

第14回 低温科学研究センター研究交流会概要集

Abstract book The 14th Research Forum of Cryogenic Research Center

> 2023年2月16日(木) 9:30~17:45 小柴ボール(理学部1号館中央棟2階)

問い合わせ先:東京大学低温科学研究センター 研究交流会事務局 (conference@crc.u-tokyo.ac.jp)

日時

場所

表紙:

低温科学研究センター・極低温量子プラットフォームに 新しく導入された共同利用装置(³He-⁴He 希釈冷凍機 と極低温マイクロ波エレクトロニクス) 詳しくは、本研究会ポスター発表 P3-16「ミリケルビン 量子プラットフォームの紹介」をご覧ください。

第14回 低温科学研究センター研究交流会 プログラム

- 日時:令和5年2月16日(木) 9:30~17:45
- 場所:小柴ホール(理学部1号館中央棟2階)
- 一般講演時間:20分(質疑応答5分を含む)
- 09:30-09:35 はじめに 鹿野田 一司 (低温科学研究センター長)

| セッション1 | | |
|-------------|---------------|---|
| 09:35-09:55 | 吉川 貴史 O-01 | 工学系研究科・物理工学専攻・助教 (齊藤研究室) 核スピンを利用した低温熱電変換 |
| | | Nuclear-spin driven low-temperature thermoelectric effect |
| 09:55-10:15 | 平井 誉主在 | 理学系研究科・物理学専攻・D2(島野研究室) |
| | O-02 | 円偏光駆動した3次元 Dirac 電子系ビスマスの異常 Hall 効果 |
| | | Anomalous Hall effect of three-dimensional Dirac electrons in bismuth under |
| | | circularly polarized light |
| 10:15-10:35 | 佐藤 彰一 | 工学系研究科・電気系工学専攻・PD(田中・大矢研究室) |
| | O-03 | Si-ベーススピン電界効果型トランジスタ(Spin MOSFET)における電子スピン輸送 |
| | | Spin transport in Si-based spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors |
| 10:35-10:55 | 磯前 貴央 | 新領域創成科学研究科・物質系専攻・D3(中辻・酒井研究室) |
| | O-04 | 四極子近藤格子系 PrTi2Al20の巨大線形磁気抵抗とその異方性 |
| | | Large linear magnetoresistance and its anisotropy in the quadrupolar Kondo |
| | | lattice system PrTi ₂ Al ₂₀ |
| 10:55-11:10 | | 休 憩 |
| セッション2 | | |
| 11:10-11:30 | 中村 一輝 | 理学系研究科・化学専攻・D1(大越研究室) |
| | O-05 | Synthesis and thermodynamic properties of cyanido-bridged Co-W assembly with room temperature bistability |
| 11:30-11:50 | 高原 規行 | 工学系研究科・物理工学専攻・D1(川崎研究室) |
| | O-06 | ガスソース分子線エピタキシー法による SrVO3 二重量子井戸構造の絶縁体金属転移 |
| | | Metal-insulator transitions in \mbox{SrVO}_3 double quantum well structures grown by gassource \mbox{MBE} |
| 11:50-12:10 | 濱尾 智 | 工学系研究科·物理工学専攻·M2(石坂研究室) |
| | O-07 | 単結晶薄膜 Cr1/4NbSe2 における新奇な低温電子状態の解明 |
| | | Novel low-temperature electronic state in $Cr_{1/4}NbSe_2$ single crystalline thin film |
| 12:10-12:30 | 江 錦燕 | 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・D1(食品生物構造学研究室) |
| | | |
| | O-08 | Structural and functional analysis of iron binding proteins from Vibrio species |

| 12:30-13:30 | | 昼 〕食 |
|---|-------------------------------------|---|
| 13:30-16:00 | ポスターセ | ッション |
| 13:30-14:20 14:20-15:10 15:10-16:00 | グループ1 (15 グループ2 (15 グループ3 (16 | 名) 名) 名) |
| 16:00-16:15 | | 休憩 |
| セッション | 3 | |
| 16:15-16:35 | 渡邊 竜太 O-09 | 工学系研究科・物理工学専攻・D3(十倉・金澤研究室) (Cr,In,Bi,Sb) ₂ Te ₃ における磁性ワイル半金属相の探索 Magnetic Weyl semimetal in magnetic semiconductor (Cr,In,Bi,Sb) ₂ Te ₃ |
| 16:35-16:55 | 川合 淳也 O-10 | 工学系研究科・マテリアル工学専攻・M2(枝川・徳本研究室) Pb(Bi,Sb)2Te4 トポロジカル絶縁体の In ドープによるバルク絶縁体化 Achieving a bulk-insulating state in Pb(Bi,Sb)2Te4 topological insulators by In doping |
| 16:55-17:15 | 荒井 悠太郎 O-11 | 理学系研究科・物理学専攻・M2(高木・北川研究室) MnPの圧力誘起磁気量子臨界点と超伝導 Pressure-induced magnetic quantum critical point and superconductivity in MnP |
| 17:15-17:35 | 関根 孝彦 O-12 | 工学系研究科・物理工学専攻・D2(鹿野田研究室) 有機物質におけるラインノード上のゼロ質量電子の新奇な磁性 Novel magnetism of massless electrons on nodal lines in organic materials |
| 17: 35-17:45 17: 45-17:50 | 教職員紹介 閉会の挨拶 | 鹿野田 一司 (低温科学研究センター長) 島野 亮 (低温科学研究センター・研究開発部門) |

ポスターセッション・グループ1 (13:30-14:20)

- P1-01 石原 奎太 工学系研究科・電気系工学専攻・D2 (田中・大矢研究室)Nanofabrication of Sn-based superconductor / topological Dirac semimetalplanar heterostructures
- P1-02 升谷 颯 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・M2(食品生物構造学研究室)
 アフリカ豚熱感染における宿主応答解析
 Host response analysis in African swine fever virus infection
- P1-03 峯尾 侑希 理学系研究科・化学専攻・D1 (大越研究室) Electromagnetic wave absorption properties of Prussian blue analogues with Rb⁺ and Cs⁺ ions
- P1-04 張 灵飛 工学系研究科・物理工学専攻・D1(川崎研究室) LnRuO3単結晶薄膜における Ln サイトに依存した電気磁気輸送特性の変化 Ln site dependence of magnetotransport properties in LnRuO3 single crystalline thin films
- P1-05 吉野 貴大 工学系研究科・電気系工学専攻・M2(田畑・松井・関研究室) AI 置換 Y₃Fe₅O₁₂ 薄膜における高温スピングラス特性 High temperature Spin-glass behaviors in Y₃Al_xFe_{5-x}O₁₂ thin films
- P1-06 Guo Yuxiao 理学系研究科・物理学専攻・D3(長谷川研究室) Two-dimensional superconductivity in α-Sn/SnTe(111) heterostructure
- P1-07 相原 孝広 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (高橋(陽)研究室) マルチフェロイクス RMn₂O₅ におけるエレクトロマグノンシフト電流の観測 Shift current by electromagnon excitations in multiferroics RMn₂O₅
- P1-08 瀧本 翔平 理学系研究科・物理学専攻・D3 (村川研究室) 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発と性能評価 Development and performance evaluation of the compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator
- P1-09 上土井 猛 工学系研究科・原子力国際専攻・M2(高橋(浩)研究室)
 光量子コンピュータへの応用に向けた超伝導転移端センサの開発
 Development of Transition Edge Sensor for optical quantum computer
- P1-10 Zu Yuhang 工学系研究科・物理工学専攻・M2(為ヶ井研究室) Unusual Transport Properties with In-plane Magnetic Field in Sr_xBi₂Se₃ Single Crystals
- P1-11 遠藤 幹大 工学系研究科・物理工学専攻・M1(岩佐・中野研究室) 層状金属 TaSe₂を用いた磁性ファンデルワールスヘテロ構造の作製と磁性変調 Fabrication and magnetic modulation of magnetic van der Waals heterostructures using layered metal TaSe₂
- P1-12 徳本 有紀 生産技術研究所・マテリアル工学専攻・講師(枝川・徳本研究室)
 Ta-Te 系二次元層状準結晶の超伝導特性
 Superconducting properties of Ta-Te 2D layered quasicrystal

P1-13 小林 将大 理学系研究科·化学専攻·M1 (大越研究室)

光・圧力誘起スピンクロスオーバーを示すオクタシアニドニオブ(IV)酸系機能性フェリ磁性体 Octacyanidoniobate(IV)-based Functional Ferrimagnet Showing Photo- and Pressure-induced Spincrossover

- P1-14 上田 健太郎 工学系研究科・物理工学専攻・助教(十倉・金澤研究室)
 ハーフホイスラー型 HoAuSn の単結晶育成と負の巨大磁気抵抗効果
 Giant negative magnetoresistance in a new half-Heusler HoAuSn
- P1-15 西田 森彦 理学系研究科・物理学専攻・D2(島野研究室) 銅酸化物高温超伝導体 La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄の光励起 c 軸テラヘルツ分光 Optical Pump c-axis Terahertz Spectroscopy of Cuprate High-temperature Superconductor La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄

ポスターセッション・グループ2 (14:20-15:10)

- P2-01 大野 達也 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室) 可視光領域の蛍光と遅い磁気緩和を示すジスプロシウム-鉄 2 核錯体 Dy-Fe dinuclear complex showing visible luminescence and slow magnetic relaxation.
- P2-02 川本 知輝 工学部・物理工学科・B4(岩佐・中野研究室)
 二次元極性イジング超伝導体における非相反輸送特性
 Nonreciprocal transport in a two-dimensional polar Ising superconductor
- P2-03 澤村 駿 工学系研究科・物理学専攻・M2(高橋(陽)研究室)
 強誘電半導体 SbSI におけるフォノン励起の光起電力効果
 Photovoltaic effect by phonon excitation in ferroelectric semiconductor SbSI
- P2-04 Wenjie LI 工学系研究科・物理工学専攻・D3(為ケ井研究室) Peak Effects in 2H-NbSe₂ Single Crystals with Columnar Defects Introduced by Heavy-ion Irradiation
- P2-05 高林 里香 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・M1(食品生物構造学研究室)
 歯周病菌 Porphyromonas gingivalis の増殖を抑制する香辛料成分の探索
 Screening for spice ingredients that inhibit the growth of Porphyromonas gingivalis, a major periodontopathic bacterium
- P2-06 金田 昌也 工学部・電気電子工学科・B4(田中・大矢研究室) Magnetic-field-controllable resistive-switching and spin-valve-like behavior in an Fe/MgO/Ge-based twoterminal device
- P2-07 浦井 瑞紀 工学系研究科・物理工学専攻・PD(鹿野田研究室)
 格子点上に内部電荷自由度を有する有機三角格子系で発現するスピンクラスター状態
 Anomalous spin clusters emerging in an organic triangular-lattice system with internal charge degrees of freedom at a lattice point
- P2-08巻内 崇彦工学系研究科・物理工学専攻・PD(齊藤研究室)キャント反強磁性体 MnCO3のマイクロ波分光Microwave spectroscopy of canted antiferrromagnet MnCO3
- P2-09 松本 陽行 理学系研究科・物理学専攻・D1(島野研究室)
 鉄系超伝導体 FeSe のネマティック超伝導状態におけるテラヘルツ第三高調波発生
 Terahertz third-harmonic generation in nematic superconducting state of FeSe
- P2-10 大野 瑞貴 工学系研究科・物理工学専攻・D2(川崎研究室) 層状超格子構造を有する[BinOn]-[RhO₂] (n = 2, 3)新物質薄膜における p 型導電性 Novel supercell compounds of layered [BinOn]-[RhO₂] (n = 2, 3) thin films with p-type conduction
- P2-11 新居 拓眞 工学系研究科・電気系工学専攻・M1(田中・大矢研究室) Change of the band structure in a freestanding La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ thin film
- P2-12 鳴坂 潮 理学系研究科・物理学専攻・M2(島野研究室) テラヘルツ波を用いた 3R-Ta_{1+x}Se₂の電荷密度波相の非熱的融解とそのダイナミクス Nonthermal melting and its dynamics of charge density wave order in 3R-Ta_{1+x}Se₂ by using terahertz pulses.

- P2-13 寺尾 健裕 工学系研究科・電気系工学専攻・M2(田畑・松井・関研究室) Co-Si 共置換による YIG 薄膜におけるゆらぎ制御と スピン波によるスピングラスの電気的検出 Control of spin fluctuation in Co-Si co-substituted YIG thin film and Electrical detection of spin glass state by spin waves
- P2-14 池田 直樹 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (関研究室) 極性構造を持つ室温強磁性体 Gd₇Pt₃ における Neel 型磁気スキルミオンの観測 Observation of Neel-type skyrmion in a room-temperature polar ferromagnet Gd₇Pt₃
- P2-15 幸福 裕 薬学系研究科・薬科学専攻・助教(生命物理化学教室)
 昆虫細胞発現系における安定同位体標識法の開発
 Stable isotope labeling of membrane proteins expressed in a baculovirus-insect cell expression system

ポスターセッション・グループ3 (15:10-16:00)

P3-01 Wu Wenxi 工学系研究科・物理工学専攻・M2(為ケ井研究室) Trapping Magnetic Field in Bulk Iron-based Superconductor Sintered under High Pressure

- P3-02 スミス ライアン 工学系研究科・原子力国際専攻・D2(高橋(浩)研究室)
 重粒子検出のための超伝導転移端センサの開発
 Development of superconducting transition edge sensors for the detection of heavy ions
- P3-03 清水 翔太 理学系研究科・物理学専攻・M2(長谷川研究室) 探針制御用走査電子顕微鏡を備えた in situ 4 探針電気伝導測定装置による SrTiO₃上の原子層構造の 測定

Measurements of atomic-layer structures on SrTiO₃ by in situ four-point probe electrical transport system with scanning electron microscopy equipped for controlling probes

- P3-04 青木 俊太 工学系研究科・物理工学専攻・M1(岩佐・中野研究室) 層状反強磁性体 CuCrP₂S₆における第二次高調波発生 Second harmonic generation in layered antiferromagnet CuCrP₂S₆
- P3-05 礒山 和基 理学系研究科・物理学専攻・D3(島野研究室) s 波超伝導体 NbN における Higgs モードの量子干渉測定 Quantum interference measurement of Higgs mode in s-wave superconductor NbN
- P3-06 高田 幸之介 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・M2(食品生物構造学研究室) アフリカ豚熱ウイルスのチミジル酸キナーゼ(pA240L)の発現、精製、活性測定および阻害剤探索 Expression, purification, activity measurement and inhibitor screening for thymidylate kinase pA240L from African swine fever virus

P3-07 坂口 大輝 理学系研究科・化学専攻・M2 (大越研究室) Photo-induced change in polarization of SH light emitted from Ln-[Fe(CN)₅NO] complexes

- P3-08 小川 和馬 理学系研究科・物理学専攻・M2(島野研究室) 中赤外円偏光パルスを用いた強磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂の磁化及びカイラリティの反転 Switching of magnetization and chirality in ferromagnetic Weyl semimetal Co₃Sn₂S₂ using mid-infrared circularly polarized laser pulses
- P3-09 遠藤 達朗 工学系研究科・電気系工学専攻・M2(田中・大矢研究室) Gate modulation of current in the metal-insulator transition region of La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃
- P3-10本田 裕佳 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・M2(食品生物構造学研究室) NMR と GC-MS を用いた蜂蜜試料のメタボローム解析解析 Metabolomic analysis of honey samples using NMR and GC-MS
- P3-11 下拂 瞭太 理学系研究科・化学専攻・M2 (大越研究室) Structural transformation of a nanochannel molecule-based magnet leading to magnetic anisotropy changes
- P3-12 正力 健太郎 工学系研究科・物理工学専攻・M2(高橋(陽)研究室)
 カゴメ格子磁性体における質量ディラック電子由来の非従来型磁気光学共鳴応答
 Unconventional magneto-optical resonances derived from massive Dirac fermions in kagome magnets

- P3-13 伊藤 嵩真 工学系研究科・物理工学専攻・M1(為ヶ井研究室) (Ba,Na)Fe₂As₂テープ線材の電流電圧輸送特性 Current-voltage transport characteristics of (Ba,Na)Fe₂As₂ tapes
- P3-14 Li Guanping 理学系研究科・化学専攻・PD (大越研究室) Development of Low-Frequency Sub-Terahertz Absorption Based on Coordination Polymers
- P3-15 藤井 武則 低温科学研究センター・研究開発部門・助教(研究開発部門) 鉄系超伝導体 Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x における電子相図と Orbital-Selective Mott Phase Electronic phase diagram and Orbital-Selective Mott Phase of Te-annealed superconducting Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x
- P3-16 戸田 亮 低温科学研究センター・共同利用部門・技術専門職員(共同利用部門)
 ミリケルビン量子プラットフォームの紹介
 Introduction for milli-kelvin guantum platform

O-01

核スピンを利用した低温熱電変換 Nuclear-spin driven low-temperature thermoelectric effect

工学系研究科 物理工学専攻 齊藤研究室 吉川 貴史, 齊藤 英治

電子の熱運動を介して温度勾配から電圧を生み出すゼーベック効果[1]は,熱電変換技術の根幹を担っ てきた[2].また近年,この電子スピン版であるスピンゼーベック効果[3,4]が見出され,電子スピンの熱 ゆらぎを,スピン流を介して電圧に変換することも可能となった.しかしこれらの熱電現象は電子由来 に制限されており,低温域では電子系のエントロピー凍結により抑制されてしまう[1-4].

本発表では、固体中の原子核スピンに基づくスピンゼーベック効果-核スピンゼーベック効果-の観 測について報告する[5,6]. 試料に用いた反強磁性絶縁体 MnCO₃は、天然存在比 100%の ⁵⁵Mn 核が大きな 核スピン *I* = 5/2 を有しており、電子系と hyperfine 相互作用によって強く結合することで、核スピンの偏 極方向を外部磁場によって制御できる稀有な系である.また一方で、核スピンの低エネルギー性に由来 して、~10 mK 程度の微小エネルギースケールでもスピンの熱励起が可能である.我々は MnCO₃/Pt 接合 において極低温域まで増大するスピンゼーベック効果を観測し、この信号が 10 T オーダーの強磁場印加 によっても抑制されないことを実験的に明らかにした.また観測された信号が、MnCO₃/Pt 界面における Korringa 緩和の影響を取り入れたスピン流理論によって定量的に再現されることを示した.



- [1] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, Solid State Physics (Saunders College, 1976).
- [2] H. J. Goldsmid, Introduction to Thermoelectricity (Springer-Verlag, 2009).
- [3] K. Uchida, H. Adachi, T. Kikkawa, A. Kirihara, M. Ishida, S. Yorozu, S. Maekawa, and E. Saitoh, Proc. IEEE 104, 1946 (2016).
- [4] T. Kikkawa and E. Saitoh, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. (2023) [DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-040721-014957], arXiv:2205.10509.
- [5] T. Kikkawa, D. Reitz, H. Ito, T. Makiuchi, T. Sugimoto, K. Tsunekawa, S. Daimon, K. Oyanagi, R. Ramos, S. Takahashi, Y. Shiomi, Y. Tserkovnyak, and E. Saitoh, Nat. Commun. 12, 4356 (2021).
- [6] 吉川貴史, 齊藤 英治, 応用物理 91, 745 (2022).

円偏光駆動した 3 次元 Dirac 電子系ビスマスの異常 Hall 効果 Anomalous Hall effect of three-dimensional Dirac electrons in bismuth under circularly polarized light

東大理・島野研究室[^], 林研究室^B, 東大物性研・岡研究室^C, 低セ・研究開発部門^D 平井誉主在^A、吉川尚孝^A、河口真志^B、林将光^B、奥村駿^C、岡隆史^C、島野亮^{AD}

ビスマスは極めて重い元素であり、極めて大きいスピン・軌道相互作用を有する系として有名である。 この帰結として、結晶内の電子の運動量とエネルギーの関係(分散関係)が通常の放物線的なそれとは異な る。具体的には運動量とエネルギーの間にほぼ線形な関係が成り立ち、それが高エネルギー物理におけ る Dirac 方程式に近い性質を示すことから、ビスマスの電子は「Dirac 電子」とも呼ばれている[1]。

さて、量子系を周期的に駆動した状態は、Floquet 理論と呼ばれる枠組みによって理解することができ る[2]。レーザー光などのコヒーレントな光電場による駆動はこのような周期駆動が理想的に実現されて いると考えることができる。Dirac 電子を円偏光で駆動した状態を Floquet 理論に基づいて解析すると、 光によってバンド構造が変調され、場合によってはトポロジカルに異なる状態に転移することも予言さ れている[3,4]。光によって高速かつ自在に物性を変調・制御できる可能性から、Dirac 電子系での Floquet 状態は盛んに研究されてきている。しかしながら Floquet 状態が実験的にどのように実現できるのかは、 まだよく理解されているとは言い難い。

我々はビスマスを中赤外の円偏光パルスで励起し、Floquet 状態の形成の兆候を実験的にとらえること を目指した。Floquet 状態の形成に伴って有効磁場 (Berry 曲率)が生じることが理論的には期待される。 そのため円偏光照射によって、外部磁場がなくとも Hall 効果が生じる(異常 Hall 効果)と考えられる。異

常 Hall 効果はテラヘルツ波などの偏光回転を通してプロ ーブできることに着目し、中赤外ポンプ・テラヘルツプロ ーブ分光をビスマス薄膜試料に対して行った。

図には観測された偏光回転のダイナミクスを、ポンプ光 の包絡線と併せて示している。偏光回転は右円偏光と左円 偏光で異なる符号を示し、なおかつポンプ光に追随するよ うに現れることが分かり、Floquet 理論で期待される性質と 一致した。さらに Floquet 理論による計算と実験結果を比 較することで、「Floquet 二重 Weyl 状態」ともいうべき特殊な 状態が形成されていることが示唆された[5]。



図: 円偏光の包絡線(上)と、誘起され たテラヘルツ波の偏光回転(下)

- [1] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 012001 (2015)
- [2] T. Oka and S. Kitamura, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 10, 387 408 (2019)
- [3] S. Ebihara, K. Fukushima, and T. Oka, Phys. Rev. B 93, 155107 (2016)
- [4] H. Hübener, et al., Nature Commun. 8, 13940 (2017)
- [5] Y. Hirai, et al., arXiv:2301.06072 (2023)

O-03

シリコンベース・スピン電界効果型トランジスタ(Spin MOSFET)における 電子スピン輸送 Spin transport in Si-based spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors 東京大学工学系研究科電気系工学専攻 田中・大矢・中根研究室

工学系研究科 スピントロニクス学術連携研究教育センター

佐藤 彰一、田中 雅明、中根 了昌

シリコン(Si) MOS 電界効果型トランジスタ(MOSFET)の二次元(2D)反転チャネル中での電子スピン輸送は、そ の物理機構の解明とデバイス応用に向けて近年盛んに研究されている[1-6]。Siはスピン軌道相互作用が比較的 小さくバルクでのスピン寿命(spin lifetime)が長いことが知られているが、2D チャネルのスピン寿命については実 験的報告が限られており、詳細はまだ明らかにされていない。伝導電子のスピン輸送の物理を解明するには Hanle 効果を測定する手法が用いられる。これはスピンに対して垂直方向の外部磁場を印加することで、外部磁 場の強さに比例して歳差運動による輸送スピンの位相が変化し、出力電圧が外部磁場に対して振動的に変化す る現象である。この信号はスピン寿命やスピン輸送長の評価・解析に非常に有効である。本研究では強磁性

Fe/Mg/MgO/n⁺-Si トンネル接合をソースとドレインに用いた スピン電界効果型トランジスタ(Spin MOSFET)[1]を作製 し、Hanle 信号を測定することで Si-2D チャネルにおける電 子スピン輸送について詳細な解析を行った。

Figure 1に作製した Spin MOSFET の構造を示す。チャ ネル層は 8 nm 厚の p-Si (NA~ 1×10¹⁵ cm⁻³)である。埋め 込み酸化膜(BOX)をゲート絶縁体として利用し、p-Siの下 部に電子反転チャネルが形成されることでトランジスタとし て動作する。Hanle 信号を明瞭に観測するためチャネル長 $L_{ch} = 10 \ \mu m$ を一定電流 I_{DS} を印加して測定した。Figure 2 は室温における Hanle 信号(垂直磁場 H」を印加したときの 電圧 VD の変化)である。磁場の増加に伴い輸送されるスピ ンの位相が 0, π, 2π, 3π... と回転し、シグナルが正、負、正 …と振動している。赤線はソース・ドレイン電極の相対磁化 方向が平行、青線は反平行状態での信号である。これらの 磁化状態に応じて位相が π ずれるため、シグナルの正負が 反転している。高磁場において振幅が小さくなっているのは スピンの拡散による位相緩和に由来する。また、IDs が小さく なるにしたがって振動周期が短くなっている。これは Ips が 小さくなるにつれ電子の輸送にかかる時間が長くなり、同じ 回転に必要な外部磁場が小さくなることと対応している。反 転チャネルでの横方向電界によるスピンドリフト効果を取り 入れた独自のスピン輸送方程式を導き[5]、Hanle 信号を解 析した。チャネル中でのスピン寿命と輸送距離を見積もり、



Fe/Mg/MgO n+-Si region

Fig. 1 Schematic illustration of our spin MOSFET device structure and measurement setup.



Fig. 2 Hanle signals obtained at $V_{GS} = 40$ V with various $I_{DS} = 10, 8$, and 5 mA at room temperature. Red and blue solid curves are obtained in parallel and anti-parallel magnetization configurations, respectively, and dashed curves are fittings.

Si 反転チャネル中のスピン輸送が室温で~10 µm という長い距離に達することを明らかにした。発表では、Si 反転 チャネル中での電子散乱機構とスピン寿命の関係、様々なデバイス構造でのスピン輸送についても述べる。

謝辞 本研究では JST CREST (No. JPMJCR1777), Spin-RNJ,科学研究費 (No. 20H02199)から支援を受けた。

References [1] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. 84, 2307 (2004). [2] H-J. Jang and I. Appelbaum, Phys. Rev. Lett. 103, 117202 (2009). [3] T. Sasaki, et al., Phys. Rev. Appl. 2, 034005 (2014). [4] S. Sato et al., Phys. Rev. B 99, 165301 (2019). [5] S. Sato et al., Phys. Rev. B 102, 035305 (2020). [6] S. Sato et al., Phys. Rev. Appl. 18, 064071 (2022).

O-04

四極子近藤格子系 PrTi₂Al₂₀の巨大線形磁気抵抗とその異方性

(Large linear magnetoresistance and its anisotropy in the quadrupolar Kondo lattice system PrTi₂Al₂₀)

東大理^A、東大物性研^B、東大トランス量子^C、東北大金研^D、

高エネルギー加速器研究機構『,豊田理研『

〇磯前貴央^B、酒井明人^A、Mingxuan Fu^{A,B}、谷口貴紀^D、瀧川仁^{E,F}、中辻知^{A,B,C}

磁場中輸送現象は重要な物理現象であるため、基礎・応用の両側面から長年研究が行われてきた。その1例である、マンガン酸化物や磁性多層膜で見られる巨大磁気抵抗は、電荷輸送とスピン構造の協奏 現象であることがよく知られている。一方、近年では、ディラックコーンやワイルノードなど非自明な トポロジカルバンド構造によって非磁性金属においても巨大磁気抵抗が観測されている。以上のよう に、磁場中輸送現象は物質の電子構造と密接に関係している。

新奇磁場中輸送現象を発見するためには、従来盛んに研究が行われてきた電子系とは異なる特徴を有 する物質の輸送特性を調べる必要がある。そこで我々は、四極子近藤格子系である PrT_2Al_{20} (T = Ti, V)に 注目した[1]。電気四極子に由来する 2 チャンネル近藤効果によって生じる非フェルミ液体相では $\rho \propto T^{1/2}$ の通常金属とは異なる特異な輸送現象が起こることが予測されている。実際、両物質の Pr^{3+} イオンの結 晶場基底状態は立方対称な結晶場によって、第一励起状態が十分に離れている多極子活性な非磁性 Γ_3 二 重項状態 ($O_{20} \ge O_{22}$ 型電気四極子と T_{xyz} 型磁気八極子) であることが様々な実験から確認されている。 また、高温の電気抵抗率で見られる磁気的近藤効果や光電子分光の近藤共鳴ピークなどから、混成効果 が強い系であることも分かっており、多極子と伝導電子の混成効果が物性に影響を与えていると考えら れる[1,2]。特に、 $PrT_{2}Al_{20}$ は、 $PrT_{2}X_{20}$ (X = Zn, Al)の中で唯一の強四極子秩序 ($T_{Q} = 2$ K)を示す物質であ り、秩序相中で $T_{C} = 0.2$ K の超伝導が現れる[3]。さらに、静水圧力下では 8.8 GPa において T_{C} が 1.1 K、電子の有効質量が 100 倍程度増大された重い電子超伝導が観測されている[4]。

以上のような研究があるが、PrTi₂Al₂₀の磁場中での電気輸送特性は未解明である。例えば[001]方向の 磁場では2T付近で秩序変数がO₂₀からO₂₂へスイッチングすることが磁化測定と核磁気共鳴測定(NMR) から確認されており[5]、*c-f*混成効果が劇的に変化していることからフェルミ面の変化が指摘されてい るが、確証は未だ無い。また、類縁物質である PrV₂Al₂₀では、多極子秩序変数の変化に伴った磁気抵抗 の巨大な変化が観測されているが[6]、フェルミ面、多極子と輸送現象の関係は理解されていない。その ような背景を踏まえ、本研究では、秩序変数が解明されている PrTi₂Al₂₀において多極子自由度とフェル ミ面が輸送特性にどのように影響を与えているかを明らかにすることを目的とした。そのため、 PrTi₂Al₂₀と、4f 電子を含まない参照物質である LaTi₂Al₂₀の輸送特性(ホール効果と横磁気抵抗)を測定し たところ、両物質において、1000%程度の巨大な線形磁気抵抗が生じることが分かった。

[1] A. Sakai and S. Nakatsuji, JPSJ 80, 063701 (2011).[2] M. Matsunami et al., PRB 84, 193101 (2011).[3] A. Sakai et al., JPSJ 81, 083702 (2012).[4] K. Matsubayashi et al., PRL 109 187004 (2012).[5] T. Taniguchi et al., JPSJ 88, 084707 (2019). [6] Y. Shimura et al., PRL 22, 256601 (2019).

O-05 Synthesis and thermodynamic properties of cyanido-bridged Co-W assembly with room temperature bistability

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, Graduate School of Science Kazuki Nakamura, Koji Nakabayashi, Kenta Imoto, Shin-ichi Ohkoshi

Magnetic phase transition has received a lot of attention from scientific community due to its applicability. Cyanido-bridged assemblies have the potential to exhibit phase transition because of various spin states, leading to the switching of various properties. [1] Especially, cyanido-bridged Co-W assemblies have been reported with interesting properties such as photomagnetism and thermal hysteresis loop derived from charge transfer between Co^{II}-W^V and Co^{III}-W^{IV} states.[2] Rearising these two stable phases at room temperature in such compounds is crucial

for applications. Herein, we synthesized a two-dimensional (2-D) Co-W assembly exhibiting room temperature bistability with elemental formula $Cs^{+}_{0.1}(H_5O_2^{+})_{0.9}[Co(4-bromopyridine)_{2.3}\{W(CN)_8\}]$ (CsHCoW), which is based on $(H_5O_2^{+})[Co(4-bromopyridine)_2\{W(CN)_8\}]$ having stable Co^{III} -W^{IV} state between 2 to 390 K. [3],[4]

The red powder was prepared by mixing an aqueous solution of CoCl₂ · 6H₂O, 4-bromopyridinium chloride, and CsCl with an aqueous solution of Cs₃[W(CN)₈] · 2H₂O and CsCl. The crystal structure was determined by Rietveld analysis with the powder X-ray diffraction pattern using the original crystal structure as the mother material.[3] CsHCoW has $P2_1/c$ space group with monoclinic and a 2-D cyanido-bridged structure, which is composed of one Co^{II}, one [W(CN)8]³⁻, and two 4-bromopyridine, along with nine-tenth oxonium cation and one-tenth Cs⁺ ion between layers. (Figure 1) The product molar magnetic susceptibility (χ_M) with temperature (T) vs T plot of CsHoW shows that transition temperatures are 276 and 329 K during the cooling and heating process, respectively. (Figure 2) This suggests that CsHCoW has room temperature bistability. The transition enthalpy and entropy were obtained by the DSC measurement and compared with other reported cyanido-bridged Co-W assemblies revealing that CsHCoW has strong cooperativity.



Fig. 1 Crystal structure of $Co^{II}-W^{V}$ state of **CsHCoW** vied from *c*-axis.



Fig. $2\chi_M T$ vs T plot under 1000 Oe.

^[1] S. Ohkoshi, et al., Nature Photonics, 8, 65 (2014).

^[2] N. Ozaki, S. Ohkoshi, et al., Adv. Funct. Mater., 22, 2089 (2012).

^[3] Y. Miyamoto, N. Ozaki, S. Ohkoshi, et al., Dalton. Trans., 45, 19289 (2016).

^[4] K. Nakamura, S. Ohkoshi, et al., Inorg. Chem. Front., 10, 850 (2023).

O-06

ガスソース分子線エピタキシー法による SrVO3 二重量子井戸構造の 絶縁体金属転移

Metal-insulator transitions in SrVO₃ double quantum well structures grown by gas-source MBE

東大院工¹,理研 CEMS²,東大東京カレッジ³

⁰高原規行^{1,2}, 高橋圭², 十倉好紀^{1,2,3}, 川﨑雅司^{1,2}

【背景】SrVO₃(SVO)は典型的な強相関金属として知られている。これまでに、超薄膜において電子の閉じ込め効果により二次元 Mott 絶縁体に転移し[1]、La 置換による電子ドープで絶縁体-金属転移することが明らかにされてきた[2]。最近、SVO の二重量子井戸構造において、共鳴トンネル効果による波動関数の混成に由来した絶縁体-金属転移が ARPES により観察されており興味深い[3]。本研究では、SVO に挟まれたバリア層として EuTiO₃(ETO)、外側のバリア層として SrTiO₃(STO)を用いた二重量子井戸構造STO/SVO/ETO/SVO/STO を作製した。ETO は 5.5 K で G 型反強磁性転移を示す磁性半導体であり、磁場印加で Eu 4f スピンを強磁性に揃えることにより Ti 伝導バンドが 100 meV 程度の大きな Zeeman 分裂を示す[4]。この Zeeman 分裂によるバリア高さの変化に由来する磁気伝導効果を期待し、輸送特性の評価を行った。 (a) (b) 10^2

【実験と結果】ガスソース分子線エピタキシー によりバリア層 ETO の膜厚(nu.c.)を変化させた 二重量子井戸構造 STO(5 u.c.)/SVO(3 u.c.)/ETO(n u.c.)/SVO(3 u.c.)/STO(5 u.c.)を作製した(図 1(a))。 図 1(b)にそれぞれのシート伝導度の温度依存性 を示した。n=4 u.c.以下では、シート伝導度が SVO(3 u.c.) 単膜の 2 倍のシート伝導度を大きく 上回り、SVO(6 u.c.)単膜の値に近くなっている。 これは、SVO 二層間のトンネル効果により波動 関数の混成が実現していると考えられる。また、 そのような n=4 u.c.以下の構造では ETO バリア 高さが磁場で変調されたことを示唆する正の磁 気伝導効果も観察された。講演ではバリア層を 非磁性の STO に変えた STO/SVO/STO/SVO/STO 二重量子井戸構造との比較を行い、輸送特性の バリア膜厚・磁場依存性を詳細に議論する。

[3] R. Yukawa et al., Nat. Commun. 12 (2021).



Fig. 1(a) A schematic of the double quantum well structure. (b) Temperature dependence of sheet conductance for STO/SVO/ETO/SVO/STO double quantum well with ETO layer thickness $n = 1 \sim 10$ u.c.. Black curves indicate sheet conductance for SVO (6 u.c.) single layer film as n = 0 and doubled value of sheet conductance for SVO (3 u.c.) single layer film as $n = \infty$.

- [2] K. S. Takahashi et al. APL Mater. <u>10</u> (2022).
- [4] K. Maruhashi et al. Adv. Mater. 32 (2020).

^[1] K. Yoshimatsu et al., PRL 104 (2010).

単結晶薄膜 Cr_{1/4}NbSe₂ における新奇な低温電子状態の解明 Novel low-temperature electronic state in Cr_{1/4}NbSe₂ single crystalline thin film

東大工物工¹,理研 CEMS²,高工研物構研³,東大先端研⁴ 量研機構⁵,東北大 IMRAM⁶,東大工 QPEC⁷ <u>濱尾智¹</u>, Bruno Kenichi Saika¹,黄驤¹,真島裕貴¹,松岡秀樹²,北村未歩³, 坂野昌人^{1,7},畑中樹人¹,野本拓也⁴,平山元昭^{1,2,7},堀場弘司⁵,組頭広志^{3,6}, 有田亮太郎^{2,4},岩佐義宏^{1,2,7},中野匡規^{1,2,7},石坂香子^{1,2,7}

 T_xMX_2 (T: 3d 磁性元素、M: 遷移金属、X: カルコゲン)は、遷移金属ダイカルコゲナイド MX_2 層間に 3d 磁性元素 T をインターカレートした層状化合物である。一般に、遷移金属ダイカ ルコゲナイドの層間に磁性元素をインターカレートすると、組成やインターカレート量に応 じて多様な超構造や磁気秩序が発現することが知られている。特に x = 1/3 は様々な系で盛 んに研究されており、キラル磁性[1]や磁性トポロジカル半金属[2,3]などの新奇物性が報告 されている。一方 x = 1/4 は比較的未開拓であり、多くの場合 T 原子の整列により 2×2 超構 造(図)を形成することが知られているが[4]、磁性を含め詳細な物性はわかっていないものが 多い。

本研究では、分子線エピタキシー法(MBE)により製膜された Cr_{1/4}NbSe₂ 単結晶薄膜(6 層) を対象として、真空紫外光を用いた角度分解光電子分光(ARPES)による電子構造の解明を 行った。室温から 20 K までの複数の温度で行った ARPES 測定の結果から、Cr_{1/4}NbSe₂の バンド構造は大きく温度変化していることが確かめられた。80 K 以下の温度領域では、フ ェルミ準位付近に存在する Cr 由来のバンドの強度が温度の低下とともに増加し、バンド構 造が平坦化することが確かめられた。これは強相関電子系においてみられるバンド構造の 温度変化の特徴と一致する振る舞いである。本発表では強相関的電子状態の物理的起源に ついても議論を行う。



[1] N. Sirica *et al.*, *Phys. Rev. B* 94, 075141 (2016).
[2] T. Inoshita *et al.*, *Phys. Rev. B* 100, 121112 (2019).
[3] B. K. Saika *et al.*, *Phys. Rev. Res.* 4, L042021 (2022).
[4] S. S. P. Parkin and R. H. Friend, *Philos. Mag. B* 41, 65 (1980).

Structure analysis of the periplasm ferric siderophore-binding proteins from

Vibrio species

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, Department of Applied Biological Chemistry Jinyan Jiang, Peng Lu, Ken Okamoto, Hideaki Itoh, Suguru Okuda, Michio Suzuki, Koji Nagata

Vibrio is a genus of ubiquitous bacteria that inhabit a wide range of aquatic and marine environments and cause seafood contamination and infectious diseases in humans. Therefore, finding new strategies to solve this issue is very urgent. Iron (Fe) is an essential micronutrient for all living microorganisms. the function including as micronutrient, cofactor for enzyme take part in the biochemistry reaction, the metabolism can transcriptional regulation in many basic metabolic pathways. For Gram-negative bacteria, iron is usually taken up by ATP-binding cassette (ABC)-type transporters that contain transmembrane protein (TMP), periplasm binding protein (PBP) and nucleotide binding domain (NBD). When pathogens acquire iron, iron will be captured by a PBP, then delivered to an ABC transporter system. The growth of pathogens can be inhibited if the binding between PBP and ferric ions are suppressed.

Based on previous research in our lab [1-3], we summarized the conserved PBP proteins from *Vibrio* species. A widely exist PBP, FecB, was found from *Vibro vulnificus*. It can specifically uptake and transport Fe³⁺-citrate. The Fe³⁺-citrate are then recognized and transported across the outer membrane using classic TonB-dependent receptor proteins.



Fig.1 The apo and complex structure of FecB

Here we showed the structure of a novel PBP FecB, the apo and complex structure of FecB with forms at 2.59Å and 2.51Å separately. In order to clarify the combined structure of complex with the Fe³⁺, binding affinity with different ions were performed. The results demonstrated this protein is a significant combined dependent on citrate. The exist of citrate can helpful to stable the complex structure. Finally, we identified the key functional amino acid when FecB captured the substrate. Our result enriched the diversity of PBP proteins and provides theory foundation for the design of drug targets for pathogen inhibitors in the future.

This work was supported by JSPS KAKENHI and JST SPRING. Thanks for the support provided by the cryogenic research center of Utokyo. The X-ray diffraction experiments were performed at synchrotron beamlines at SPring-8 and Photon Factory.

- [1] Lu, P et al., Int J Mol Sci., 22, 13010 (2021)
- [2] Lu, P et al., Metallomics. 11, 2078-2088 (2019)
- [3] Wang, S et al., Acta Cryst. D., 79, 196-202 (2014)

O-09

(Cr,In,Bi,Sb)₂Te₃における磁性ワイル半金属相の探索 Magnetic Weyl semimetal in magnetic semiconductor (Cr,In,Bi,Sb)₂Te₃

工学系研究科 物理工学専攻 十倉・金澤研究室

渡邊竜太¹, Ilya Belopolski², 吉見龍太郎², 川村稔², 塚﨑敦³, 高橋圭², 川﨑雅司^{1,2}, 十倉好紀^{1,2,4}

東京大学大学院¹,理研 CEMS²,東北大金研³,東京大東京カレッジ⁴ 近年、バンド構造とトポロジーの関係の理解が深まり、トポロジカル絶縁体やディラック・ワイル半 金属などといった非自明なバンド構造の存在が明らかとなっている。トポロジカル絶縁体はギャップの 開いたバルクバンドと金属的な表面状態を有し、バンドギャップムのが0を跨いで変化するバンド反転に より、自明な絶縁体(ム0>0)とトポロジカル絶縁体(ム0<0)の相転移が生じる。また、その相境界(ム0=0)で はディラック半金属となる。このディラック半金属状態で、分極または磁性が導入されると、縮退が解 けてワイル半金属になると予測されている([1],[2])。特に、磁性を導入する場合、ム0と交換分裂ムmが山0|< 山の関係にあるとき磁性ワイル半金属になると予測されている(図1)が、その全体像は実験的に明らか にされてこなかった。

上記の方法で磁性ワイル半金属相を実現し、新奇な輸送特性を実現 するためには、3 つのパラメーター $\Delta_0, \Delta_m, E_F(フェルミ準位)$ のそれぞれ を制御する必要がある。本発表では、 In_2 - $Cr_{2x}(Bi_{1-y}Sb_y)_{2-2x-2z}Te_3(ICBST)$ を用いて、組成x(Cr), y(Sb), z(In)により Δ_0, Δ_m, E_F それぞれの制御を行 った。 $|\Delta_0| > |\Delta_m|$ と期待される組成の試料における異常ホール伝導度の膜 厚依存性では、膜厚に依存せず量子化した 2 次元的な異常ホール効果 が、 $|\Delta_0| < |\Delta_m|$ と期待される組成の試料では膜厚に比例した 3 次元的な異 常ホール効果が観測された。この次元性の変化は、表面状態が量子化 したホール伝導度を示す磁性トポロジカル絶縁体と、バルク由来の巨 大な異常ホール効果を示す磁性ワイル半金属のトポロジカル相転移の 存在を強く示唆している。また、面内異方的磁気抵抗効果(AMR)測定で は、組成に依存して AMR 比の符号変化が観測された。磁場 B//電流 Iでの負の AMR は、ワイル半金属特有の輸送現象であるカイラル異常に 由来していると解釈することができ、膜厚依存性で推測されたトポロ ジカル相転移との良い整合性も確認された。

本研究の結果により、磁性トポロジカル絶縁体と磁性ワイル半金属 の関係性の全体像が明らかとなった。また、今回実現した磁性ワイル 半金属は単一のワイル点対を有する最も単純なワイル半金属であり、 新奇な物理現象の探索も期待される。 $\begin{array}{c} & \Delta_m \text{ Exchange splitting} \\ & & \Delta_0 \text{ Band gap} \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & & & \\ & & & &$

- [1] S. Murakami, New J. Phys. 9, 356 (2007).
- [2] G. Y. Cho, arXiv:1110.1939v2 (2012)

図1. 磁性トポロジカル絶縁体 (TI)、自明な絶縁体(NI)、磁性ワ イル半金属(WSM)の相図(文献[2] から改変)。*AmとA*0は、それぞれ 交換分裂とバンドギャップであ る。

O-10 Pb(Bi,Sb)2Te4トポロジカル絶縁体の In ドープによるバルク絶縁体化 Achieving a bulk-insulating state in Pb(Bi,Sb)2Te4 topological insulators by In doping

東京大学大学院マテリアル工学専攻 枝川・徳本研究室 川合淳也, 徳本有紀, 枝川圭一

Pb(Bi,Sb)₂Te₄トポロジカル絶縁体は Z₂ 指数(1;111)を持ち、表面だけでなく内部の転位に沿っても特殊な 金属状態が発現し得る数少ない物質の一つである。我々のグループは将来的に転位に沿った特殊な金属 状態の実験研究に発展させることを念頭において、Pb(Bi,Sb)₂Te₄のバルク絶縁性向上に取り組んできた。 これまでに、Sb 分率を調整することでバルクの電気抵抗の温度依存性が絶縁体的振舞いを示す結晶を得 ることに成功した[1]。本研究では Pb(Bi,Sb)₂Te₄ のさらなるバルク絶縁性向上を目指し、(Pb,Sn)Te や GeSb₂Te₄ などの合金系で電気抵抗率を増加させる効果があることが報告されている[2][3]、In ドーピング を試みた。

各元素をモル比がPb: In: Bi: Sb: Te = (1 - x): x: (0.21 × 2): (0.79 × 2): 4となるよう秤量し、ブリッジマン法で結晶 育成を行った。In ドープ量はx = 0.01, 0.02, 0.04の 3 通り とした。Sb 分率は Pb(Bi,Sb)₂Te₄において低温で最大の電 気抵抗率が得られた 0.79 にした。得られた結晶の Pb(Bi,Sb)₂Te₄単相部分から3×1×0.2 mm³程度の試料を 切り出し、電気抵抗率の温度依存性を測定した。その結 果、同一仕込み組成でも電気抵抗率の温度依存性が試料 ごとに大きく異なり、金属的な振舞いを示す試料と絶縁 体的な振舞いを示す試料が共存していることがわかっ た。その中でも最もバルク絶縁性の高い x=0.04 中試料の 規格化抵抗率 ρ_{2K}/ρ_{300K} は 45 に達した。この値は x=0.00 の ρ_{2K}/ρ_{300K} の約7倍である(図 1)。さらに、Pb(Bi,Sb)₂Te₄ では見られなかった三次元可変領域ホッピングの挙動





(σ_{xx} ∝ exp(-T/T₀)^{-1/4})が明らかとなった。これらの結果から、In ドープにより空間的に離散した不純物 バンドが形成され、これによりバルク絶縁性が大幅に向上したと考えられる。また、2K~300K で磁気抵 抗測定も行った。2K~80K の磁気抵抗については、三次元弱反局在と電子-電子相互作用の式でよくフィ ットした。フィッティングの結果求めた位相コヒーレンス長 L_φの温度依存性から、この系の位相消失メ カニズムは電子-フォノン散乱であることがわかった。

- [1] Y. Hattori et al., Phys. Rev. Mater. 1, 074201 (2017).
- [2] C.-L. Zhang et al., Phys. Rev. Mater. 4, 091201(R) (2020).
- [3] P. Chen et al., Adv. Funct. Mater. 2211281 (2023).

O-11 MnPの圧力誘起磁気量子臨界点と超伝導

Pressure-induced magnetic quantum critical point and superconductivity in MnP

^A 東大理、^B 中国科学院物理研、^C 東大物性研、^D マックスプランク研 荒井悠太郎^A、平岡奈緒香^A、Jinguang Cheng^B、Wei Wu^B、Jianlin Luo^B、上床美也^C、 北川健太郎^A、高木英典^{A, D}

超伝導は低温で電子対が凝縮することで生ずる。中でも重い電子系、鉄系超伝導体などでは、多くの場合磁気秩序相に隣接して超伝導を生じる。磁気秩序の2次相転移が絶対零度まで抑制された量子臨界点 (QCP)の近傍では、量子臨界揺らぎにより非フェルミ流体的振舞いを生ずる。実際に CeRhIn₅[1] などの 重い電子系超伝導体では、超伝導相内に存在する QCP の近傍で超伝導転移温度 T_{SC} が最大となるため、 QCP により超伝導を生じているとされている。しかし鉄系超伝導体を含む 3d 電子系では、超伝導相内に QCP が存在することが確実視されている物質はほぼ存在しない。

MnP は臨界圧力 $P_{\rm C} \approx 8$ GPa でらせん磁性相 が消失するとともに、 $P_{\rm C}$ 近傍で $T_{\rm SC} \approx 1$ Kの 超伝導を生じる [2]。このため、本物質は 3d 電 子系でありながら QCP が超伝導相内に存在す る物質とされ注目を集めている。しかし、この 先行研究では特に 5 GPa 以上でデータ点が少な い。また、中性子回折では 7.6 GPa においても 相転移点 $T_{\rm m}$ が 85 K と比較的高い [3] としてお り、本物質において QCP が超伝導相内に存在す るかについては議論の余地がある。

そこで、本研究では超伝導相近傍における詳 細な相図を確定するべく、8.6 GPa までの NMR 測定を行った。その結果、8.0 GPa においても 微弱な磁気秩序が存在することが判明した。ま た、常磁性スペクトル強度から見積もった $T_{\rm m}$ は、 $T_{\rm SC}$ が最大値の半分以下となる 8.6 GPa におい ても 46 K と比較的高い。このため、超伝導相は



図 1. 先行研究 [2, 3]、および本研究の実験結果から得た相図。超伝導相の大部分はらせん磁性相内にあり、相転移は少なくとも 7.0 GPa 以上で 1 次となる。

らせん磁性相内にのみ存在するとみられる。さらにスピン・格子緩和率 T₁ からは、少なくとも 7.0 GPa 以上において相転移が 1 次となることが判明した。これらの振舞いは MnP の相図が QCP により超伝導 を生じているとされる場合の典型的な相図とは大きく異なることを示す。本発表では、主に NMR から得 られた超伝導相近傍の詳細な相図について議論する。

- [1] M. Yashima *et al.*, Phys. Rev. B **76**, 020509 (2007).
- [2] J.-G. Cheng *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 117001 (2015).
- [3] S. E. Dissanayake *et al.*, to be published.

O-12

有機物質におけるラインノード上の ゼロ質量電子の新奇な磁性

Novel magnetism of massless electrons on nodal lines in organic materials

^A工学系研究科物理工学専攻、^B日本大学文理学部、^C 産総研

<u>関根孝彦</u>^A、畠村匠^A、須波圭史^A、宮川和也^A、秋元健汰^B、周彪^B、石橋章司^C、小林昭子^B、 鹿野田一司^A

ある固体物質中では電子のエネルギーが円錐状の運動量分散を有する。その円錐の頂点(ディラック点 という)のまわりでは、固体中でありながら質量がゼロとして振る舞う準粒子、ディラック電子が励起さ れる。ディラック電子は非常に高い移動度や磁場による特異な量子化効果を示し、その研究は2次元単 層物質のグラフェンで盛んに行われてきた。近年、3次元格子を有する分子性導体 $[M(dmdt)_2]$ (M = Ni, Pt) がディラック電子系であることが分かった (図1(a))[1]。この物質の特徴は、2次元運動量面内 (図1(b) k_b-k_c面)のディラック点が面垂直方向(k_a軸)に沿って連続的に分散していることである。これをディラッ クノーダルラインという。2次元ディラック電子がノーダルラインに沿った運動量自由度を獲得すること によってどのような新奇物性が発現するのかに注目が集まっている。ディラックノーダルラインの低温磁 性を微視的なプローブで探るため、本研究では¹³C 置換体 [M(dmdt)₂] の多結晶試料を用いて¹³C-NMR |実験を行った。[Ni(dmdt)₂] の¹³C 核スピン-格子緩和率 1/T₁T は、100 K 以上の温度で T^{2.13} に比例し た (図 1(c))。これは 2 次元ディラック電子系に期待されるべき乗則 (T²) と矛盾しない。しかし約 30 K で1/T₁T は極大を示し、しかもその極大値は低磁場ほど大きくなった。このことは30 K まわりの低磁場 下で電子スピン揺らぎが発達することを示唆する。このようなスピン揺らぎは従来の2次元ディラック 電子系では観測されておらず、ディラックノーダルラインに特有の振る舞いであると推察される。この 1/T₁Tの極大は [Pt(dmdt)₂] では [Ni(dmdt)₂] ほど顕著に観測されなかった。両塩の電子状態の違いは、 ディラックノーダルラインの分散幅 ΔE の大きさにある (図 1(b))。この ΔE などの、ディラックノーダ ルラインの特性が新奇なスピン揺らぎに如何に寄与しているかを検討する。



図 1. (a)¹³C 置換体 M(dmdt)₂ の分子構造式および結晶構造. (b) ディラックノーダルラインのエネルギー-運動量 分散. (c)[Ni(dmdt)₂] および [Pt(dmdt)₂] における ¹³ 核スピン-格子緩和率 1/*T*₁*T*

[1] A. Kobayashi et al., Bull. Chem. Soc. Jpn. 94, 2540 (2021)

Sn ベース超伝導体/トポロジカルディラック半金属横型ヘテロ 接合の微細加工 Nanofabrication of Sn-based superconductor / topological Dirac semimetal planar heterostructures

Dept. of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo Keita Ishihara, Le Duc Anh, Tomoki Hotta, Kohdai Inagaki, Masaki Kobayashi and Masaaki Tanaka

Heterostructures of superconductor/topological materials attract attention as a platform of unconventional superconductivity. Among various topological material candidates, α -Sn is attractive because it can exhibit a wide range of topological phases from topological Dirac semimetal to topological insulator [1]. Moreover, upon heating α -Sn undergoes a phase transition to β -Sn, which becomes superconducting at low temperature (< 4 K). In this study, we utilize this rich phase diagram of Sn to fabricate superconducting β -Sn/topological Dirac semimetal α -Sn planar junctions.

We grew epitaxial 40 nm-thick α -Sn thin films with diamond-type crystal structure grown on InSb (001) substrates by molecular beam epitaxy (MBE). The α -Sn films are transformed to β -Sn under Ga ion-beam irradiation. By focusing the ion beam, we successfully fabricated β -Sn nanoscale structures such as a nanowire with width t = 180 nm (Fig. 1) and a planar Josephson junction with two β -Sn electrodes separated by an α -Sn area of 70 nm. We found that the β -Sn nanowires of various t exhibit superconductivity below 4 K (Fig. 2) and the critical temperature depends on t. The microscopic structures of the β -Sn/ α -Sn were characterized using scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy and X-ray photoemission spectroscopy, indicating the formation of β -Sn areas and good β -Sn/ α -Sn interfaces inside the α -Sn thin films due to local heating. In the presentation, we will discuss the structure and superconducting properties of the nanostructure in more detail.

This work was partly supported by CREST program (JPMJCR1777) and PRESTO Program (JPMJPR19LB) of JST, UTEC-UTokyo FSI, Murata Science Foundation and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

References: [1] L. D. Anh, et al., Adv. Mater. 33, 2104645 (2021).



Fig.1 Top view SEM image of a β -Sn nanowire with a width of 180 nm formed in an α -Sn thin film. We confirmed that all the fabricated nanowires have the clean and straight-lined structure.



Fig.2 Temperature dependence of the resistance of β -Sn nanowires of various wire widths. Phase transitions to superconductivity at below 4 K are observed.

P1-02

Host response analysis in African swine fever virus infection 食品生物構造学研究室 升谷 颯

Introduction

African Swine Fever (ASF) is a febrile infectious disease of pigs and wild boars caused by the ASF virus (ASFV). The number of ORFs of ASFV exceeds 190, which is quite large for a virus. However, there are still many genes with unknown functions. In particular, there are five groups of functionally unknown genes called MGF (Multi-Gene Family): MGF 100, MGF 110, MGF 300, MGF 360, and MGF 505. Some ASFV strains that lack several genes belonging to MGF 360 and MGF 505 have been reported to be effective as vaccines. The genes belonging to MGF110 are predicted to contain transmembrane regions and/or signal peptide sequences. In this research, the toxicity and localization of MGF proteins were examined to clarify the function of MGF proteins.

Analysis of ORFs function using porcine cell

A total of 47 plasmid DNAs encoding each MGF with C-terminally linked green fluorescent protein mNeonGreen were constructed and transfected to LLC-PK1 cells (Pig renal tubular epithelial cell line). First, the transfection conditions were optimized: transfection reagent PEI Max and plasmid DNA ratio was 300 nL to 100 ng. Then, the lipopolysaccharide in the plasmid DNA solution was removed with Triton X-114 colored with Oil red O to decrease the effect on viability. Finally, cell viability after transfection was evaluated with the MTT assay method. The viability of LLC-PK1 cells transfected with MGF300-2R, MGF300-4L, MGF360-12L, and MGF360-13L was less than 50%, indicating high cytotoxicity to the cells.

Simultaneously, the localization of each MGF when heterologously expressed was examined. The nucleus and mitochondria were stained with DAPI and MitoBright LT Red, respectively. The stained cells were observed using a confocal microscope and a fluorescence microscope. Most MGF proteins were localized in the cytoplasm, whereas some MGF110 members showed specific localization: MGF110-12L was localized in mitochondria, MGF110-5L-6L around the nucleus, and MGF110-13Lb in the nucleus.



Figure 1. The viability of LLC-PK1 cells 30 hours after transfection

P1-03

Electromagnetic wave absorption properties of Prussian blue analogues with Rb⁺ and Cs⁺ ions.

Solid state physical chemistry lab., Department of Chemistry, School of science OYuuki Mineo, Koji Nakabayashi, Kenta Imoto, Kosuke Nakagawa, Marie Yoshikiyo, Hiroko Tokoro, Shin-ichi Ohkoshi

Terahertz (THz) wave is drawing attention for its various applications in pharmaceutical science, the information and communication technologies, and so on.[1] Our laboratory recently reported that $Cs_{0.90}Mn[Fe(CN)_6]_{0.93} \cdot 1.9H_2O$ (**CsMnFe**) exhibits the THz wave absorption at 1.4 THz mainly due to the phonon modes of heavy Cs⁺ ions confined in the three-dimensional cyanido-bridged framework.[2] It is essential for the development of THz wave application to control THz wave. Therefore, we investigated the THz wave absorption properties of the isostructural analogues of **CsMnFe**, Rb_{0.97}Mn[Fe(CN)_6]_{0.99} \cdot 0.5H_2O (**RbMnFe**), and Rb_{0.67}Cs_{0.30}Mn[Fe(CN)_6]_{0.99} \cdot 0.6H_2O (**Rb**_{0.67}Cs_{0.30}MnFe), which show a charge-transfer phase transition.

The crystal structures of **RbMnFe** and **Rb**_{0.67}**Cs**_{0.30}**MnFe**, were revealed by the powder X-ray diffraction patterns and the Rietveld analyses to be the cubic structure with a space group of $F\overline{4}3m$ at room temperature (Fig.1). In the magnetic measurements, these compounds show a charge-transfer phase transition between the high temperature (HT) phase and the low temperature (LT) phase (Fig.2a). In

the LT phase, the crystal structure changed into the tetragonal structure with a space group of $I\overline{4}m2$. THz timedomain spectroscopy revealed that **RbMnFe** and **Rb**_{0.67}**Cs**_{0.30}**MnFe** in the HT phases showed the THz wave absorption at 1.15 and 1.30 THz, respectively (Fig.2b). Smaller ionic radii of Rb⁺ ions than that of Cs⁺ ions can contribute to the larger space for the oscillation of Rb⁺ ions, resulting in the lower absorption frequency in **RbMnFe**. As temperature decreased, the absorption frequency shifted to lower, but with further cooling to 140 K, the absorption frequency shifted higher again, 1.31 THz for **RbMnFe** and 1.33 THz for **Rb**_{0.67}**Cs**_{0.30}**MnFe**. As for



Fig. 1. The crystal structure of AMnFe ($A = Cs^+$ or Rb⁺)



Fig. 2. (a) $\chi_M T$ -*T* plots under 5000 Oe. (b) THz wave absorption spectra with temperature change.

RbMnFe, the structural change with the phase transition led to the shrinkage of the cubic volume in the LT phase, resulting in the higher absorption frequency than in the HT phase, while $\mathbf{Rb}_{0.67}\mathbf{Cs}_{0.30}\mathbf{MnFe}$ didn't show such a drastic change as shown in **RbMnFe** despite the similar change in cell volumes. Additionally, a peak shoulder around 0.8 THz became clear in $\mathbf{Rb}_{0.67}\mathbf{Cs}_{0.30}\mathbf{MnFe}$. Therefore, the structural change with a charge-transfer phase transition leads the change of the THz wave absorption frequency and the substitution of \mathbf{Cs}^+ ions is presumed to suppress this change.

^[1] T. Yoshida, K. Nakabayashi, H. Tokoro, M. Yoshikiyo, A. Namai, K. Imoto, K.Chiba, S. Ohkoshi, *Chem. Sci.* **11**, 8989 (2020). [2] S.Ohkoshi, M.Yoshikiyo, A.Namai, K.Nakagawa, K.Chiba, R.Fujiwara, H.Tokoro, *Sci. Rep.*, 7, 8088 (2017).

P1-04 *Ln*RuO₃単結晶薄膜における *Ln* サイトに依存した電気磁気輸送特 性の変化

Ln site dependence of magnetotransport properties in *Ln*RuO₃ single crystalline thin films

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室 張灵飛、先崎俊亮、藤田貴啓、川崎雅司

【背景】ペロブスカイト型 ARuO3 酸化物は典型的な遍歴金属酸化物として長年注目を集め、とりわけ Ru が 4 価となる AeRu⁴⁺O3 (Ae: Tルカリ土類金属) は多彩な物性を示す強磁性体 SrRuO3 を中心に盛んに研 究されている [1]。一方、Ru が 3 価をとなる LnRu³⁺O3 (Ln: 希土類金属) は Ru³⁺の不安定性から試料作 製が困難であり、高圧合成によるバルク多結晶 [2]や、ごく最近になって水熱合成によるバルク単結晶 [3] の作製が報告されたものの、磁気輸送特性は明らかにされていない。LnRu³⁺O3 では、磁気モーメントを 持った Ln^{3+} を選択することで、Ln の局在 4f 電子と Ru の遍歴 4d 電子の相互作用により、従来の AeRu⁴⁺O3 では見られない新奇な磁気輸送特性の発現が期待できる。 Ln^{3+} イオンは電子数の変化に伴い、イオン半径

や磁気的性質が大きく変化するため、磁気輸送特性に影響すると 考えられる。本研究では、*Ln*RuO₃系材料の磁気輸送特性を解明す べく、当研究室で開発した LaRuO₃ 薄膜の成膜手法[4]を利用して *Ln*RuO₃ (*Ln* = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd)の単結晶薄膜を作製し、磁気 輸送特性の *Ln* サイト依存性を評価した。

【実験と結果】 $Ln RuO_3$ 単結晶薄膜は、パルスレーザー堆積法で作 製したアモルファス薄膜を、管状炉で窒素気流中アニールするこ とで作製した [4]。各組成の縦抵抗率の温度依存性は、 Ln^{3+} イオン 半径が小さいほど(La > Pr > Nd > Sm > Eu > Gd)、より絶縁体的な 挙動を示した(図1)。 Ru^{3+} は Ir^{4+} と同じく d^{5} 電子配置を持つこと から、 Sr_2IrO_4 と同様のスピン軌道モット絶縁体状態 [5]が、 $Ln RuO_3$ における電子相変化の起源である可能性が考えられる(図2)。2 K における磁気輸送測定では、Ln = La以外のすべての組成において 異常ホール効果、Ln = Nd, Sm, Gd において Ln^{3+} の磁性由来と思わ れる負の磁気抵抗効果を観測した。0.5 K のホール測定において、 Ln = Ndにのみトポロジカルホール効果が観測され、 Ln^{3+} の磁気的 性質の違いが磁気輸送特性に寄与することを強く示唆した。





図2. 絶縁性の強い *Ln*RuO₃ にお ける Ru³⁺イオンの *t*_{2g} バンド分裂 の概念図。*U*と SOI はそれぞれ電 子相関とスピン軌道相互作用を 指す。

^[1] K. Takiguchi et al., Nat. Commun. 11, 4969 (2020),

^[2] A. Sinclair et al., Angew. Chem. Int. Ed. 53, 8343 (2014),

^[3] B. K. Patel et al., J. Crys. Gro. 602, 126979 (2023),

^[4] 張 灵飛ほか、第68回応用物理学会春季学術講演会22p-E204-2、2022年3月,

^[5] B. J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. 101, 076402 (2008).

Al 置換 Y₃Fe₅O₁₂ 薄膜における高温スピングラス特性 High temperature Spin-glass behaviors in Y₃Al_xFe_{5-x}O₁₂ thin films

工学系研究科 電気系工学専攻 田畑・松井・関研究室 ^〇吉野 貴大、山原 弘靖、田畑 仁、関 宗俊

非磁性体に磁性元素を少量添加することで発現するスピングラスは、複数の相互作用の競合により、 個々のスピン配置にフラストレーションが生じることで、安定な秩序構造が決まらずに凍結する低温物 理現象である。本研究では、フェリ磁性体であるイットリウム鉄ガーネット Y₃Fe₅O₁₂に非磁性元素であ る AI を 1-10%置換することで、スピン間の磁気的な結合を断ち切り、クラスターグラスを発現させ た。パルスレーザー堆積法によって Y₃Al_xFe_{5-x}O₁₂ (Al:YIG)薄膜(膜厚:40-100 nm, 0.05 $\leq x \leq 0.5$)を Y₃Al₅O₁₂ (111)基板上に堆積させており、AI 元素は YIG 結晶中にランダムに配置される。低温センター 共同利用装置の MPMS を用いて測定した交流帯磁率の温度依存性を図 1 に示す。図中に見られるピーク はフェリ磁性相からスピングラス相への相転移を示唆している。交流磁場によって見かけのスピン凍結 温度が高くなっており、周波数を上げることでピーク温度が高温側へシフトする。また、交流周波数の 逆数であるスピン緩和時間 τ とピーク温度の関係は、臨界温度を T₆として、臨界減速の式 τ= $\tau_0(T_p/T_c-1)$ ⁻*に従う(図 2)[1]。これは、実際のスピン凍結温度に近づいていくにつれてスピン緩和時間 τ が発散することを表しており、磁場中でスピングラス相が存在していることが示唆される。これによ り、薄膜のエネルギー状態がスピングラス特有の多谷構造になっていることが分かった[2]。また、得ら れた臨界温度 T₆は 324 K であり、スピン凍結温度が室温を超えていることが確認された。





図2. Y₃Al_{0.1}Fe_{4.9}O₁₂ 薄膜におけるスピン凍 結温度 T_pの交流周波数依存性.

謝辞本研究の一部は Beyond AI 研究費および JST-CREST(JPMJCR22O2)の助成を受けたものです。 参考文献 [1] J. Dho et al., Phys. Rev. Lett. 89, 1 (2002). [2] Y. Tabata et al., J. Phys. Soc. Japan 79, 1 (2010). Two-dimensional superconductivity in α -Sn/SnTe(111) heterostructure.

Yuxiao Guo¹, Ryota Akiyama¹, Takako KonoiKe², Yuya Hattori², Takuya Takashiro¹, Rei

Hobara¹, Yaichi Terashima², Shinya Uji² and Shuji Hasegawa¹

¹ Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

²Tsukuba Magnet Laboratories, NIMS, Japan

Topological crystalline insulators (TCIs) are the materials in which the spin-splitting metallic states occur on the surface of the insulating bulk crystal due to the mirror symmetry of the crystal instead of time-reversal symmetry in conventional topological insulators. SnTe is a typical TCI while PbTe is a trivial narrow-gap semiconductor, although both have the rock-salt structure.

It has been reported recently that a-few-layer α -Sn thin films grown on the PbTe(111) become superconducting due to the electron doping from PbTe, leading to a large in-plane critical magnetic field by Type II Ising pairing^[1,2].

Therefore, it is an attractive question of whether α -Sn can be grown on SnTe(111) also and shows superconductivity or not. Furthermore, if α -Sn is grown on SnTe, it is expected to become a candidate for a topological superconductor by the combination of the s-wave superconductivity of α -Sn and the topological surface state of SnTe. In this study, we have successfully fabricated a-few-layer α -Sn(111) on SnTe(111) using the underlayer of Bi₂Te₃(111)/Si(111) by molecular beam epitaxy and found that our samples show superconductivity by ex-situ electrical transport measurements. As shown in **Fig 1a**, Superconductivity emerges from a tri-layer sample. **Fig. 1b** shows the relation of the critical magnetic field (B_{c2}) and the temperature, which indicates two-band superconducting characteristics. We will report the details of results such as Berezinskii–Kosterlitz–Thouless (BKT) transition behavior in the presentation.



Figure 1 (a) Normalized temperature dependent resistance of $0 \sim 5ML \alpha$ -Sn(111) grown on 15-SnTe/4-Bi₂Te₃/Si(111) substrate, numbers inserted denote the ML number of the α -Sn(111) layer. (b) The critical magnetic field B_{C2}/B_P as a function of temperature T/T_c under out-of-plane magnetic fields, which indicates two-band superconductivity. B_P indicates the Pauli-paramagnetic limit value $B_P = 1.84T_{C,0}$. The dashed line and solid line are fitting curves by two-bands model and 2D Ginzburg–Landau (GL) model.

[1] M. Liao et. al. Nature Physics 14, 344 (2018). [2] J. Falson et al., Science 367, 1454 (2020).

P1-07 マルチフェロイクス RMn₂O₅におけるエレクトロマグノンシフト電 流の観測

Shift current by electromagnon excitations in multiferroics RMn₂O₅

工学系研究科物理工学専攻高橋研究室

相原孝広、岡村嘉大、金子良夫、十倉好紀、高橋陽太郎

空間反転対称性の破れた物質のバルクに光を照射することで起電力が生じるバルク光起電力効果は、 二次の非線形光学効果であり、物質のバンドギャップをはるかに超える光起電力が許容され偏光依存性 があるといった特徴を持つ。バルク光起電力効果のミクロなメカニズムの有力な解釈の一つとして、本 研究で注目するシフト電流機構が挙げられる。シフト電流機構では、光照射に伴い実空間における電子 雲の重心が変位することで電流が生じるという描像で説明される。シフト電流は電子の幾何学的位相に 関するベリー接続にあらわに依存する電流として記述されるという観点から注目を集めている。

従来ではシフト電流はバンド間遷移に伴って生じると考えられていたが、最近では可視・近赤外領域 に対して小さいエネルギー帯に存在する素励起を介したシフト電流の理論的予測、実験的観測がされて きた。強誘電体としてよく知られている BaTiO3 では、テラヘルツ領域に存在するソフトフォノンによ る光起電力効果の観測が報告されている[1]。一方、磁性と強誘電性が共存した物質群であるマルチフェ

ロイクスに存在するエレクトロマグノンと呼ばれる素励起 を介したシフト電流機構が理論的に予測されている[2,3]。 エレクトロマグノンは磁気秩序由来の強誘電体に固有な電 場活性なスピン励起で、テラヘルツ領域に存在する素励起 である。本研究ではマルチフェロイクス RMn₂O₅ (*R*=Y)に おけるエレクトロマグノン由来のテラヘルツ光電流の観測 を行った。その結果、強誘電相においてのみバルク光起電 力効果による光電流が観測された (図 1)。テラヘルツ光に よる光起電力効果は、高効率な発電原理やテラヘルツ光の センサーとしての応用が期待される。また、バンド間遷移 に限らず物質に備わった様々な励起によって光起電力効果 が生じる可能性を示唆している。



図 1. *R*Mn₂O₅ (*R*=Y)におけるテラヘル ツパルス誘起光電流。

- [1] Y. Okamura *et al.*, PNAS. **119**, 14 (2022).
- [2] T. Morimoto et al., Phys. Rev. B. 100, 235138 (2019).
- [3] T. Morimoto et al., Phys. Rev. B. 104, 075139 (2021).

小型連続核断熱消磁冷凍機の開発と性能評価 Development and performance evaluation of the compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator

低温科学研究センター・村川研究室¹. 同・共同利用部門². 同・研究開発部門³ 瀧本 翔平¹, 戸田 亮², 村川 智¹, 福山 寛³

近年、トポロジカル物質の研究や人工衛星に搭載する X線マイクロカロリメータの冷却、超伝導量子 ビットを用いた量子コンピュータの開発等,市販の³He-⁴He 希釈冷凍機で得られる 10 mK までの極低温 環境での実験が盛んである.これに対し、熱ノイズがさらに低減する、より低い 0.1 mK までの冷凍・ 測温技術も既に開発はされているが、市販品がない、大型で操作に専門知識が必要、連続冷却ができな い等々の理由のため、サブ mK 温度域の利用は未だ普及していない. そこで我々は、0.8 mK の温度を連 続発生できる小型で取り扱いが容易な小型連続核断熱消磁冷凍機(CNDR)の開発を進めてきた[1-4].

CNDR(図1)は2個の PrNi₅核ステージ(NS1,2)を2個の熱スイッチ(HSW1,2)を介して直列接 続した構造をもつ.磁気作業物質として採用した van Vleck 常磁性体 PrNi5の特徴は、Pr核スピン(I= 5/2) に外部印加磁場が11倍に増強された強い実効磁場が作用するため、低い初期磁場(1.2T)からの 断熱消磁で実用的な冷凍能力が得られることである。そのため、磁気シールドした小型超伝導マグネッ トに核ステージを収め、2つの核ステージを近接設置することが可能となり、連続冷却と小型化の両方 を実現できた(図2).

当日は、主要構成部品である、いずれも小型で高性能な(A)高透磁率材 FeCoV で磁場遮蔽した小型 超伝導マグネット(SSC1,2),(B) 亜鉛はんだを用いた PrNi5核ステージ,(C) 亜鉛フォイルを用いた 超伝導熱スイッチの設計・性能評価を中心に、CNDRの開発の詳細を発表する.



[3] S. Takimoto et al., J. Low Temp. Phys. 208, 492 (2022).

[1] R. Toda et al., J. Phys.: Conf. Ser. 969, 012093 (2018). [2] S. Takimoto et al., J. Low Temp. Phys. 201, 179 (2020). [4] R. Toda et al., arXiv:2209.08260. P1-09

光量子コンピュータへの応用に向けた超伝導転移端センサの開発 Development of Transition Edge Sensors for optical quantum computer

工学系研究科・原子力国際専攻・高橋研究室

上土井猛 三津谷有貴 スミスライアン 高橋浩之

情報社会の発展に伴い、膨大な情報を処理する計算機は非常に重要な役割を果たしており、より高性 能な計算機の開発が望まれている。そこで、動作原理が異なり、古典コンピュータでは計算量的に解く ことができない特定の問題を効率的に解くことができる量子コンピュータに大きな注目が集まってい る。光量子コンピュータは量子コンピュータの実現における課題点である量子ビットの拡張性が容易で あり、クロック周波数が高い。そのため実現に大きな注目が集まっている。

光量子コンピュータの実現には、非ガウシアンゲートと呼ばれるエンタングルメント状態と光子数測 定を利用した三次位相状態を作成する必要がある。そのため光子数識別能力を保有する検出器の開発が 望まれている。また、光量子コンピュータの性能を最大限引き出すためにはピコ秒程度の高速応答性を 保有することが求められている。[1]

そこで、本研究では光量子演算素子への応用を目指した光子数識別能力と高速応答性を保有した超伝 導転移端センサ(Transition Edge Sensors: TES)の開発をおこなう。具体的には化学的に安定し、超伝導温 度が低い Ir (イリジウム)を用いた超伝導薄膜を 5 µm 角以下に成型した TES を作成し、その応答特性 評価を行った。超伝導転移端センサは非常に高感度なマイクロカロリメータであり、光子入射に伴う温 度上昇を超伝導転移領域における急峻な温度抵抗変化を用いて正確に測定できる。[2] また、有感領域 を極小化することでエネルギー分解能を向上させ立ち上がり時間を改善することが可能となる。[3]

3 μm×3 μm、4 μm×4 μm の有感領域をもつ Ir TES を開発し、素 子に 850 nm と 1330 nm のシングルモードパルスレーザを照射する ことで、その応答特性評価を行った。その結果、3 μm TES で光検出 能力が確認され、4 μm TES で 0..67 eV のエネルギー分解能と光子数 識別能力を保有することが確認された。また、既存の研究結果であ る超伝導転移温度 180 mK、金イリジウム近接二重層薄膜を保有す る 12 μm Au/Ir TES [4]の結果と比較したところ、立ち上がり時間が 高速化していることも確認された。



図1.4 µm TES における光 子数識別能力



図 2. 4 μm TES における 立ち上がり時間

結論として、本研究では TES の有感領域を極小化することにより 高速応答性と光子数識別能力を保有する 4µm TES を実現することに 成功した。

[1]宮田一徳"三次位相ゲート実現法の探求と非線形フィードフォワードおよび 波東エンジニアリングの実現"博士論文(2016)東京大学[2] Irwin et al.,
APL,69,1945(1996) [3] Irwin et al., "Thermal-response time of superconducting transition-edge microcalorimeters." Journal of Applied Physics 83.8 (1998): 3978-3985. [4] Jodoi, T et al., "Iridium-gold bilayer optical transition edge sensor" J Low Temp Phys(2022)

P1-10

Unusual transport properties with in-plane magnetic field in Sr_xBi₂Se₃ single crystals

Tamegai lab, Department of Applied Physics, The University of Tokyo Zu Yuhang

Bi₂Se₃ is one of the representative topological insulators that show unique metallic surface state despite its insulating nature of the bulk. By doping Cu or Sr, Bi₂Se₃ can become a topological superconductor, which show novel properties such as the nematicity [1]. In this study, we prepared high-quality single crystals of $Sr_xBi_2Se_3$ and investigated its in-plane magnetic-field-angle dependence of resistivity. Resistivity (p) was measured at 2 K by applying the in-plane magnetic field along the direction with an angle φ from *a*-axis. We have measured the 4 percent sample (x = 0.04) and the 17 percent sample (x = 0.17). Figure 1(b) and Figure 1(d) shows temperature dependence of magnetization in $Sr_{0.17}Bi_2Se_3$ and temperature dependence of resistivity in $Sr_{0.04}Bi_2Se_3$, which shows only the 17 percent sample is superconductor. Figure 1(a) and Figure 1(c) shows $\rho(\phi)$ as a function of ϕ at 8.5 T, which is defined by $\Delta \rho \equiv \rho - \rho_0$. $\Delta \rho(\phi)$ mainly shows two-fold symmetry, or in other words nematicity. In figure 1(a), we fit the angular dependence by $\Delta\rho(\phi) = \rho_1 \cos(\phi + \alpha_1) + \rho_2 \cos(2\phi + \alpha_2)$, where the 2nd term originates from the nematicity, magnetoresistance, or misalignment of the field from the in-plane direction. The fact that the minimum value of the 2φ component is at $\varphi = 0^{\circ}$ suggests that it is caused either by nematicity or by magnetoresistance. In the case of magnetoresistance, its magnitude should be proportional to the square of the transverse component of the field with respect to the current, $(Bsin(\varphi))^2$, which means that it is proportional to $\cos(2\varphi)$. One of the possible origins of the 1st term is the Hall effect for currents flowing along the *c*-axis as shown in Fig. 2. If this interpretation is true, the Hall voltage should be zero at $\varphi = 0$ and p. However, the zerovalue angle is offset by $\sim 35^{\circ}$ as shown in the Fig. 1. Such a shift can be explained by the shift of effective locations of the two voltage terminals, V_{+} and V_{-} . Namely, if locations of the effective voltage terminals are not parallel to *a*-axis, the zero-value position of the Hall effect should change. We also fitted 4 percent sample and the result is $\Delta\rho(\phi) = \rho_1 \cos(\phi + \alpha_1) + \rho_2 \cos(2\phi + \alpha_2) + \rho_3 \cos(3\phi + \alpha_1) + \rho_4 \cos(4\phi + \alpha_2)$. The 3rd and 4th terms may have physics meanning but it needs further research. The abnormal current may not have relationship with the superconductivity of $Sr_xBi_2Se_3$, because even low-doped $Sr_xBi_2Se_3$ shows it. With the x decrease, the amplitude of $\cos(\varphi)$ term decrease (Sr_{0.17}Bi₂Se₃: 8%, Sr_{0.04}Bi₂Se₃: 0.3%), which implies that there can be a critical value of x above which $\cos(\varphi)$ term appears due to inhomogeneous current flow. Different percent sample will be measured to find the critical x value when the $\cos(\varphi)$ term appears and we will try to find out the possible physical origins of the 3rd and 4th terms by analyzing more measurement results

[1] Y. Pan et al., Sci. Rep. 6, 28632 (2016).





Fig. 2 Possible current flow in the $Sr_xBi_2Se_3$ single crystal. The current path along *c*-axis exists, which may be bent by obstacles.

Fig. 1. (a) Plot of in-plane magnetic-field-angle dependence of magnetoresistance $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ in Sr_{0.17}Bi₂Se₃ at 2K and 8.5 T, with ρ_0 =1.168 mΩcm. (b) Plot of temperature dependence of magnetization in Sr_{0.17}Bi₂Se₃. (b) Plot of in-plane magnetic-field-angle dependence of magnetoresistance $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ in Sr_{0.04}Bi₂Se₃ at 2K and 8.5 T, with ρ_0 =0.295 mΩcm. (d) Plot of temperature dependence of resistivity in Sr_{0.04}Bi₂Se₃.

P1-11 層状金属 TaSe₂ を用いた磁性ファンデルワールスヘテロ構造の 作製と磁性変調

Fabrication and magnetic modulation of magnetic van der Waals

heterostructures using layered metal TaSe₂

工学系研究科物理工学専攻中野研究室^A、理研 CEMS^B 遠藤 幹大^A、武藏 摩紀^A、梶原 駿^A、松岡 秀樹^B、岩佐 義宏^{AB}、中野 匡規^{AB}

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)という層状物質を薄くした二次元 TMDC は様々な二次元物性発 現の場として発展を続けており、その例は発光特性から二次元超伝導、二次元磁性、トポロジカル量子 伝導など極めて多岐に渡る。さらに、この物質系は各層が弱いファンデルワールス(vdW)力で結びつい ているため、格子不整合が大きな物質同士でも良質なヘテロ界面を作製することが可能であり、ヘテロ 界面における物性開拓の良い構成要素になっている。我々はこれまでに分子線エピタキシー(MBE)法 による二次元 TMDC やそのヘテロ構造の作製に取り組み、主に輸送特性に注目してそれらの物性開拓を 行ってきた。そして、特に NbSe₂と二次元強磁性体 V₅Se₈を積層させた磁性 vdW ヘテロ構造では、二次 元 NbSe₂に特有のゼーマン型スピン軌道相互作用 (SOI)によって V₅Se₈の磁性に垂直磁気異方性が誘起 されることや、その逆効果として非磁性 NbSe₂に自発バレー分極を伴った強磁性が誘起されることを明 らかにした[1][2]。 一方で、本研究では 3R-TaSe₂と強磁性体 Cr₃Te₄の磁性 vdW ヘテロ構造に注目す る。3R-TaSe₂は厚膜においても面内・面直方向の空間反転対称性が破れた特異な結晶構造を有してお り、二次元 NbSe₂と同様のゼーマン型 SOI をバルクでも有することに加えて、ラシュバ型 SOI も期待さ れる稀有な物質系である。本発表ではこの 3R-TaSe₂と Cr₃Te₄のヘテロ構造を作製し、界面における特異 な磁気近接効果の観測を試みた結果について報告する。



図 1. MBE による成膜プロセス



図 2. TaSe₂(上)とCr₃Te₄(下)の結晶構造 (左: top view、右: side view)

[1] H. Matsuoka, et al., Nano Lett. 21, 1807 (2021).

[2] H. Matsuoka, et al., Nat. Commun. 13, 5129 (2022).

P1-12

Ta-Te 系二次元層状準結晶の超伝導特性 Superconducting properties of Ta-Te 2D layered quasicrystal

生産技術研究所・マテリアル工学専攻・枝川・徳本研究室 徳本有紀,浜野晃太朗,枝川圭一

1998年に発見された Ta-Te 系準結晶は唯一劈開性を示す二次元層状物質であるという点で他の準結晶 と異なる[1]。グラフェンや他の遷移金属カルコゲナイドからの類推により、数層以下まで薄くすること により劇的な電子構造の変化が期待できる。しかし、これまでサイズの大きな単相試料が得られておら ず、バルクについてすら物性は未解明である。当研究グループは、この Ta-Te 系 2 次元層状準結晶の作 製と物性評価に取り組んでいる。

TaTe₂粉末とTa粉末をモル比 1:3 で混合し、微量のヨウ素を添加し、直径 10 mm の円筒状に圧縮成形 した。圧縮成形体を石英管に真空封入し、1000 ℃で6日間熱処理を施した。得られた試料について、 粉末 XRD および TEM により相の同定をした。また、焼結体から取り出した数 mm³程度のサイズの試 料について低温で磁化および比熱の測定を行った。さらに、FIB-SEM で焼結体の中の直径数十 µm、厚 さ 1.5 µm 程度の単一の粒からマイクロサンプルを切り出し、TEM 観察と電気抵抗率の測定を行った。

粉末 XRD の結果、Ta-Te 系準結晶由来のピークが確認された。c 面のピークはシャープであったが、 その他のピークはブロードであった。焼結体を粉砕した試料の TEM 観察の結果、12 回対称の電子回折 図形が得られたが、ブロードで強度の小さいスポットもあり、質の悪い準結晶あるいは高次の近似結晶 が混在していることが示唆された。

焼結体の欠片の磁化測定の結果、3.2 K 以下で完全反磁性の 10%程度の値の反磁性が観測された。また、比熱測定の結果、3.2 K で小さなとびが観測された。この比熱のとびの大きさは、この温度直上での電子比熱の約 0.14 倍であり、BCS 理論による超伝導転移温度 T_c での比熱のとびと T_c直上での正常状態の電子比熱との比 1.43 の 10%程度であった。これらの結果から、焼結体の 10%が 3.2 K で超伝導転移したと考えられる。

単一の粒から切り出したマイクロサンプルの TEM 観察においても、12回対称の電子回折図形が得ら れたが、ブロードで強度の小さいスポットもあった。複数のマイクロサンプルについて電気抵抗率を測 定した結果、いずれも300 K から温度の低下に伴って電気抵抗率が上昇し、4~5 K から急激に減少し、1 K 以下でゼロとなり、超伝導の振舞いが観測された。超伝導転移のオンセット温度は、焼結体の欠片の 磁化測定および比熱測定において観測された超伝導転移のオンセット温度とは一致しなかった。また、 超伝導転移のオンセット温度にばらつきがあることから、同一の焼結体の中でも組成や構造が不均一で ある可能性が示唆される。さらに、オンセットからゼロ抵抗に至るまでが急峻でないことから、単一の 粒内においても組成や構造が不均一である可能性が示唆される。発表では磁気抵抗の測定結果について も紹介する。

[1]M. Conrad, F. Krumeich, and B. Harbrecht, Angew. Chem. Int. Ed. 37 1383 (1998)

光・圧力誘起スピンクロスオーバーを示す オクタシアニドニオブ(IV)酸系機能性フェリ磁性体 Octacyanidoniobate(IV)-based Functional Ferrimagnet Showing Photo- and Pressure-induced Spin-crossover

東京大学 理学系研究科 化学専攻 物性化学研究室 小林将大、中村一輝、井元健太、中林耕二、大越慎一

Spin-crossover (SCO) phenomena, in which the spin state of a $d^4 - d^7$ transition metal ion switches between high-spin (HS) and low-spin (LS) states by various external stimuli, have been studied as a possible application for memory devices and sensors. Cyanido-bridged Fe^{II}-Nb^{IV} assemblies are of particular interest because they can provide magnetically interacting SCO-active Fe^{II} through cyanides and Nb^{IV} (S = 1/2), and they have realized functionalities such as photo-induced ferrimagnetism[1]. Recently, our laboratory has reported a cyanido-bridged Fe^{II}-Nb^{IV} assembly showing multi-step spin-crossover due to multiple Fe^{II} sites generated by partial hydrolysis of the ligand[2]. Herein, we report [Fe^{II}₂(3-acetamidopyridine)₇(H₂O){Nb^{IV}(CN)₈}]·9H₂O (**FeNb**) showing light- and pressure-induced SCO. **FeNb** is a ferrimagnet, and the long-range magnetic ordering was able to be tuned by light irradiation and pressure application.

The polycrystalline sample of FeNb was synthesized by reacting an aqueous solution of K₄[Nb^{IV}(CN)₈]·2H₂O with an aqueous solution of (NH₄)₂Fe^{II}(SO₄)₂·6H₂O, sodium *L*-ascorbate, and 3-acetamidopyridine. The crystal structure was revealed by the Rietveld analysis of the powder x-ray diffraction pattern of FeNb based on the crystal structure of the molybdenum analog. FeNb has a monoclinic crystal system in the C2/cspace group and a three-dimensional coordination network (Fig. 1). The asymmetric unit includes three different pseudo-octahedral Fe^{II} sites induced by the bulkiness and the hydrolysis resistance of the acetamidomoieties. FeNb shows ferrimagnetism with the Curie temperature of 17 K. Upon irradiation of 532 nm green laser light, the Curie temperature increased to 19 K (Fig. 2). The enhancement of ferrimagnetism is attributed to the increase of HS Fe^{II} (S = 2) fraction by light-induced excited spin state trapping (LIESST) effect. On the contrary, when applied hydrostatic pressure up to 0.51 GPa, the quenching of ferrimagnetism was observed due to pressure-induced SCO to LS Fe^{II} (S = 0) with the maximum conversion rate of 58 %.



Fig. 1 The crystal structure of **FeNb** viewed from *b*-axis.



Fig. 2 The field cooled magnetization (FCM) curves of **FeNb** before (black) and after (red) photoirradiation.

^[1] S. Ohkoshi et. al, Nat. Chem., 2011, 3, 564.

^[2] S. Ohkoshi et. al, Inorg. Chem., 2019, 58, 6052.

ハーフホイスラー型 HoAuSn の

単結晶育成と負の巨大磁気抵抗効果

東大工^A, 理研CEMS^B, 東大物性研^c, 東大新領域^D, 東大東京カレッジ^E 上田健太郎^A, Tonghua Yu^{A, B}, 平山元昭^{A, B}, 黒川亮^A, 中島多朗^{B, C}, 齋藤開^C, Markus Kriener^B, 星野学^B, 橋爪大輔^B, 有馬考尚^{B, D}, 有田亮太郎^A, 十倉好紀^{A, B, E}

> Single crystal growth and giant negative magnetoresistance in half-Heusler HoAuSn

Dept. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo^A, RIKEN CEMS^B, Inst. For Solid State Phys. Univ. of Tokyo^C, Dept. of Adv. Mat. Sci., Univ. of Tokyo^D, Tokyo College, Univ. of Tokyo^E Kentaro Ueda^A, Tonghua Yu^{A,B}, Motoaki Hirayama^{A,B}, Ryo Kurokawa^A, Taro Nakajima^{B,C}, Hiraku Saito^C, Markus Kriener^B, Manabu Hoshino^B, Daisuke Hashizume^B, Taka-hisa Arima^{B,D}, Ryotaro Arita^A, Yoshinori Tokura^{A,B,E}

関亜鉛鉱型 HgTe における量子スピンホール効果の発見以来、トポロジカル 電子物性の研究が盛んに行われている。中でも、(Hg, Cd) Te と類似の電子構造 を持ちうる三元化合物に注目が集まっている。例えば、パイロクロア型イリジ ウム酸化物 Roir207 (R:希土類元素)やハーフホイスラー型金属間化合物 RTX(T: 遷移金属元素、X:14-15 族元素)である。特に後者では、T, Xの変調によってバ ンド反転など幅広く電子構造を制御でき、さらに R-4f 電子の磁性を導入でき る(図 a)。そのため、次世代のトポロジカル物性を開拓する系として理想的で ある [1]。しかし、これまでは、バンド反転したゼロギャップ半導体 RPtBiや RPdBiに留まっており、トポロジカル物性の理解や発展は頭打ちとなっていた。

本研究では、自明な半導体 HoAuSn の 単結晶育成による新規物性開拓を目指 した。フラックス法により、初めて単結 晶作製に成功した(図b)。抵抗率は、室 温から温度を下げると約 40 倍に増加 し、20 K 以下で飽和する。外部磁場に より、最低温において 4 桁以上抵抗率が 減少した(図 c)。当日は、量子振動解析 やバンド計算結果を紹介し、観測された 磁気抵抗効果の起源について議論する。

[1] S. Chadov et al. Nat. Mat. 9, 541 (2010); H. Lin et al. Nat. Mat. 9, 546 (2010).



a. 結晶構造、b. 粉末X線回折、c. 各磁場に おける抵抗率の温度依存性

銅酸化物高温超伝導体 La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄ の 光励起 c 軸テラヘルツ分光 Optical Pump *c*-axis Terahertz Spectroscopy of Cuprate High-temperature Superconductor La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄

[▲]理学系研究科 物理学専攻 島野研究室,『東大低温科学研究センター, [©]産総研

西田 森彦[^], 勝見 恒太^{A,B}, Dongjoon Song^c, 永崎 洋^c, 島野 亮^{A,B}

銅酸化物高温超伝導体は超伝導相に加え、反強磁性秩序や擬ギャップ、電荷・スピン密度波といった多彩な 秩序を示し、これらの秩序相と超伝導との競合・共存関係を理解することが高温超伝導の原理究明のための重要 な課題となっている。中でも電荷とスピンが縞状に整列したストライプ秩序と呼ばれる秩序相は、バルク超伝導と 競合して超伝導転移温度 T。を強く抑制することが古くから知られており、電荷・スピン秩序と超伝導の関係性を解 明する上での良いプラットフォームとなっている。近年、このストライプ秩序を光励起によって破壊することで、T。以 上であるにも関わらず超伝導が瞬間的に回復するという、いわゆる光誘起超伝導の報告が大きな注目を集めた [1,2]。この結果はストライプ秩序相でクーパー対が形成されている可能性を示唆するものであり、これらの共存関 係について多面的な検証が待たれている。

本研究では、ストライプ秩序の性質が超伝導に与える影響という観点から、より短距離相関なストライプ秩序を示す 銅酸化物高温超伝導体 La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄ (x = 0.12) を対 象に、近赤外励起-テラヘルツプローブ分光を行った。この 物質では La³⁺サイトが Nd³⁺イオンで置換されることで結晶 構造に歪みが生じ、ストライプ秩序の相関長が他の代表的 な物質に比べて半分程度に短くなっていることが X 線散乱 によって調べられている[3]。ストライプ秩序を破壊すること が知られている波長 800 nm、光子エネルギー1.55 eV の近 赤外光を励起光として用い、プローブ光としては試料 c 軸 方向に偏光したテラヘルツ光を用いることで、ab 面内で発 達していると考えられるクーパー対が 3 次元コヒーレンスを 獲得する過程を検証した。図 1 に示すように、励起後に反



図 1. 光励起から *t*_{pp} 経過後の過渡反射率変化 スペクトル。プラズマエッジ状のスペクトル構造 が生じている。

射率スペクトルにはプラズマエッジ状の構造が生じ、数 ps かけて低周波側にシフトしていく様子が観測された。発表ではその詳細を報告し、La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄において光誘起状態で現れる反射スペクトルの特徴と起源について議論する。

- [1] D. Fausti et al., Science 331, 189-191 (2011)
- [2] D. Nicoletti et al., Phys. Rev. B 90, 100503(R) (2014)
- [3] S. Wilkins et al., Phys. Rev. B 84, 195101 (2011)

P2-01 可視光領域の蛍光と遅い磁気緩和を示すジスプロシウム-鉄2核錯 体

Dy-Fe dinuclear complex showing visible luminescence and slow magnetic relaxation. 理学系研究科化学専攻大越研究室

大野達也 中林耕二 大越慎一

Lanthanide ions are known to show luminescence from near infra-red to visible region and have large magnetic anisotropy, both originating from their 4f electrons. By using organic ligands and counter ions, the anisotropy is enhanced, and the magnetic relaxation becomes slower. In molecules with this behavior, one spin center can be regarded as one magnet and these molecules are called single-molecule magnets (SMMs). SMMs are promising candidates in quantum computing and information storage to achieve smaller size. Combination of luminescence and slow magnetic relaxation enables lanthanide complexes to be applied to multifunctional materials[1]. Switching of functionalities are also widely studied, and light is often used as an external stimulus. In this context, pentacyanonitrosylferrate, $[Fe(CN)_5NO]^{2-}$, which shows 90° and 180° rotation of nitrosyl, NO by photo irradiation, is adopted in functional molecules to achieve photoswitchability[2]. We aimed at the synthesis of SMMs with lanthanide and $[Fe(CN)_5NO]^{2-}$ to achieve photoswitchable luminescent SMMs, and herein, we report Dy-Fe dinuclear complex, $\{[Dy(2-pyridone)_4(H_2O)_3][Fe(CN)_5NO]Cl\} \cdot H_2O$ (**DyFe**) (Figure 1), which works as a luminescent SMMs.

DyFe was synthesized by mixing two aqueous solutions: one solution contained DyCl₃·6H₂O and 2-pyridone, and the other contained Na₂[Fe(CN)₅NO]·2H₂O. The crystal system of **DyFe** was monoclinic and the space group is $P2_1/n$. When **DyFe** was irradiated with 320 nm light at 77 K, it showed large blue emission and three sharp emission peaks, which were respectively assigned to 2-pyridone π^* orbital to π orbital electron transition and Dy³⁺ 4f electron transition. Ac magnetic field was applied to investigate SMM behavior of **DyFe**, and DyFe showed slow magnetic relaxation under a 1500 Oe dc magnetic field below 5 K (Figure 2).



J. Wang, S. Chorazy, K. Nakabayashi, B. Sieklucka, S. Ohkoshi, J. Matter. Chem. C., 2018, 6, 473.
 M. Komine, K. Imoto, A. Namai, M. Yoshikiyo, and S. Ohkoshi, Inorg. Chem., 2021, 60, 4, 2097.

P2-02 二次元極性イジング超伝導体における非相反輸送特性 Nonreciprocal transport in a two-dimensional polar Ising superconductor

工学系研究科物理工学専攻 A, 理研 CEMS B 川本 知輝 A, 松岡 秀樹 B, 武藏 摩紀 A, 田中 勇貴 A, 遠藤 幹大 A, 小川 直毅 B, 岩佐 義宏 A, B, 中野 匡規 A, B

Dept. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo^A, RIKEN CEMS^B Tomoki Kawamoto^A, Hideki Matsuoka^B, Maki Musashi^A, Yuki Tanaka^A, Kanta Endo^A, Naoki Ogawa^B, Yoshihiro Iwasa^{A, B}, Masaki Nakano^{A, B}

ファンデアワールス物質は様々な二次元物性発現の場として発展を続けており、その例は発光特性から超伝導、磁性、トポロジカル量子伝導など多岐に渡る。中でも、ファンデアワールス物質の一つである 遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は金属元素とカルコゲンの組み合わせに依存してユニークな物性 を示すことで注目されており、例えば V 族の金属元素を有する NbSe₂ や TaS₂ では超薄膜化することで 空間反転対称性の破れに起因する特異な超伝導状態(イジング超伝導)が現れることが知られている。

一方、TMD は構造多型と呼ばれる局所構造の違いに応じて物性が大きく変わることが知られている。 我々は最近、分子線エピタキシー法で作製した TaSe₂ が準安定の 3R 構造を取り、これが最安定の 2H TaSe₂ とは異なる物性を示すことを発見した[1]。この 3R 構造は特に結晶の空間対称性の観点で 2H 構造 と異なる特徴を有している。即ち、超薄膜化状態でのみ面内の対称性の破れが生じる 2H 構造と対照的 に、3R 構造ではバルクにおいても面内方向の空間反転対称性の破れが保持される(図 1)。従って、多層 薄膜においても面内方向の空間反転対称性の破れと超伝導が強く連結した所謂二次元イジング超伝導状 態の実現が期待される。加えて、3R 構造では面直方向に対しても空間反転対称性の破れが生じているた め、特異な輸送現象の発現が期待される。本研究では 3R TaSe₂ のイジング超伝導状態に注目し、イジン グ超伝導物性と空間反転対称性の破れのカップリングのプローブとして非相反伝導現象(図 2)の観測を 行った。発表では、観測された非相反伝導現象をもとに超伝導状態の詳細を議論する。

[1] Y. Tanaka et al., Nano Lett. 20, 1725-1730 (2020).



図 1:3*R*-TaSe2の結晶構造

図2:非相反伝導現象の概図

強誘電半導体 SbSI におけるフォノン励起の光起電力効果 Photovoltaic effect by phonon excitation in ferroelectric semiconductor SbSI

工学系研究科 物理工学専攻 高橋研究室 <u>澤村駿</u>,岡村嘉大,金子良夫,中村優男,川﨑雅司,十倉好紀,高橋陽太郎

光起電力効果とは、太陽電池などに広く用いられる、物質に光を照射した際に電流や電圧が生じる現象 のことであるが、その中でも空間反転対称性の破れた結晶におけるバルク光起電力効果は盛んに研究さ れている現象の1つである。近年ではバルク光起電力効果のメカニズムに関する理解が進み、シフト電 流と呼ばれる微視的機構が明らかになった。シフト電流は波動関数の量子力学的位相の変化に由来して おり、一般にバンド間遷移による電子励起に伴って生じると考えられてきたが、最近では強誘電体 BaTiO₃においてフォノン励起によるシフト電流の観測が報告された[1]。これは低エネルギー領域におけ る新たな光電流発生機構として非常に注目を集めており、大容量通信や非接触検査といった次世代の技 術を担うテラヘルツ領域における光応答機能の拡充といった観点でも期待が集まっている。しかし、フ ォノン励起によるシフト電流は、その作用スペクトルや光学応答の物理量の定量性といった詳しい光電 流特性に関して未だ研究がなされていない。

そこでフォノン励起の光電流の特性を明らかにするため、本研究ではバンド間遷移におけるシフト電流の特性が明らかになっている強誘電半導体 SbSI を対象とした[2][3]。本物質は強誘電相転移を引き起こすソフトフォノンがテラヘルツ領域に存在している。テラヘルツパルスを照射した際に生じる光電流

を測定したところ、電場強度の2乗に比例し、強誘電相 において分極の符号反転によって光電流の符号も反転す るバルク光起電力効果の観測に成功した。また、光電流 を特徴付ける非線形伝導率 σ⁽²⁾の作用スペクトルには、 ソフトフォノンの共鳴周波数に対応したピーク構造が見 られ、フォノン励起による光起電力効果の周波数特性を 実験的に示すことができた(図1)。さらに、グラス係 数と呼ばれる光電流発生の性能指数に相当する物理量を 比較すると、本研究で定量的に見積もられた値は TaAs などの既報物質と同程度の大きな値であることが分かっ た。さらに、ソフトフォノンではない光学フォノンを励 起した際にも同様の現象が観測されており、光学フォノ ンを介した光起電力効果の幅広い可能性が示唆される。



- [1] Y. Okamura., et al. PNAS 119, 14 (2022).
- [2] N. Ogawa., et al. Phys. Rev. B 96, 24 (2017).
- [3] H. Hatada., et al. PNAS 117, 34 (2020).

P2-04 Peak Effects in 2*H*-NbSe₂ Single Crystals with Columnar Defects Introduced by Heavy-ion Irradiation

¹Department of Applied Physics, The University of Tokyo ²Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency W. Li¹, S. Pyon¹, R. Sakagami¹, S. Okayasu², and T. Tamegai¹

Heavy-ion irradiations have been widely used as effective ways to increase the critical current density J_c of superconductors to realize the practical application of superconductors. The mechanism for the enhancement of the J_c is that columnar defects (CDs) introduced by heavy-ion irradiation have similar structures to vortices in superconductors, and effectively suppress the motion of vortices. In addition to such an increase in J_c in superconductors, some novel phenomena have also been observed. For example, in iron-based superconductors, it was found that when splayed CDs are introduced, a peak effect at a magnetic field of $\sim 1/3B_{\Phi}$ (B_{Φ} is a dose equivalent matching field related to defects density) is observed [1]. When the pinning force is saturated by exhausting all available pinning centers, J_c should decrease monotonically with increasing magnetic field. However, in iron-based superconductors with splayed CDs, J_c increases with the magnetic fields and shows a peak at a certain

field (peak effect). This peak effect cannot be explained by the mechanism related to order-disorder transition of vortices, which was frequently observed at a field close to H_{c2} [2]. It also cannot be explained by the self-field peak effect [3] because the peak field of ~1/3B_{Φ} is several times larger than the self-field [1]. In this study, we conducted detailed angular dependent magnetic measurements using a small Hall probe by modifying horizontal rotator of MPMS5-XL, which allows us to change the angle between the magnetic field and the sample *c*-axis (θ_{H}) without warming up the sample. We found that for NbSe₂ with symmetric splayed CDs, the peak becomes weaker gradually with increasing θ_{H} as shown in Fig. 1. We will discuss the origin of this peak effect by analyzing the θ_{H} dependence of the peak field and peak height for samples with different θ_{CD} (angle between the *c*-axis and CDs).



Fig. 1 Magnetic field dependence of local magnetization for NbSe₂ single crystal irradiated by 320 MeV Au at $\theta_{CD} = \pm 15^{\circ}$ measured at various field angles θ_{H} at 4 K.

- [1] A. Park et al., Phys. Rev. B 97, 064516 (2018).
- [2] Y. Paltiel et al., Phys. Rev. Lett. 85, 3712 (2000).
- [3] T. Tamegai et al., Supercond. Sci. Technol. 25, 084008 (2012).

歯周病菌 Porphyromonas gingivalis の増殖を抑制する

香辛料成分の探索

Screening for spice ingredients that inhibit the growth of

Porphyromonas gingivalis, a major periodontopathic bacterium

東京大学 大学院農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 高林里香、陸鵬、岡本研、伊藤英晃、鈴木道生、奥田傑、永田宏次

歯周病は、歯の喪失だけでなく、糖尿病や脳血管疾患など、全身疾患にも関わることが示唆されている。日本 における歯周病患者の割合は 60 歳以上で 50%を超え、歯周病の予防および治療への取り組みは重要な課題 である。グラム陰性細菌 Porphyromonas gingivalis (P. gingivalis) は、歯周病の主要原因菌 3 種のうちの 1 種で あり、慢性歯周炎患者の疾患部位の 86%で検出されること等から、口腔内に生息する 300 種以上の細菌の中で 歯周病の進行に最も強く関連しているとされている。現在、歯周病を含む口腔感染症の治療における抗生物質 の使用は、耐性菌の発生、歯の着色、味覚の変化などを起こす可能性があるため、制限されており、安全性が認 められた新たな抗菌成分の探索が求められている。

本研究では抗 P. gingivalis 活性を有する成分の探索対象として、古くから食品や香料として人々に摂取され、 安全な天然素材である香辛料に着目した。植物由来の香辛料は、抗酸化や抗菌といった有用な活性を示すこと が知られている。抗菌活性について、ローズマリー、ユーカリ、シナモンのエタノール抽出物やクローブのメタノー ル抽出物等が、抗 P. gingivalis 活性を示すことがすでに報告されている。本研究では、将来的な歯周病予防の 食品や飲料開発への応用を視野に入れ、抽出における有機溶媒の使用は避け、香辛料の熱水抽出物の抗 P. gingivalis 活性の評価、および作用機構の解析を目的とした。

20種の香辛料の熱水抽出物をそれぞれ P. gingivalis の培養液に添加して培養し、培養前後に濁度測定を行うことで、菌の増殖阻害率を算出した。その結果、クローブ、オールスパイス、山椒、シナモン、花椒の熱水抽出物が、増殖阻害率 80%を超える抗菌活性を示した。次に、日本原産の香辛料であり、抗菌活性成分に関する知見が少ない山椒に着目した。熱水抽出物中の成分を逆相クロマトグラフィーで分離し、各分画の成分を加えた培地で P. gingivalis を培養することで抗菌活性を評価し、抗菌活性成分を含む分画を特定した。また、山椒熱水抽出物で処理された P. gingivalis の透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察により、山椒の熱水抽出物が細胞の膨潤と、内膜の破損、細胞質内容物の凝集をもたらすことが示された。

P2-06

Fe/Mg0/Geの横型二端子デバイスにおける 巨大抵抗スイッチ効果の観測とスピントロニクス機能の創出 Magnetic-field-controllable resistive-switching and spin-valve-like behavior in an Fe/MgO/Ge-based two-terminal device

[°]Masaya Kaneda,¹ Shun Tsuruoka,¹ Hiroshi Katayama-Yoshida,² Tatsuro Endo,¹ Yuriko Tadano, ¹Masaaki Tanaka^{1,2}, and Shinobu Ohya^{1,2}

¹Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo ²Center for Spintronics Research Network (CSRN), The University of Tokyo

Resistive switching (RS) has been intensively investigated, evoking interest due to their potential applications to next-generation nonvolatile memory and neuromorphic computing [1,2]. In most RS devices, the electric-field-induced formation/destruction of conductive filaments induces switching between high- and low-resistance states. The next essential requirement for further development of the RS devices is multi-functionalization. From this point of view, the magnetic-field dependence of RS has been studied for the metal/insulating oxide/metal devices [3-5]; however, the current status is far below the level of the full use of the potential of the multi functions of RS. Previously, our group observed the RS effect in two-terminal devices composed of Fe/MgO/Ge heterostructures [6]. Here, we present, for the first time, an unusual magnetic-field-controllable RS of the Fe/MgO/Ge heterostructure, whose MR-curve shape is similar to that of the spin-valve effect, with a large magnetoresistance (MR) ratio of up to 33400%, when applying appropriate bias voltages.

The device is composed of Co (5 nm) / Fe (17 nm) / MgO (1 nm) / Ge:B (17 nm, B concentration: 1×10^{18} cm⁻³) grown on a Ge (001) substrate by molecular beam epitaxy [Fig. 1(a)]. The two-terminal device structure shown in Fig. 1(b) was formed with electron-beam lithography and Ar-ion milling. There are two gap regions with a width of 3 µm and 16 nm, where the carriers conduct through the Ge substrate. In our device, the *I*–*V* curve has a hysteresis loop with an unusually large dependence on the magnetic field *H* applied along the [010] direction in the film plane (Fig. 2); the threshold voltage, at which the current abruptly increases, increases with increasing |*H*|. Using this hysteretic behavior of the *I*–*V* characteristics depending on *H*, we obtain spin-valve-like MR curves (Fig. 3). For example, in the downward sweep of the major loop shown in Fig. 3(a) plotted as a blue curve, a negative peak appears at H = 0.005 kG with an MR ratio of 33400%. Here, the MR ratio is defined as $(R_{!"#!} - R_{$\%\&})/R_{$\%\&}$, where $R_{!"#!}$ ($R_{$\%\&}$) is the resistance value in the downward sweep at H = 0.50 (0.005) kG. As shown in Fig. 3(b), we can see a clear minor loop. Our results suggest that this device has the potential as a nonvolatile memory with high magnetic-field sensitivity under specific bias conditions. This work was partly supported by Grants-in-Aid Scientific Research, the CREST of JST, and the Spintronics Research Network of Japan.

References: [1] T. Shi *et al.*, Small Struct. **2**, 2000109 (2021). [2] J. Zhu *et al.*, Appl. Phys. Rev. **7**, 011312 (2020). [3] D. Sahu *et al.*, Sci. Rep. **7**, 17224 (2017). [4] A. Kalitsov *et al.*, AIP Adv. **1**, 42158 (2011). [5] S. Das *et al.*, Phys. Chem. C **114**, 6671 (2010). [6] S. Tsuruoka, MK *et al.*, JSAP 23p-B201-4; in preparation.



Fig. 1 Schematic device structure. (a) Side view. (b) Top view.



Fig. 2 *I–V* hysteresis observed in the device at 3 K under different magnetic fields applied along the [010] direction in the film plane.



Fig. 3 Magnetic-field dependence of the resistance at 16.1 V at 3 K. (a) Major-loop. (b) Minor-loop. Here, the magnetic field was applied along the [010] direction in the film plane.

P2-07

格子点上に内部電荷自由度を有する有機三角格子系で発現する スピンクラスター状態

Anomalous spin clusters emerging in an organic triangular-lattice system with internal charge degrees of freedom at a lattice point

工学系研究科·物理工学専攻·鹿野田研究室¹, IPCP RAS², The John Hopkins University³ 浦井瑞紀¹, 宮川和也¹, 渡部友太¹, Elena I. Zhilyaeva², Svetlana A. Torunova², Rimma N. Lyubovskaya², Natalia Drichko³, 鹿野田一司¹

一般に相互作用する多体系は低温で長距離秩序を示すが、強いフラストレーションを内包する系で は、量子力学的な揺らぎの効果により、秩序化が妨げられることがある。例えば三角格子上で反強磁性 相互作用する量子スピン系では、幾何学的なフラストレーションにより、低温でもスピンが揺らいだま ま秩序化しない、「量子スピン液体」が発現することが議論され、盛んに研究されている。

本研究の対象物質である分子性物質ĸ-(ET)₂Hg(SCN)₂Br は、伝導性・磁性を担う ET 分子からなる層 と、Hg(SCN)₂Br からなるブロック層が交互に積層した層状化合物で、低温では絶縁体である。ET 層内 では、ET 分子の二量体が三角格子状に配列しており、二量体あたり1個の正孔が存在する。二量体化 が十分強い極限では、二量体をひとつのサイトとした三角格子上の局在スピン系として考えることがで きるが、ĸ-(ET)₂Hg(SCN)₂Br ではこの二量体化の程度が弱く、電荷が二量体のどちらの ET 分子上に存在 するかの自由度が顕在化し、二量体内で1THz 程度の時間スケールで揺らいでいる[1]か、不均一に凍結 している[2]と考えられている。

本研究では、このような格子点上に電荷の内部自由度を持つ三角格子系の磁性を明らかにするため、 NMR および DC/AC 磁化測定を行った[3]。その結果、この物質では、低温 1.8 K まで磁気転移やスピン グラス転移の兆候がないにも関わらず、ET 二量体あたり最大 ~1 µB と見積もられる大きな不均一磁気 モーメントが磁場によって誘起され、低温で MHz より遅い時間スケールでクラスター様に揺らいでい ることがわかった。ナノ粒子系などでしばしば用いられる磁化の解析から、磁場下でのスピンの相関長 は数ナノメートル程度と見積もられる。

このような振る舞いは類縁物質でも過去に例がなく、スピン・電荷両自由度が関与した、この物質ならではの磁性であると考えられる。

- [1] N. Hassan et al., Science 360, 1101 (2018).
- [2] T. Le et al., Phys. Rev. B 102, 184417 (2020).
- [3] M. Urai et al., Sci. Adv. 8, eabn1680 (2022).

キャント反強磁性体 MnCO₃のマイクロ波分光 Microwave spectroscopy of canted antiferromagnet MnCO3

工学系研究科・物理工学専攻・齊藤研究室 巻内崇彦、吉川貴史、シッチャヌギリッツ タナポーン、沼田淳希、高橋三郎、齊藤英治

炭酸マンガン MnCO₃ はキャント反強磁性電子スピンと常磁性核スピンが超微細相互作用により強く 結合した物質であり、核スピン分極の向きと大きさを磁場と温度で制御できる。核スピンポンピング[1] や核スピンゼーベック効果 [2]といった核スピントロニクスの効果が MnCO₃の核スピンの良い制御性に よって初めて実証され注目を集めた。本研究では MnCO₃の電子スピンおよび核スピン共鳴の磁場分散 [3]を低温マイクロ波分光により直接可視化した。反強磁性電子スピン共鳴が数ギガヘルツの小さなギャ ップを持つゼロ磁場付近において、核スピン共鳴の分散が強く混成することを明瞭に観測した。磁場分 散の温度依存性やマイクロ波パワー依存性を系統的に測定することにより、MnCO₃の電子スピン¬核ス ピン混成の変化や、核スピン波励起による非線形吸収も明らかになった。発表ではマイクロ波分光のデ ータを基にこれらの現象について議論する。

Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi, and E. Saitoh, Nature Physics 15, 22 (2019).
 T. Kikkawa, D. Reitz, H. Ito, T. Makiuchi, T. Sugimoto, K. Tsunekawa, S. Daimon, K. Oyanagi, R. Ramos, S. Takahashi, Y. Shiomi, Y. Tserkovnyak, and E. Saitoh, Nature Communications 12, 4356 (2021).
 H. Fink and D. Shaltiel, Physical Review 136, A218 (1964).

P2-09 鉄系超伝導体 FeSe のネマティック超伝導状態における テラヘルツ第三高調波発生 Terahertz third-harmonic generation in nematic

superconducting state of FeSe

理学系研究科・物理学専攻・島野研究室¹,低温科学研究センター・研究開発部門², 総合文化研究科・広域科学専攻・前田研究室³

松本陽行¹, 中村祥子², 小川浩生³, 小林友輝³, 鍋島冬樹³, 前田京剛³, 島野亮^{1,2}

近年、超伝導秩序変数の振幅振動に対応する集団励起モード(Higgs モード)がテラヘルツ(THz) 周波数領域の電磁波と非線形に結合することによって観測できることが明らかとなった[1]が、超伝導 ペアリング相互作用が副次的対称性成分を持つ場合は秩序変数の副次的対称性成分の振動に対応する集 団励起モード(Bardasis-Schrieffer モード; BS モード)も同様に観測可能であることが理論計算によっ て主張されている。[2]一方、鉄系超伝導体 FeSe は強く異方的な 2 回回転対称の超伝導ギャップを持つ ことが角度分解光電子分光やトンネル分光によって測定されており[3]、ペアリング相互作用が複数の 対称性成分を持つ可能性が考えられる。そこで、本研究では鉄系超伝導体 FeSe のペアリング相互作用 の対称性を調べることを目的として THz 周波数領域の非線形光学応答の一種である THz 第三高調波発 生(THz-THG)の測定を行った。

FeSe/CaF₂薄膜($T_c = 12.5 \text{ K}$) について、 T_c 以下で THz-THG の位相差(第三高調波の位相と基本波の 位相の差)の温度依存性を測定したところ、基本波として中心周波数 0.8 meV の THz パルスを用いた場 合には位相差が温度変化する振舞いが観測された一方、

中心周波数 1.2 meV・2.1 meV の THz パルスを用いた場 合にはそのような振る舞いが観測されなかった。(図1) THz-THG が集団励起モードに起因する場合、観測された 振舞いは FeSe の超伝導ギャップ(~3 meV [3]) よりも小 さなエネルギーの集団励起モードの存在を示すが、これ は BS モードの性質と一致する。[2]BS モードは超伝導 ペアリング相互作用が副次的対称性成分を持つ超伝導体 のみに存在する集団励起モードであることから、観測さ れた THz-THG の位相差の温度依存性は FeSe のペアリン グ相互作用が複数の対称性成分を持つ可能性を示唆する と考えられる。



図1. FeSe における THz-THG の位相差の
 の温度依存性。データ点の色は基本波として用いた THz パルスの中心周波数を表す。

- [1] R. Shimano and N. Tsuji, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 11, 103 (2019).
- [2] M. A. Müller and I. M. Eremin, Phys. Rev. B 104, 144508 (2021).
- [3] T. Shibauchi, T. Hanaguri, and Y. Matsuda, J. Phys. Soc. Jpn. 89, 102002 (2020).

層状超格子構造を有する[Bi_nO_n]-[RhO₂] (n = 2, 3) 新物質薄膜における p 型導電性 Novel supercell compounds of layered [Bi_nO_n]-[RhO₂] (n = 2, 3) thin films with p-type conduction

P2-10

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室 大野瑞貴,藤田貴啓,増竹悠紀,組頭広志,川崎雅司

【背景】CuO₂層とそのブロック層によって構成される銅酸化物超伝導体に代表される層状酸化物は、伝 導層とブロック層を制御することで様々な機能を付与することが可能となる[1]。近年、薄膜技術を用い ることで新しい構造を持つ層状酸化物が安定化されており、その中の一つが Bi 層状超格子構造を有する [Bi_nO_n]-[MnO₂] (n = 2, 3)である[2]。[Bi_nO_n]-[MnO₂] (n = 2, 3)は絶縁体であり、BiO 副格子の層数制御によ って、Mn の磁性や透過率などの物性が変調されている[3]。本研究では、パルスレーザー堆積法(PLD 法) を用いて、Mn を Rh に置換した新物質を作製し、p型導電性を示すことを確認した。

【実験と結果】 PLD 法により YSZ(111)基板上に成膜を行った。Bi₂O₃ と Rh₂O₃ の粉末を 1:1 の割合で混 合し、酸素雰囲気下で固相反応させることで得られた Bi₂Rh₂O₇ をターゲットとした [4]。室温で成膜した アモルファス膜を管状炉にて酸素雰囲気下でアニールすることで、アニール温度(T_{anneal})が 700 °C, 900 °C の時に、それぞれ d=12.96 Å, 8.94 Å の面間隔を持つ 2 種類の新物質薄膜を作製した (Fig. 1 (a), 1(b))。Bi 原子が見える方向から観測した断面 TEM 像によって、それぞれ BiO 層を 3 層([Bi₃O₃]-[RhO₂] (3-Bi)), 2 層 ([Bi₂O₂]- [RhO₂] (2-Bi))有することを確認した(Fig. 1(c-f))。これらの薄膜は金属的な縦抵抗率の温度依存性 を示し、2K のホール抵抗率の磁場依存性は正の傾きを持つ直線であり、見積もられたキャリア密度は p= 6×10²¹ cm⁻³ (3-Bi), 3×10²¹ cm⁻³ (2-Bi)となった。



Fig. 1 XRD θ -2 θ scan taken for (a) T_{anneal} =900°C and (b) 700°C films grown on the YSZ (111) substrate. YSZ substrate peaks are marked with an asterisk. Schematics of atomic arrangement for (c) [Bi₂O₂]- [RhO₂] (2-Bi) and (d) [Bi₃O₃]-[RhO₂] (3-Bi) stacking structures. Higher resolution HAADF-STEM images of the films annealed at (e) 900°C and (f) 700°C.

B. Raveau, Angew. Chem. Int. Ed. 52, 167–175 (2013).
 L. Li *et al.*, Nano Lett. 17, 6575-6582 (2017).
 C. Jin *et al.*, Appl. Phys. Lett. 117, 042902 (2020).
 X. Li *et al.*, Int. J. Mod. Phys. B 27, 1362021 (2013).

P2-11 Change of the band structure in a freestanding La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ thin film

¹Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo

²PRESTO, Japan Science and Technology Agency
³Center for Spintronics Research Network (CSRN), The University of Tokyo Takuma Arai¹, Shingo Kaneta-Takada¹, Le Duc Anh^{1, 2, 3}, Masaki Kobayashi^{1, 3}, Masaaki Tanaka^{1, 3}, and Shinobu Ohya^{1, 3}

Since Lu *et al.* first reported a method to make high-quality freestanding perovskite-oxide films using $Sr_3Al_2O_6$ (SAO) as a buffer layer in 2016 [1], freestanding $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films have attracted much attention due to their bulk half-metallic nature [1,2]. However, no systematic data of the magnetic properties of these films have been available until now. In this study, we evaluate the quality of an epitaxially grown freestanding $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ (LSMO) thin film and show the change of the band structure by comparing its magnetic circular dichroism (MCD) spectrum with strained LSMO thin films epitaxially grown on the substrates of STO, (LaAlO₃)_{0.3}(SrAl_{0.5}Ta_{0.5}O₃)_{0.7} (LSAT).

To evaluate the magnetic properties of a freestanding LSMO film, we have grown a water-soluble SAO layer on a $SrTiO_3$ (STO) (001) substrate (sub.) by molecular beam epitaxy. Then, LSMO [30 unit cells (u.c.)] was grown on SAO by a shuttered growth technique. After the growth, a polydimethylsiloxane (PDMS) sheet was attached to the LSMO surface to support the LSMO thin film. The SAO buffer layer was dissolved in de-ionized water at room temperature for one day.

X-ray diffraction (XRD) $2\theta - \omega$ scans of both the as-grown LSMO/SAO/STO and the freestanding LSMO thin film on PDMS show the (001) and (002) diffraction peaks of LSMO [Fig. 1(a)]. The lattice constant is changed from 3.85 Å for the as-grown LSMO layer strained by STO to 3.88 Å for the freestanding LSMO layer. Given that the pseudo-cubic lattice constant is 3.876 Å, this result indicates that the LSMO film detached from the substrate is relaxed. The as-grown sample also shows the (001) and (002) diffraction peaks of SAO, indicating that both SAO and LSMO layers are epitaxially grown on the STO sub. From the MCD spectrum and hysterysis, the freestanding LSMO thin film is confirmed to be ferromagnetic. The MCD peak positions vary by substrates [Fig. 1(b)], meaning that the band structure of LSMO is changed. Magneto-optical Kerr effects indicate that the the feature around 3.5 eV is attributed to electron excitations from the O 2p to the minority-spin t_{2g} band [3]. Therefore, the peak shifts to the lower energies with decreasing strains [$\varepsilon = 0.75\%$ on STO, 0% on PDMS (freestanding), -0.21% on LSAT] are possibly due to decreasing distorsion of electron orbitals in the LSMO thin films.



Fig. 1 (a) Out-of-plane XRD spectra of the as-grown and freestanding LSMO thin films. The inset shows the optical image of the freestanding LSMO thin film on PDMS. (b) Normalized MCD spectra measured for the studied films with various strains under a magnetic field of 1 T applied perpendicular to the film plane at 300 K.

D. Lu *et al.*, Nat. Mater. **15**, 1255 (2016).
 Z. Lu *et al.*, APL Mater. **8**, 051105 (2020).
 S. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. B **58**, 6862 (1998).

P2-12 テラヘルツ波を用いた 3R-Ta_{1+x}Se₂の電荷密度波相の非熱的融解と そのダイナミクス

Nonthermal melting and its dynamics of charge density wave order in 3R-Ta_{1+x}Se₂ by using terahertz pulses

東大理 島野研究室^A,東大工 岩佐研究室^B,理研 CEMS^C,東大低温セ 研究開発部門^D 鳴坂潮^A,吉川尚孝^A,松岡秀樹^B,田中勇貴^B,武藏摩紀^B, 中野匡規^{B,C},岩佐義宏^{B,C},島野亮^{A,D}

光によって超高速に量子相の秩序を変調することで、平衡状態にない隠れた秩序相への相転移を起こせる可能性が示唆されている。中でもテラヘルツ(THz)波を用いた光誘起相転移現象は、高エネルギーな中間状態や熱的過程を極力介することなく直接的に量子相の秩序を変調させることができるため、近年のTHz 波発生技術の進展に伴い、活発に研究が進んでいる[1,2]。我々はこのような THz 波を用いた量子相探索、相制御の対象として電荷密度波(CDW)相に注目し、その集団励起モードである CDW 振幅モードをTHz 波を用いて大振幅に駆動した際の、平衡 CDW 秩序の動的な融解過程及び融解後の状態について検

証することを目的として、遷移金属ダイカ ルコゲナイド物質 3R-Ta_{1+x}Se₂ を対象に高 強度 THz 波ポンプ-近赤外光プローブ実験 を行った。

その結果、励起 THz 波電場の2 乗に従っ て 2.4 THz で固有振動する CDW 振幅モー ドが観測され、図(a)のように励起強度が上 がるにつれ共鳴周波数が動的に減少する 振る舞いが見られた。振動波形に対する Ginzburg-Landau (GL)モデルを用いた CDW 秩序の実時間ダイナミクスの解析から、こ の非線形な CDW 振幅モードの振る舞いは



図(a) 3R-Ta1+xSe2 薄膜の THz 波パルス照射後の近赤外プロ
 ーブ光の透過率変化(丸)とシミュレーション結果(青線)。動
 的に共鳴周波数が変化する振る舞いが観測された。
 図(b) (a)のシミュレーションで仮定したテラヘルツ電場 127
 kV/cm における CDW 秩序変数の時間発展の様子。

図(b)のような GL ポテンシャルの収縮に対応しており、平衡 CDW 相の融解ダイナミクスを観測してい ると考えられる。CDW 振幅モードが消失した際のテラヘルツ波励起条件から見積もられる試料の温度上 昇は転移温度以下より十分低く留まっていることから、この融解現象は非熱的な過程により生じている と推察される。加えて CDW 相が融解した状態の緩和ダイナミクスを検証したところ、CDW 相が融解し た状態は数 100 ps にわたって長時間持続することが判明した。これはテラヘルツ励起によって電子系に 加えて低エネルギーのフォノンのみ格子系がモード選択的に励起されたことで、高エネルギーのフォノ ンを介した緩和チャンネルが抑制され非平衡な融解状態が長寿命化したことを示唆する結果であり、THz 波による量子相制御の潜在的な能力を示していると考えられる。

[1] X. Li et al., Science 364, 1079-1082 (2019) [2] N. Yoshikawa et al., Nat. Phys. 17, 909-914 (2021)

P2-13

Co-Si 共置換による YIG 薄膜におけるゆらぎ制御と スピン波によるスピングラスの電気的検出 Control of spin fluctuation in Co-Si co-substituted YIG thin film and Electrical detection of spin glass state by spin waves 所属 東大院工 電気系工学専攻 田畑・松井・関研究室 氏名 寺尾 健裕, Md Shamim Sarker, 山原 弘靖, 関 宗俊, 田畑 仁

スピングラスは、磁気相互作用のランダムネスとフラストレーションによって低温でスピンが乱雑な 状態(スピン凍結状態)をとる物質である。スピン凍結状態ではそのポテンシャルの多谷構造により、メ モリ効果や光誘起磁性等の様々な特徴的な磁気記憶特性を示し、工学応用の観点で興味深い。 -方で正 準なスピングラスに転移する温度(スピン凍結温度)は100K以下の低温であり、工学応用が難しかった。 そこで我々は、非磁性あるいは磁気異方性の異なるイオンを添加することで高温でスピングラス特性発 現を目指して希土類鉄ガーネット(RIG)薄膜を研究対象として選び[1]、室温付近でのスピングラス特性 の発現を狙った。 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)は、数多くの磁性体の中で Gilbert ダンピング定数 α が $\alpha \sim 10^{-5}$ と非常に 小さい値を示す。加えて、Co添加による光誘起磁性発現で、光による磁気状態の書き換えが期待でき る[2]。本研究では、磁気状態に鋭敏なスピン波を用いて、その磁気状態を読み出すことを目的とした。 試料は、Y3Fe5-2xCoxSixO12(YFCS(x))ターゲットを化学量論比に基づいて作製し、パルスレーザー堆積 法によって、基板温度 750℃、酸素分圧 0.1 Pa 下で、YFCS 薄膜を Y3Al5O12 (YAG), Gd3Ga5O12 (GGG) (001)基板上にエピタキシャル成長した。薄膜はX線結晶構造解析によって解析し、その結晶性を確認し た。スピン凍結温度 Teは YAG 基板上の薄膜について、低温センター共用装置の MPMS を用いた Zero Field Cooling – Field Cooling (ZFC - FC) 過程によって確認した。さらに、フォトリソグラフィ法によ りGGG 基板上YFCS 薄膜に電極パターニングをし、スパッタ法によりCr/Au 電極を薄膜上に作製した。 スピン波の伝搬特性は、ベクトルネットワークアナライザを用いて 20-300 K の範囲で測定した。Fig.1 (a)に YFCS(0.5)/YAG 薄膜上における ZFC-FC 測定の結果を示す。すると、Tfは外部磁界が強くなるにつ れて減少傾向を示し、外部磁界 100 Oe 以下ではT_fが 300K を超えた室温スピンクラスターグラスである ことが分かった。これは、スピングラスの設計通りに非磁性 Si による磁気結合の切断と異方性元素 Co の導入によって達成されていると考えられる。また、Fig 1. (b)に YFCS(0, 0.05, 0.1, 0.2)/GGG 上で、 ZFC-FC 過程によってスピン波励起周波数の温度依存性の測定結果を示す。スピン波は ZFC-FC 過程で ある温度Trで励起周波数が分岐することが確認でき、Co-Siのドープと共にTrが上昇することを確認でき た。これは YFCS 薄膜のスピンの凍結挙動を帯磁率ではなく、スピン波により電気的に検出したものと 考えられる。



Fig.1(a) YFCS(0.5)/YAG 薄膜上における ZFC-FC 測定の結果 (b) YFCS(0, 0.05, 0.1, 0.2)/GGG 薄膜上における、ZFC-FC 過程でのスピン波励起周波数の温度依存性

謝辞 本研究の一部は Beyond AI および JST-CREST(JPMJCR22O2)助成の助成を得て遂行された。 参考論文 [1] H. Yamahara, et al. *J Magn Magn Mater.* 501 (2020) 166437, [2] M. Adachi, et al. *Appl. Phys. Express* 8, 043002 (2015) P2-14

極性構造を持つ室温強磁性体 Gd7Pt3 における Neel 型磁気スキルミオンの観測 Observation of Neel-type skyrmion in a room-temperature polar ferromagnet Gd7Pt3

東大エ^A, 理研 CEMS^B, 東大東京カレッジ^c 池田直樹^A, 高木里奈^A, Fehmi Sami Yasin^B, Licong Peng^B, 星野学^B, 橋爪大輔^B, 十倉好紀^{A,B,C}, Xiuzhen Yu^B, 関真一郎^A

近年、磁気スキルミオンと呼ばれる渦巻き状のスピン構造が、トポロジカルに安定な粒子としての性 質を伴った、新しい情報担体の候補として大きな注目を集めている。磁気スキルミオンは、空間反転対 称性の破れた系で生じる DM 相互作用によって安定化されることが知られており、そのスピンの巻き方 は結晶構造の対称性に強く依存することが知られている。極性構造では Neel 型の磁気スキルミオンの発 現が許されるが、バルク結晶での Neel 型磁気スキルミオンの観測例は限られている。

本研究では極性金属 Gd₇Pt₃の単結晶試料の育成に初めて成功したので、その物性の詳細について報告 する。本物質は室温で強磁性を示すことが知られている[1]が、本研究により磁気転移温度 *T*_cが 330K で あり、*T*_c以下の広範囲にわたって容易軸型の磁気異方性を示すことが判明した。また、ローレンツ電子 顕微鏡法による実空間観測を行い、磁気スキルミオンの検出に成功した。本講演ではその微視的な起源 についても議論を行う予定である。



図: (a) Neel 型磁気スキルミオンの模式図, (b) Gd7Pt3の結晶構造, (c)Gd7Pt3における磁気スキルミオンの LTEM 像

[1] H. Gamari-Seale, J. Less-Common Met. 75, 43 (1980).

昆虫細胞発現系における安定同位体標識法の開発 Stable isotope labeling of membrane proteins expressed in a baculovirus-insect cell expression system

所属 大学院薬学系研究科 · 薬学部 · 生命物理化学教室 氏名 幸福裕, 横溝智貴, 今井駿輔, 白石勇太郎, 上田卓見, 嶋田一夫

G タンパク質共役型受容体 (GPCR) は、真核生物最大の膜タンパク質ファミリーであり、多くの生理 機能に関与する他、創薬標的としても重要である.近年の NMR 解析などにより、GPCR は複数の構造 間を交換する動的平衡状態にあり、その平衡のシフトは、シグナル伝達などの機能を制御することが明 らかになってきた[1].一方で、GPCR の発現には昆虫細胞-バキュロウイルス発現系 (BVES) が必要で あることから、安定同位体標識法に制限があり、脂質二重膜中の GPCR の構造平衡を高い空間分解能で 解析することは困難である.これまで、我々は、BVES における高度な重水素化とメチオニンメチル基 選択的な¹³C¹H₃標識を開発し、GPCR の NMR 解析に適用してきた[2].本研究では、これに加えて、ア ラニンメチル基の選択的な¹³C¹H₃標識が可能な方法を確立した[3].

メチル TROSY 法を用いて、アラニンのメチル基由来の NMR シグナルを高感度に観測するには、ア ラニンメチル基が高い標識率で¹³C¹H₃ 標識されていることに加えて、アラニンα位が高度に²H 標識さ れることが重要である. BVES においては、昆虫細胞は高濃度の重水中では生育しないことから、軽水 を用いた培地が必要である.この時、細胞内のトランスアミナーゼ活性により、α位が²H から¹H に戻 ってしまうことが課題であった.そこで、プロトコルの最適化をおこなうことで、アラニンメチル基の ¹³C¹H₃標識率が 46%、そのうちα位が²H 標識された割合が 92%となる条件を確立した.

この手法を用いて,GPCRの一種であるβ₂-アドレナリン受 容体 (β₂AR)の NMR 解析をおこなった.15 種類のアミノ酸 残基を²H 標識し、メチオニンとアラニンのメチル基に選択的 に¹³C¹H₃標識を導入した試料を調製し、ナノディスクの脂質 二重膜中に再構成した上で、メチル TROSY スペクトルを測定 した.その結果、メチオニンメチル基の NMR シグナルに加え て、22 残基のアラニン残基に概ね対応する数の NMR シグナ ルが観測された (図 1).このことから、本手法を用いること で、膜貫通領域を含めたβ₂AR の分子全体から構造情報を得る ことができると結論した.本手法は他の多くの真核生物由来 膜タンパク質の NMR 解析に有効であると考えている.



- [1]I.Shimada et al. Nat Rev Drug Discov **18**, 59–82 (2019)
- [2]Y. Kofuku et al. Angew Chem Int Ed Engl 53, 13376–13379 (2014)
- [3]Y. Kofuku et al. J Biomol NMR 71, 185–192 (2018)

Trapping Magnetic Field in Bulk Iron-based Superconductors Sintered via Hot Pressing

Department of Applied Physics, The University of Tokyo Wenxi Wu, Ryosuke Sakagami, and Tsuyoshi Tamegai

Superconductors with a large critical current density (J_c) can trap a high magnetic field when their powders are pressed into bulk and sintered, which could be used as superconducting magnets. In this work, we attempted to improve the J_c and the trapped field of bulk iron-based superconductors by enhancing the texturing of grains in the sample via hot pressing with an uniaxial pressure.

In the present study, We fabricated two bulk superconductors of (Ba,Na)Fe₂As₂ using a cubic press and hot press sintering techniques. Polycrystalline powder was synthesized by the mechanochemical method as described in Ref. [1]. For bulk #1 sintered by cubic press, despite its small dimensions, with diameter 4.1 mm and height 3.64 mm, a trapped field value of ~9.97 kG has been achieved on its surface, which is only 230 G lower than the value reported in a bulk with a diameter of 10 mm before. Critical current density (J_c) is estimated to be 81.2 kA cm⁻² at 4.2 K under self-field, which is larger than the value reported before. It suggests that the improvement of J_c achieved by high pressure could make up for the negative influence from the smaller dimensions and achieve a large trapped field. In the second larger bulk #2 sintered by hot pressing technique, with diameter 9.45 mm and height 4.58 mm, the value of J_c is ~ 33.9 kA cm⁻² and the trapped field is ~8.81 kG on the surface. The expected better texturing has not been observed, as shown in Fig. 2. Possible origins for inferior properties of bulk #2 are discussed.



Figure 1 The measured magnetic induction by a Hall probe set at a position 0.5 mm away from the bottom of (a) bulk #1 and (b) bulk #2 at 4.2 K.



Figure 2 XRD patterns of (002) and (103) peaks for the cross sections of (a) bulk #1 and (b) bulk #2 normalized by the intensity of the intensity of (103) peaks.

[1] S. Pyon et al., Supercond. Sci. Technol. 33, 065001 (2020).

重粒子検出のための超伝導転移端センサの開発 Development of superconducting transition edge sensors for the detection of heavy ions

エ学系研究科 原子力国際専攻 高橋研究室 スミスライアン 高橋浩之 三津谷有貴

重粒子線は放射線治療に用いられる放射線の一種であり、体内の深部にて付与エネルギーのピークが 生じる線量集中性と、がんを治癒する能力に関わる生物学的効果比(RBE)の二点において優れてい る。そのため、体内深部のがん細胞に対して周囲の健康な組織に対する被曝を抑えながら効果的ながん 治療が可能という利点がある[1]。重粒子線治療の現場では、電離箱などの既存の検出器を用いて患者に 照射するビームの強度を調整するが、既存検出器のエネルギー分解能の低さや重粒子について標準化さ れていないW値を線量の計算において使用することから、実際の治療結果に影響が出る程度の不確か さが生じている。この不確かさは、超伝導転移端センサ(TES)などの高いエネルギー分解能を持ち、 線量の計算にW値を用いないカロリメータを用いることにより最小化することが可能となる[2]。

TES は極低温カロリメータの一種であり、高い温度感度を持つ超伝導体の転移領域を温度計として応 用したものである。TES などのカロリメータは超伝導体の薄膜からなる温度計、放射線のエネルギーを 熱に変換する吸収体、発生した熱を熱浴に逃すための熱リンクの三つから構成される。このうち、吸収 体部として人体に(原子番号などが)近い物質を応用することにより、人体へのエネルギー付与の計算 における不確かさを小さくすることが可能となる。これまでのTES を用いた重粒子検出実験では重金属 の吸収体を搭載したγ線検出用のTES を使用た[3]が、新たに重粒子線検出に最適なTES として、グラ ファイト吸収体を搭載した TES を開発した。

実際の重粒子線検出を行う前に、グラファイト吸収体 を搭載した TES が十分なエネルギー分解能を持ってい ることを実証するために、²⁴¹Am 線源の α 粒子の検出に よる検出器の特性評価を行った。以前の研究で行った実 験では、線源の窓の影響によりピークの広がりが正確に 評価できなかった[4]が、非密封の線源を扱うことによ り、 α 線のエネルギースペクトルを検出することが可能 になった。検出した α 線のスペクトルからこの検出器の エネルギー分解能を評価したところ、 $\Delta E = 55 \text{ keV}$ @ 5.486 MeV のエネルギー分解能が示された。



図1. グラファイト吸収体を搭載した TES に より検出された α 線のエネルギースペクトル

[1] T. Kamada, H. Tsujii, E.A. Blakely, Lancet Oncol. 16(2), e93-e100 (2015)

- [2] M. Ohno, T. Irimatsugawa, Y. Miura et al., J. Low Temp. Phys. 193, 1222 (2018).
- [3] R. Smith, M. Ohno, Y. Miura, et al., J Low Temp Phys 199, 1012–1017 (2020)
- [4] R. Smith, M. Ohno, Y. Mitsuya, et al., J Low Temp Phys 209, 427–432 (2022)

探針制御用走査電子顕微鏡を備えた in situ 4 探針電気伝導

測定装置による SrTiO3表面上の原子層構造の測定

Measurements of atomic-layer structures on SrTiO3 surface by in situ

four-point probe electrical transport system with scanning electron

microscopy equipped for controlling probes

1. 理学系研究科 物理学専攻

2. 工学系研究科 電気系工学専攻

3. 工学系研究科 スピントロニクス学術連携研究教育センター 清水翔太¹、保原麗¹、秋山了太¹、堀内皓斗²、金田真悟²、大矢忍^{2,3}、長谷川修司¹

SrTiO₃ (STO) はバンドギャップ 3.2 eV をもつ透明酸化物 絶縁体である。近年、この表面上に原子層 FeSe 薄膜を成長 すると高い転移温度 (T_c)を持つ2次元超伝導が報告され、 その性質に基板との相互作用や電荷移動が重要な役割を担 うという指摘もあり、基板としても大きく注目されている [1]。STO(001)面は、熱処理により酸素原子が欠損し電子ドー プされ、欠損量順に($\sqrt{13}\times\sqrt{13}$),2×1,($\sqrt{5}\times\sqrt{5}$)の表面超構造をと る[2]。また酸素欠損による表面ドナー準位も報告されている が[3]、表面の伝導特性は不明であった。



そこで本研究では non-doped STO(001)面において(√13×√13) 定にしたとき(●)と不定のとき(▲)の 表面超構造を BHF エッチングとアニールにより形成し、探針 シート抵抗の探針間隔依存性。 制御用走査電子顕微鏡(SEM)を用いて超高真空中 *in situ* 4 探針電気伝導測定を行った。その結果、図1(▲) のように SEM の電子線ドーズレートを一定にしない場合は抵抗値にばらつきが認められ、抵抗への電子 線の影響が顕著に認められた一方、ドーズレートを一定にすると抵抗値は安定し、探針間隔に依らないシ ート抵抗が得られ(橙色破線)、2 次元伝導を示した。これは SEM の電子線により STO の表面ドナー準 位からキャリアが励起され伝導性が増大した可能性を示している。発表ではさらにその上に FeSe 薄膜を 成長した場合についても紹介したい。本研究は部分的に科学研究費の助成を受けた。

[1] H. Zhang, *et al.* Nat. Commun. 8, 214 (2017). [2] R. Shimizu, *et al.* Appl. Phys. Lett. 100, 263106 (2012).
[3] L. L. Rusevich, *et al.* Sci. Rep. 11, 23341 (2021).

層状反強磁性体 CuCrP₂S₆ における第二次高調波発生 Second harmonic generation in layered antiferromagnet CuCrP₂S₆

工学系研究科物理工学専攻^A, 理研 CEMS^B, 物性研^c 青木 俊太^A, Yu Dong^A, Ziqian Wang^B, Xiang Huang^A, 板橋 勇輝^A, 小川 直毅^{A,B}, 井手上 敏也^{A,C}, 岩佐 義宏^{A,B}

近年発見された2次元磁性体は、数層の薄膜試料でも磁気秩序が存在することに加えて[1,2]、薄膜化に よって磁性の変調や制御が可能であり、新奇磁気物性探索の場として注目を集めている。その中でもフ ァンデルワールス反強磁性体は、多彩な結晶構造と磁気秩序を持つ物質が最近見つかってきており、磁 性の発現に伴う複雑な対称性とそれを反映した特徴的物性や機能性の発現が期待される。反強磁性体は 有限の磁化をもたないため、2次元強磁性体で用いられているような磁気光学カー効果や磁気円二色性で 磁性を評価することは一般に難しいが、例えば反強磁性磁気秩序に伴って空間反転対称性の破れが実現 するような2次元反強磁性体である2層 Crl₃や MnPX₃(X=S, Se)、2層 CrSBr 等では、反強磁性磁気秩序 に由来する特徴的第二次高調波発生が報告されている[3-6]。

本発表では、ファンデルワールス反強磁性体 CuCrP₂S₆の劈開薄膜試料において第二次高調波発生を測定した結果を報告する。CuCrP₂S₆は150 K 近傍で構造相転移を示して結晶対称性が低下し、さらに32 K 以下の低温領域で反強磁性秩序が発現することが知られているが[7]、本研究ではこれら構造相転移と反強磁性相転移を反映した第二次高調波発生の観測に成功した。講演では、磁場を印加することで第二次高調波発生がさらに変調される様子を報告すると同時に、その起源に関しても議論する。

- [1]C. Gong et al., Nature, 546 265(2017)
- [2]B. Huang et al., Nature, 546 270 (2017)
- [3]Z. Sun et al., Nature 572, 497 (2019)
- [4]H. Chu et al., Phys. Rev. Lett., 124, 027601 (2020)
- [5]Z. Ni et al., Nat. Nanotech., 16 782 (2021)
- [6]K. Lee et al., Nano Lett. 21, 3511 (2021)
- [7]C. C. B. Park et al. Adv. Electron. Mater. 2101072 (2022)

s 波超伝導体 NbN における Higgs モードの量子干渉測定 Quantum interference measurement of Higgs mode in s-wave superconductor NbN

[^]東大院・理, ^B理研 CEMS, ^GNICT, ^D低セ・研究開発部門 礒山和基^A, 辻直人 ^{AB}, 寺井弘高^G, 島野亮 ^{AD}

近年のテラヘルツ (THz) 波や中赤外光技術の進展により,固体中の低エネルギー集団励起モードに直 接アクセスすることが可能となった.最近では集団励起モードの性質の研究のみならず,集団励起モー ドの駆動に伴う物性の変化などが精力的に調べられている.例えば銅酸化物高温超伝導体などにおいて フォノン駆動による過渡的な金属状態から超伝導状態への変化である「光誘起超伝導」現象や[1],量子常 誘電体 SrTiO₃においてフォノン駆動による強誘電状態への準安定的な転移などが報告されている[2].

超伝導体の場合には U(1)ゲージ対称性の破れに伴い,超伝導秩序変数の振幅方向の揺らぎに対応する Higgs モードと呼ばれる集団励起モードが現れる. Higgs モードは THz 波を用いた非断熱的な超伝導クエ ンチ,および光-Higgs 非線形結合に由来する THz 第 3 高調波発生 (THz-THG) の 2 つの方法によって観 測が可能であり,従来型 *s* 波超伝導体 NbN においてそれぞれの方法による観測が報告されて以来,他の 超伝導体においても Higgs モードの観測を目指した研究が行われている[3].

本研究では *s* 波超伝導体 (a) NbN において THz 波ポンプ-THz-THG プローブ分光 (図(a)) を行い, THz 波照射とその後に 続く超伝導秩序変数の振動に よる非線形光学応答の変化を 調べた. その結果, NbN 薄膜試 料から放射される THz-THG 信 号の強度がポンプ THz 波とプ ローブ THz 波の時間差 (ポン プ-プローブ遅延時間 *t*pp) に対 して振動する振る舞いが観測 された (図(b)). これは 2 つの



図 (a) 実験系の概念図. NbN 薄膜試料に励起 THz 波 (赤色) と時間差 t_{pp} をつけたプローブ THz 波 (紫色) を照射し, 透過してきたプローブ THz 波の時間波形 E_{tr} を測定する. (b) THz-THG 信号の遅延時間依存性. 10 ps 程度で変化する遅い成分に加えて, $\omega_{osc}/2\pi = 1$ THz の振動が見られた. インセットにダイナミクスの振動成分のパワースペクトルを示した.

異なる過程によって励起された Higgs モードが干渉したことに由来する現象であると考えられ, THz ポン プパルスによって誘起された超伝導秩序変数のコヒーレントな変調が THG 信号に変調信号として現れる ことが明らかになった. ポスターでは理論計算との比較や, 系のダイナミクスを反映した測定により得 られた結果について紹介する.

- [1] レビューとして A. Cavalleri, *Contemporary Physics* **59**, 31 (2018).
- [2] T. F. Nova et al., Science **364**, 1075 (2019).

^[3] レビューとして R. Shimano & N. Tsuji, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 11, 103 (2020).

アフリカ豚熱ウイルスのチミジル酸キナーゼ (pA240L) の 発現、精製、活性測定および阻害剤探索

Expression, purification, activity measurement and inhibitor screening for thymidylate kinase pA240L from African swine fever virus

農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 食品生物構造学研究室 高田幸之介¹、陸鵬¹、岡本研¹、奥田傑¹、鈴木道生¹、國保健浩²、伊藤英晃¹、永田宏次¹ (1. 東大院・農生科・応生化 2. 農研機構・動衛研)

アフリカ豚熱 (ASF) は、アフリカ豚熱ウイルス (ASFV) が豚や猪に感染して起こる熱性の感染症で あり、甚急性や急性の場合、その致死率は100%に達する。これまでアフリカやヨーロッパ、世界最大

の豚肉生産国である中国を含めたアジアにて ASF の流行が確 認され、養豚業界に深刻な影響をもたらしている。DNA ウイ ルスである ASFV はそのゲノムに 160 以上のタンパク質をコ ードしているが、その多くは機能未知であり、ASFV に対し て有効かつ商業利用可能な抗ウイルス薬は存在しない。ASFV 由来タンパク質 pA240L はチミジル酸キナーゼ (TMPK) と機 能が予測されている。TMPK は、DNA の必須構成要素である dTTP の合成において、デオキシチミジンーリン酸 (dTMP) を デオキシチミジンニリン酸 (dTDP) に変換する酵素である。 TMPK は dTTP の生合成経路において、salvage 経路と *de novo* 経路の 2 つの経路の接点に位置する反応を触媒することか ら、TMPK は望ましい創薬ターゲットである[1]。また、ASFV 強毒株から dTTP 合成に関与する遺伝子を削除するとその毒 性が有意に低下し、ASFV の複製における dTTP 合成の重要性 が示唆されている[2]。しかしながら、pA240L の機能は検証さ



 $\boxtimes 1$. Graphical abstract

れていない。そこで本研究では、ASFV Georgia 2007/1 株由来の pA240L について、発現・精製法および 2 つの酵素活性測定系 (NADH coupled TMPK assay、HPLC assay) を確立した。pA240L が TMPK 活性を 有することを示し、酵素動力学パラメータを決定した。また、抗ウイルス活性、酵素阻害活性などを有 する様々な活性成分を含むスパイスに着目し、その熱水抽出物を用いた pA240L 阻害剤のスクリーニン グを行った結果、オールスパイスが pA240L の TMPK 活性を 100%近く阻害することを示した。将来的 には、豚飼料への pA240L 阻害成分の添加により、ASFV に感染してもその複製を抑制することで重症 化を防ぐ方法の開発を目指す。

- [1] Kandeel M, Kato A, Kitamura Y, Kitade Y. Nucleic Acids Symp Ser (Oxf). 2009;(53):283-4.
- [2] Moore DM, Zsak L, Neilan JG, Lu Z, Rock DL. J Virol. 1998 Dec;72(12):10310-5.

P3-07 Photo-induced change in polarization of SH light emitted from Ln-[Fe(CN)₅NO] complexes

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, School of Science <u>Taiki Sakaguchi</u>, Kenta Imoto, Koji Nakabayashi, Shin-ichi Ohkoshi

Second harmonic generation (SHG), the phenomenon that materials generate new light with twice the energy of incident light, has been studied to develop wavelength converters. Nowadays, photoswitchable SHG properties draw attention as a candidate of new optical devices especially for optical computer. Our laboratory has reported photoswitchable SHG crystal, $[Dy(NO_3)(1,10\text{-phen})_2(H_2O)][Fe(CN)_5NO] \cdot 3H_2O$ (**DyFe**) in 2021 [1]. This complex showed photo-induced change in intensity of SH light accompanied with photo isomerization in nitrosyl ligands. In this study, we report $[Tb(NO_3)(1,10\text{-phen})_2(H_2O)][Fe(CN)_5NO] \cdot 2.5H_2O$ (**TbFe**), analogue of **DyFe**, which showed photoswitching in polarization of SH light.

Crystals of **TbFe** were obtained by mixing an aqueous solution of $Tb(NO_3)_3$ and Na₂[Fe(CN)₅NO], and a methanolic solution of 1,10-phenanthroline. Single crystal X-ray analyses revealed **TbFe** has a one-dimensional structure along the *a*-axis with space group *Pna*2₁. In the structure, nitrosyl ligands aligned in the same side about the *c*-axis and it is obvious that **TbFe** has polarization.



Measurements of photo-induced SHG properties were performed on the crystallographic *bc*-plane of **TbFe** crystal at 100 K. In the measurements, incident laser was 1040 nm pulse laser polarized along -14.7 degrees to the *c*-

Figure 1. The structure of **TbFe** viewed from the *b*-

axis and transmitted SH light was measured by photo multiplier tube before and after the irradiation of 473 nm light. The polarization angle before the irradiation was 15.9 degrees to the *c*-axis and that after the irradiation was 37.9 degrees to the *c*-axis. Therefore, **TbFe** crystal showed photoswitchable polarization of SH light. Moreover, this change was repeatable by irradiation of 473 and 804 nm light.



Figure 2. The schematic image of polarization switching with photo irradiation.

[1] M. Komine, K. Imoto, A. Namai, M. Yoshikiyo, S. Ohkoshi, Inorg. Chem., 60, 2097 (2021).

中赤外円偏光パルスを用いた強磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂の磁化及びカイラリティの反転

Switching of magnetization and chirality in ferromagnetic Weyl semimetal Co₃Sn₂S₂ using mid-infrared circularly polarized laser pulses

¹東大理・島野研究室,²東北大金研,³東北大 CSIS,⁴低セ・研究開発部門 小川和馬¹,吉川尚孝¹,平井誉主在¹,藤原宏平²,池田絢哉²,塚崎敦^{2,3},島野亮^{1,4}

時間反転対称性の破れたワイル半金属、磁性ワイル半金属ではフェルミ準位近傍のワイルノードの存 在によって、巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果などの興味深い物性が発現する。例えば、異常 ホール効果はワイル点に付随する電子のカイラリティを反映しており、正負のカイラリティを持つワイ ル点対の間に発生する仮想磁場によって生じている。そのため、ワイルフェルミオンが持つカイラリテ ィを外場で制御することで異常ホール伝導度などの符号を操作することができる。磁性ワイル半金属で は、磁化とカイラリティが結合しているため、例えば、電流を用いて磁性ワイル半金属の磁化反転を誘起 し、異常ホール伝導度の符号を反転させる実験などが報告されている[1,2]。一方、光を用いた磁性ワイル 半金属におけるワイル粒子のカイラリティや磁化の反転は実証されていなかった。

強磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂ はそのバンドトポロジーに由来して物質の中でも最大級の異常ホール 効果を強磁性相で示すことが知られている。我々はスパッタリング法によって成膜した厚み 23 nm の Co₃Sn₂S₂薄膜を使用し、面直方向に単一に磁化した状態を用意するためにキュリー温度(~185 K)以下 まで磁場中冷却を行った。光パラメトリック増幅器から出力された波長 4 µm の中赤外光パルスを照射す ると、偏光に応じてテラヘルツ帯の異常ホール伝導度の符号反転が無磁場中で生じることを、ファラデ

一効果を用いることによって観測した[3]。さらに、近赤外磁気光学イメージングを用いて磁化の変化を調べた結果、
異常ホール伝導度の符号反転は磁化反転を伴うことが判明し、この現象は適度な強度の励起光の照射が重要であることがわかった。また、照射位置を掃引すると、光照射領域の磁化状態を制御できることを観測した。この光誘起磁化反転現象は複数回の光パルスの照射の蓄積効果によって生じる。その起源として、この物質が中赤外領域において約15%の非常に大きな磁気円二色性を持つことによる、磁区の偏光選択的な温度上昇が支配的であることを数値シミュレーションとの比較から明らかにした。



図1. Co₃Sn₂S₂薄膜に右回り円偏光(σ+) と左回り円偏光(σ-)を交互に一定時間照 射したときのテラヘルツ帯における異常 ホール伝導度の時間変化を示す。円偏光の ヘリシティに応じて異常ホール伝導度の 符号が切り替わる。

^[1] Tsai, H. et al. Nature 580, 608-613 (2020).

^[2] Han, J. et al. Appl. Phys. Lett. 119, 212409 (2021).

^[3] Yoshikawa, N. et al. Commun Phys 5, 328 (2022).

Gate modulation of the spin-dependent transport in the metal-insulator transition region of La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃-based spin-MOSFET structure ¹The University of Tokyo EEIS, ²The University of Tokyo CSRN Tatsuro Endo¹, Shun Tsuruoka¹, Yuriko Tadano¹, Shingo Kaneta-Takada¹,

Le Duc Anh^{1,2}, Masaaki Tanaka^{1,2}, and Shinobu Ohya^{1,2} Within a single perovskite oxide, transition metal cations with different valences may coexist, and at specific composition ratios, they undergo abrupt property changes or phase transitions [1]. For example, (La,Sr)MnO₃ (LSMO) exhibits metal-insulator transition (MIT) when oxygen deficiencies are incorporated [2]. This allows us to

(LSMO) exhibits metal-insulator transition (MIT) when oxygen deficiencies are incorporated [2]. This allows us to induce MIT at the intended locations of a thin LSMO layer by implementing oxygen vacancies. Recently, we formed an insulating nano-channel region by inducing the MIT in the LSMO and made a planar two-terminal spin-valve device with an extremely large magnetoresistance ratio of 140% [3].

In this work, we report a current modulation of a nanoscale MIT channel by a gate electric field. The composition of LSMO used in this work is La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃. This LSMO film was epitaxially grown on a SrTiO₃ substrate by molecular beam epitaxy (thickness: 30 unit cells = 12 nm). Afterward, we used the electron beam lithography to define the nanoscale Mott-insulator region, conducted the MIT process to implement the nanoscale Mott-insulator region in the LSMO layer, and prepared the back-gate electrode by sputtering an aluminum layer [Fig. 1(a)]. The Mott-insulator channel showed a nonlinear current (I) – voltage (V) characteristic that can be well-fitted with the theoretical curve of the tunneling current with a low barrier height of 55 meV. We experimentally confirmed that the electric current decreases when the positive gate voltage (V_G) is applied [Fig. 1(b)]. We also reproduce the current modulation theoretically by considering the change in the tunnel barrier height induced by the carrier density modulation due to the capacitance of the STO substrate [Fig. 1(c)].

This work was partly supported by the Grants-in-Aid Scientific Research and ARIM programs of MEXT, CREST and PRESTO of the Japan Science and Technology Agency, and the Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).



Fig. 1 (a) Schematic illustration of the LSMO-based planar spin-valve device after the MIT process with a back-gate electrode. (b) I - V data of the LSMO device with the MIT region (yellow colored) under the gate-voltage application. (c) Comparison of the experimental data (dots) and theoretical curves (solid lines) of the I-V characteristics under the gate voltage $V_G = 0$ V (blue) and $V_G = 100$ V (red).

[1] A. Urushibara et al., Phys. Rev. B 51, 14103 (1995). [2] N. Manca et al., Appl. Phys. Lett. 106, 203502 (2015).

^[3] T. Endo *et al.*, submitted.

P3-10

NMR と GC-MS を用いた蜂蜜試料のメタボローム解析

Metabolomic analysis of honey samples using NMR and GC-MS

東京大学 大学院農学生命科学研究科 応用生命化学専攻

本田 裕佳、住田 喬哉、伊藤 光洋、盧 翌、降旗 一夫、堀 吉満、奥田 傑、伊藤 英晃、 岡本 研、鈴木 道生、陸 鵬、永田 宏次

【背景・目的】

蜂蜜はミツバチが蜜源植物の蜜から作り出す自然食品であり、複数の蜜源植物から得られる百花蜂蜜 と、単一の蜜源植物から得られる単花蜂蜜に分類される。蜂蜜には主成分の糖類や水分以外に、風味や 味といった蜂蜜の特徴に関与するアミノ酸や有機酸、ミネラル等の微量成分も含まれている。本研究で は、NMR と GC-MS により百花蜂蜜と単花蜂蜜の微量成分を分析し、蜂蜜の微量成分と蜜源植物の関係 に着目することで、環境が蜂蜜の品質に及ぼす影響を評価することを目的とした。

【方法】

採蜜時期の異なる百花蜂蜜 27 サンプルおよびレンゲ蜂蜜 9 サンプル、カラスザンショウ蜂蜜 18 サン プルをそれぞれ重水素化溶媒に溶解し¹H-NMR を測定した。得られた NMR スペクトルから定量分析、 および主成分分析を行った。また、レンゲ蜂蜜 9 サンプル、カラスザンショウ蜂蜜 18 サンプルを対象 に、GC-MS により揮発性成分の分析も行った。

【結果・考察】

主成分分析の結果、百花蜂蜜は分散して分布していたのに対し、単花蜂蜜はそれぞれグループを形成 していたことから、主成分分析により蜜源植物と蜂蜜の微量成分の関係性を可視化することができた。 成分分析の結果、同一養蜂場から採取された百花蜂蜜について採蜜時期によって成分組成に大きな差が 見られた。用いた百花蜂蜜の主蜜源植物として、5月はレンゲ、8月はカラスザンショウが挙げられて

いたが、5月の百花蜂蜜とレンゲ蜂蜜の NMR スペクトルは類似していないことから、5月 の百花蜂蜜にはレンゲ以外にも主要な蜜源が 存在することが示唆された。一方で8月の百 花蜂蜜とカラスザンショウ蜂蜜のそれは類似 していたため8月の百花蜂蜜ではカラスザン ショウが主要な蜜源であることが示唆され た。

また、GC-MSを用いた揮発性成分の分析 では、カラスザンショウ蜂蜜は産地により揮 発性成分組成が顕著に異なり、GC-MSが産 地の区別に有用であることが示唆された。こ れらのメタボローム解析は、蜂蜜の新たな品 質評価法の確立に貢献するものである。



P3-11

Structural transformation of a nanochannel molecule-based magnet

leading to magnetic anisotropy changes

理学系研究科化学専攻 物性化学研究室 下拂瞭太,中林耕二,Kunal Kumar,大越慎一

Molecule-based materials have structural flexibility and hence have possibility to realize a variety of nanostructures [1]. Some of these materials can change their structure by external stimuli such as light or pressure. Recently, our laboratory successfully synthesized a molecule-based magnet with nanochannels of Co₇[W(CN)₈]₄Cl₂·29H₂O [2]. Here we report an analogue compound, Co₇[W(CN)₈]₄Cl₂·24H₂O·3(acetone), in which the solvent molecules inside the nanochannels were changed from water to acetone molecules using an alternative synthetic method.

The crystals were obtained by delivering Rb^ICl and Rb^I₃[W^V(CN)₈] aqueous solutions by drops into an acetone-

water solution of Co^{II}Cl₂. Single crystal structure analysis revealed that this material (open-CoW) had large open nanochannels. When the crystals were exposed to humid air, the open-CoW underwent a structural change and transformed to a different structure. In the structure after the transition (closed-CoW), the nanochannels were almost closed. Magnetic measurements results indicated that the both structure showed ferromagnetism. Angular dependent magnetic measurements suggested that the magnetic anisotropy of closed-CoW is smaller than that of open-CoW. To investigate the origin of the anisotropy change, we performed CASSCF calculations by extracting the non equivalent cobalt sites from the both structures focusing on the single ion anisotropies of cobalt ions. The results hinted the single ion anisotropies of the cobalt ions and the dipole-dipole interactions caused by them are one of the reasons for the change of magnetic anisotropy.







Fig. 2. Angular dependent M-H plot of **Open-CoW** (a) and **Closed-CoW** (b). 0° and 90° represent the states where magnetic field is applied parallel and perpendicular to the ab plane, respectively.

[1] S. Ohkoshi, et al., Nature Chemistry, 12, 338 (2020)

[2] K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, et al., Cryst. Growth Des. 17, 9, 4511 (2017).

カゴメ格子磁性体における質量ディラック電子由来の 非従来型磁気光学共鳴応答 Unconventional magneto-optical resonances derived from massive Dirac fermions in kagome magnets

工学系研究科・物理工学専攻・高橋研究室 正力健太郎,岡村嘉大,野村悠祐,藤代有絵子,北折曉, 金澤直也,有田亮太郎,十倉好紀,高橋陽太郎

カゴメ格子を持つ物質群は、原子の特殊な配列により、その電子構造において、ディラック電子、フラ ットバンド、ファン・ホーヴ特異点が生じることが知られ、幾何学・トポロジー・スピン・相関効果の間 の相互作用から豊かな創発現象が生じることが期待されている[1]。特にディラック電子についてはバン ドのトポロジカルな性質を内包している。ここに、磁性などの時間反転対称性を破る秩序変数が結合す ることによってトポロジカルなギャップが空き、質量ディラック電子が生じる。この質量ディラック電 子系においては、量子異常ホール効果をはじめとして、様々な量子電磁気応答が発現する可能性がある。

本研究では、カゴメ格子磁性体 RMn₆Sn₆(R = Gd, Dy)において、質量ディラック電子に由来する磁気光 学共鳴応答の、磁化方向に対する変化を捉えることを目指した。この物質群のうち、TbMn₆Sn₆において は、STM による先行研究からは、質量ディラック電子の存在が実証されている[2]。さらに、これまで の研究から、ディラック電子の存在が示唆される中赤外領域に顕著な共鳴構造を観測することに成功し ている。Gd, Dy 組成における磁化容易軸は、それぞれ面内方向と、c 軸から 45°方向を向いているた め、c 軸方向に外部磁場を印加することによって、磁化方向を変化させることができる。実際、Gd, Dy いずれの組成においても、観測した光学ホール伝導度スペクトルσ_{xy}(ω)に、質量ディラック電子由来の 共鳴構造が現れていることが明らかになった。さらに、その共鳴の大きさの、磁化方向に対する依存性 は、Gd 組成においては、一般の強磁性体でよく知られるような単純に磁化に比例する振る舞いが見ら れた。その一方で、Dy 組成においては、磁化に比例する成分に加えて有限の y 切片を持つ非従来型の 磁化依存性が得られた。また、光学ホール伝導度スペクトルを解析して質量ディラック電子のギャップ

の大きさを求めたところ、磁化方向に対する質量ギャップの 異方性について、Gd 組成では、2 次元カゴメ格子特有のダン ベル型の異方性を示すのに対して、Dy 組成ではではひょうた ん型のような異方性を示すことがわかった(図 1)。そのため、 Dy 組成において観測された磁化方向に対する非従来型の磁 気光学共鳴応答は、こうした質量ギャップの異方性の変化 に起源をもつことが明らかになった。



図 1. 質量ギャップの磁化方向に対する 異方性の変化

[1] J. X. Yin *et al.*, Nature **612**, 647 (2022).

[2] J. X. Yin et al., Nature 583, 533 (2020).

(Ba,Na)Fe₂As₂テープ線材の臨界電流密度と配向度の関係 Relationship between Critical Current Density and Texturing in (Ba,Na)Fe₂As₂ tapes

東大院工物理工学専攻為ヶ井研究室、量研機構^A、東北大金研^B 伊藤嵩真、坂上良介、為ヶ井強、梶谷秀樹^A、淡路智^B

鉄系超伝導体は高い臨界磁場及び高い臨界電流密度(J_c)を有することから、次世代高磁場マグネット用超伝導線材の候補の一つとして注目され研究が進められている。その中でも、122型鉄系超伝導体(Ba,A)Fe2As2(A: Na, K)を原料とした線材の性能は特に優れており、その作製方法の簡単さも相まって大きな注目を集めている。4.2 K、10 kOe での J_cは K ドープのテープ線材で150 kA/cm²[1],丸線で49 kA/cm²[2]に達している一方、Na ドープのJ_cについては、丸線では54 kA/cm²に達しているものの[3]、テープ線材ではコールドプレスにより作製されたものにおける43 kA/cm²(4.2 K, 40 kOe)にとどまっている[4]。高い J_cを得るためには、超伝導コア内の結晶粒の配向性を向上させることが重要であると考えられている。

今回我々は、(Ba,Na)Fe₂As₂ コールドプレス テープ線材における J_cのプレス圧力依存性を 評価した。プレスの際の圧力の異なる銀シース のコールドプレステープ線材を作製し、その J_c を試料の磁化から評価した結果を図に示す。高 い圧力で作製したテープの方が J_cが高くなっ ていることが観測された。

発表では、製法の条件やシースを変化させて 作製した(Ba,Na)Fe₂As₂テープ線材のJ_cを評価 し、その結果を配向度と関連づけて議論する。



図. (Ba,Na)Fe₂As₂ コールドプレステープ線材の磁化 から求めた J_c の磁場依存性。1.5 mm の丸線を厚さ 0.3 mm のテープ状に加工し、異なる圧力で単軸プレ スした後に 800 ℃で 2 h 焼結した。

- [1] H. Huang et al., Supercond. Sci. Technol. 31, 015017 (2018).
- [2] S. Pyon et al., J. Phys.: Conf. Ser. 2323, 012020 (2022).
- [3] S. Pyon et al., Supercond. Sci. Technol. 34, 105008 (2021).
- [4] S. Imai et al., Sci Rep 9, 13064 (2019).

Development of Low-Frequency Sub-Terahertz Absorption Based on Coordination Polymers

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, University of Tokyo <u>Guanping Li</u>, Olaf Stefanczyk, Kunal Kumar, Yuuki Mineo, Koji Nakabayashi, and Shin-ichi Ohkoshi

The latest technological advancements including the development of terahertz timedomain spectroscopy (THz-TDS) and low-frequency Raman (LF-Raman) scattering spectroscopy, open up the possibility of studying a variety of molecular materials in the underexplored range from sub-THz (f



Figure 1. Crystal packing (a) and THz-TDS spectrum (b) of 1.

< 1 THz ≈ 33.36 cm⁻¹) to a few THz [1]. Notably, Fe^{II} complexes are promising metal centers to create multifunctional materials that can act as tailorable THz absorbers and THz switches. Additionally, the building block [Hg(XCN)₄]²⁻ (X = S or Se) is a good candidate for generating various Fe^{II} -Hg^{II} assemblies. Such unprecedented coordination polymers (CPs) are promising for the development of a diverse type of multifunctional Fe(II)-based CPs and have never been reported for THz-TDS and LF-Raman response. Given the aforementioned trends in advanced material research, we reported a series of self-assembly Fe^{II} complexes with the general formula of $[Fe(L)_m][Hg(XCN)_4]$ solvents (L = Phen, m/X = 2/S, 1; L = Qxn, m/X = 2/S, 2; L = Qxn, m/X = 1/S, 3; L = Qxn, m/X = 1/Se, **3-Se**; L = Tmp, m/X = 1/S, 4; and L = Tmp, m/X = 1/Se, 4-Se) and investigated them the sub-THz absorption and LF-Raman scattering as well as paramagnetic properties. 1, 3, and 3-Se show an intense sub-THz absorbance centered at 0.63, 0.61, and 0.61 THz (Figure 1), respectively, mainly due to the vibrations of solvent molecules coordinated to Fe(II) centers as well as crystallization organic ligands based on first-principles calculations. Meanwhile, crystals of 1, 4, and 4-Se reveal low-frequency (LF) Raman scattering with exceptionally low values of 0.44, 0.51, and 0.53 THz. This study indicates that heavy metal Fe^{II}-Hg^{II} systems provide an alternative strategy for designing sub-THz absorbers and broaden the knowledge to unravel the nature of vibrations in the LF region. It should contribute to fine-tuning of materials to an even lower frequency close to 0.3 THz, which may be realized by applying heavier elements such as bismuth or lead or by modifying the solvent environment to meet the requirements of 6G communication technologies.

[1] G. Li, O. Stefanczyk, K. Kumar, Y. Mineo, K. Nakabayashi, and S. Ohkoshi, Angew. Chem. Int. Ed. 62 e202214673 (2023).

鉄系超伝導体 Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x における電子相図と Orbital-Selective Mott Phase Electronic phase diagram and Orbital-Selective Mott Phase of Teannealed superconducting Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x

低温科学研究センター・研究開発部門 藤井 武則

Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_xにおけるドーピング(x)ー温度(T)の電子相図を明らかにすることは、その超伝導機構を解 明するうえで重要である。近年、角度分解光電子分光の実験において特定の軌道にモットギャップが生 じる Oobital-selective-Mott Phase が見いだされ、注目を浴びている[1]。これまで我々は、磁気抵抗、およ びホール効果の測定により、特徴的な温度 T^{**}, T^{*}, T_{sef}を詳細に観測し、電子相図を調べてきた。ここで は、Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_xの Te アニールにより、過剰鉄を十分に取り除いた良質な単結晶を用いて、常伝導状態 の磁化率を測定した。常伝導状態の磁化率は、主に、パウリ常磁性によるものと考えられ、擬ギャップ など、状態密度に敏感な測定であると思われる[2]。その結果、特徴的な温度 T^{**}, T^{*}, T_{sef}は、以前報告し ている磁気抵抗、およびホール効果による解析と一致することが明らかなった[3]。

図 1(a)に Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_xの磁化率の温度依存性を示す。温度を下げると *T***において磁化率は減少しはじ め、*T**以下でわずかに上昇する(*T**を明らかにするため磁化率の温度微分を図 1(b)に示す)。さらに *T*_c直 上の *T*_{scf}以下において再び減少する振る舞いが観測された。磁気輸送特性の結果と比較して考察すると、 *T***以上では、面内抵抗率は負の温度依存性を示し、Mott ギャップによる Incoherent な伝導となっている と考えられる。一方、磁化率は局在スピンによるキューリーワイス的な振る舞いから、T**以下で Coherent な伝導になるため、パウリ常磁性的な振る舞いに変わると考えられる。一方、*T**以下では、電子キャリア が励起されるために状態密度が増加すると考えられる。講演では、量子臨界点や BCS-BEC クロスオーバ ーについても考察する。



- [1] J. Huang et al., Commun Phys 5, 29 (2022).
- [2] T. Watanabe et al., Phys. Rev. B 84, 5848 (2000).
- [3] T. Otsuka et al., Phys. Rev. B 99, 184505 (2019).

P3-16

ミリケルビン量子プラットフォームの紹介 Introduction for Millikelvin Quantum Platform

所属 低温科学研究センター・共同利用部門¹、同・研究開発部門² 氏名 戸田 亮¹、福山 寛²

2022 年7月から本格的な共同利用が始まった低温科学研究センター「ミリケルビン量子プラットフォーム」[1,2]の³He-⁴He 希釈冷凍機と極低温マイクロ波エレクトロニクス(図1)について、その概要を 紹介します。本設備は、量子コンピュータや量子センサの開発、それらの基礎となる量子物質の物性研 究など、ミリケルビン温度を必要とする幅広い量子技術の実験研究に利用できる共同利用装置です。本 学だけでなく他の大学や公的研究機関、民間企業の研究者も使用できます。

本希釈冷凍機は 10 mK までの極低温を連続発生でき、100 mK で 0.4 mW 以上という大きな冷却力を もちます。極低温マイクロ波実験用の高周波同軸ケーブルと低温プリアンプ (≤14 GHz)、種々の物性測 定用の RF 同軸ケーブル (≤100 MHz) や

THERMOCOAX ケーブルおよびツイストペアケー ブル、そして光ファイバーケーブルなど多彩な測 定用ケーブルが配線済みなので、利用者は混合器 温度の実験空間に試料を固定しこれらケーブルへ 接続するだけで実験を行うことができます。

10 mK の温度で 3 T の磁場を印加できる超伝導マ グネット (ボア径 25 mm、巻線部長さ 130 mm、軸 上 6 mm にわたる均一度 1×10^{-4}) も準備されてい ます。マイクロ波エレクトロニクス (≤ 12.5 GHz) は、発信器、任意波形発生器、変調器、復調器、 デジタイザ、ネットワークアナライザ等からな



図1 希釈冷凍機と極低温マイクロ波エレクトロ ニクスの全景。右側白い円筒形真空槽内の下部 (点線部)が実験空間。

り、最大で10ビットの超伝導量子ビット回路を制御・読み出し可能です。

実験のサイクルは、通常1週間で試料廻りのセッティングを入れ替えた後、1週間単位で冷却実験します。本装置の利用にご興味やご質問のある方は、ポスター発表時あるいは電子メール [3]にて気軽にお問い合わせください。なお、当センターでは最近、0.8 mK の温度を連続発生できる世界初の連続核断熱消磁冷凍装置の実証実験に成功しましたので[4]、ごく近い将来、本設備のサブ mK オプションとして 共同利用いただくことを計画しています。

[1] 福山 寛「ミリケルビン量子プラットフォームの開設」2021 年東京大学低温科学研究センター年報(pp. 71–72).
[2] <u>http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/FSI/</u>
[3] <u>mk platform@crc.u-tokyo.ac.jp</u>
[4] 瀧本翔平、戸田 亮、村川 智、福山 寛「小型連続核断熱消磁冷凍機の開発と性能評価」第 14 回低温 科学研究センター研究交流会.

第14回 低温科学研究センター研究交流会 概要集

Abstract book The 14th Research Forum of Cryogenic Research Center



お問い合わせ 東京大学低温科学研究センター 研究交流会事務局 e-mail: conference@crc.u-tokyo.ac.jp http://www.crc.u-tokyo.ac.jp