

特 集

第 19 回 低温物質科学講演会・研究交流会 開催報告

Report on the 19th LTM Workshop

石田 憲二

京都大学 大学院理学研究科

Kenji Ishida

Graduate School of Science, Kyoto University,

The 19th Low-Temperature and Materials Sciences (LTM) Workshop was held on February 20, 2025, at the Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University. This marked the long-awaited resumption of the workshop, which had been suspended for four years due to the COVID-19 pandemic. The workshop served as a valuable platform for exchange among students and researchers in the fields of low-temperature and materials sciences. More than 80 participants, including 48 students, took part in the event, which featured three invited lectures and 49 poster presentations.

2025 年 2 月 20 日 (木) に京都大学百周年時計台記念館国際ホールにて「第 19 回低温物質科学講演会・研究交流会」が開催されました。この研究会は、旧低温物質科学研究センター設立時より、京都大学内の低温に関する研究者の情報交換・相互交流の場として毎年開催されていましたが、COVID-19 のため 2020 年開催を最後に中断となっていました。その間、色々なことがありましたが、低温関係の研究者の情報交換・相互交流の場を復活させようと関係者で話し合い、5 年ぶりとなる講演会・研究交流会が開催されました。前半の講演会は以前の様式を引継ぎましたが、後半の研究交流会は生協のケータリングのサービスが停止していることもあり、料理を囲んでの歓談とはなりませんでした。国際会議でのポスター発表をイメージし、飲み物と軽い軽食を片手にポスター発表を楽しめるスタイルに変えました。後で紹介するように、Best Poster Award も新設し発表者を顕彰する企画を新たに設けました。研究交流会をどのような企画にしていくのかは継続して関係者で話し合うとして、今後も講演会・研究交流会を続けていこうということになりました。今後とも、御参加、御協力の程よろしくお願いいたします。以下、今回の講演会・研究交流会の様子を報告いたします。

今年度の講演会のテーマは、京大発の物理である「超伝導ダイオード効果 ―基礎から今後の発展について―」で 14 時 30 分から講演会は開始されました。最初に佐々木低温物質管理部門長の挨拶に続き、以下の 3 件の講演が行われました。

最初の講演は化学研究所の小野輝男先生による「超伝導ダイオード効果」の講演で、この効果の説明や、発見の経緯や発見した学生の紹介、発見論文を投稿した時の referee とのやり取りやその後の反響について、ユーモアを交えわかりやすく説明頂きました。最初に講演を依頼した時は他の会議の講演と重なっていたた



講演時の小野先生

め辞退されていましたが、他の会議の日程を変更して、今回講演していただきました。発見時の研究室の様子を知ることが出来た貴重な講演で、参加の学生の方も刺激を受けたのではないのでしょうか。

続いて、理学研究科の柳瀬 陽一 先生による「内因的超伝導ダイオード効果と非平衡超伝導ダイオードの理論」の講演がなされ、この効果に見られる超伝導非相反現象の理論的な説明をわかりやすくしていただきました。また自身の研究グループで行っている理論研究から、この現象がヘリカル超伝導、軌道 FFLO 超伝導体などのエキゾチック超伝導体に広く見られることを紹介されました。

最後に工学研究科の大島 諒 先生による「鉄系層状超伝導体における無磁場超伝導ダイオード効果」と題する講演があり、鉄系超伝導体で構造が最も簡単な FeSe の膜を基板に置いたところ、従来の超伝導ダイオード効果とは異なり無磁場でも超伝導臨界電流が電流方向で異なる超伝導ダイオード効果が見られたことを報告されました。講演では他の材料での対照実験やその起源についてもお話しされた。

この分野を牽引している第一線の研究者による講演とあって、講演の後も活発な質疑応答がなされ講演会は成功裏に終わりました。

講演会に続き、ポスター発表と懇親会からなる研究交流会が 17 時より約 2 時間開催されました。今回はポスター発表を 2 組に分け、ポスター発表者には自身のポスターの前にて 30 分間の発表時間を義務付けるようにしました。アルコールも入り、関係者で議論が盛り上がっている発表も多く見られました。またシニアの先生方にポスター発表の審査を依頼し、下記の 3 件のポスターを Best Poster Award に選出しました。

- ・宮本 将志 さん(工学研究科 電子工学専攻)
「ジョセフソンプラズマエミッタの放射テラヘルツ波周波数変調」
- ・矢坂 聡一郎 さん(理学研究科 化学専攻)
「 κ -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Br における陰イオン層のディスオーダーによる電子局在」
- ・松村 拓輝 さん(理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻)
「超純良単結晶 UTe₂ の NMR: スピン三重項超伝導状態におけるゆらぎ」

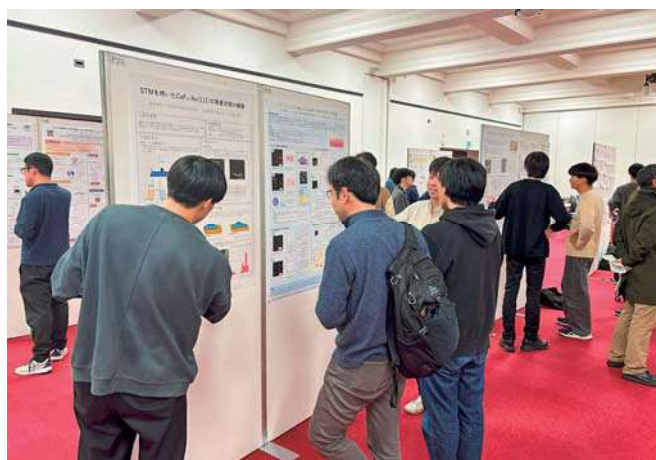
副賞は「低温物質科学誌」への投稿権です。発表内容の記事の投稿をお願いします。今回の講演会開催案内が会の直前にあったにもかかわらず、コロナ前とほぼ同数のポスター発表であった



講演中の柳瀬先生



講演中の大島先生



研究交流会でのポスター発表の様子

ことは、大変うれしいことでした。

講演をして頂いた3名の講師の先生をはじめポスター発表を行ってくださった方々、参加いただいた皆様に感謝いたします。今年度の講演会・研究交流会も昨年度と同時期の開催を考えています。是非、多くの方の御参加の程よろしく願いいたします。



研究交流会終了後の記念撮影。Best Poster Award 受賞者は、左から宮本さん、矢坂さん、松村さん

超伝導ダイオード効果

小野 輝男^{a, b}

^a 京都大学 化学研究所

^b 京都大学 スピントロニクス学術連携研究教育センター

E-mail : ono@scl.kyoto-u.ac.jp



Nb 層, V 層, Ta 層から構成される非対称構造を有した人工格子において (図 1(a)), 測定電流と垂直に外部磁場を印加すると (図 1(b)), 超伝導の臨界電流の大きさが電流方向に依存することを見出した (図 1(c)). 図 1(c)の結果は, 順方向の臨界電流と逆方向の臨界電流の間の電流値では, 順方向では超伝導状態でゼロ抵抗であるが, 逆方向では常伝導状態で抵抗が有限となることを示し, 超伝導ダイオード効果と呼ぶべき現象が観測されたことを意味する[1]. さらに, この超伝導ダイオード効果は, 極性が外部磁場で切り替え可能であるという, 従来のダイオードにはない特徴を持つ. 論文発表後に, このような現象は超伝導体中の磁束運動によっても起こることが以前から知られているとご指摘をいただいた. 先人の論文を引用できなかったことを大変反省している. 講演では, 本研究への私たちのアプローチ, 磁束運動以外に最近提案された超伝導ダイオード効果のメカニズム, 磁性体との融合によるゼロ磁場超伝導ダイオード[2,3], 超伝導ダイオード効果の応用可能性について議論したい.

- [1] F. Ando *et al.*, *Nature* **584**, 373 (2020).
- [2] H. Narita *et al.*, *Nature Nanotechnology* **17**, 823 (2022).
- [3] H. Narita *et al.*, *Adv. Mater.*, 2304083 (2023).

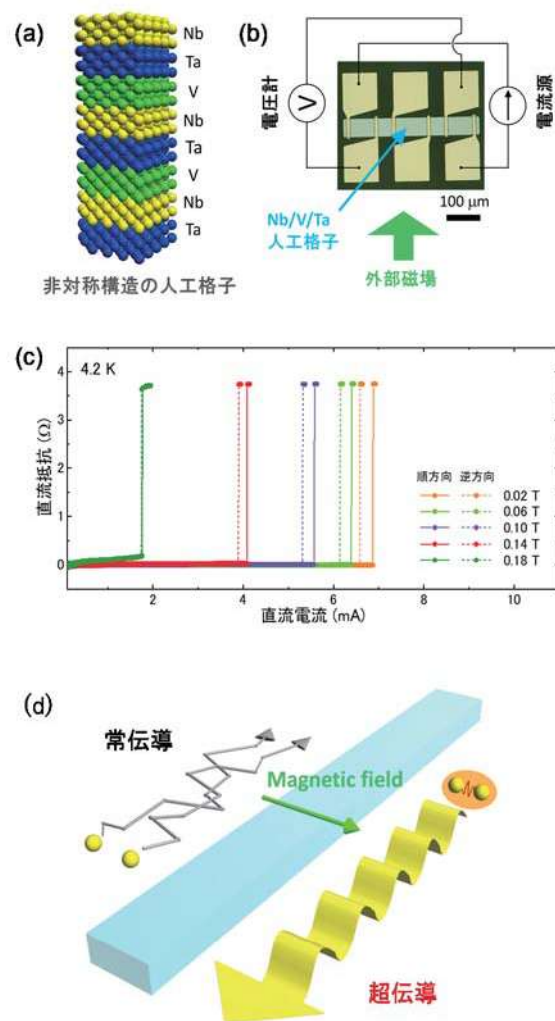


図 1 (a) 非対称構造 Nb/V/Ta 人工格子の概念図 (b)試料の光学顕微鏡図と 4 端子電気抵抗測定の実験配置 (c) 磁場中での抵抗の測定電流方向依存性 (順方向 (実線), 逆方向 (点線)) (d) 超伝導ダイオード効果の概念図

内因的超伝導ダイオード効果と非平衡超伝導ダイオードの理論

大同 暁人^a, 中村 恭平^a, ヌンチョット ナラティップ^a,
茶園 宙弥^a, 柳瀬 陽一^a

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

E-mail: yanase@scphys.kyoto-u.ac.jp



近年の物性物理学においては量子力学的な法則に由来する非相反現象が重要な研究テーマになっている。非相反現象とは、右向きの流れと左向きの流れが異なる性質を持つ現象である。代表的な例として、ダイオードが挙げられる。私たちの社会で現在用いられているダイオードは半導体接合などを用いたものであり、その原理は半古典的な描像で理解できる。一方、現在の物性研究では、量子力学的な法則に従う物質固有の性質に由来する非相反現象が

注目を集めている。なかでも低温研究においては、安藤らにより Nb/V/Ta 人工超格子において超伝導臨界電流の非相反性が観測されたことが超伝導研究に新たな潮流を生み出した[1,2]。右方向に電流を流せば超伝導体としてふるまい、左方向の電流に対しては金属としてふるまう分かりやすい非相反現象であり、それが制御された系で観測された点も重要である。また、超伝導ダイオード効果は非摂動的である点も顕著な特徴である。本講演では特に、超伝導体に固有の量子状態を反映した内因的超伝導ダイオード効果[3]を解明した私たちの理論研究について紹介する。ヘリカル超伝導[3,4]や軌道 FFLO 超伝導[5], アナポール超伝導[6]に由来する超伝導ダイオード効果の特徴(図1)や、二次元系に特有の BKT 転移に伴う非線形超伝導ダイオード効果[7]について述べる。これらの結果を用いたエキゾチック超伝導状態の検出法についても述べ、関連する実験研究を紹介したい。

また、最近の発展として、超伝導状態の非平衡性を積極的に利用した完全超伝導ダイオード効果の理論提案[8]についても述べる。超伝導のダイオード効率を 100 %にすることが原理的に可能であることを示し、そのセットアップの一例を紹介する。

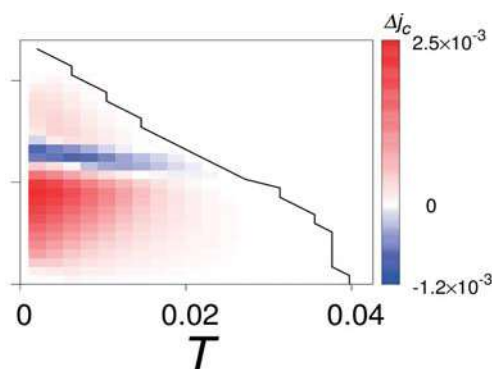


図 1 ラッシュバ超伝導体の超伝導ダイオード効果の大きさを表す磁場温度相図

- [1] F. Ando *et al.*, Nature 584, 373-376 (2020). [2] N. Nagaosa and Y. Yanase, Annual Review of Condensed Matter Physics, 15, 63-83 (2024). [3] A. Daido, Y. Ikeda, Y. Yanase, Phys. Rev. Lett. 128, 037001 (2022). [4] N. Nunchot, Y. Yanase, Phys. Rev. B 109, 054508 (2024). [5] Kyohei Nakamura, Akito Daido, Youichi Yanase, Phys. Rev. B. 109, 094501 (2024). [6] M. Chazono, S. Kanasugi, T. Kitamura, Y. Yanase, Phys. Rev. B 107, 214512 (2023). [7] N. Nunchot, Y. Yanase, arXiv:2409.16930. [8] Akito Daido, Youichi Yanase, arXiv:2310.02539.

鉄系層状超伝導体における無磁場超伝導ダイオード効果

永田 歌寧, 太島 諒, 白石 誠司

京都大学 工学研究科 電子工学専攻

E-mail : ohshima.ryo.2x@kyoto-u.ac.jp



超伝導ダイオード効果 (SDE) は、電流の流す方向により臨界電流に差が生じ非相反的な伝導を示す現象である。Nb/Ta/V 人工格子における空間反転対称性の破れと時間反転対称性の破れの導入による非相反伝導の観測[1]を契機とし、近年理論的にも実験的にも熱心に研究されている本効果であるが、一方でその詳細な発現機構や時間反転対称性の破れが果たす役割は未だ議論が続いている。例として、NbSe₂/Nb₃Br₈/NbSe₂ 積層構造による Josephson 接合において非相反的な臨界電流が報告された[2]が、この非相反性は外部磁場や強磁性体により顕に時間反転対称性を破ることなく発現するとともに、その強度や極性が外部磁場に対し依存しない振る舞いが観測された。従来報告されてきた外部磁場に対し奇関数的な SDE とは全く異なる振る舞いを示す新奇 SDE の報告により、当該効果のより詳細な物性理解や類似効果の観測が希求されている。

我々は、鉄系層状超伝導体 FeSe において SDE を観測した。FeSe は最も単純な構造を持つ鉄系超伝導体とされており、剥離可能な層状物質である。図 1a に示すように熱酸化シリコン基板上に転写した FeSe に電極を作製し電流電圧測定を行った。このとき、従来の SDE とは異なり外部磁場を印加していないにも関わらず、臨界電流が電流方向で異なる SDE と同様の振る舞いが観測された (図 1b)。また、FeSe 膜面内かつ電流と垂直方向に外部磁場を掃引した結果を図 1c に示すが、外部磁場に依存しない振る舞いが観測された。以上は従来 SDE では説明できない SDE 発現機構を示唆するものである。講演では、FeSe で得られた SDE に対し、他の材料系での対照実験などからその起源について議論する[3]。

参考文献 : [1] F. Ando *et al.*, Nature **584**, 373 (2020). [2] H. Wu *et al.*, Nature **604**, 653 (2022). [3] U. Nagata, R. Ohshima, M. Shiraishi, *et al.*, submitted; see arXiv 2409.01715.

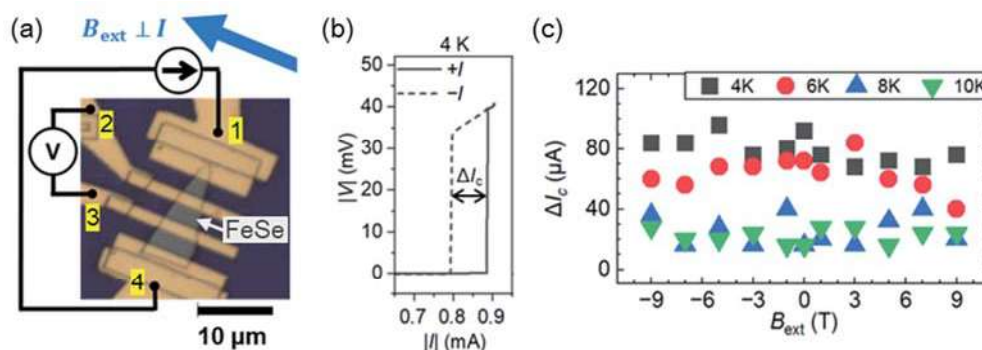


図 1(a) 作製した FeSe デバイスと測定構成。(b) 磁場印加無しかつ測定温度 4 K での電流電圧特性。実線と破線で電流の流す方向が逆向きであり、電流方向による臨界電流の差を ΔI_c とした。(c) 測定温度 4 K ~ 10 K における ΔI_c の外部磁場依存性。

P2 欠損スピネル化合物 $A(\text{Mo, Re})_4\text{S}_8$ ($A = \text{Fe, Co, Ni}$)の結晶育成と磁性

瀬川 優祐, Mohamed A. Kassem, 和氣 剛, 田畑 吉計, 中村 裕之
京都大学 工学研究科 材料工学専攻

E-mail : segawa.yusuke.44m@st.kyoto-u.ac.jp



欠損スピネル化合物 $A(\text{Mo}_2\text{Re}_2)\text{S}_8$ ($A = \text{Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga}$)は過去に合成の報告があるものの、一部、液体窒素温度以上の磁性が報告されているのみで、詳細な磁性が報告されていない。化合物中では磁性原子が三角形を基調とする FCC 格子を成すため、過去の報告と合わせると、スピン間の相互作用が競合し、低温で非自明な磁性が期待できるフラストレート磁性体であると考えられる。

本研究では多結晶体や一部の単結晶試料を作製し、それらに対して共同利用機器の MPMS 等を用いて低温の物性を評価した。特に $\text{Fe}(\text{Mo}_2\text{Re}_2)\text{S}_8$ では、図に示すように 10 K 付近でスピングラス転移を示唆する零磁場冷却と磁場中冷却磁化率の乖離が見られ、単純な反強磁性体ではないことが明らかになっている。幾何学的な配置によるフラストレーションに起因するスピングラス様磁性は、現状その機構について明らかになっていない点もあり、現状考えられている理論との対応についても紹介する。さらに、当日は他の $A(\text{Mo, Re})_4\text{S}_8$ についても研究の現状を報告する。

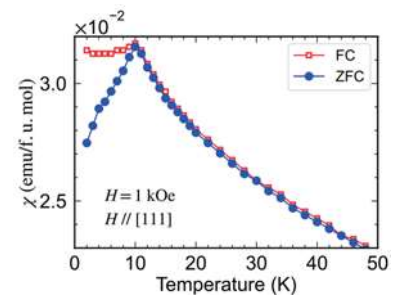


図. $\text{Fe}(\text{Mo}_2\text{Re}_2)\text{S}_8$ 単結晶磁化率の温度依存性

P3 カノニカルスピングラスにおけるカイラル臨界現象

窪田 尚通, 田畑 吉計, 和氣 剛, 中村裕之
京都大学 工学研究科 材料工学専攻 磁性物理研究室

E-mail : kubota.naomichi.76c@st.kyoto-u.ac.jp



スピングラス(SG)は、スピン間の強磁性相互作用と反強磁性相互作用が混在し、低温でランダムな配列のままスピンが凍結する相転移が起こる磁性体である。3次元 Heisenberg SG のモデル物質であるカノニカルスピングラス(CSG)の相転移機構については、スピンの 3 重積であるスカラースピンカイラリティが第一の秩序変数となるカイラリティ仮説[1]が提唱されているが、その当否については現在も結論は出ていない。カイラリティ仮説の実験的な検証方法として特に注目されたのが、カイラル感受率を間接的に捉えることのできる異常ホール抵抗測定である[2][3]。本研究では CSG AuMn (8 at.% Mn) についてホール抵抗率の詳細な測定を行い、非線形カイラル感受率 $R_s^{(c)(2)}$ の臨界発散の観測と、カイラリティの臨界指数の決定を目指した。

図 1 に、非線形カイラル感受率 $R_s^{(c)(2)}$ の温度依存性を示す。SG 転移温度 $T_g = 24.5$ K 近傍で臨界発散的な振る舞いを明瞭に示している。この結果は、カイラリティによって臨界現象が支配されていることを強く示唆している。当日は臨界現象の詳細な議論を行い、その結果を報告する予定である。

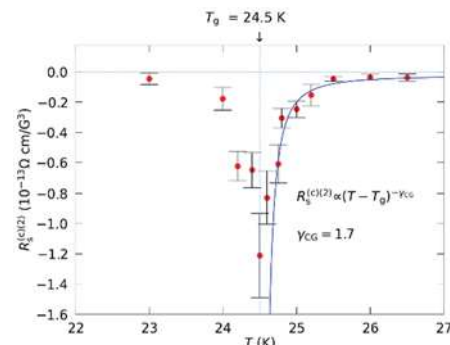


図 1 非線形カイラル感受率 $R_s^{(2)}$ の温度依存性

- [1] H. Kawamura, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 01107 (2010). [2] G. Tatara and H. Kawamura, J. Phys. Soc. Jpn. 71, 2613 (2002). [3] H. Kawamura, Phys. Rev. Lett. 90, 047202 (2003).

P4 超低温下やパルス磁場下での磁気光学カー効果測定技術の開発と精度評価

中村 颯汰^a, 池田 敦俊^{a,b}, 野田 孝祐^c, 池田 暁彦^c, 米澤 進吾^{a,b}

^a 京都大学 工学部 電気電子工学科

^b 京都大学 工学研究科 電子工学専攻

^c 電気通信大学 情報理工学研究科

E-mail : nakamura.souta.75x@st.kyoto-u.ac.jp

Loop-less Signac 干渉計[1]を用いた磁気光学カー効果測定方法は、物体表面の磁化の非接触な測定方法であり、物質の磁性の理解に大きく貢献する。パルス磁場下や液体ヘリウム温度下で安定した測定を行うことは現在の大きな目標である。

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

この新しいセットアップを用いて、定常磁場下では液体ヘリウム温度まで、2 ms, 10 T 超のパルス磁場下では室温において、鉄などに対しカー効果の測定を行った。本発表では新しいセットアップやこれらの測定結果についてより詳細に発表し、今後の展望についても説明する。

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

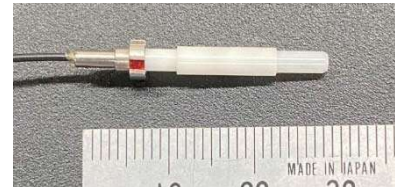


図 1 改良した試料固定部分

P5 ジョセフソンプラズマエミッタからの 10GHz 帯周波数変調テラヘルツ波放射

杉本 啓太郎^a, 宮本 将志^a, 小林 亮太^a, 辻本 学^b, 掛谷 一弘^a

^a 京都大学 工学部 電気電子工学科

^b 産総研

E-mail : sugimoto.keitarou.45c@st.kyoto-u.ac.jp

ジョセフソンプラズマエミッタ (JPE) は Bi2212 の単結晶に内在する固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ領域の光源デバイスである [1]. 最近, JPE に電圧を変調することで、放射される電磁波を周波数変調させることに成功した [2].

本研究では、デバイスに印加する電圧の変調周波数を 3GHz から 10GHz まで変化させた。図 1 に 3.1GHz と 7.5GHz の変調周波数で得られたスペクトルを示す。最大周波数偏移は変調周波数に応じて複雑に変化し、JPE に変調電圧が印加されるまでの回路の減衰率が高い周波数依存性を持つことが分かった。高周波変調を実現するためには回路のインピーダンスを小さくする工夫が必要である。

[1] I. Kakeya and H. Wang, *Supercond. Sci. Technol.*, **29**, 073001 (2016).

[2] M. Miyamoto *et al.*, *Nature Photonics*, **18**, 267–275 (2024).

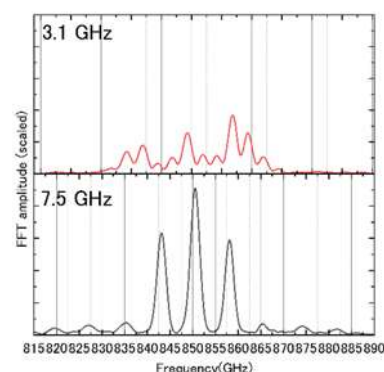


図 1 変調周波数 3.1GHz, 7.5GHz のスペクトル

P6 比熱測定によるカゴメ格子超伝導体 $\text{Cs}(\text{V}_{1-x}\text{Nb}_x)_3\text{Sb}_5$ の上部臨界磁場の測定

前川 健太^a, 池田 敦俊^b, Yugai Yao^c, Yongkai Li^c, Zhiwei Yang^c, 米澤 進吾^{a,b}

^a 京都大学 工学部 電気電子工学科

^b 京都大学 工学研究科 電子工学専攻

^c 北京工科大学

E-mail : maekawa.kenta.63y@st.kyoto-u.ac.jp



カゴメ格子をもつ超伝導体は非従来型超伝導発現の舞台として注目を集めている。実際、 V のカゴメ格子を持つ六方晶超伝導体 CsV_3Sb_5 では、異方的なギャップ関数を持つことだけでなく、上部臨界磁場 H_{c2} が面内 6 回異方性を持つことが我々のグループにおいて確認された。[1] 従来の Ginzburg-Landau 理論では「創発回転対称性」により H_{c2} の 6 回異方性は発現が強く制限されるが、この物質では二成分超伝導が実現していることで H_{c2} の 6 回異方性が観測された可能性が指摘されている。そこで我々は、Nb 置換 CsV_3Sb_5 に対して、ベクトルマグネット装置と希釈冷凍機を用い、高精度に磁場方向を制御したうえで上部臨界磁場を測定し、その磁場角度依存性を調べた。Nb 置換を行うことで、ギャップ関数が等方的になった場合にも、 CsV_3Sb_5 のような上部臨界磁場の面内異方性が保たれるのかは興味深く、超伝導の発現機構にも重要な示唆を与えうる。今回の発表では、我々の実験結果の詳細について報告を行う。

[1] K. Fukushima *et al.*, Nature Commun. **15**, 2888 (2024)

P7 新規一軸歪み印加装置開発に向けた画像解析による歪みの定量的評価方法

藤田 祥太郎^a, 池田 敦俊^a, Giordano Mattoni^b, 松本 久和^b 前野 悦輝^b, 米澤 進吾^a

^a 京都大学 工学研究科 電子工学専攻

^b 京都大学 高等研究院 豊田理研-京大連携拠点

E-mail : fujita.shotaro.35x@st.kyoto-u.ac.jp



物質に異方的な圧力を印加し歪ませることによって超伝導転移温度の上昇[1]などさまざまな性質の変化がみられることが注目されている。現在その圧力を加える手段としてピエゾ素子を使用されており、ピエゾ素子は低温においてもその変形が電氣的な制御可能な点が大きな強みである。一軸歪み印加装置[2]はこのピエゾ素子を組み合わせて配置した装置であり、ピエゾ素子を変形させることで試料に一軸方向の圧力を印加し歪みを生み出すことが可能である。本研究では類似の一軸歪み印加装置を組み立て、その動作を定量的に評価する手法を開発した。具体的にはデジタル画像相関法という解析を利用した。これは二枚の画像を比較し撮影物の二次元的な変位を数値化する方法である。装置の動作前後の写真に対しこの解析を行い得られた結果を用い変位をベクトル図として描画することで装置の動きを直観的に捉えることができる。さらに変位ベクトルの大きさや変位の場所依存性を解析することで歪みテンソル ε の各成分の値を定量的に評価することに成功した。

[1] A. Steppke *et al.*, Science **355**, eaaf9398 (2017).

[2] Hicks *et al.*, Science **344**, eaaf6181 (2014.)

P8 Fiber Bragg grating を用いた Altermagnet 候補物質 RuO₂ の piezo 磁気効果測定を試み

埜田 傑留^a, 池田 敦俊^a, Shubhankar Paul^b, 前野 悦輝^b, 米澤 進吾^a

^a京都大学 工学研究科 電子工学専攻

^b京都大学 高等研究院 豊田理研—京大連携拠点

E-mail : noda.suguru.26r@st.kyoto-u.ac.jp



時間反転対称性の破れの検出方法として、圧磁効果 (piezomagnetism) が注目されている。圧磁効果とは、印加した磁場に対して試料が線形にひずむ特性のことであり、試料が時間反転対称性を破っているときのみ許される現象である。このように歪み測定の技術開発は時間反転対称性の破れを伴う物質の研究の上で重要である。

我々のグループでは fiber-Bragg grating(FBG)という手法を使い、URhGe について強磁性体では初めての圧磁効果を観測した[1]。FBG は光ファイバーのコア内に刻み込まれた回折格子で、特定の波長の光のみをブラッグ反射する。FBG を試料に貼り付けると、試料の伸縮に合わせて FBG も伸縮し反射波長が変化する[2]。この FBG を用いた歪み測定は、電磁ノイズに影響されず、発熱がなく、多軸測定も可能である。

RuO₂ は交替磁性を示すかどうか議論されている物質である。交替磁性状態では時間反転対称性が破れているため、圧磁効果を用いて検証できる。我々は FBG 測定用の改良型プローブを作成し、RuO₂ の圧磁効果を調べている。現在のところ線形歪みは見えず、時間反転対称性を示す証拠は得られていない。

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

[2] レビューとして, M. Jaime *et al.*, Sensors **17**, 2572 (2017).

P9 磁気光学カー効果を用いた高感度磁気ドメインスキャン装置の開発

渡辺 岳斗^a, 山根 総一郎^a, 池田 敦俊^a, 米澤 進吾^a

^a京都大学 工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学研究室

E-mail : watanabe.gakuto.73x@st.kyoto-u.ac.jp



物質の理解のために磁氣的性質を調べることは重要である。磁氣的性質を調べる方法の一つが磁気光学カー効果である。この効果は磁化した物質に偏光を入射させると反射光の偏光面が回転する効果である。磁化の大きさによって偏光面の回転角が変わるため、金属など光を反射する物質の磁化を高感度で測定することができる。

我々のグループではこの磁気光学カー効果を用いた物質の磁化測定を行ってきた。今まで使用してきたセットアップは 1 点を取るものが多く、磁気ドメインの空間的な広がりを見るには不向きだった。そこで物質表面の二次元的な磁気構造を調べるため、レンズに自動 XY ステージを取り付けたセットアップ開発を行った。このセットアップでは光を当てる場所を変えながら測定を行うことで磁化のスキャンを可能にしておき、磁気ドメインを観測するために十分な空間分解能を持っている。この装置を使用して磁気ドメインの観測を行っており、反射光強度の改善や安定した測定を目指したセットアップの改良を行っている。現在までに行った測定の結果やセットアップについての説明を行う。

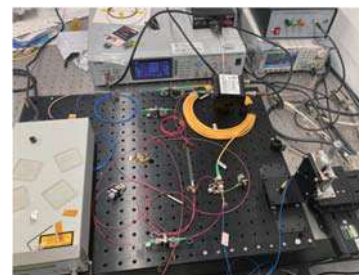


図1 作製したセットアップ

P10 LTspice を用いたジョセフソンプラズマエミッタのシミュレーションにおける等価回路のシンボル化に関する一検討

森 倫太郎^a, 小林 亮太^a, 掛谷 一弘^a

^a 京都大学 工学研究科 電子工学専攻

E-mail : mori.rintaro.27z@st.kyoto-u.ac.jp



テラヘルツ波は電波と光の間の領域の周波数 (0.1~10THz) を持つ電磁場であり, それらの特性を併せ持つことから超高速通信やイメージングなど様々な応用が期待されている. 近年, 有用なテラヘルツ波源として銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) を用いた素子であるジョセフソンプラズマエミッタ (JPE) が研究されており[1], 筆者の研究グループではその理論・設計・実装について研究を行なっている. 筆者は JPE の放射強度の増強に向けてメサの形状最適化とアンテナの付与を検討している.

本報告では, JPE 等価回路のシンボル化について述べる. JPE の設計手法の 1 つとして等価回路によるシミュレーションがあり, 文献[2]では回路パラメータを抽出することでデバイスの放射特性の測定結果を再現している. この逆方向の手順を踏むことで, ある放射特性を実現するためのデバイス形状を決定することができると考えている. 一方で, メサの多層構造を厳密に再現するには等価回路が大きく複雑になってしまうため, LTspice の機能を用いて 1 層分の等価回路をシンボル化することで, 全体の回路をより見やすくし拡張性を高めることを検討する.

References

- [1] I. Kakeya and H. Wang, *Supercond. Sci. Technol.* **29**, 073001 (2016).
- [2] R. Kobayashi, et al., *Appl. Phys. Express* **17**, 054043 (2022).

P11 ジョセフソンプラズマエミッタの放射テラヘルツ波周波数変調

宮本 将志^a, 小林 亮太^a, 辻本 学^b, 桑野 玄気^b, 掛谷 一弘^a

^a 京都大学 工学研究科 電子工学専攻 米澤研究室

^b 産業技術総合研究所

E-mail : miyamoto.masashi.24a@st.kyoto-u.ac.jp



ジョセフソンプラズマエミッタ[1] (JPE) は銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) の単結晶基板上にメサ構造を形成した素子である. Bi2212 は結晶内部に固有ジョセフソン接合 (IJJ) を持つことから, JPE は印加電圧と放射テラヘルツ波の周波数が比例する[2]. 本研究グループは, 800 GHz 帯で発振する JPE のバイアス電圧に数 GHz の正弦波変調を重ねることで, 中心周波数 860 GHz, 最大変調周波数幅 40 GHz の周波数変調テラヘルツ波の放射に成功した[3]. これまでテラヘルツ波の周波数変調の報告はほとんどなく, この成果はテラヘルツ波に期待される超高速・大容量通信への応用が期待される.

References

- [1] I. Kakeya and H. Wang, *Supercond Sci Technol* **29**, 073001 (2016).
- [2] M. Tsujimoto et al., *Phys Rev Lett* **108**, 107006 (2012).
- [3] M. Miyamoto et al., *Nat Photon* **18**, 267-275 (2024).

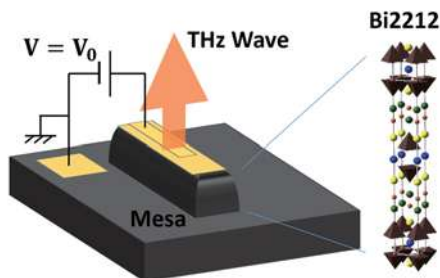


図 1 : ジョセフソンプラズマエミッタ (JPE)

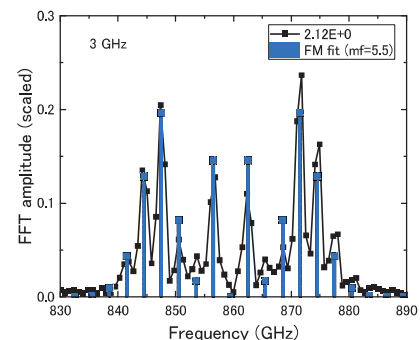


図 2 : 3 GHz 変調スペクトル (黒線) と理想 FM スペクトル (青線)

P12 超伝導テラヘルツ光源のモデル解析とその展望

小林 亮太^a, 掛谷 一弘^a

^a京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻 米澤研究室

E-mail : kobayashi.ryota.86a@st.kyoto-u.ac.jp



超伝導テラヘルツ光源は、銅酸化物高温超伝導体の一種である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) における固有ジョセフソン接合を用いた周波数可変なテラヘルツ光源である。固有ジョセフソン接合は超伝導層と絶縁層が交互に積層した結晶構造を指す。超伝導トンネル接合であるジョセフソン接合が多数積層した構造とみなすことができることがその名前の由来である。ジョセフソン接合は接合に直流電圧を印加すると、印加した電圧の大きさに比例した交流超伝導電流を励振することが知られており、この現象は交流ジョセフソン効果と呼ばれる。超伝導テラヘルツ光源ではこの交流ジョセフソン効果を利用し、Bi2212 結晶の積層方向に直流の電圧を印加することで周波数可変なテラヘルツ光を放射する。

このような説明で超伝導テラヘルツ光源の動作原理はおおよそ理解されているが、その挙動を簡潔に記述する解析的なモデルは存在せず、既存の電磁界、ないし電気回路シミュレーションに組み込むことのできる数値計算手法も今まで提案されていなかった。そこで発表者はこれまで既存の電磁界、ないし電気回路シミュレータ上で動作する超伝導テラヘルツ光源の近似モデルを提唱し、そこから得られる予測が実験で得られる特性を良く再現していることを示してきた。本発表では、こうしたモデル解析手法のオーバービューと、それらのさらなる展望として、モデル解析手法同士の関連やモデルから新たに導出された解析解の存在について紹介する。

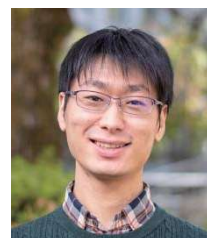
P13 ディラック線ノード金属 CaSb_2 の超伝導転移温度の元素置換依存性

池田 敦俊^{a,b}, 米澤 進吾^a, 前野 悦輝^b

^a京都大学 工学研究科 電子工学専攻

^b京都大学 高等研究院 豊田理研ー京大連携拠点

E-mail : ikeda.atsutoshi.3w@kyoto-u.ac.jp



我々は 2020 年に CaSb_2 が超伝導を示すことを発見した[1]。 CaSb_2 は非共型な結晶構造を有しており、その構造に由来して常伝導状態のバンド構造にトポロジカルなディラック線ノードを持つことが理論的に指摘されている。実験的にも第一原理計算と矛盾しないバンド構造が観測されている。核磁気共鳴の測定によって CaSb_2 は従来型超伝導体であることが明らかとなったが、圧力下で超伝導転移温度がピークを持つという従来型超伝導には珍しい振る舞いを示す[2]。

我々は化学圧力によるバンドチューニングを目的に、 CaSb_2 の Ca を Sr と Ba で部分的に置換した物質を合成した[3]。その結果、負の圧力効果と整合的な転移温度の低下が観測された。また、Ca の 3% を Eu で置換した物質では超伝導は観測されなかった。この結果は磁性不純物に敏感な従来型超伝導の性質で説明できる。本発表では 2020 年における超伝導の発見以来の研究を概観したのち、元素置換の効果について紹介する。

- [1] A. Ikeda et al., PRMaterials **4**, 041801(R) (2020); 池田敦俊, 京都大学物性科学センター誌, **37**, 3 (2020).
- [2] S. Kitagawa, A. Ikeda et al., PRB **104**, L060504 (2021).
- [3] A. Ikeda, S. Yonezawa, and Y. Maeno, JPSJ **93**, 075002 (2024).

P15 ヘリウム3の密度ビリアル係数

多田 康平^{a, b}

^a 京都大学 大学院工学研究科 技術室

^b 京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

E-mail : tada.kohei.6c@kyoto-u.ac.jp



低温・高圧の気体を取り扱う場合、実在気体のふるまいは理想気体のものからずれるため、このずれを理解することは重要である。このずれを表す物理量として、密度ビリアル係数がしばしば用いられる。ヘリウム (He) は広く用いられている寒剤のひとつであり、⁴He では密度ビリアル係数が実験・理論の両面からよく決定されている一方で、³He では密度ビリアル係数が実験的に求められた例は少ない。そのような背景から ³He の密度ビリアル係数を実験的に精度よく求める試みを続けてきたので、これまでの試みを紹介する。

既報の P - V - T (圧力・体積・温度) の実験データ[1]を用いて、3.3 K から 13 K の温度範囲で ³He の密度ビリアル係数を精度よく求めることに成功した[2]。こうして求めた密度ビリアル係数は、傾向として、最近 *ab initio* 計算から得られたもの[3]と辻褄が合うことを確認した[4]。密度ビリアル係数は、一般に気体の P - V - T データの精密測定から求められるが、音響と密度のビリアル係数の間の関係[5]を用いれば、音速の精密測定からも求めることが理論上可能である。この理論的基礎となる公式を得ることに成功した[6,7]。

[1] I.V. Bogoyavlenski et al., *Fiz. Niz. Temp.* **4**, 549 (1978). [2] K. Tada, *Int. J. Thermophys.* **42**, 145 (2021). [3] D. Binosi et al., *J. Chem. Phys.* **160**, 244305 (2024). [4] K. Tada, *J. Chem. Phys.* accepted. [5] K.A. Gillis and M.R. Moldover, *Int. J. Thermophys.* **17**, 1305 (1996). [6] K. Tada, *Int. J. Thermophys.* **43**, 64 (2022). [7] K. Tada, *Int. J. Thermophys.* **43**, 148 (2022).

P16 RuO₂ single crystals: Altermagnet or Paramagnet?

Shubhankar PAUL^{a, b}, Hisa MATSUKI^b, Giordano MATTONI^b, Atsutoshi IKEDA^c, Shingo YONEZAWA^c, Chanchal SOW^a, Yoshiteru MAENO^b

^aDepartment of Physics, Indian Institute of Technology Kanpur, 208016, India

^bToyota Riken–Kyoto University Research Center (TRiKUC), Kyoto 606-8501, Japan

^cGraduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8510, Japan

Email: paul.shubhankar.52x@st.kyoto-u.ac.jp, shubhp@iitk.ac.in

Altermagnets, with RuO₂ emerging as a promising candidate, represent a novel class of materials reviewed by Šmejkal [1] following several independent pioneering studies in 2019. While categorized as antiferromagnets, altermagnets exhibit ferromagnetic- or paramagnetic-like behavior depending on the crystallographic direction, distinguishing them from conventional antiferromagnets. Since 2020, significant research efforts have focused on determining whether RuO₂ qualifies as an altermagnet.

In this study we successfully grew exceptionally high-quality RuO₂ single crystals, achieving a residual resistivity ratio (RRR) exceeding 400. The crystals displayed distinct morphologies—either bulk-like or needle-like shapes, depending on the growth conditions. However, magnetization and angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) measurements reveal no evidence of altermagnetism [2]. Instead, the results demonstrate clear paramagnetic behavior.

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

[2] Osumi, T., Paul, S. Maeno, Y. et al, preprint at <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.10649> (2025)



Figure 1: Optical photograph of typical crystals of RuO₂

17 Design of a uniaxial strain cell for study of the superconductivity of Sr_2RuO_4

T. Johnson^{*}, H. Matsuki, G. Mattoni, Y. Maeno

Toyota Riken - Kyoto University Research Center (TRiKUC), Kyoto University
Institute for Advanced Study (KUIAS)

^{*}JSPS PD Fellow

E-mail : johnson.thomas.75j@st.kyoto-u.ac.jp

After 30 years of research, the superconducting (SC) symmetry of Sr_2RuO_4 (SRO) is still unknown [1, 2]. One way to investigate this symmetry is to perform experiments on SRO under strains that explicitly break rotational symmetries of the lattice.

We designed a uniaxial strain cell based on differential thermal contraction that can apply strains up to 0.8%. Such devices are useful as they can apply large strains without electric voltages that can interfere in certain measurements such as ARPES or M-EELS.

To test device performance, we use an optical cryostat combined with digital imaging correlation that allows us to measure the strain distribution at temperatures down to 30 K. We perform AC magnetic susceptibility measurements on SRO samples to study the response of superconductivity to strain. We can then estimate the applied strain by comparison with piezo-based strain experiments in literature. One preliminary result shows an enhanced T_c onset at 2 K, corresponding to a maximum strain of about 0.3%.

[1] Maeno, Y., Yonezawa, S., & Ramires, A. "Still Mystery after All These Years--Unconventional Superconductivity of Sr_2RuO_4 ." *J. Phys. Soc. Jpn.* **93** (2024) 062001.

[2] Maeno, Y., Ikeda, A. & Mattoni, G. "Thirty years of puzzling superconductivity in Sr_2RuO_4 ." *Nat. Phys.* **20**, 1712–1718 (2024).



図 1 Thermal contraction strain cell (OD 9.5 mm).

P18 超伝導ボルテックスダイオード効果の直接観測

松本 久和^{a,b}, A. Gutfreund^c, V. Plastovets^d, A. Noah^c, L. Gorzawski^a, N. Fridman^c, G. Yang^a, A. Buzdin^d, O. Millo^c, J. W. A. Robinson^a, Y. Anahory^c

^aUniversity of Cambridge, ^b京都大学 高等研究院 豊田理研-京大連携拠点 (TRiKUC), ^cThe Hebrew University of Jerusalem, ^dUniversity of Bordeaux

E-mail: matsuki.hisakazu.2i@kyoto-u.ac.jp



超伝導ダイオード効果[1]は、非相対的な臨界電流が発生する現象として近年注目されています。超伝導体/強磁性体二層構造を基にした超伝導ダイオード[2]は 15 年前に実証されましたが、その正確なメカニズムは明らかにされていません。一方、Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態による対称性の破れが、一因である可能性が指摘されています[3]。本研究では、Nb/EuS (Nb は超伝導体, EuS は強磁性絶縁体) 二層構造において、超伝導ダイオード効果を引き起こす非対称的なボルテックスダイナミクスを直接観測しました。ナノスケール SQUID-on-tip 顕微鏡および電気輸送測定を用いて、観測結果を説明する理論モデルも提案しました。このモデルでは、強磁性層からの散逸磁場が遮蔽電流を誘起し、これが非相対的な臨界電流の原因となります。

Gutfreund, A., Matsuki, H., *et al.* Direct observation of a superconducting vortex diode. *Nat Commun* **14**, 1630 (2023).

[1] Ando, F. *et al.* *Nature* **584**, 373–376 (2020).

[2] Carapella, G., *et al.* *Applied Physics Letters* **94**, 242504 (2009).

[3] Daido, A., Ikeda, Y. & Yanase, Y. *Phys. Rev. Lett.* **128**, 037001 (2022).

P19 超伝導検出用の交流磁化率コイル巻き器とマイクロコイル Coil winder and micro coils for AC susceptibility measurements of superconductors

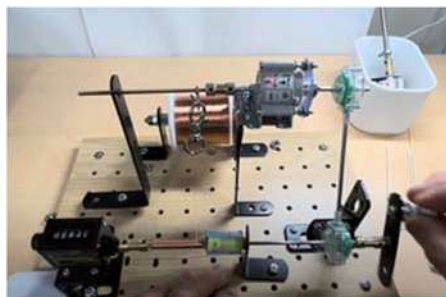
前野 悦輝, Giordano MATTONI

京都大学 高等研究院 豊田理研-京大連携拠点 (TRiKUC)

E-mail : maeno.yoshiteru.b04@kyoto-u.jp



超伝導転移や磁気転移の検出には交流 (AC) 磁化率測定が広く使われています。それに用いる相互インダクタンスコイルの作製に適した自作のコイル巻き器と、100 ミクロン程度の微小試料での検出に威力を発揮するマイクロコイルの作製例を紹介します。コイル巻き器は線材の供給位置の自動送り機構とその反転機構も備えており、当日は来訪者にも実演していただく予定です。マイクロコイルは内径 0.3 mm, 外径 1 mm 程度のもので、自己インダクタンスコイルや相互インダクタンスコイルの例を展示します。また、これらを使った超伝導転移測定の例をご紹介します。この研究活動は JSPS 科研費 No. JP22H01168 の補助を受けています。



Coil winder for a regular-size mutual inductance coil.



Mutual-inductance micro coil: 0.3 mm ID/1.0 mm OD.

P20 あなたの可能性を広げる iCeMS 解析センター

本間 貴之, 藤原 敬宏, 樋口 雅一, 坂本 裕俊, 辻本 将彦, 石館 文善, 逢坂 千歳, 山本 麻代, 森見 公一, 見学 美根子

京都大学 高等研究院 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS) 解析センター

E-mail : thomma@icems.kyoto-u.ac.jp



iCeMS 解析センターは京都大学に 5 つある設備サポート拠点のうちの 1 つである本部構内設備サポート拠点 (MacBES) を, ナノテクノロジーハブ拠点と共に構成している機器共用組織である。利用登録をすることで, 学内外の研究者が最先端の超解像光学顕微鏡や電子顕微鏡, 溶液および固体 NMR, 電子回折装置 (R7 年度共用開始予定) 等々 30 台以上の機器を, アドバイスを受けながら利用することができる。本ポスターでは, iCeMS 解析センター機器だけでなく, 京都大学における共用機器の現状も紹介する。ご自身の研究で必要な機器を探しておられたら, ぜひお立ち寄りください。



P21 LaMnO₃ 薄膜の水素イオン照射による物性制御

岩下 修平, 前里光彦, 平田 勸, 北川 宏

京都大学 理学研究科 化学専攻

E-mail : iwashita.shuhei.55w@st.kyoto-u.ac.jp

LaMnO₃ は Sr や Ca などの 2 価イオンを La と一部置換するホールドーピングにより, 超巨大磁気抵抗を示すことが知られている[1, 2]. しかし LaMnO₃ 系で, 電子ドーピング系を作ることは困難である. そこで, 我々が注目したのが, 水素イオンビーム照射によるドーピング手法である[3]. 水素は原子サイズが最も小さく, 様々な物質に容易にドーピングすることができ, 低温でイオン照射を行うことにより, 水素の脱離を抑えつつ大量に水素を注入することが可能である. この手法により, いくつかの酸化物において高濃度の水素と電子のドーピングが実現されている[4, 5]. 今回我々は, LaMnO₃ 薄膜に対して水素イオンビーム照射を行い, 電気伝導性や磁性などへの影響を調べたので報告する.

[1] A. Urushibara, *et al.*, *Phys. Rev. B* **51**, 14103 (1995).

[2] P. Schiffer, *et al.*, *Phys. Rev. Lett* **75**, 3336 (1995).

[3] R. Nakayama, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 123904 (2017).

[4] R. Nakayama, *et al.*, *Chem. Comm.* **54**, 12439 (2017).

[5] G. C. Lim *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **146** (46), 32013 (2024)



P22 エピタキシャル歪み導入 Sr₂IrO₄ への水素ドーピング

平田 勸^a, 前里 光彦^a, 近松 彰^b, 北川 宏^a

^a 京都大学大学院 理学研究科 化学専攻

^b お茶の水女子大学大学院 理学研究科

E-mail : hirata.susumu.68z@st.kyoto-u.ac.jp

層状ペロブスカイト化合物である Sr₂IrO₄ は, 銅酸化物高温超伝導体との類似性から超伝導状態が期待されている[1]. しかし, 超伝導状態の実験的な観測例は未だ存在しない.

超伝導相の探索は, 化学ドーピングによるキャリア濃度制御か, 格子歪みによるバンド構造制御によって行われるが, 化学ドーピングは格子歪みを誘発し両者の独立な制御は難しい. 水素イオンビーム法は格子歪みを誘発しづらく, この問題を回避できる. そこで, エピタキシャル歪みによるバンド構造制御と水素イオンビームによるキャリア濃度制御を組み合わせ, 実験を行った.

圧縮歪みを印加できる LaAlO₃ 基板上にパルスレーザー堆積法にて Sr₂IrO₄ エピタキシャル薄膜を作製, 100 K で水素イオンビーム照射を行った. 抵抗率は一度増加した後, 大きく減少した. 本発表では, 磁化測定など他の物性測定結果もあわせて報告する.

[1] H. Watanabe *et al.*, *Phys. Rev. Lett*, **110**, 27002 (2013)

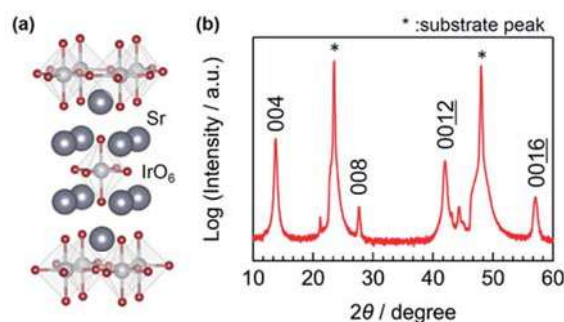


図1 (a)Sr₂IrO₄ の結晶構造, (b) Sr₂IrO₄ エピタキシャル薄膜の XRD パターン

P23 κ'' -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Br における陰イオン層の ディスオーダーによる電子局在

矢坂 聡一郎^a, 吉田 幸大^a, 田中 優輝^a, 井口 敏^b, 池本 夕佳^c, 杉浦 栞
理^b, Muhammad Khalish Nuryadin^b, 佐々木 孝彦^b, 北川 宏^a, 前里 光彦^a

^a京都大学 理学研究科 化学専攻, ^b東北大学 金属材料研究所,

^cJASRI / Spring-8

E-mail : yasaka1119@ssc.kuchem.kyoto-u.ac.jp

有機分子 BEDT-TTF (ET) と陰イオン種 X⁻ を用いた κ -(ET)₂X 錯体は量子スピン液体相や超伝導相などの多様な電子状態を有し、強相関電子系として注目されている[1]. 我々はその中の一つである有機超伝導体 κ -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Br (κ -Br) [2] の初の結晶多形である κ'' -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Br (κ'' -Br) を合成し、その物性研究を行ってきた[3]. 本物質は、既知の κ -Br と非常に類似した ET 分子による伝導層を有するが、陰イオン層にランダムな分子配向を有する (図 1). 本発表では κ'' -Br の結晶構造、バンド構造、並びに低温での物性測定の結果から、その電子状態について議論する。

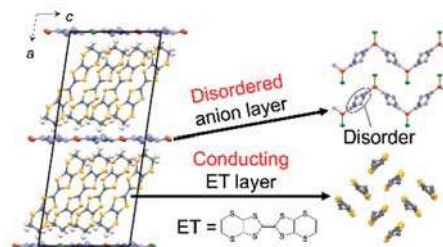


図 1 κ'' -Br の結晶構造

[1] K. Kanoda *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 051007 (2006).

[2] A. M. Kini *et al. Inorg. Chem.* **29**, 2555–2557 (1990).

[3] S. Yasaka *et al. Inorg. Chem.* **63**, 4196–4203 (2024).

P24 Si (111) 基板上に作製した Bi₂Se₃ 超薄膜の成長および電子状態

中村 海斗, 八田 振一郎, 奥山 弘

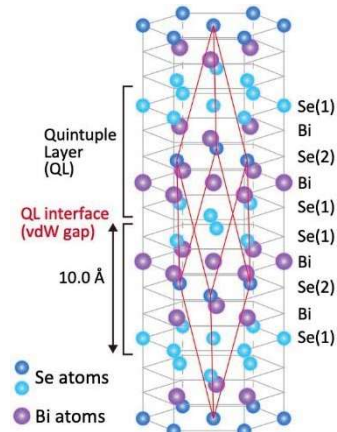
京都大学 理学研究科 化学専攻 表面化学研究室

E-mail : nakamura.kaito.37w@st.kyoto-u.ac.jp

Bi₂Se₃ は Se-Bi-Se-Bi-Se の 5 原子層を積層単位(quintuple layer:QL)とする層状物質である。通常基板上のエピタキシャル成長には厳しい格子整合条件が必要だが、Bi₂Se₃(0001)へき開面には未結合手が存在しないため様々な基板上で結晶構造を保ってエピタキシャル成長できる。ただ Si(111)には多くの未結合手が存在するため、Bi₂Se₃ を直接蒸着すると界面で SiSe₂ を形成してしまうことがある^[1]。そのため基板表面を H, Se, Bi などで終端する手法が用いられている。

本研究では Bi₂Se₃ の昇華による MBE 法を用いて、Bi-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30°もしくは Bi₂Se₃ を少量蒸着して加熱して得た buffer という 2 種類の終端方法で Si(111)基板上に数 QL の Bi₂Se₃ 超薄膜を作製した。どちらの試料でも、低速電子回折の回折パターンからエピタキシャル成長が確認された。また角度分解光電子分光によって層数毎に異なるバンド分散が明瞭に得られたことから、Bi₂Se₃ が 1 QL ずつ層状成長していることが確認された。

[1] L. He *et al. Appl. Phys.* **109**, 103702 (2011).



P25 STM を用いた $\text{CaF}_2/\text{Au}(111)$ の吸着状態の観察

竹島 紫苑, 奥山 弘, 八田 振一郎

京都大学 理学研究科 化学専攻 表面化学研究室

E-mail : takeshima.shion@surf.kuchem.kyoto-u.ac.jp



金属上に絶縁体薄膜を作製する過程や, その吸着状態について原子レベルで理解することは電子工学に関連して重要である.

本研究では $\text{Au}(111)$ 表面に蒸着した CaF_2 の吸着状態を走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いて観察した. CaF_2 を蒸着する際の基板の温度が低い場合, CaF_2 は一層のアイランドを多く形成し, 温度が高い場合, 二層のアイランドを多く形成することが観測された. さらに, 蒸着量が低いと正三角形, 高いと六角形の二層のアイランドが優勢に形成することがわかった. 他の金属表面や絶縁体薄膜に関する研究では, 二層の CaF_2 アイランドの辺が基板の $\langle 110 \rangle$ 方向に平行に成長する[1,2]のに対して, $\text{Au}(111)$ 上 CaF_2 アイランドは $\text{Au}(111)$ の $\langle 110 \rangle$ 方向に対して一定の角度 ($\sim 8^\circ$) の方向に成長する. また, $\text{Au}(111)$ 上のアイランド内には一次元モアレが観測されており, CaF_2 の吸着構造について考察した

[1] F.Calleja et al. Surf. Sci. 582, 14–20 (2005)

[2] Mauro Borghi et al. Surf. Sci. 656, 159724 (2024)

P26 グラフェン上の Ag および Au 原子の電子状態と水素吸着

小川 大樹^a, 平島 和輝^b, 山本 大貴^a, 濱田 幾太郎^b,

八田 振一郎^a, 奥山 弘^a

^a 京都大学 理学研究科 化学専攻 表面化学研究室

^b 大阪大学 工学研究科 物理学専攻 精密工学コース 計算物理領域

E-mail : ogawa.haruki.44z@st.kyoto-u.ac.jp



基板に担持された金属単原子は特異な触媒特性を示すことから注目されている[1]. グラフェンは単純で均一な構造と電子状態をもつことから金属原子の基板として適しており, グラフェンと金属原子の相互作用を解明することは金属原子の反応制御に向けて本質的である[2]. 本研究ではグラフェン上の Ag と Au 原子の吸着状態, および水素との相互作用を STM と第一原理計算を用いて調べた.

基板温度 15 K において Ag および Au はどちらも単原子としてグラフェンに吸着し, 状態密度測定からフェルミ準位の上 0.6~0.7 eV に 5s または 6s 軌道に由来する準位が観測された. 水素は Ag 原子に吸着し, 5s 軌道のエネルギーが 1.0~1.1 eV ヘシフトしていた. このことは 1σ 軌道から Ag 原子の 5s 軌道に電子が供与されることで, 結合が形成されることを示唆している.

[1] Jindong Ren, et al., *Nano Lett.* **2014**, *14*, 7, 4011–4015. [2] F. Donati, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **2013**, *111*, 236801

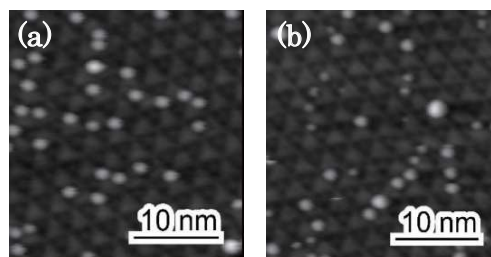


図 1 (a) グラフェン上に蒸着させた Ag 原子の STM 像. (b) さらに D_2 ガスに曝露した後の STM 像. 測定温度 6 K. ($V = -1.0$ V, $I = 0.05$ nA)

P27 Optical and chemical properties of Ag nanoparticles on graphene

山本 修也, 奥山 弘, 小川 大樹, 八田 振一郎, 有賀 哲也
京都大学 理学研究科 化学専攻 表面化学研究室

E-mail : shuya.yamamoto@surf.kuchem.kyoto-u.ac.jp



金属ナノ粒子は様々な分野での応用が期待されている。そのうちの一つとして、光学的特性を利用した研究が進められている。ナノ粒子に特定の波長の光が入射すると粒子内の自由電子全体が光の電場の影響を受け、集団振動を起こす。これを局在表面プラズモン共鳴という。この共鳴によって光のエネルギーが電子のエネルギーに変換され、吸着分子がそれを受け取ることで反応が起こる可能性がある。このような特性から、光触媒としての利用などが考えられている。

遷移金属基板上に単層グラフェンを作製するとグラフェンはモアレ構造をとり、これをテンプレートとして用いることでナノ粒子を形成させることができる。本研究では、Rh(111)基板上単層グラフェンに Ag ナノ粒子を成長させ、電子エネルギー損失分光(EELS)と D₂ ランプを用いた反射率測定によって局在表面プラズモンを観察した。また、Ag ナノ粒子の成長後、チオフェノールやフタロシアニンを吸着させ、プラズモン共鳴への影響を調べた。

P28 C₅DABCO を対カチオンとする TCNQ ラジカルアニオン塩の構造と物性

高村 美衣^a, KIM YONGJIN^a, 中野 義明^a, 大塚 晃弘^a

^a京都大学 理学研究科 化学専攻

E-mail : takamura.mii.86c@st.kyoto-u.ac.jp



有機材料は、希少・有毒元素を含まず、軽量かつ安価であることから、分子設計により所望の物性を発現する方法論を確立することが重要である。(C₅DABCO)(TCNQ)₂ (**1**)では、導電性を担う TCNQ が 1 次元積層カラムを形成し、室温導電率 $1.5 \times 10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$ ($E_a = 0.19 \text{ eV}$) の半導体的挙動を示す[1]。一方、C₅DABCO は TCNQ の積層カラムに対して平行、垂直に配列したものが存在し、熱伝導率の低減に寄与すると考えられるが、不明な点も多い。本研究では、錯体 **1** の光学特性について検討した。参照物質である (C₅DABCO)(TCNQ) (**2**)は、(C₅DABCO)I と Li(TCNQ)をエタノール中で混合することにより作製した。錯体 **1**, **2** では、それぞれ $\text{TCNQ}^- \rightarrow \text{TCNQ}^0$, $\text{TCNQ}^- \rightarrow \text{TCNQ}^-$ に帰属される電荷移動吸収帯が $3190, 10100 \text{ cm}^{-1}$ に観測された(図1)。また、TCNQ の $\text{C}\equiv\text{N}$ 伸縮(ν_{19})モードは、TCNQ (2226 cm^{-1})、錯体 **1** (2196 cm^{-1})、錯体 **2** (2176 cm^{-1})に観測された。以上より、錯体 **1** の TCNQ は部分電荷移動状態にあり、錯体 **1** の高い導電性を支持している。当日は、他の物性の詳細についても報告する。

[1] 中井暁量, 京都大学大学院理学研究科化学専攻 修士論文(2022 年)

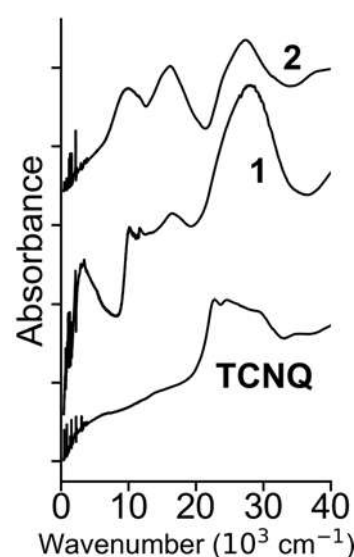


図1 TCNQと錯体 **1**, **2** の UV-vis-IR スペクトル (KBr 法)

P29 *N*-ペンチルキノリニウムを対カチオンとする TCNQ 誘導体のラジカルアニオン塩の構造と物性

澤田 卓寛^a, 石川 学^a, 大塚 晃弘^a, 中野 義明^a

^a 京都大学 理学研究科 化学専攻

E-mail : sawada.takuhiko.58m@st.kyoto-u.ac.jp

分子性導体は、分子間相互作用、分子配列の制御により様々な物性を発現することが可能である。以前、(C_nDABCO)(TCNQ)₂ における高い導電性、低い熱伝導率、秩序—無秩序転移について報告しており、アルキル鎖や DABCO 部位の弱い分子間力が関係していると考えられる[1]。今回は、*N*-ペンチルキノリニウム (C₅Qno) を対成分とした TCNQ 系ラジカルアニオン塩 ((C₅Qno)(TCNQ) (1), (C₅Qno)(F₄TCNQ) (2), (C₅Qno)(TCNQ)₂ (3)) について検討した。錯体 1 は、TCNQ と C₅Qno のそれぞれの 2 量体が交互に積層しており、300 K で観測されていた C₅Qno のディスオーダーが 100 K では秩序化していた。錯体 2 では、F₄TCNQ が 2 量化した 1 次元積層カラムを形成し、C₅Qno は F₄TCNQ のカラムと平行に 1 次元積層カラムを形成していた。錯体 3 は、今のところ結晶構造は不明だが、高い室温導電率 (19.5 S cm⁻¹) を示し、室温から 230 K まで金属的挙動を示した後、半導体的挙動 ($E_a = 42$ meV) を示した。この高い導電性は、約 3400 cm⁻¹ に TCNQ^{•-} と TCNQ⁰ の間の電荷移動吸収帯が観測されたことや IR, Raman スペクトルから TCNQ がおよそ -0.6 価付近にあることから支持される (Fig. 1)。

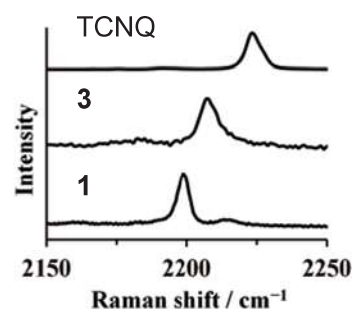
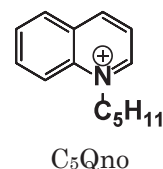


Fig. 1 TCNQ, 錯体 1, 3 の Raman スペクトル

[1] Y. Nakano, M. Ishikawa, R. Ogawa, A. Nakai, *et al.*, ICPAC KK 2022, IGS 65 (2022).

P30 5-アゾニアスピロ[4.4]ノナンカチオンを対成分とする TCNQ, F₄TCNQ ラジカルアニオン塩の結晶構造と物性

KIM YONGJIN^a, 石川 学^a, 中野 義明^a, 大塚 晃弘^a

^a 京都大学 理学研究科 化学専攻

E-mail : kim.yongjin.67s@st.kyoto-u.ac.jp

有機導電体はその分子配列制御を通じて、電気・熱輸送特性や磁気特性などの物性を自在に制御できる点で注目されている。本研究では、イオン液体や柔粘性イオン結晶の成分として用いられている AS[4.4]カチオン^[1]と TCNQ, または、F₄TCNQ から構成される有機導電体 ((AS[4.4])(TCNQ)₂ (1), (AS[4.4])(TCNQ) (2), (AS[4.4])(F₄TCNQ) (3)) について検討した。錯体 1 では、300 K で AS[4.4] はディスオーダーしており、TCNQ が 2 量化した 1 次元積層カラムを形成していた。250 K では単位格子が 2 倍化し、TCNQ の 1 次元積層カラムが 2 種類になるとともに、AS[4.4] が秩序化した。錯体 1 は、300 K から 277 K まで金属的挙動 ($\sigma_{RT} = 7.2$ S cm⁻¹), 277 K から 261 K までは半導体的挙動 ($E_a = 0.28$ eV) を示した (Fig. 1)。さらに、261 K で上述の相転移に関連すると考えられる抵抗率の飛びが観測された。また、磁化率は 75 K に極大を持つ 1 次元反強磁性鎖様の挙動を示した後、45 K で急激に減少した。当日は、他の錯体の詳細についても報告する。

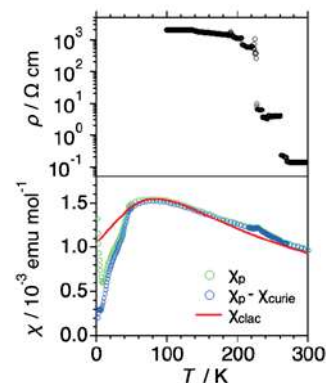
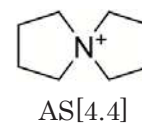


Fig. 1 Temperature dependence of electrical resistivity and magnetic susceptibility of 1.

[1] A. J. Ward, A. F. Masters, T. Maschmeyer, *RSC Adv.*, 2014, 4, 23327

P31 1-アルキル-1,4-ジアザビシクロ[2.2.2]オクタン-1-イウムと TCNQ から成る有機導電体の構造と物性

中野 義明^a, 立木 実^a, 石川 学^a, 大塚 晃弘^a

^a 京都大学 理学研究科 化学専攻

E-mail: nakano@kuchem.kyoto-u.ac.jp

熱伝導率は、分子間相互作用、単位格子の大きさ、構成元素の種類等により制御可能である。1-アルキル-1,4-ジアザビシクロ[2.2.2]オクタン-1-イウム (C_n DABCO)と TCNQ から成る有機導電体(C_6 DABCO)(TCNQ)₂ では、低い熱伝導率が観測されており、 C_6 DABCO の示す弱い分子間相互作用や柔軟性に起因すると考えられる[1]。本研究では、より長いアルキル鎖を導入した (C_8 DABCO)₄(TCNQ)₉ (**1**), (C_8 DABCO)₂(TCNQ)₅ (**2**), (C_9 DABCO)₂(TCNQ)₅ (**3**), (C_{10} DABCO)(TCNQ)₃ (**4**)の結晶構造と物性について検討した。錯体 **3** では、TCNQ 分子は 5 量化した 1 次元積層カラムを形成していた。結合長より TCNQ は、-0.19, -0.74, -0.24 Åと見積もられ、電荷秩序状態にあると考えられる。室温磁化率は $1.96 \times 10^{-3} \text{ emu mol}^{-1}$ であり、温度の低下に伴い 100 K 付近で極大を示した後、15 K 以下の温度で Curie 不純物に由来すると考えられる増大が観測された(図 1)。Singlet-Triplet モデルで解析を行ったところ、スピン間に $J/k_B = -78.6 \text{ K}$ の反強磁性的相互作用が働いていることが分かった。また、室温導電率 $9.3 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ 、活性化エネルギー 0.25 eV の半導体的挙動を示した。当日は、他の錯体の詳細についても報告する。

[1] Y. Nakano, M. Ishikawa, R. Ogawa, A. Nakai, *et al.*, ICPAC KK 2022, IGS 65 (2022)

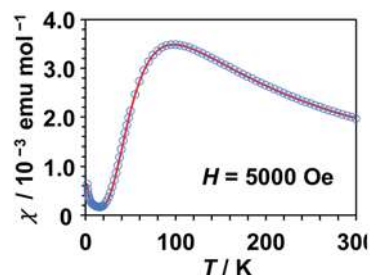
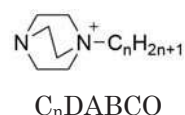


図 1 錯体 **3** の磁化率の温度依存性

P32 TCNQ 及びフッ素化 TCNQ と N-アルキル化カチオンからなる分子性導体の結晶構造と物性

大塚 晃弘^a, 小濱 智宏^a, 増田 怜旺^a, 石川 学^a, 中野 義明^a

^a 京都大学 理学研究科 化学専攻

E-mail: otsuka@kuchem.kyoto-u.ac.jp

分子性導体の構成分子における分子配列は、導電性や磁化率などの物性に影響を与える。本研究では、N-アルキル化カチオン (C_n Qno, C_2 DABCO)と TCNQ, F_2 TCNQ, F_4 TCNQ ラジカルアニオン塩の結晶構造と物性について検討した。熱 EtOH 中、(C_6 Qno)I と Li(TCNQ)を混合後、徐冷することで(C_6 Qno)(TCNQ) (**1**)を、熱 EtOH/アセトニトリル中、(C_5 Qno)I と TCNQ を混合後、徐冷することで(C_5 Qno)(TCNQ)₂ (**2**)をそれぞれ得た。

錯体 **1** では、TCNQ が 2 量体を形成し、各 2 量体間には相互作用がないと考えられる配置をしており(図 1), 8000 cm^{-1} 付近に TCNQ⁻同士間の CT バンドが確認された。磁化率は室温で $4.9 \times 10^{-5} \text{ emu mol}^{-1}$ と小さな値で、極低温で Curie 不純物由来、150 K 以上では昇温に伴う熱励起型と考えられる磁化率の増大がそれぞれ観測された。

錯体 **2** の結晶構造は不明だが、元素分析から 1:2 の組成とわかり、 5500 cm^{-1} 付近に TCNQ⁻と TCNQ⁰ の間の CT バンドが見られた。磁化率は室温で $6.4 \times 10^{-4} \text{ emu mol}^{-1}$, 15 K 付近まで緩やかに増加してプラトーを示した後 10 K 以下で急激に増大する興味深い挙動を示した。当日は、その他の化合物の詳細についても報告する。

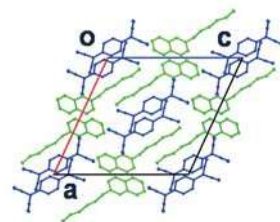
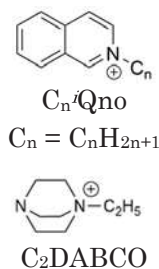


図 1 錯体 **1** の結晶構造

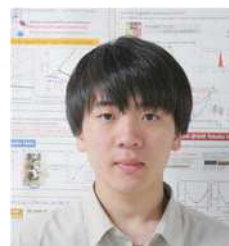
P33 ハイエントロピー超伝導体の NMR

山田 雄風^a, 井原 大志^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, 平井 大悟郎^b,
植松 直人^b, 竹中 康司^b

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b名古屋大学 大学院工学研究科 応用物理学専攻 構造物性物理学

E-mail : yamada.yufu.24p@st.kyoto-u.ac.jp



ハイエントロピー化合物とは単一サイトに 5 種類以上の元素を混ぜて作られた化合物のことである。多数の元素を混ぜることで、通常の化合物では見られないようなユニークな物性が現れることが知られている[1]。ハイエントロピー超伝導体においても高い上部臨界磁場や、高い転移温度を持つことなどが見出され、近年注目を集めている。

我々はその中でも $(\text{RuRhPdIr})_{1-x}\text{Pt}_x\text{Sb}$ に注目した[2]。図 1 に示すように、混合組成 x を変化させると $x = 0.4$ で一番高い転移温度をもち、 $x = 0.7$ で一度超伝導が潰れ、再び転移温度が上昇するダブルドーム型の超伝導相が確認されている[3]。このことからハイエントロピー化によって $\text{PtSb}(x=1)$ とは異なる超伝導対称が発現している可能性がある。発表では転移温度が最も高い $x = 0.4$ の試料において、希釈冷凍機を用いて極低温まで ^{195}Pt -NMR を行った結果について報告する。

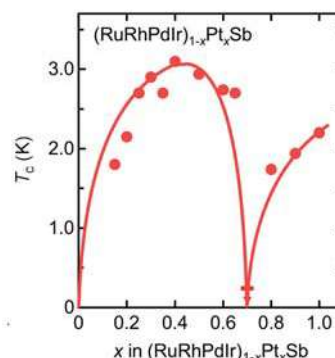


図 1 $(\text{RuRhPdIr})_{1-x}\text{Pt}_x\text{Sb}$ 超伝導転移温度の組成依存性[3]

[1]C. Oses *et al.*, Nat Rev. Mater. **5**, 295 (2020).

[2]D. Hirai *et al.*, Inorg. Chem. **62**, 14207 (2023).

[3]D.Hirai *et al.*, Chem. Mater. **36**, 9547 (2024).

P34 Ni ナノ粒子の NMR 測定

前川 幹渡^a, 井原 大志^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a,
草田 康平^{b,c}, 北川 宏^b

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

物理学第一分野 固体量子物性研究室

^b京都大学大学院理学研究科化学専攻

^c京都大学 白眉センター

E-mail : maekawa.mikito.44m@st.kyoto-u.ac.jp



金属ナノ粒子はその小ささのゆえに、バルクとは異なる物性を示す。その一例として表面効果がある。ナノ粒子では粒子全体に対する表面の割合が増えることで、内部と物性が異なる表面が支配的となり、金属ナノ粒子特有の物性が観測される。

強磁性金属ナノ粒子では、粒径が小さくなることで磁化が減少する現象が報告されており、表面における磁性の消失がその原因とされている [1]。実際、メスバウアー分光法による研究では、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ナノ粒子表面における非磁性層が磁化減少に関与していることを示唆する結果が得られている[2]。

Ni ナノ粒子についても同様に磁化の減少が観測されているが[3]、磁気的性質についての微視的な研究はほとんど行われていない。本研究では、Ni ナノ粒におけるゼロ磁場 NMR 測定から示唆される Ni ナノ粒子の磁気的構造について報告する。

[1] R. H. Kodama, J. Magn. Magn. Mater. **200**, 359 (1999)

[2] J.M.D. Coey, Phys. Rev. Lett. **27**, 1140 (1971).

[3] X. He *et al.*, Nanoscale Res. Lett. **8**, 446 (2013).

P35 重い電子超伝導体 CeRh_2As_2 の NQR 測定

山田 琢登^a, 尾方 司貴^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a,

Grzegorz Chajewski^b, Dariusz Kaczorowski^b

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

物理学第一分野 固体量子物性研究室

^bINTiBS-PAS

E-mail : yamada.takuto.53u@st.kyoto-u.ac.jp

2021 年に報告された重い電子系超伝導体 CeRh_2As_2 は、局所的な空間反転対称性の破れに起因する超伝導多重相を示す新奇な物質である(図)[1]. 我々は As 核の NMR/NQR 測定から超伝導相内に反強磁性秩序が存在することを発見した. 反強磁性転移温度は初期の試料では超伝導転移温度より低温であった[2]が, よりクオリティの高い試料では, 超伝導転移とほぼ同時に生じることがわかってきた.

そこで, 本研究では, 超伝導と反強磁性の関係の試料依存性を明らかにするために別グループの合成した試料[3]を用いて NQR 測定を行った.

発表では, 質の異なる 3 つの試料における超伝導転移温度と反強磁性転移温度の関係について報告する.

[1] S. Khim *et al.*, Science **373**, 1012 (2021).

[2] M. Kibune *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 057002 (2023).

[3] G. Chajewski *et al.*, Phys. Lett. **132**, 076504 (2024).

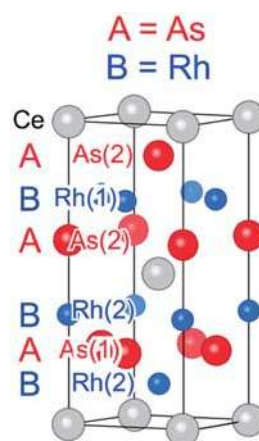


図 CeRh_2As_2 の結晶構造[2]

P36 純良単結晶 UTe_2 の超伝導状態における a 軸方向スピン磁化率

松林 陸^a, 松村 拓輝^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, 徳永 陽^b,
酒井 宏典^b, 神戸 振作^b, 仲村 愛^c, 清水 悠晴^c, 本間 佳哉^c,
李 徳新^c, 本多 史憲^d, 三宅 厚志^c, 青木 大^{c,e}

^a京大院理物一, ^b原子力機構先端研, ^c東北大金研,

^d九大アイソトープセンター, ^eCEA-Grenoble

E-mail : matsubayashi.riku.38a@st.kyoto-u.ac.jp

2018 年に超伝導が発見された UTe_2 [1]は, 近年の研究からスピン三重項超伝導体であることが確実視されている. 図 1 に見るように, UTe_2 では高磁場下においても超伝導が維持され, その超伝導状態は理論と実験の両面から盛んに研究がなされている.

特に, 超伝導状態のスピン磁化率は超伝導対のスピン方向などを反映するため, UTe_2 の超伝導状態を調べる上で重要な物理量である. 我々はこれまでに ^{125}Te 核磁気共鳴により, 転移温度が 2.1 K の純良単結晶 UTe_2 において 1.5 K までのスピン磁化率を報告した[2].

今回我々は, 磁化容易軸である a 軸のスピン磁化率を低温まで測定した. その結果を報告する.

[1] S. Ran *et al.*, Science **365**, 684 (2019).

[2] H. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 063701 (2023).

[3] A. Rosuel *et al.*, Phys. Rev. X **13**, 011022 (2023).

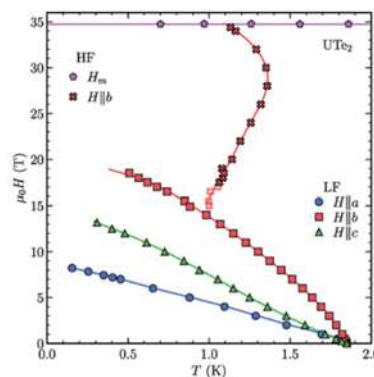


図 1 各軸方向に磁場をかけた際の $H-T$ 相図[3].

P37 NMRで観る奇パリティ反強磁性 LaMnSi の低温物性

酒井 佑輔^a, 堀 文哉^a, 松村 拓輝^a, 大口 峻平^a, 北川 俊作^a,
石田 憲二^a, 谷田 博司^b

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b富山県立大

E-mail : sakai.yuusuke.88c@st.kyoto-u.ac.jp

本研究の対象物質である LaMnSi は $T_N \sim 297$ K で Mn スピンが反強磁性秩序を示すが、拡張多極子の観点からは時間反転対称性と空間反転対称性を同時に破る奇パリティ磁気多極子秩序とみなせる。しかし、磁気構造について単結晶の磁化測定[1]と粉末試料の中性子散乱[2]で整合しない結果となっている。そこで本研究では、奇パリティ多極子系の低温物性の解明及び磁気構造の決定を目的として LaMnSi 単結晶における核磁気共鳴(NMR)の測定を行った。

図 1 は測定した NMR スペクトルである。 ^{139}La 及び ^{55}Mn の信号が観測され、複数の周波数で測定した際のピーク位置依存性から磁気構造について考察を行った。その結果、Mn スピンは c 軸に平行であることを明らかにした。加えて温度依存性の測定結果から磁性金属としてのふるまいを議論する。

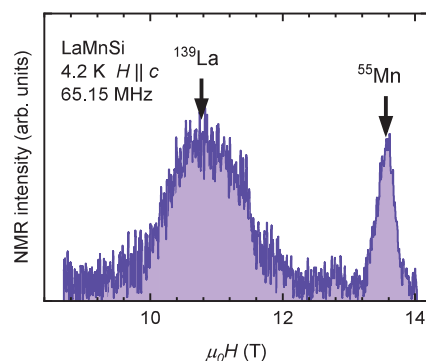


図 1 LaMnSi の NMR スペクトル

[1] H. Tanida, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 013704 (2022).

[2] R. Welter, *et al.*, J. Alloys Comp. **206**, 55 (1994).

P38 圧力で増強される超伝導体 CaSb₂ 単結晶を用いた 圧力下電気抵抗測定

大口 峻平^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, 池田 敦俊^b, 前野 悦輝^c

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 工学研究科 電子工学専攻

^c京大 TRiKUC

E-mail : oguchi.shumpei.77r@st.kyoto-u.ac.jp

CaSb₂ は空間群 $P2_1/m$ に属する、非共型な対称性に保護されたラインノードル物質として研究されている。さらに超伝導転移温度 $T_c = 1.7$ K で超伝導を示すため[1], トポロジカル物質における非自明な超伝導が期待されている。

NQR 測定からは、従来型の s 波超伝導状態が示唆されている一方、圧力を印加すると転移温度が上昇し 3 GPa でピークをもつ、通常の超伝導とは異なるふるまいを示す(図 1)[2,3]。圧力下 XRD 測定から 3 GPa での構造相転移が示唆されているが、超伝導との関係は明らかになっていない。

今回我々は単結晶 CaSb₂ の電気抵抗の圧力依存性を用いて、圧力による電子状態の変化と超伝導との関係について議論する。

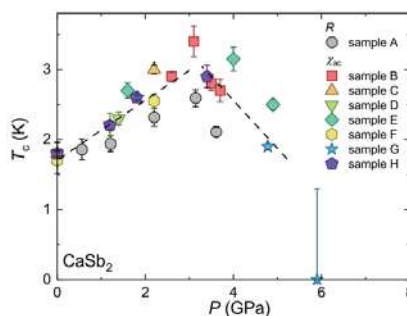


図 1 CaSb₂ の超伝導転移温度 T_c の圧力依存性[3].

[1] A. Ikeda *et al.*, Phys. Rev. Materials **4**, 041801 (2020).

[2] H. Takahashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 073702 (2021).

[3] S. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. B **104**, L060504 (2021).

P39 「超」重い電子系化合物 YbCu₄Ni における Ni の組成変化の研究

松平 広康^a, 谷口 貴紀^b, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, M.Giovannini^c, J.G.Sereni^d, 渡邊 寛大^e, 志村 恭通^e

^a 京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b 東北大学金研, ^c Department of Chemistry University of Genova,

^d Low Temperature Division CAB-CNEA, ^e 広大先進理工

E-mail : matsudaira.hiroyasu.34a@st.kyoto-u.ac.jp



物質中の電子の有効質量は電子比熱係数 γ によって特徴づけられる。 γ は通常の金属では数 mJ/mol K^2 程度の大きさであるが、電子相関の強い所謂「重い電子系」では γ の値は 0.1 J/mol K^2 から 1 J/mol K^2 程度まで増大する。さらに、近年いくつかの重い電子系において 5 J/mol K^2 以上の非常に大きな γ を示す、「超重い電子系(Super heavy fermion)」と呼ばれる物質も報告されている。

2018 年に発見された YbCu₄Ni もこの超重い電子系に属する物質である。YbCu₄Ni の γ は、200 mK 以下で 7.5 J/mol K^2 にもなる[1]。先行研究の μSR 測定[2]や我々が行った核四重極共鳴測定(NQR)から YbCu₄Ni における超重い電子系の起源は、近藤温度が極めて低いことにより発達した、非常に大きな磁気ゆらぎであることが考えられる。YbCu₄Ni では Cu と Ni の比率を変化させることで γ が変化することが報告されている。そこで、本講演では Cu と Ni の比率の変化による効果について議論する。

References

[1] J. G. Sereni *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 094420 (2018).

[2] K. Osato *et al.*, Phys Rev. B **109**, 024435 (2024).

P40 超純良単結晶 UTe₂ の NMR: スピン三重項超伝導状態におけるゆらぎ

松村 拓輝^a, 松林 陸^a, 高橋 侑希^a, 金城 克樹^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, 徳永 陽^b, 酒井 宏典^b, 神戸 振作^b, 仲村 愛^c, 清水 悠晴^c, 本間 佳哉^c, 李 徳新^c, 本多 史憲^d, 三宅 厚志^c, 青木 大^{c,e}

^a 京大院理物一, ^b 原子力機構先端研, ^c 東北大金研,

^d 九大アイソトープセンター, ^e CEA-Grenoble

E-mail : matsumura.hiroki.75r@st.kyoto-u.ac.jp



スピン三重項超伝導では、残存するスピン自由度と超伝導の協奏による特有の現象が期待される。これまでいくつかの物質がスピン三重項超伝導の候補として研究されてきたものの[1], 十分な理解はされていない。

2018 年に超伝導が報告された UTe₂[2]では、非常に大きな臨界磁場や超伝導多重相を示すことからスピン三重項超伝導の実現が確実視されている。我々のグループも核磁気共鳴(NMR)を用いたスピン磁化率の測定からそれを支持してきた[3]。

今回我々は、超伝導転移温度が 2.1 K である純良単結晶試料を用いて、¹²⁵Te-NMR 測定を行い、特に準粒子密度やゆらぎを反映する核スピン—格子緩和率 $1/T_1$ の温度・磁場依存性を調べた。その結果、超伝導で従来期待されるような単純なギャップ構造では説明できない低温でのゆらぎが見られ、そのゆらぎが磁場印加によって抑制される振る舞いを観測した。発表では、このゆらぎの起源とスピン三重項超伝導との関連について議論する。

[1] 例えば H. Tou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 1374 (1996).

[2] S. Ran *et al.*, Science **365**, 684 (2019).

[3] H. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 063701 (2023).

P41 局所的に空間反転対称性の破れた超伝導体CeRh₂(As, P)₂の常伝導状態の³¹P-NMR

尾方 司貴^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二, Manuel Brando^b, Elena Hassinger^{b,c}, Christoph Geibel^b, Seunghyun Khim^b, Michael Baenitz^b

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^bMax Planck Institute for chemical physics of solid

^cTechnical University Dresden

E-mail : ogata.shiki.86c@st.kyoto-u.ac.jp



CeRh₂As₂は2021年に報告された超伝導転移温度 $T_{SC} \sim 0.3$ Kの重い電子系超伝導体で、図のような磁場誘起超伝導多重相が報告されている[1]。超伝導に加えて $T_0 \sim 0.4$ Kで比熱や熱膨張率の異常[2]や、 $T_N \sim 0.25$ Kの反強磁性秩序[3]など多様な秩序相を持つ点も興味深い。CeRh₂As₂に圧力を印加すると、0.5 GPa程度で T_0 が消失する一方で超伝導は2.67 GPaにおいても0.2 K以上を維持する。

今回我々はCeRh₂As₂のAsサイトのP置換に着目した。PはAsに比べてイオン半径が小さいため、化学圧力効果によって圧力印加と同様の性質を示すことが期待できる。我々はAsを一部Pに置換した試料を合成し、置換効果の評価のために常伝導状態の³¹P-NMRおよび⁷⁵As-NMRを行った。

[1] S. Khim *et al.*, Science **373**, 1012 (2021).

[2] D. Hafner *et al.*, Phys. Rev. X **12**, 011023 (2022).

[3] S. Ogata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 166001 (2023).

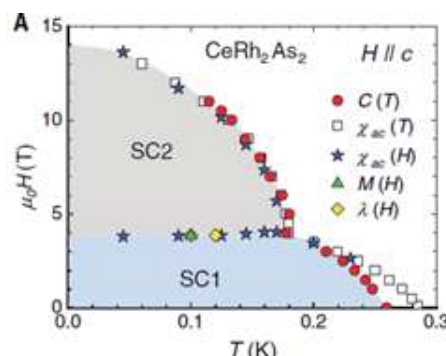


図. CeRh₂As₂のc軸磁場-温度相図[1]。

P42 Yb ジグザグ鎖をもつ YbCuS₂ で現れる電気的中性な準粒子

堀 文哉^a, 金城 克樹^a, 松平 広康^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, 大曲 雄大^b, 白井 宏尚^b, 水谷 宗一郎^b, 鈴木 大斗^b, 鬼丸 孝博^b

^a京大院理 ^b広大院先進理工

E-mail : hori.fumiya.36s@st.kyoto-u.ac.jp



近年、4f 電子をもつ希土類化合物を舞台とした磁気フラストレーションの研究が注目されている。磁性半導体 YbCuS₂は、Yb³⁺がジグザグ鎖を形成しており、最近接と次近接の磁気相互作用の競合による磁気フラストレーションの効果が期待できる[1]。実際、ゼロ磁場下でワイス温度より1桁以上低い $T_N \sim 0.95$ Kで相転移を示し、さらに特異な磁場温度相図を持つことが報告されている[1]。

我々は、YbCuS₂の磁気状態を微視的な観点から調べるために、^{63/65}Cu-NQR測定を行った[2]。その結果、 T_N での相転移は反強磁性秩序であることを明らかにした。さらに、0.5 K以下で核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ が温度の一次に比例する振舞いを発見した(図1)。この結果は、低温秩序相において、電荷をもたない電気的中性な準粒子が存在していることを示唆している。

発表では、これらの結果に加え、圧力[3]や元素置換[4]の効果と合わせて、YbCuS₂で見られた中性準粒子の起源について議論する。

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

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

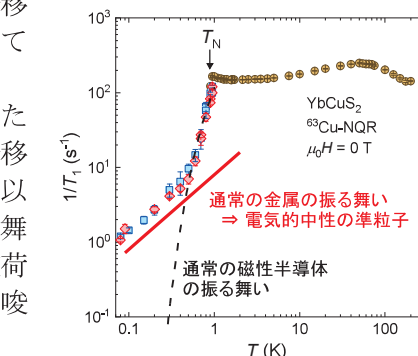


図1 YbCuS₂における $1/T_1$ の温度依存性。

[3] F. Hori *et al.*, arXiv:2412.17575.

[4] F. Hori *et al.*, arXiv:2412.18373.

P43 Dirac ラインノード半金属 CaAgP におけるトポロジカル表面状態に誘起された磁性

高橋 秀光^a, 北川 俊作^a, 石田 憲二^a, 三枝 一茂^b, 竹中 康司^b, 岡本 佳比古^c

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b名古屋大学 工学研究科 応用物理学専攻

^c東京大学 物性研究所

E-mail : takahashi.hidemitsu.23r@st.kyoto-u.ac.jp



近年の物性物理学において、トポロジ的に非自明なバンド構造を持つ物質が中心的な研究対象になっている。CaAgP はトポロジーで保護された線形バンドの交差点である Dirac 点が繋がって波数空間で線を成す、いわゆる Dirac ラインノード半金属の候補物質であり、ドラムヘッド表面状態と呼ばれる特徴的な表面状態を持つと考えられている[1]。このドラムヘッド表面状態はほぼフラットなエネルギー分散を示し、強相関効果による新奇な量子現象を引き起こすことが期待される。

我々は ^{31}P 原子核を用いた核磁気共鳴測定により、CaAgP の電子状態を微視的に調べた。その結果、約 20 K において磁性が現れることを発見した。CaAgP は磁性イオンを含まない sp 電子系であり、よく知られているような磁性発現のメカニズムは働かないと考えられる。我々は今回発見された磁性がドラムヘッド表面状態に起因するものとして説明できることを示した。当日は測定データと理論提案[2, 3]を比較し、詳細な議論を行う。

[1] A. Yamakage *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 013708 (2016). [2] J. Liu *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 075426 (2017). [3] B. Roy *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 04113(R) (2017).

P44 円筒容器内の超流動 ^3He テクスチャのシミュレーション

上野 純弥^a, 生貝 悠人^a, Xu Zeju^a, Tang Boyi^a, 高木 丈夫^b, 佐々木 豊^a

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b福井大学 工学研究科

E-mail : ueno.junya.87s@st.kyoto-u.ac.jp



^3He の超流動相には A 相 B 相と呼ばれる 2 つの凝縮相があり、A 相の秩序変数は 1 ベクトル、d ベクトルといった単位ベクトルによって構成される。これらのベクトルの空間的な構造はテクスチャと呼ばれ、このテクスチャは容器の壁際において 1 ベクトルが壁に垂直に配向するという境界条件と自由エネルギーを極小化するように配向するという条件から決まる。このことから境界条件と初期状態を設定し、系全体の自由エネルギーを極小化する数値計算を行うことでテクスチャの構造が予測できると期待される。テクスチャがどのような形をとっているかを実験で直接測定することは困難であるため、数値計算によるシミュレーションによってテクスチャの構造を考える。

円筒容器内でこのシミュレーションを行った。円筒の軸方向を x 方向とし、初期状態として 2 つの異なるテクスチャを隣り合う x の区間におき、シミュレーションにより自由エネルギーを極小化し収束した後の 1 ベクトル、d ベクトルの空間変化の様子や 1 ベクトルと d ベクトルの相対角度が大きくなる場所を図示した。隣り合うテクスチャとして 2 次元円容器内で準安定なディスジャイレクション型、Mermin-Ho 型、パンナム型を初期状態に置き、その間で l, d ベクトルがどのように変化するかを調べた。

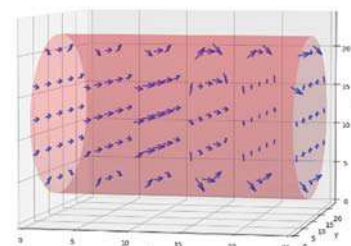


図 1 円筒容器内での 1 ベクトル

P45 超流動 $^3\text{He-A}$ における d ソリトンの生成と消滅

TANG BOYI^a, 生貝 悠人^a, 日野 祐哉^a, XU ZEJU^a, 高木 丈夫^b, 佐々木 豊

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b福井大学

E-mail: tang.boyi.63h@st.kyoto-u.ac.jp



超流動 $^3\text{He-A}$ の中で、クーパー対の物理状態を表すオーダーパラメータを記述する異方性ベクトルの空間構造を織目構造 (texture) と呼ぶ。異なる異方性を持つ texture の間に、急激に空間構造が変化するソリトンができることがある。

我々は $100\mu\text{m}$ 離れた平行平板の間に、スピンの向きと直交する d ベクトルが空間回転する d ソリトンを、パルス NMR 法により、磁化を大きい角度で倒すことで、多数生成した。磁場勾配をかけながら NMR 測定を行うことで、d ソリトンの場所情報も手に入れた。d ベクトルがお互いに逆向きに回転する隣接した d ソリトンが接近し、ほぼ同じ場所に対消滅を起こすことがある。均一磁場下の NMR スペクトルから、d ソリトンの生成に起因する周波数シフトと、消滅による信号量の減衰が見えた。多数の d ソリトンが密集して隣接している場合、d ソリトンの密度によって、異なる周波数シフトを持つことが観測され、違う密度の 2 つ領域が空間を隔てて共存する現象も観測された。

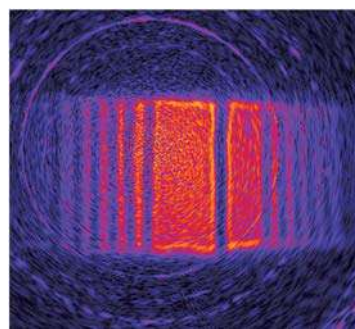


図 1 パルスにより生成した d ソリトン

P46 超流動 ^3He の異方的量子渦構造の研究を目指した回転核断熱消磁冷凍機の開発

石川 颯人^a, 松原 明^a, 佐々木 豊^a

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

E-mail: ishikawa.hayato.72r@st.kyoto-u.ac.jp



超流動 $^3\text{He-A}$ 相では、複数の異なる渦構造が理論的研究によって解析されており、NMR 測定による共鳴周波数のシフト量を理論値と比較することで、渦構造を区別することが行われてきた。このような渦構造に対して超流動 ^4He や超伝導状態の電子においては渦格子が可視化されているのに対し、超流動 ^3He においては、渦構造が直接可視化された例はなく、その観測は長年にわたる課題であった。

そこで、本研究では、将来的に回転超流動 ^3He の渦格子構造を MRI 測定で可視化することを目指し、その基盤となる装置の開発を行った。回転可能な核断熱消磁冷凍機を新たに設計・作成し、MCT (融解圧曲線温度計) を用いて核断熱消磁段 (核ステージ) の冷却特性を評価した。7.5T, 12mK 程度まで予冷した結果、核断熱消磁後に核ステージを約 1mK まで冷却することに成功し、核断熱消磁冷凍機の冷却特性の評価を行うことができた。核断熱消磁中のマグネットに流れる電流と MCT で測定した核ステージの温度との関係を図 1 に示す。

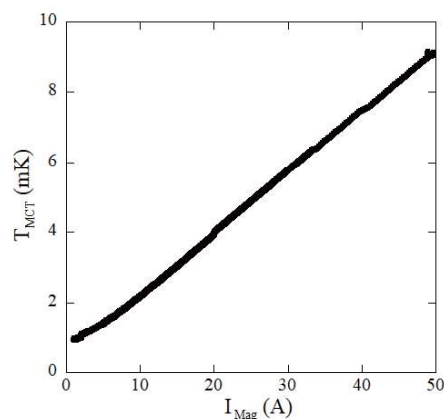


図 1 核ステージにおける MCT 温度のマグネット電流依存性

P47 超流動 ^3He -A 相におけるカイラルドメインとバウンダリー流

生貝 悠人^a, 日野 祐哉^a, Tang Boyi^a, Xu Zeju^a, 高木 丈夫^b, 佐々木 豊^a

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b福井大学 大学院 工学研究科 物理工学専攻

E-mail : ikegai.yuto.27x@st.kyoto-u.ac.jp



近年, 物質のトポロジカルな性質が盛んに研究されている. トポロジカル超伝導体・超流動体もそのうちの一つで, 特異な粒子や流れが物質の表面に存在することが予想されている. 液体 ^3He も, 極低温に冷やすことで ^3He 原子自体が抵抗なく流れる超流動状態となり, 特に A 相と呼ばれる状態ではその表面に自発的に流れるバウンダリー流の存在が予想される. ^3He 原子はクーパー対というペアを組み超流動状態となるが, A 相では, このペアが持つ角運動量の向きがある方向($\hat{l}$ と表記する)に揃う. この $\hat{l}$ がある決まった方向を向いた領域をカイラルドメインと呼び, クーパー対の角運動量を反映してバウンダリー流がこの領域の表面に流れる. 図 1 は ^3He -A 相の MRI 画像で, オレンジの部分がかイラルドメインだ. $\hat{l}$ の向きが異なるドメイン間にはドメインウォールが形成され, 図中に黒い筋として映っている. このウォール中にもバウンダリー流の存在が予想され, この流れは外部からの超流動流 v_s と相互作用してドメインウォールを傾ける効果を持つ. 図 1 では実際にこの効果が確かめられ, バウンダリー流の存在が証明された.

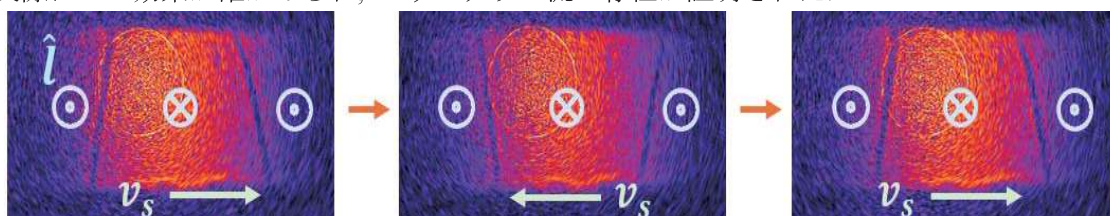


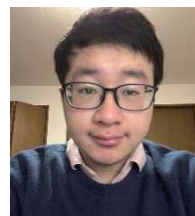
図 1 外部からの超流動流により傾くカイラルドメインウォールの MRI 画像

P48 円筒容器中の超流動 ^3He -A 相テクスチャーの可視化

Zeju Xu^a, Boyi Tang^a, Yuto Ikegai^a, Junya Ueno^a, Yutaka Sasaki^a

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

E-mail: xu.zeju.32x@st.kyoto-u.ac.jp



直径 1mm の円筒容器内に閉じ込めた超流動 ^3He -A 相テクスチャーに現れる特異な構造を研究するため, NMR/MRI の測定法を用いて, 容器の円形断面および長軸方向の信号強度分布を測定した. 温度がノーマル相から A 相に下がったあと, 長軸方向に並んで配置されたドメインウォールが自発的に形成されたものを観測した (図 1). このウォールは, A 相中のテクスチャーの対称性が異なるドメインを接続する薄膜状の構造体と考えられる. さらに, 温度が転移温度直下に近づくと, ドメインウォールの位置および数とその運動に伴って変化の様子が観測された. この変化は転移温度より十分低い温度の A 相中では見られないため, 転移温度付近でテクスチャーの構造変化が起きたと考えられる.

一方, 円形断面方向では, 境界面付近の MRI 信号強度が強くなる現象も観測された (図 2). この明るい領域は転移温度付近で顕著になり, 温度が離れるほど弱くなる. この現象はノーマル相でも観測されたため, テクスチャーの影響ではなく, 常流動成分中のスピン拡散現象の可能性が高い.

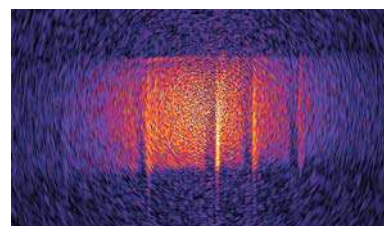


図 1 長軸方向 MRI 像

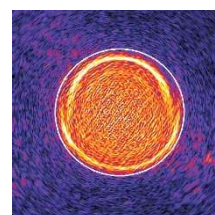


図 2 円形断面方向 MRI 像

P49 バルク超伝導体アンジュレータ ～京都大学における20年の開発史～

紀井 俊輝^a

^a 理化学研究所 先端放射光施設開発研究部門

加速器開発戦略研究グループ

E-mail : t.kii@spring8.or.jp



相対論的速度の電子ビームを周期交代磁場中で蛇行させることで放射光を発生させることができる。物質の分析等に用いる高輝度硬 X 線の生成には、現在の永久磁石技術を用いた場合 6 GeV 以上の大型放射光施設が必要とされている。原理的には磁場強度を 4 倍にできればビームエネルギーを半分にできるが、現時点で永久磁石や超伝導線材の材料特性を 4 倍にすることは不可能である。そこで、放射光施設の大幅な小型化または超高性能化を目標に定め、超伝導体への誘導電流を活用する周期磁場発生を考案し、宇治キャンパスにおいて「バルク超伝導体アンジュレータ」の開発を続けてきた。2024 年から理研 SPring-8 に拠点を移し、実用化に向けた開発を推進している。現行のプロトタイプでは永久磁石の約 3 倍の磁場強度を達成している。本発表では、2004 年の着想から現在に至るまでの開発状況を概説するほか、アンジュレータ技術から派生した非一様の局所強磁場生成のアイデアについて紹介を行う。

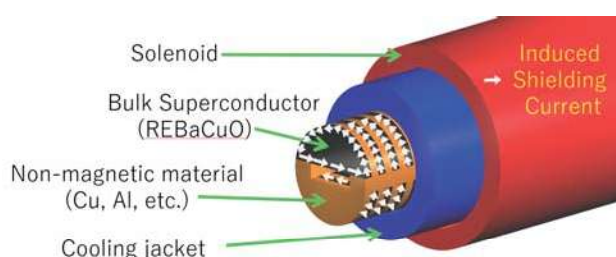


図1 アンジュレータ構造模式図