換相互作用に加えて、反対称なジャロシンスキー・守屋相互作用により、ヘリカル磁性など興味深い磁気基底状態が実現する。極性キラル磁性体 $\text{Ni}_2\text{InSbO}_6$ (空間群 $R3$) ではゼロ磁場において $T_N = 78 \text{ K}$ で $q = 0.0029b^*$ の伝播ベクトルを持つヘリカル磁性が観測されている。[1] 一方で、同様の結晶構造を持つ $\text{Ni}_2\text{ScSbO}_6$ では等方的な Ni^{2+} 磁気モーメントを、より異方性の強い Co^{2+} に置換していくことで伝播ベクトルが c 方向に回転することが報告された。[2] このとき、ヘリカル構造の周期性が格子に整合することが明らかになっているが、これには Co ドープによる乱れが影響していると考えられる。そこで、本研究ではより均一に磁気的な異方性を導入する手段として強磁場を印加し、磁場中で実現する磁気構造を NMR 測定により調べた。[3] 反強磁性相互作用を持つ極性キラル磁性体では、磁気構造変化を誘起する磁場が非常に高く、実際 $\text{Ni}_2\text{InSbO}_6$ では面内方向では 14 T、面直方向では 19 T において誘電異常を伴う磁気異常が観測されている。[4] 一般的な超伝導電磁石では到達が難しい強磁場領域までの NMR 測定を行うため、東北大学金研の CSM-25T を用いて単結晶試料に対する ^{115}In -NMR スペクトル測定を行った。最低温度での ^{115}In -NMR スペクトルは面内、面直どちらの磁場についても、臨界磁場において明確に構造が変化し、強磁場相では内部磁場の分布が減少していることが明らかになった。これらのスペクトルは面内磁場中では傾角反強磁性、面直磁場中では伝播ベクトルの回転が起こっていることと矛盾しておらず、強磁場による伝播ベクトル回転のミクロな証拠を得た。しかし、局所的なプローブである NMR 測定ではヘリカル構造の周期性を同定することはできないため、強磁場ネットワークを活用し、これを可能にする強磁場中性子回折実験を行うことが今後の課題である。

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

[2] K.-L. Ji, *et al.*, *Chem. Commun.* **54**, 12523 (2018).

[3] Y. Ihara, *et al.*, *Phys. Rev. B* **108**, 024417 (2023).

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

パルス強磁場電子スピン共鳴によるマグノン崩壊の観測

赤木暢^A, 松本正茂^B, 鳴海康雄^C, 大久保晋^D, 太田仁^D, 萩原政幸^C

^A東北大金研, ^B静岡大, ^C阪大先端強磁場, ^D神戸大分子フォトセ

Observation of magnon decay by pulsed-high field electron spin resonance

M. Akaki^A, M. Matsumoto^B, Y. Narumi^C, S. Okubo^D, H. Ohta^D, and M. Hagiwara^C

^AIMR, Tohoku Univ., ^BShizuoka Univ., ^CAHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ., ^DMPRC, Kobe Univ.

電気磁気マルチフェロイック物質では、電子スピン共鳴 (ESR) において、電気分極変動を伴う磁気励起 (エレクトロマグノン) が観測される。エレクトロマグノンは、電磁波の振動電場励起も許容するため、振動磁場・振動電場励起の干渉による非相反性など特異な振る舞いが現れることがある。本研究の対象物質であるオケルマナイト物質は、スピン誘起の電気分極が発現するマルチフェロイック物質であり、エレクトロマグノンが観測される。実際、 $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ では、スピン双極子マグノンの2倍のエネルギーを持つスピン四極子が振動電場成分によって励起されている[1]。また、本研究の対象物質である $\text{Sr}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$ では、パルス強磁場 ESR 測定から非常に大きな非相反方向二色性 (一方向透過性) が、ローレンツ型吸収波形とは明らかに異なるブロードな吸収において観測された (図 1(a), Cモード)。本研究では、ESR におけるブロードな吸収と一方向透過性の発現の機構を理解するため実験・理論両面から研究を進めた。

ESR 吸収のブロード化の起源を理論解析から研究した結果、自発的なマグノン崩壊が重要であることが分かってきた。図 1(b)は、 $\text{Sr}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$ のマグノン分散を模式的に示したものである。 $2E$ マグノン (L_0) は、2つの $1E$ マグノン (T_{-k}, T_k) へ崩壊することができる。つまり、Cモードは、「 $L_0 \leftrightarrow T_{-k}, T_k$ 」という崩壊過程を伴った磁気励起モードである。この崩壊過程を考慮することで ESR 共鳴吸収におけるブロード化と共鳴点シフトが説明できる。

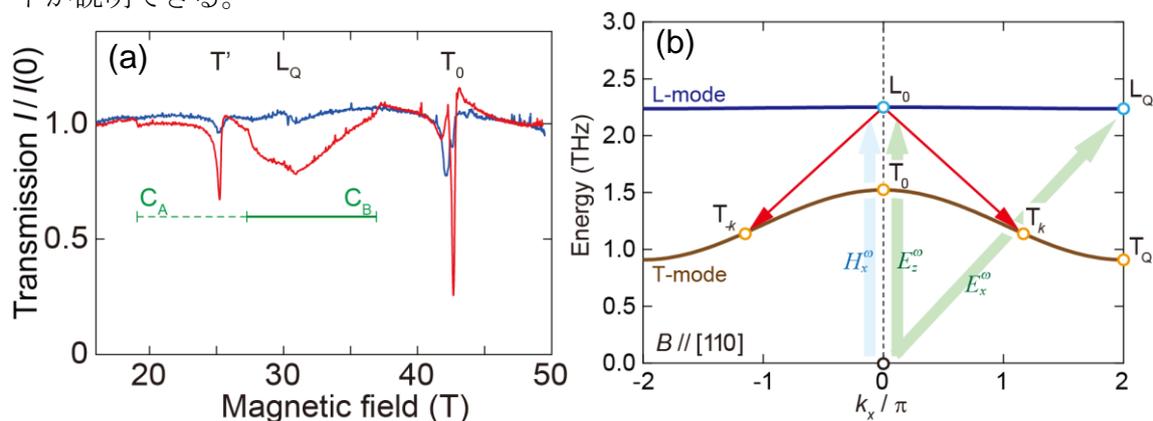


図1. (a) $\text{Sr}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$ におけるESR吸収スペクトル (Voigt配置, $B//H^{\omega}//[110]$, $E^{\omega}//[001]$, 1.4K, 1.62THz)。 (b)マグノン分散の模式図。 T_0, T_Q は1E、 L_0, L_Q は2Eマグノンを示す。

[1] M. Akaki *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 214406 (2017).