

電荷移動誘起相転移を示すシアノ架橋型金属集積体のテラヘルツ光吸収特性

Terahertz wave absorption properties of cyanido-bridged metal assemblies showing charge-transfer phase transition

理学系研究科化学専攻 大越研究室

○峯尾侑希, 中林耕二, 井元健太, 中川幸祐, 吉清まりえ, 大越慎一

近年、当研究室では $\text{Cs}_x\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y \cdot z\text{H}_2\text{O}(\text{CsMnFe})$ が 1.4 THz 付近でテラヘルツ光の吸収を示すことを報告した[1]。これは、3次元格子の空隙に閉じ込められた重原子である Cs^+ イオンのフォノンモード振動のため、対応する特定の周波数の電磁波が吸収されることで生じる。本発表では、重原子として Rb^+ イオンを含み、温度変化に伴う構造相転移を示す $\text{Rb}_{0.97}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.99} \cdot 0.2\text{H}_2\text{O}(\text{Rb}_{0.97}\text{MnFe})$ についてのテラヘルツ光吸収特性を報告する。

粉末結晶構造解析の結果、 $\text{Rb}_{0.97}\text{MnFe}$ は室温下で図1のような構造を有することが明らかになった。また、テラヘルツ時間領域分光法を用いて $\text{Rb}_{0.97}\text{MnFe}$ のテラヘルツ光吸収測定を行ったところ、室温下で 1.15 THz に吸収を示した。この吸収は、テラヘルツ光によって格子空隙中の Rb^+ イオンの振動が励起されたことに由来すると考えられる。この吸収周波数は既報の CsMnFe の吸収周波数より低い値であるが、 Rb^+ イオンは Cs^+ イオンよりも半径が小さく、周囲の空間が広くなるため、生じる振動の振幅も大きくなることで Rb^+ イオンの方がよりゆっくりと振動するためと考えられる。また、低温相の $\text{Rb}_{0.97}\text{MnFe}$ についても同様の測定を行った結果、1.41 THz で吸収を示した。この高周波数側へのシフトは、低温相への相転移による結晶の収縮に起因すると考えられる。

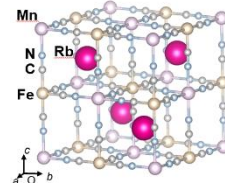


図1:室温下の $\text{Rb}_{0.97}\text{MnFe}$ の結晶構造

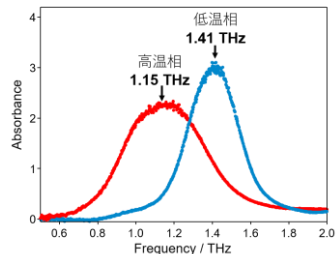


図2: $\text{Rb}_{0.97}\text{MnFe}$ の室温下でのテラヘルツ光吸収スペクトル

[1] S.Ohkoshi, M.Yoshikiyo, A.Namai, K.Nakagawa, K.Chiba, R.Fujiwara, H.Tokoro, Scientific Reports 7, 8088 (2017).

層状磁性体 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbSe}_2$ の MBE 成長と二次元磁性

Molecular-beam epitaxy growth of $\text{Cr}_{1/3}\text{NbSe}_2$ and its magnetic properties at the two-dimensional limit

工学系研究科・物理工学専攻・岩佐研究室

真島裕貴, Saika Bruno Kenichi, 松岡秀樹, 中野匡規, 吉田訓, 石坂香子, 岩佐義宏

遷移金属カルコゲナイド(TMDC)は層間が弱いファンデルワールス力により結合した層状物質であり、有機分子や遷移金属等、多様な原子・分子のインターカレーションが可能である。特に 3d 磁性イオンがインターカレートされた TMDC はその磁性イオンの種類や濃度に応じた様々な磁気秩序相を形成する事が知られている。しかしそれらは機械的な剥離が困難であり、2次元極限における磁気特性は未解明である。そこで我々は分子線エピタキシー法(MBE法)を用いる事により、原子層レベルにおける、磁性イオンのインターカレーションを伴う TMDC 薄膜の作製に取り組んでいる。

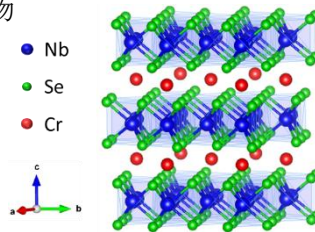


図 1: $\text{Cr}_{1/3}\text{NbSe}_2$ の結晶構造

特に本研究では、バルクにおいて面内強磁性の発現が示唆される $\text{Cr}_{1/3}\text{NbSe}_2$ [1] (図 1)の超薄膜化に取り組んだ。輸送特性・磁気特性評価の結果、Cr 単原子層を有する薄膜試料において、金属的な電気伝導性と面内強磁性の発現を観測した。本研究成果は XY 型の 2次元強磁性体を実現したものであり、トポロジカルな相転移である KT 転移等、XY 模型における磁気秩序形成の詳細な調査を可能とした。発表では得られた試料の磁気特性について詳しく紹介する。

Influence of the quantization of the d_{xy} band on spin-to-charge conversion at the LaAlO₃ / SrTiO₃ interface

工学系研究科 電気系工学専攻 田中大矢研究室
 荒井勝真、金田真吾、Le Duc Anh、田中雅明、大矢忍

The recently observed various phenomena of spin-to-charge-current conversion have attracted much attention. The LaAlO₃/SrTiO₃ (LAO/STO) interface is very promising for efficient spin-to-charge conversion due to the two-dimensional electron gas (2DEG) with a large Rashba spin-orbit interaction. Previously, we achieved a large spin-to-charge conversion efficiency, the so-called inverse Edelstein length λ_{IEE} , up to 6.7 nm at the LAO/STO interface. In this previous work, we carried out the band-structure calculation to explain the experimental results; however, the 2nd d_{xy} subband was not taken into account. In this study, we have incorporated the 2nd d_{xy} subband into our calculation and calculated the two-dimensional current density over the spin accumulation as a function of the Fermi level. The calculated result in this research (green) fits the experimental result (red) better than the previous result (blue) by the small Δ_{ASO} value, which represents the largeness of the spin splitting.

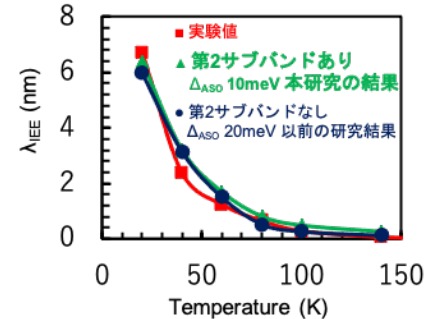


Fig. 1 Experimental result and the calculation results of the λ_{IEE} . The result with the 2nd subband (green) fits well the experimental result by small Δ_{ASO} .

[1] S. Ohya *et al*, Phys. Rev. Res. **2**, 012014(R) (2020).

反転対称性を有する新規スキルミオン物質における創発磁気輸送現象

Observation of emergent magnetotransport phenomena

in centrosymmetric skyrmion-hosting magnet

東大工^A, JST さきがけ^B, 東大物性研^C, 理研 CEMS^D, 東大東京カレッジ^E吉持遥人^A, 高木里奈^{A, B}, Nguyen D. Khanh^C, 齋藤開^C, Ju Jiwon^C,中島多朗^{C, D}, 十倉好紀^{A, D, E}, 関真一郎^{A, B}

スキルミオンはトポロジカルに保護されたスピンの渦構造であり、超高密度で消費電力の少ない情報担体としての応用に向け積極的に研究が行われている。従来、DM相互作用がスキルミオンの形成に寄与しており、それゆえに反転対称性の破れた結晶構造が必要であると考えられてきた。しかしながら、近年では反転対称性の保たれた Gd 化合物において、遍歴電子を介した高次スピン相互作用によるスキルミオンの観測が報告されており [1-3]、大きな注目を集めている。

そこで本研究では、この形成機構に基づいて現在世界最小のスキルミオン径を実現している GdRu_2Si_2 の類縁物質に注目して物性測定を行った。測定の結果、磁化のステップ構造に対応して、ホール抵抗率の磁場依存性に複数の急峻なピーク構造が確認された。これらの結果は、本物質においてスキルミオン相が実現していることを示すのみならず、一つの物質の相図において複数のスキルミオン相が存在していることを示唆する興味深い結果である。本発表では、ホール抵抗率の特異的な振る舞いや、中性子散乱実験の結果を踏まえた本物質における磁気構造について議論する。

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

[2] M. Hirschberger *et al.*, *Nature Communications* **10**, 5831 (2019).

[3] N. D. Khanh, S. Seki *et al.*, *Nature Nanotechnology* **15**, 224424 (2020).

自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体を含むサンドイッチ構造における スキルミオンの電氣的観測

Electrical observation of skyrmions in a sandwich structure incorporating
self-assembled ferromagnetic topological insulators

東大理, IACP FES RAS ^A, Far Eastern Federal Univ. ^B, 東工大理 ^C, 物材研究機構 ^D

高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev^{A,B}, A. V. Matetskiy^{A,B}, 中西亮介, 佐藤瞬亮, 平原徹 ^C, 深澤拓朗 ^C, 佐々木泰祐 ^D, 宝野和博 ^D, 遠山晴子, 樋渡功太, A. V. Zotov^{A,B}, A. A. Saranin^{A,B}, 長谷川修司

トポロジカル絶縁体(TI)の持つ spin helical/chiral 状態では、電子のスピンの自由度がトポロジカルに保護され新規な物性が期待できることから大きな注目を集めている。特に磁気秩序が付与された TI(強磁性 TI: FMTI)では、従来観測が困難であった表面状態の spin chirality の性質が、実空間上のトポロジカルに非自明な磁気スキルミオン(Sk)となって観測可能であると提案され[1]盛んに研究がなされている。本研究では、フェルミ準位の制御が可能な、磁性元素 Mn が自己形成的に単原子層に配列した FMTI 層状物質 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$ (MnBST, 図 1(a))に着目し、トポロジカルホール効果の測定を通じて Sk の観測に成功した。本系では 2 層の MnBST に対してスペーサーとして非磁性 TI を導入したサンドイッチ構造を作製して面間反強磁性相互作用を抑制し(図 1(b)(c))、さらにスペーサー厚を調整することで、MnBST 間の相互作用を系統的に変化させ Sk 発現状態を制御することに成功し、自己形成構造由来の、従来よりも“軟磁性”的な Sk 生成を観測した。 [1] K. Yasuda *et al.* Nat. Phys. **12**, 555-559 (2016).

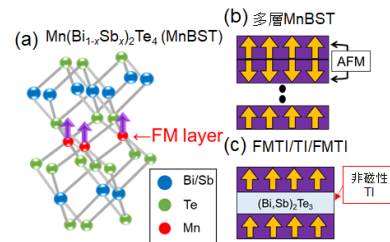


図 1. (a)MnBST ユニット層 (b) 多層構造 (c)サンドイッチ構造

スピン液体物質 $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ におけるスピノンフェルミ面の探索

Search for the Spinon Fermi surface in the spin liquid material, $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室 修士二年

清水 康司, 宮川 和也, 浦井 瑞紀, 竹原 陵介, 小濱 芳允, 野村 肇宏, 下起 敬史,

三宅 厚志, 佐々木 孝彦, 鹿野田 一司

有機物質 $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ は常圧でモット絶縁体であり、等方的二次元三角格子として理解される。幾何学的フラストレーションによりスピン液体状態を実現していると考えられているが、スピン励起におけるギャップの有無が議論されている。磁気励起がギャップレスなスピン液体を説明するモデルの候補としてスピンの自由度(スピノン)がフェルミ面を形成しているとする描像が理論的に提案されている。本研究では $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ におけるスピノンフェルミ面の有無を実験的に検証することを目的として磁気抵抗測定、磁気トルク測定、磁気熱量効果測定、誘電率測定により量子振動の観測を試みた。結果として強磁場においても量子振動は得られず、スピノンフェルミ面が存在しないことが示唆された。また、 $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ は 6K に相転移またはクロスオーバーのような物理量の異常な振る舞いがいくつも観測されている。このスピン液体における異常を調べることを目的として $^1\text{H-NMR}$ 測定を行った。その結果緩和時間 T_1 の逆数が 50K 以下から 5K まで活性化の振る舞いを示し、スピノンフェルミ面が存在しないことと矛盾しない結果が得られた。5K で T_1 の逆数が増大し、3K にピークをもつことが分かった。5K 以下で発達した磁気的な揺らぎが低温で抑えられることから、5K 以下における磁気的な組織の形成が示唆された

Synthesis of $\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_{1+x}\text{O}_5$ Solid Solution Thin Films by Pulsed Laser Deposition and Their Magnetic Properties

Tabata/Matsui/Seki Lab, Department of Electrical Engineering and Information Systems,
Graduate School of Engineering

Haining Li (M1), Hiroyasu Yamahara, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata

Iron titanium oxide (Fe_2TiO_5 , pseudobrookite) with orthorhombic structure have been well investigated and its solid solution ($\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_{1+x}\text{O}_5$; FTO) thin films are potential candidates for magnetic semiconductor materials in spintronics. Herein, we offer a report on the successful fabrication of a series of FTO ($0 \leq x \leq 0.7$) films grown on SrTiO_3 (100) substrates by pulsed laser deposition. The single phase with crystal orientation of (230) is revealed in XRD patterns and the changing proportions of Fe^{3+} and Fe^{2+} ions are confirmed and calculated by curve fittings on Fe $2p_{3/2}$ peaks in X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The indirect bandgap energy of insulator Fe_2TiO_5 is obtained to be about 2.1 eV. The measurements of Seebeck effect and electrical resistivity show that metallic $\text{Fe}_{1.7}\text{Ti}_{1.3}\text{O}_5$, semiconducting $\text{Fe}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_5$ and insulating $\text{Fe}_{1.3}\text{Ti}_{1.7}\text{O}_5$ were all *n*-type oxides. The films with higher Ti content *x* exhibit significant room-temperature ferromagnetic properties, which is closely related to the different ratios of Fe^{2+} , Fe^{3+} and Ti^{4+} . It is worth noting that $\text{Fe}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_5$ and $\text{Fe}_{1.3}\text{Ti}_{1.7}\text{O}_5$ films not only show promising thermoelectric properties with giant Seebeck coefficients, but also own ferromagnetic behaviors above room temperature (400 K). The results of this research possibly lay a solid foundation for future cost-effective spintronics applications of FTO films.

Giant magneto-optical responses in magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$

工学系研究科物理工学専攻高橋研究室 岡村嘉大

見波将、加藤喜大、藤代有絵子、金子良夫、池田絢哉、村本文、金子竜馬、上田健太郎、V. Kocsis、
金澤直也、田口康二郎、是常隆、藤原宏平、塚崎敦、有田亮太郎、十倉好紀、高橋陽太郎

The search for the topological materials has been rapidly developed in recent years. In particular, the discovery of the Weyl semimetal (WSM), which has a pair of the Wey points (WPs) with intense Berry curvature, is the important advance in this field. While the WPs in this novel class of materials potentially exhibit various giant/functional electromagnetic phenomena [1], the direct evidence is still lacking. In this presentation, we will report the magneto-optical study on the recently discovered magnetic WSM $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ with the giant anomalous Hall effect (AHE) [2,3]. The magneto-optical Faraday/Kerr effect and first-principles calculations reveal that the optical Hall conductivity spectra are dominated by the interband transition upon the nodal ring structures and the WPs (Fig. 1), which demonstrates that those electronic structures play the decisive roles for the giant intrinsic AHE. The magneto-optical signals are also exceptionally large compared with the conventional ferromagnetic metals, which exemplifies the intriguing functionality of the WSM.

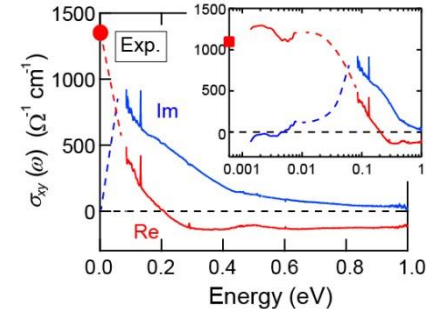


Fig.1: Giant optical Hall conductivity in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$.

- [1] N. P. Armitage, *et al.*, Rev. Mod. Phys. **90**, 015001 (2018). [2] E. Liu, *et al.*, Nat. Phys. **14**, 1125 (2018). [3] Y. Okamura *et al.*, Nat. Commun. **11**, 4619 (2020).

Novel Approach Towards Luminescent Ratiometric Thermometry Based on the Re-Absorption Effect of Ho(III) Molecular Nanomagnets

Solid State Physical Chemistry Lab, Department of Chemistry, Graduate School of Science

Junhao Wang, Jakub J. Zakrzewski, Mikolaj Zychowicz, Koji Nakabayashi,
Szymon Choazy, and Shin-ichi Ohkoshi

Thanks to the large single-ion magnetic anisotropies and well-structured f electronic levels of trivalent lanthanide ions (Ln^{III}), molecular materials based on Ln^{III} can often exhibit functionalities of the single-molecule magnets (SMMs) and luminescent ratiometric thermometry. In this work, we explored these two functionalities in a series of CN-bridged d-f dinuclear molecules, $\{[\text{Ho}^{\text{III}}(4\text{-pyridone})_4(\text{H}_2\text{O})_2][\text{M}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M} = \text{Co}$, **1**; Rh , **2**; Ir , **3**) and their respective magnetically diluted samples **1@Y-3@Y**. By *ac* magnetic characterization, the zero-field SMM behaviors for Ho^{III} center were observed in all samples. Photoluminescence study on **1@Y-3@Y** revealed broad emission band from 4-pyridone ligand, dented by a series of highly thermal-dependent re-absorption lines of the Ho^{III} f-f electronic transitions, giving rise to highly sensitive ratiometric thermometric calibration curves, which is a novel design approach towards optical thermometer.

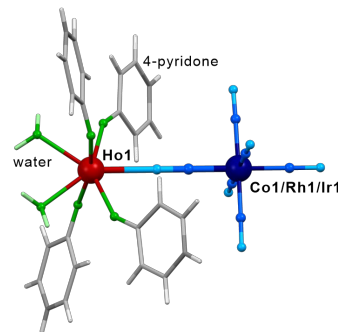


Fig 1. Structure of **1-3**

[1] J. Wang, S. Chorazy, S. Ohkoshi et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **142**, 3970–3979 (2020).

[2] J. Wang, S. Chorazy, S. Ohkoshi et al., *Chem. Sci.*, **12**, 730–741 (2021).

銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の光励起非平衡状態

Photo-excited nonequilibrium state of a high-temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$

東大理^A, 阪大理^B, 東大低温セ^C

勝見 恒太^A, 西田 森彦^A, 宮坂 茂樹^B, 田島 節子^B, 島野 亮^{A,C}

近年、銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)に中赤外光パルス(波長 15 μm)を照射して頂点酸素フォノンを共鳴励起すると、超伝導転移温度 T_c 以上でテラヘルツ(THz)周波数帯の c 軸光学伝導度の虚部 $\sigma_2(\omega)$ が過渡的に増大する様子が観測され、光誘起超伝導と解釈された[1,2]。しかし、同様の $\sigma_2(\omega)$ の過渡的な増大が近赤外光パルス励起によっても観測され、常伝導状態における準粒子とする解釈が主張されるなど[3]、YBCO における光励起状態相の解釈は未だ定まっていない。そこで我々は、超伝導秩序の発現をピコ秒の時間分解能で測定可能なヒッグスモード[4]やジョセフソン・プラズマ共鳴(JPR)[5]といった超伝導秩序の集団励起に起因する THz 非線形光学応答を用いて、光励起による $\sigma_2(\omega)$ の過渡的な増大の起源を解明することを目指した。

不足ドープ YBCO に対して近赤外光ポンプ・THz 反射プローブ分光を行うと、 T_c 以下では光励起によって THz 周波数帯の反射率に現れる JPR の周波数がレッドシフトし、平衡状態の超伝導秩序が破壊されることがわかった。一方、 T_c 以上ではフォノン共鳴励起の先行研究 [1,2]で光誘起超伝導と解釈されている $\sigma_2(\omega)$ の過渡的な増大を観測した。講演ではこの光励起後の過渡的な $\sigma_2(\omega)$ の増大の起源について、光励起後の THz 非線形光学応答と合わせて議論する。

[1] W. Hu *et al.*, Nat. Mat. **13**, 705 (2014) [2] S. Kaiser *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 184516 (2014)

[3] S. J. Zhang *et al.*, Phys. Rev. X, **10**, 011056 (2020) [4] K. Katsumi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 117001 (2018)

[5] S. Rajasekaran *et al.*, Science **359**, 575 (2018)

Gate-controlled two-dimensional carrier transport at the $\text{FeO}_y/\text{SrTiO}_3$ interface

Department of Electrical Engineering and Information Systems, Tanaka-Ohya Group

Theodorus Jonathan Wijaya, Le Duc Anh, Shingo Kaneta-Takada,
Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya

The recently found two-dimensional (2D) hole gas (2DHG), which has an ultrahigh mobility up to $24,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ at 2.0 K, and 2D electron gas (2DEG) formed at the $\text{FeO}_y/\text{SrTiO}_3$ (STO) interface are expected to provide a new platform for oxide-based electronics [1]. Here, using a back-gate configuration [Fig. 1], we demonstrate for the first time a gate control of the carrier type and mobility of the 2D carrier gas at this interface. The samples were formed by depositing Al (1.0 nm)/Fe (0.75 – 4.0 Å) on STO (001) substrates using molecular beam epitaxy. For all the samples, the carrier type was transformed from n-type to p-type with increasing gate voltage above a threshold value, which varies among samples. This suggests a complicated band structure of this 2D system. Furthermore, at low temperatures ($\sim 3.5 \text{ K}$), these devices exhibit excellent transistor features with subthreshold swing values of $\sim 30 \text{ mV/dec}$ and on-off ratios of $\sim 10^8$. These results provide insights into the formation mechanism of the 2DHG at the FeO_y/STO interface, as well as highlight the possibility of high-performance field-effect transistors based on the 2D carrier gas on STO substrates.

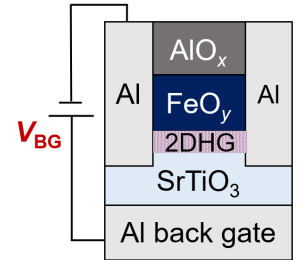


Fig. 1: Schematic cross-sectional structure of the $\text{AlO}_x/\text{FeO}_y/\text{STO}$ samples with Al back gate and contact pads.

[1] L. D. Anh *et al.*, *Adv. Mater.* **32**, 1906003 (2020).

トポロジカル絶縁体(Bi,Sb)₂Te₃／超伝導体 PdTe₂ 接合における非相反輸送現象

工学系研究科・物理工学専攻・D2(十倉・金澤研究室)

増子真, 池田侑哉, 渡邊竜太, 吉見龍太郎, 川村稔, 塚崎敦,

Denis Maryenko, 高橋圭, 川崎雅司, 十倉好紀

トポロジカル絶縁体の表面には、スピン-運動量ロックを伴うディラック型の 2 次元状態が現れる。トポロジカル絶縁体に超伝導体を貼り合わせると、超伝導体中のクーパー対の侵入によりトポロジカル絶縁体の表面状態に超伝導を誘起することができる。超伝導近接効果により誘起されたこの超伝導はトポロジカル超伝導となることが理論的に指摘されており[1](図 1)、電気的に中性なマヨラナフェルミオンが渦糸コアや試料端に現れると期待され精力的に研究されている。

本研究では、分子線エピタキシー法により作製したトポロジカル絶縁体 (Bi,Sb)₂Te₃／超伝導体 PdTe₂ 薄膜を対象に、非相反輸送測定を行った。電荷輸送の非相反性とは電流 I の印加方向により電気抵抗 R の大きさが異なる ($R(+I) \neq R(-I)$) 現象であり、近接効果によるトポロジカル超伝導体は磁場下で非相反性を示すことが理論的に期待されている[2]。発表では、非相反応答の系統的な測定から、超伝導近接効果によりトポロジカル超伝導が生じている可能性について議論する。

[1] L. Fu and C. L. Kane, PRL **100**, 096407 (2008) [2] S. Hoshino *et al.*, PRB **98**, 054510 (2018)

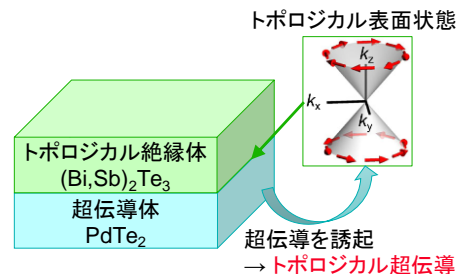


図 1: 近接効果によるトポロジカル超伝導の形成の概念図。

高性能有機発光デバイスを実現する直鎖連結型芳香族分子の開発

Acyclic, Linear *meta*-phenylenes as Multipotent Base Materials for Highly Efficient Single-layer Organic Light-emitting Devices

理学系研究科・化学専攻・磯部研究室

○尾仲柚香・芳井朝美・池本晃喜・泉倫生・佐藤宗太・北弘志・高秀雄・磯部寛之

単層構成の有機発光デバイス (OLED) は、一般的な多層 OLED と比べ、簡単にデバイス作製可能であるという利点を持つ。本研究では、既に単層 OLED 基盤材料として機能することを見出している 5Me-cyclo-*meta*-phenylene (5Me-[5]CMP) の環状構造を鎖状構造とした Linear [5]oligo-*meta*-phenylene ([5]LOMP) を設計・合成し、単層 OLED 材料としての構造活性相関研究を行った[1]。[5]LOMP **1-3** の合成を行い、蒸着法によって単層 OLED を作製した。その結果、**1** を用いた単層 OLED にて、理論上限に迫る外部発光量子効率 (EQE) 20.1%を実現した。正孔移動に伴う電流密度 (J) を測定したところ、発光剤導入前後での電流密度比 ($\%J_{\text{dope}}/J_{\text{neat}}$) が、**1** を用いたデバイスのみで、ほぼ 0 となっていることが分かった。すなわち発光剤添加により正孔移動が劇的に遅延され、それが高効率発光の鍵となっていることが示唆された。

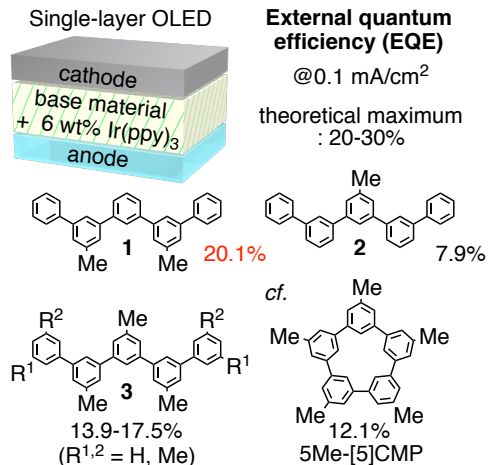


図 1: LOMP の単層 OLED 性能

[1] A. Yoshii, Y. Onaka, K. Ikemoto, T. Izumi, S. Sato, H. Kita, H. Taka, H. Isobe, Chem. Asian J. **15**, 2181 (2020).

Nonlinear transport in 2D Rashba superconductor SrTiO₃

工学系研究科物理工学専攻 岩佐研究室¹, UCSB², 理研 CEMS³,
 Central Research Institute of Electric Power Industry⁴, 東北大金研⁵
 Yuki Itahashi¹, Toshiya Ideue¹, Yu Saito^{1,2}, Sunao Shimizu^{3,4}, Takumi Ouchi⁵,
 Tsutomu Nojima⁵, Yoshihiro Iwasa^{1,3}

Polar conductors with Rashba-type spin-orbit coupling is a potential material platform for exotic quantum transport and spintronic functionalities [1,2]. One of their inherent properties is the nonreciprocal transport, where the magnetoresistance becomes inequivalent between the rightward and leftward current directions, due to breaking of both spatial inversion and time reversal symmetries. Such a rectification effect reflecting polar symmetry has been studied at the interface or bulk polar semiconductor [3,4]. Here we have reported nonreciprocal transport in polar superconductivity achieved in gated SrTiO₃. We found the gigantic enhancement in the nonlinear resistance in the amplitude and phase fluctuation regions [5]. Also, we discuss possible origins of nonreciprocity in the 2D Rashba superconductor, such as paraconductivity with a parity mixing in the Cooper pairs and rectified vortex motions.

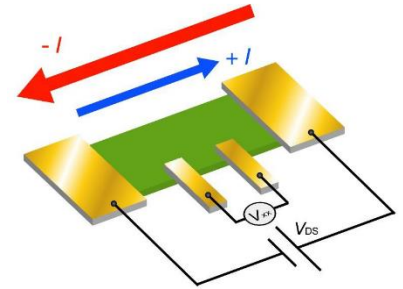


図1 非相伝導現象の概念図

- [1] E. Lesne *et al.*, *Nat. Mater.* **15**, 1261–1266 (2016). [2] R. Ohshima *et al.*, *Nat. Mater.* **16**, 609–614 (2017).
 [3] P. He *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 266802 (2018). [4] T. Ideue *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 578–584 (2017).
 [5] Y. M. Itahashi *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eaay9120 (2020).

マグノニクスへの応用に向けたスピネルフェライト薄膜の磁気特性の制御

Control of Magnetic properties of spinel ferrite thin film towards their application in magnonics

工学系研究科・電気系専攻・田畑研究室

唐思逸, Sarker Md Shamim, 山原弘靖, 関宗俊, 田畑仁

Spin-wave (SW)-based devices have been envisioned to require much less energy to operate than their electronics counterparts due to negligible Joule heating. As a critical parameter of magnetic materials, low Gilbert damping is required for the efficient propagation and modulation of the spin wave. With low damping constant, the spin wave can be propagated in nanoscale devices without the flow of charge for long distance [1]. Here we focused on the spinel-type γ -Fe₂O₃ and MgFe₂O₄ as the candidate materials. They have good lattice matching with other crystal systems, in contrast to the conventional garnet-type ferrites which have been intensively investigated as a candidate for SW applications.

Thin films were synthesized on single-crystal substrates of MgAl₂O₄ (100) by pulsed laser deposition from a polycrystalline target of stoichiometric γ -Fe₂O₃ or MgFe₂O₄. The oxygen pressure and growth temperature were maintained at 1 Pa 600~800°C, respectively. Structural characterization by x-ray diffraction (XRD) reveals that both epitaxial spinel-type γ -Fe₂O₃ and MgFe₂O₄ films attain coherent epitaxial growth. The γ -Fe₂O₃ film with thickness of ~50 nm shows soft magnetism with weak spin-orbit coupling, with low coercive field of about 60 Oe. And it also shows ferromagnetic behaviors at room temperature as shown in Fig. 1. The Gilbert damping constant was determined as ~0.03 by the measurement of electron spin resonance. [2]

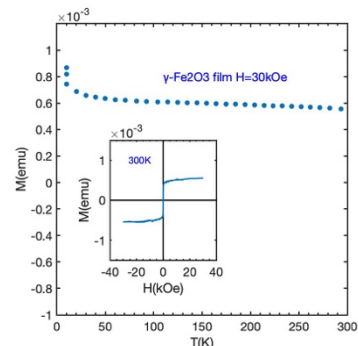


Figure 1. Temperature dependence of the magnetization for the γ -Fe₂O₃ film. Inset shows M-H loop of the γ -Fe₂O₃ film.

[1]A. Hoffmann and S. D. Bader, Phys. Rev. Appl., vol. 4, no. 4, p. 047001, Oct. 2015, doi: 10.1103/PhysRevApplied.4.047001.

[2]A. Layadi, AIP Adv., vol. 5, no. 5, p. 057113, May 2015, doi: 10.1063/1.4920940.

Pbドーピング SrRuO₃ 薄膜における強磁性と異常ホール効果の相関Evolution of ferromagnetism and anomalous Hall effect in Pb doped SrRuO₃ thin films

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室

張 灵飛、藤田 貴啓、川崎 雅司

SrRuO₃ は 160 K の転移温度を持つ遍歴強磁性体であり、A サイトに Ca²⁺、Ba²⁺ をドーピングすることで磁気的な性質が変化することが知られている[1]。その転移温度の変化は格子の体積や RuO₆ の歪みに強く関係していると考えられている。一方、イオン半径が Sr²⁺ と Ba²⁺ の間にある Pb²⁺ をドーピングすると、全ドーピング領域で強磁性となる Ba²⁺ ドーピングの場合とは異なり、強磁性相が約 60%ドーピングの時に消失することがバルク多結晶によって報告されている[2]。本研究では、Sr_{1-x}Pb_xRuO₃ 単結晶薄膜を作製し、その強磁性相および磁気輸送特性、特に異常ホール効果の変化を評価した。

縦抵抗の温度依存性のキック及び異常ホール効果のヒステリシスから強磁性転移温度を見積り、転移温度はバルクより低く、強磁性相はバルク多結晶と同じく約 $x = 0.6$ で消失することが分かった。図 1 の異常ホール角の温度依存性から、Pb ドーピングを少量ドーピングした場合、異常ホール効果は SrRuO₃ と同じく符号反転が起きているのに対し、Pb をさらにドーピングすると符号反転が消失することが分かった。

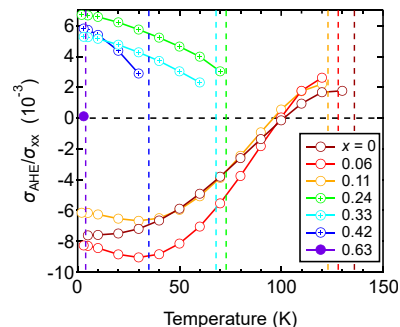


図 1 Sr_{1-x}Pb_xRuO₃ ($0 \leq x \leq 0.63$) の異常ホール角の温度依存性。

[1] J.-G. Cheng *et al.*, PNAS **110**, 33 (2013).

[2] J.-G. Cheng *et al.*, PRB **81**, 134412 (2010).

Magnetic properties of high Rh substituted epsilon iron oxide

Solid State Physical Chemistry Laboratory, Department of Chemistry, School of Science

Seiya Tsukamoto, Asuka Namai, Marie Yoshikiyo, Shin-ichi Ohkoshi

Epsilon iron oxide (ϵ -Fe₂O₃) is one of the Fe₂O₃ phases (Figure 1), which is stable in nanometer-size region. In 2004, our group firstly obtained single phase ϵ -Fe₂O₃ and reported that it has a large coercive field (H_c) over 20 kOe in nanometer-size region[1]. This H_c value is largest value among the metal oxides. Our group also reported rhodium substituted ϵ -Fe₂O₃ and it has larger coercive field value 28.1 kOe with ϵ -Rh_{0.19}Fe_{1.81}O₃[2].

In this study, the synthesis of Rh substituted ϵ -Fe₂O₃ was investigated by using sol-gel method using ferrihydroxide nanoparticle as a starting material to investigate high Rh substitution. The X-ray diffraction (XRD) pattern and elemental analysis indicated that the sample contains ϵ -Rh_xFe_{2-x}O₃ (~60%) and the x value was estimated to be $x = 0.27$. The magnetic hysteresis of Rh_{0.27}Fe_{1.73}O₃ at 300 K measured by superconducting quantum interference device (SQUID) shows that magnetic hysteresis loop did not close up to 70 kOe, which indicates the large magnetic anisotropy.

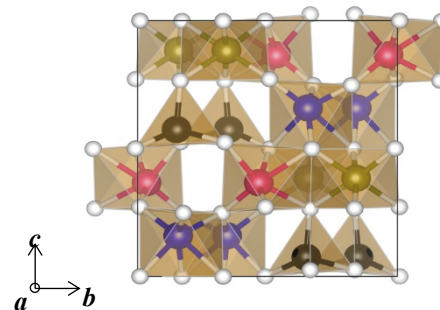


Figure1: The crystal structure of ϵ - Fe₂O₃

[1] J. Jin, S. Ohkoshi, and K. Hashimoto, *Adv. Mater.*, **16**, 48 (2004).

[2] A. Namai *et al.*, *J. Mater. Chem. C*, **1**, 5200 (2013).

中赤外励起されたストライプ系銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ のテラヘルツ分光
Terahertz spectroscopy of MIR-pumped stripe-ordered cuprate superconductor
 $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

^A 理学系研究科・物理学専攻・島野研究室, ^B 産総研・電子光技術研究部門, ^C 低温科学研究センター・
研究開発部門

^AShimano Group, Department of Physics, ^BAIST, ^CCryogenic Research Center

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

Morihiko Nishida^A, Kota Katsumi^A, Dongjoon Song^B, Hiroshi Eisaki^B, Ryo Shimano^{A, C}

銅酸化物超伝導体では超伝導相の他にも電荷・スピン密度波など多彩な相が発現し、超伝導との競合・共存を理解することが重要となっている。なかでも、電荷とスピンが整列するストライプ秩序は超伝導と競合することが知られており、静的な圧力を加えてストライプ秩序を破壊すると超伝導転移温度が上昇することも観測されている[1]。また、高強度の中赤外光を照射すると、光誘起超伝導を示唆するテラヘルツ帯反射率スペクトルが発現することが報告されている [2]。一方でストライプ秩序自体の光励起による変化については十分に調べられておらず、ストライプ秩序と超伝導の競合関係の理解に向けてこの点を明らかにする必要がある。そこで本研究ではストライプ秩序相における光ポンプテラヘルツプローブ測定を行った。本発表ではその詳細を報告し、光誘起状態、電荷・スピンストライプのダイナミクスについて議論する。

[1] Z. Guguchia et al., Phys. Rev. Lett. 125, 097005 (2020).

[2] D. Fausti et al., Science 331, 189-191 (2011).

キラルな反強磁性体における巨大な異常ホール効果 Large Anomalous Hall effect in the chiral-lattice antiferromagnet

東大工^A, 東大物性研^B, 東大理^C, 東北大金研^D,
東大 OPEC^E, 理研 CEMS^F, 東京カレッジ^G

高木寛貴^A, 高木里奈^A, 中島多朗^B, 齋藤開^B, 野本拓也^A, 見波将^C, 鈴木通人^D, 柳有起^D, 平山元昭^E,
カーン・ドゥイ・ヌイエン^B, 軽部皓介^F, 橋爪大輔^F, 十倉好紀^{A,F,G}, 有田亮太郎^A, 関真一郎^A

従来、異常ホール効果は強磁性体中で磁化に比例して現れるホール効果として知られていた。しかし現在では、物質中の電子のみが感じる仮想的な磁場である創発磁場に起因した非自明な異常ホール効果[1]が存在し、磁化を持たない反強磁性体においても巨大な異常ホール効果が発現することが知られている。具体的には、Mn3Sn[2]などが知られており、トポロジーによって保護されたワイルノードに由来した巨大な創発磁場の存在が示されている。このような物質群は、巨大な異常ホール効果などの新しい量子機能を提供する革新的なプラットフォームとして注目を集めている。

本研究では、キラルな反強磁性体に着目し、巨大な異常ホール効果を示すことを発見し、中性子散乱実験から磁気変調ベクトルが $q=(0.5,0.5,0)$ であることを見出したのでこれを報告する。また、候補となる磁気構造についても議論する。

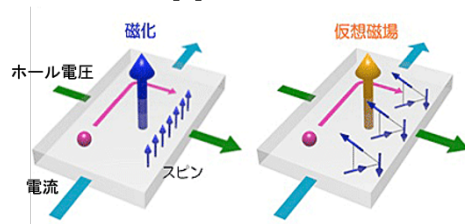


図 1 異常ホール効果の概念図

[1] N. Nagaosa et al., Reviews of modern physics **82**, 1539 (2010).

[2] S. Nakatsuji et al., Nature **527**, 212-215 (2015).

Fe/MgO/a-Ge/MgO/Feからなる縦型スピバルブ素子における磁気抵抗効果の観測 Observation of magnetoresistance in Fe/MgO/a-Ge/MgO/ Fe vertical spin valve devices

工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢研究室
但野由梨子、鈴木亮太、田中雅明、大矢忍

スピントロニクスでは、従来のエレクトロニクスで用いられてきた電子の電荷だけでなく、電子が持っている「スピン」を用いることにより、スピン MOSFET[1]をはじめとする新たな機能性を有したデバイスの実現を目指している。縦型スピン MOSFET は、横型の構造に対してチャンネル長を短くすることが容易であることから、高い磁気抵抗(MR)比を得られることが示された[2]。しかし、縦型スピン MOSFET を構成するヘテロ構造を実現する材料系は非常に限られている。本研究においては、MgO (001)上に製膜した Co (20 nm)/ Fe (20 nm)/ MgO (2 nm)/ *amorphous(a)*-Ge (1 nm)/ MgO (2 nm)/ Fe (100 nm) 構造を用いて縦型スピバルブ素子を作製し、3.7 K で 1.1%程度の MR 比を観測することに成功した。

- [1] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. 84, 2307 (2004).
[2] T. Kanaki et al., Appl. Phys. Lett. 107, 242401 (2015).

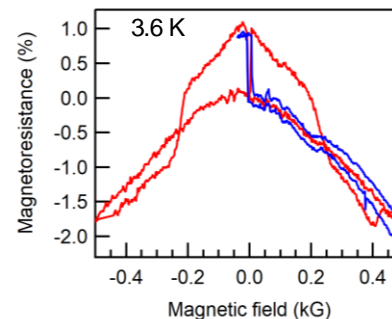


Fig. 1 MR curve observed at 3.7 K with a bias voltage $V = 10$ mV. The magnetic field H was applied in plane along the [100] direction, which is the easy magnetization axis of the Fe layers.

カイラル反強磁性体 CoNb_3S_6 における巨大異常ホール効果Large magneto-optical effect on chiral antiferromagnet CoNb_3S_6 工学系研究科物理工学専攻^A、理研 CEMS^B、東大東京カレッジ^C林悠大^A、岡村嘉大^A、カーン・ヌイエン^B、関真一郎^A、十倉好紀^{A,B,C}、高橋陽太郎^A

異常ホール効果は自発磁化が重要な役割を果たすホール効果であると考えられてきた。しかし近年、自発磁化をほとんど持たない系である反強磁性体において大きな異常ホール効果が発見され注目を集めている。その代表例と言えるのがノンコリニアなスピン構造を持つ反強磁性体 Mn_3Sn である[1]。近年ではさらに、スピンが反平行な配置をとる反強磁性体 RuO_2 でも、結晶の対称性に由来して異常ホール効果を示すことが発見された[2]。しかしこれまで、これらの反強磁性体における異常ホール効果がバンド構造に起因する内因的な機構によって引き起こされているものなのか直接検証した研究はなかった。

本研究では、大きな異常ホール効果を示すスピニコリニア反強磁性体 CoNb_3S_6 における低エネルギー領域の磁気光学効果の研究を行った。 CoNb_3S_6 はカイラルな結晶構造を持ち、バンド計算によりフェルミレベル付近での Berry 曲率が異常ホール効果を引き起こすとされている[3]。今回得られた赤外領域での磁気光学カー回転スペクトルは 10 K では 1 mrad を超える大きさになった。本研究ではさらにホール伝導度スペクトルを算出し、異常ホール効果に寄与する光学遷移を議論した。

[1] S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015). [2] Z. Feng *et al.*, arXiv:2002.08712 (2021). [3] N. J. Ghimire *et al.*, Nat. Commun. **9**, 3280 (2018).

マルチフェロイック六方晶 $R\text{FeO}_3$ の室温反強誘電性について

Room-Temperature Antiferroelectricity in Multiferroic Hexagonal Rare-earth Ferrites

理学系研究科化学専攻固体化学研究室

Jun Kasahara

Multiferroic materials, which exhibit both magnetic and electric orders, have been intensively explored due to their extraordinary properties and a wide range of applications. Among various multiferroic materials, hexagonal rare-earth manganites and ferrites ($h\text{-RMnO}_3$ and $h\text{-RFeO}_3$, respectively) are promising because of their high ferroelectric (FE) ordering temperatures (> 800 K) and intimate coupling between magnetic and FE domains [1]. The FE properties can be modulated by changing the ionic size of R . For example, when R is relatively large, $h\text{-RMnO}_3$ shows antiferroelectric (AFE) properties. However, to date, the AFE phase of $h\text{-RMn(Fe)O}_3$ has been observed only in a narrow temperature range (60–160 K), which restricts magnetoelectric applications. In this study, I successfully expanded the temperature range of AFE phase (10–300 K) by preparing $h\text{-DyFeO}_3$ ($h\text{-DFO}$) films with a low c/a ratio through epitaxial stabilization. In addition, I found weak ferromagnetism and unusual magnetocapacitance (MC) behaviors such as an M-shaped MC versus magnetic field (H) curve.

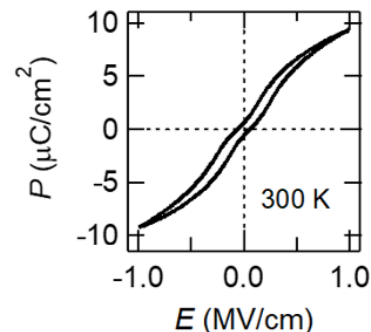


Figure 1. P - E (a) curve of the $h\text{-DFO}$ film measured at 300 K and 5 kHz

[1] H. Das *et al.*, *Nat. Commun.* **5**, 2998 (2014)

^{13}C -NMR study of superconductivity in a doped spin liquid candidate

工学系研究科物理工学専攻、埼玉大学理学部物理学科 ^A
 若松浩大、上野祥広、宮川和也、谷口弘三 ^A、鹿野田一司

本研究の対象物質である κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ (以下 κ -HgBr) は擬 2 次元有機超伝導体である。 κ -HgBr は絶縁層と伝導層の格子不整合により実効的なキャリアドーピングが実現している、有機伝導体では例外的な系である。スピン自由度は局在スピンのため、その温度依存性は、絶対零度でも磁気秩序を示さない「スピン液体」と一致している[1]。一方、電荷自由度は金属的であり、低温で超伝導になる ($T_c \sim 4 \text{ K}$)。以上から、 κ -HgBr は「スピン液体」にキャリアドーピングされた、これまで例のない系であり、その特異な電子・スピン状態、超伝導の性質に大きな関心が寄せられる。本研究では微視的なプローブである NMR により、電子・スピン状態の静的・動的な性質や超伝導の詳細を捉えることを目的とした実験を行った。スピン磁化率と緩和率の測定により、①ギャップにラインノードを有するスピンシングレット超伝導であること、②スピンの静的・動的な性質がともにスピン液体のものに対応することの 2 点が明らかとなった。発表では詳細を議論する予定である。

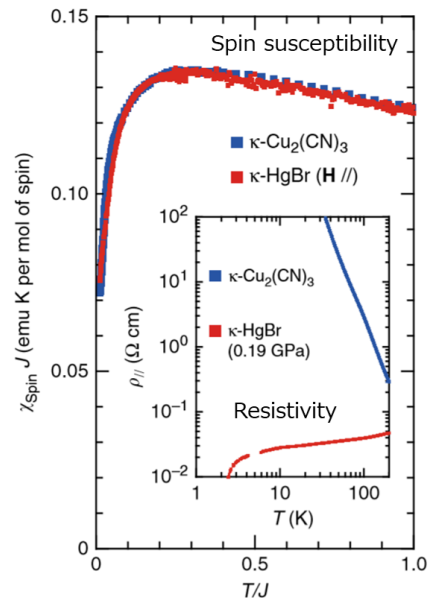


FIG.1. κ -HgBr のスピン磁化率と電気抵抗の温度依存性[1]。

[1] H. Oike, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 756 (2017).

Pb(Bi,Sb)₂(Te,Se)₄ トポロジカル絶縁体の作製と電気抵抗測定

Fabrication and electrical resistivity measurements of Pb(Bi,Sb)₂(Te,Se)₄ topological insulators

工学系研究科材料工学専攻 M2

杉本 恭一、服部 裕也、徳本 有紀、枝川 圭一

トポロジカル絶縁体(TI)は、特異な電子スピン構造を持ち、表面にスピン偏極したディラック粒子が存在している。しかし特殊な表面伝導の検出は(Bi,Sb)₂(Te,Se,S)₃(BSTS系)など、TIのうちごく一部の系に限られている[1]。TIの特殊な表面伝導を検出するために、バルクキャリアを低減しバルク絶縁性を向上させることが重要な課題となっている。本研究ではTIの中でもBSTS系に匹敵するバルクバンドギャップを持つPb(Bi,Sb)₂(Te,Se)₄を対象とし、Sb分率調節によるバルクキャリア抑制とSe分率調節によるバルクバンドギャップ増大の2つの面からバルク絶縁性を向上させることを目的とした[2-4]。(仕込みSb分率 x 、仕込みSe分率 y)=(0.80, 0.10),(0.80, 0.20),(0.82, 0.30)となるよう原料を秤量し、ブリッジマン法で結晶育成を行った。EPMAによる組成評価と粉末XRD測定による相の同定を行いPb(Bi_{1-x},Sb_x)₂(Te_{1-y},Se_y)₄単相領域から2×1×0.2 mm³程度の試料を切り出し、PPMSを用いて2~300 Kで電気抵抗測定、2 Kでホール測定を行った。その結果、いずれの仕込み組成の結晶からも電気抵抗率の温度依存性が絶縁体的な振る舞いを示す試料を得ることに成功したが、金属的な振る舞いを示すものと絶縁体的な振る舞いを示すものが共存していた。また、n型の試料とp型の試料が共存しており、バルクキャリア密度の大きさが試料ごとに異なっていた。そこで、電気抵抗率の温度依存性が絶縁体的振る舞いを示すミリスケール試料から局所的にバルク絶縁性が高い試料を得るため、FIB-SEMを用いて20×10×10 μm³程度のマイクロスケール試料を切り出し、2~300 Kで電気抵抗測定を行った。(x, y)=(0.82, 0.30)のミリスケール試料から切り出したマイクロスケール試料から2 Kにおけるバルク抵抗率がいずれのミリスケール試料の2 Kにおけるバルク抵抗率を上回るものが得られた。詳細は発表で示す。

[1] S. K. Kushwaha et al., Nat. Commun. **7**, 11456 (2016). [2] Y. Hattori et al., Phys. Rev. Mater. **1**, 074201 (2017).

[3] Y. Hattori et al., Sci. Rep. **10**, 7957 (2020). [4] I. A. Shvets et al., Phys. Rev. B **96**, 235124 (2017).

4,4'-ジピリジルジスルフィドおよびシアニド配位子を用いたオクタシアニド金属磁性体 Octacyanidometalate-based magnet constructed of 4,4'-dipyridyl disulfide and cyanide ligands

理学系研究科・化学専攻・物性化学研究室 (大越研究室)

菅野 武文, 中林 耕二, 川畑 慎太郎, 井元 健太, 大越 慎一

Cyano-bridged metal assemblies enable us to achieve various attractive functionalities such as photo-magnetism by the incorporation of organic ligands.^[1] It is commonly known that the introduction of large-size ligands depresses the effective magnetic interaction between metal centers and lowers the dimensionality of the coordination framework, leading to a decrease in Curie temperature. 4,4'-dipyridyl disulfide (DPDS) is one such interesting bridging ligands because it not only shows structural flexibility but also various types of disulfide bond cleavages by photo, redox, and electrochemical reactions and so on. In this presentation, we report the crystal structure and the magnetic properties of bimetal assembly

$[\text{Mn}^{\text{II}}(\text{DPDS})_2]_2[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (**MnNb**). Single crystal X-ray structural analysis at 90 K (using liquid N₂) revealed that Mn^{II}-Nb^{IV} and Mn^{II}-Mn^{II} are bridged by cyanide ligands and DPDS, respectively, resulting in the three-dimensional network (**Fig 1**). Magnetic measurements (using liquid He) show that **MnNb** is a ferrimagnet with a critical temperature (T_c) of 48 K.

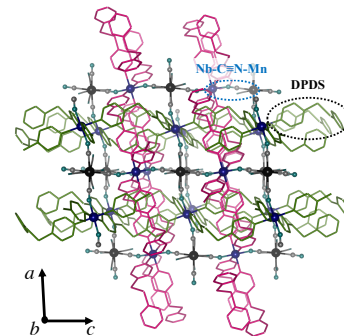


Fig 1. **MnNb** の結晶構造

[1] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, H. Tokoro. *Nature Photonics*, **2014**, 8, 65.

テラヘルツ波励起による 3R-Ta_{1+x}Se₂ 電荷密度波相の非平衡ダイナミクス
Nonequilibrium dynamics of charge-density-wave phase of 3R-Ta_{1+x}Se₂ induced by terahertz-wave excitation

¹理学系研究科 物理学専攻 島野研究室、²工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室、
³理研 CEMS、⁴低温科学研究センター 研究開発部門

¹Dept. Phys., ²Dept. Appl. Phys. ³RIKEN CEMS, ⁴Cryogenic Research Center

吉川尚孝¹、菅沼大貴¹、松岡秀樹²、田中勇貴²、中野匡規²、岩佐義宏^{2,3}、島野亮^{1,4}

**Naotaka Yoshikawa, Hiroki Suganuma, Hideki Matsuoka, Yuki Tanaka, Masaki Nakano,
Yoshihiro Iwasa, Ryo Shimano**

超伝導や電荷・スピン密度波などの複数相が共存する系の光励起状態においては、競合秩序の抑制による光誘起相転移や隠れた秩序相の発現など、興味深い現象が多く報告されている[1]。本研究では、電荷密度波相と超伝導相を示す V 族の遷移金属ダイカルコゲナイド 3R-Ta_{1+x}Se₂ 薄膜の電荷密度波相について、低エネルギー励起に着目して高強度テラヘルツ波励起による非平衡状態のダイナミクスを調べた。その結果、電荷密度波秩序と結合したフォノン振動を観測し、光学伝導度にはギャップ構造が現れることを見出した。観測された光学伝導度スペクトルのギャップ構造は平衡状態には現れないため、テラヘルツ波励起によって隠れた相へ転移したと考えられる。

[1] L. Stojchevska et al., Science **344**, 177 (2014).

2次元 BCS-BEC クロスオーバーにおける磁束状態

Vortex matter in two dimensional BCS-BEC crossover

工学系研究科・物理工学専攻・量子相エレクトロニクス研究センター

Max Heyl, 中川裕治, 板橋勇輝, 岩佐義宏

BCS(Bardeen-Cooper-Schrieffer)とBEC(Bose-Einstein Condensation)は、多フェルミ粒子系の量子凝縮状態の2つの極限である。これらの2つの極限は相転移ではなく連続的につながると考えられており、実験室系では冷却原子系がBECから、超伝導がBCSからクロスオーバーにアプローチする方法が取られている。超伝導系では、最近FeSe [1]やツイストグラフェン [2]などが発見され、この現象の理解が急激に進み始めているように思われる。

近年我々は、Liをインタカレーションした層状窒化物 Li_xZrNCl に対して、Li量を30%から0.4%まで2桁近く変化させることに成功し、未踏の低キャリア領域を実現することに成功し、トンネル分光と合わせて擬ギャップを含めた相図を決定するとともに、本系が2次元BCS-BECクロスオーバーを示す系であることを明らかにした[3]。 ZrNCl は六方晶系の単純な半導体でそれにキャリア数をドーピングして得られる少数キャリア超伝導体で、BCS-BECクロスオーバー現象のモデル物質になりうる系である。本研究では、クロスオーバー領域での磁束の振る舞いを調べたので報告する。

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

[2] Y. Cao *et al.*, *Nature* **556**, 43 (2018).

[3] Y. Nakagawa *et al.*, *arXiv:2012.05707*.

Epitaxial strain dependence of the magnetic anisotropy of *n*-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb studied by ferromagnetic resonance measurements

¹Dept. of EEIS, Univ. of Tokyo, ²IEI, Univ. of Tokyo, ³PRESTO, JST, ⁴CSRN, Univ. of Tokyo

Akhil Pillai¹, Shobhit Goel¹, Le Duc Anh^{1,2,3}, and Masaaki Tanaka^{1,4}

This work presents the first observation of ferromagnetic resonance (FMR) signal in the *n*-type ferromagnetic semiconductor (In_{1-x}Fe_x)Sb (*x* = 15%) [1] at room temperature and its dependence of magnetic anisotropy (MA) on epitaxial strain by FMR measurements. Epitaxial strain ranging from compressive (AlSb buffer) to tensile strain (InSb buffer) can be induced in (In,Fe)Sb by growing on different buffers. This study shows the change in sign of magneto-crystalline component (K_i) of MA from positive (perpendicular magnetization) to negative (in-plane magnetization) on changing the strain from compressive to tensile. In all the samples, shape anisotropy (K_{sh}) is negative in sign and larger than K_i . Thus, the effective magnetic anisotropy ($K_{eff} = K_{sh} + K_i$) is always negative, and we observe in-plane magnetic anisotropy (IMA) for all the samples. The behaviour observed is similar to that shown by (Ga,Fe)Sb [2].

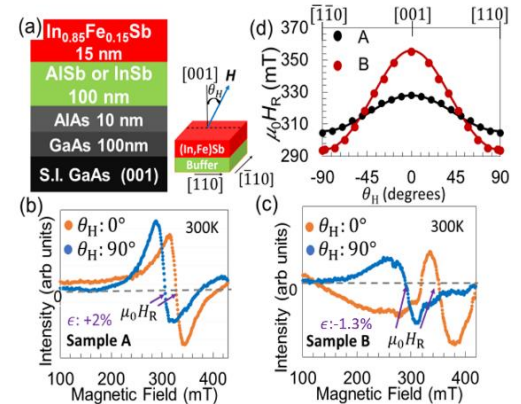


FIG. 1 (a) Sample structure. Inset shows the definition of θ_H and magnetic field H used in measurements. (b) FMR signals for (In,Fe)Sb/AlSb (Sample A) (c) FMR signals for (In,Fe)Sb/InSb (Sample B). (d) FMR resonant field $\mu_0 H_R$ vs. H direction θ_H in both samples. Dots and curves denote experimental data and fitting results, respectively.

[1] N.T. Tu et. al Appl. Phys. Express **11**, 063005 (2018)
 [2] Goel, et al. Phys. Rev. B **99**, 014431 (2019)

(Pb_{1-x}Sn_x)_{1-y}In_yTe 薄膜におけるソフトフォノンのテラヘルツ分光Terahertz spectroscopy of soft phonon in (Pb_{1-x}Sn_x)_{1-y}In_yTe thin film

工学系研究科 物理工学専攻 高橋(陽)研究室

半田光, 岡村嘉大, 吉見龍太郎, 塚崎敦, 高橋圭, 川崎雅司, 十倉好紀, 高橋陽太郎

物質の光駆動の最も重要な目標の 1 つとして強誘電相の超高速制御があげられる。例えば、量子常誘電体の SrTiO₃ のソフトモード励起はその代表的な候補であり、強励起効果[1,2]について非常に盛んに研究されてきた。しかし、相転移と関連したソフトフォノンの非線形ダイナミクスについては、未解明な点も多く、候補となる物質群も限られていた。本研究では強誘電かつポロジカル結晶絶縁体である SnTe と、自明な常誘電体である PbTe の混晶系に注目した。この系では強誘電性や電気伝導性を制御可能であり、ソフトフォノンのダイナミクスにアプローチする最適な系といえる。

本研究では絶縁体的な(Pb_{0.8}Sn_{0.2})_{0.9}In_{0.1}Te 薄膜においてテラヘルツ誘電率スペクトルの電場依存性を測定した。パルス面傾斜法を用い最大電場 630 kV/cm で測定を行った。電場強度の増大に伴って、ソフトフォノンの共鳴周波数が 0.4 THz から 0.8 THz にハード化する非線形な応答の観測に成功した(図 1)。また、この非線形応答を調和振動子モデルに非調和ポテンシャルを加えたモデル[2]を用いることで原子変位、フォノンポテンシャルを見積もることに成功した。

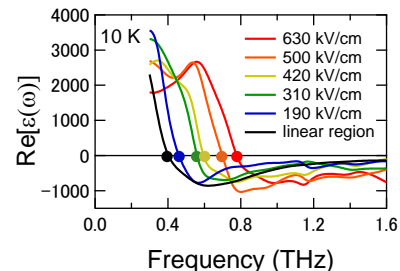


図 1: (Pb_{0.8}Sn_{0.2})_{0.9}In_{0.1}Te 薄膜の誘電率スペクトル

[1] X. Li *et al.*, Science **364**, 1079 (2019).

[2] I. Katayama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 097401 (2012).

固体内テラヘルツ回転を示す分子ベアリング

A molecular bearing enabling terahertz rotational frequency in solid

理学系研究科・化学専攻・磯部研究室

寺崎成哉・松野太輔・磯部寛之

分子の回転運動は物質の物性に深く関連する。特に固体内分子回転はその実現の難しさにも関わらず、様々な特異な物性を引き起こす可能性があるため興味を持たれている。最近磯部研究室では有限長カーボンナノチューブ分子，[4]シクロ-2,8-クリセニレンがフラーレン(C₆₀)と強く会合し，内部のフラーレンが固体中で213 GHzの高速回転をしていることを発見した。[1] 我々はこの系を「分子ベアリング」と呼称し研究を続けてきた。本研究では固体内分子回転のさらなる速度向上を実現するため，直径縮小型筒状分子である[3]シクロ-3,11-ジベンゾクリセニレン ([3]C^{db}C) [2] と，軽く，小さい球状分子，アダマンタンを用いた分子ベアリングの設計と構築について報告する。アダマンタン-d₁₆について固体 ²H NMR 測定により回転速度を求めたところ，[3]C^{db}C 内部のアダマンタン-d₁₆は560 Kで1.05 THzの固体内分子高速回転をすることが明らかになった。

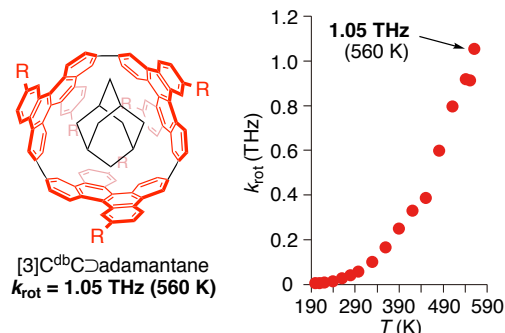


図 1: テラヘルツ回転する分子ベアリング

[1] T. Matsuno, Y. Nakai, S. Sato, Y. Maniwa, H. Isobe. Nat. Commun. 9, 1907 (2019).

[2] K. Kogashi, T. Matsuno, S. Sato, H. Isobe. Angew. Chem. Int. Ed. 58, 7385-7389 (2019).

線状に連なるディラック点を有する有機半金属の NMR 研究

NMR studies on organic semimetals with Dirac nodal line

東京大学大学院工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研,^A 日本大学文理学部,^B 産総研
関根孝彦, 須波圭史, 宮川和也, 秋元健汰^A, 周彪^A, 石橋章司^B, 小林昭子^A, 鹿野田一司

結晶中の特殊なポテンシャル構造により、有効質量がゼロとなり相対論的性質を示す電子系をゼロ質量 Dirac 電子系という。この電子系はコーン型のエネルギー分散を示し、コーンの頂点(Dirac 点)まわりでは、通常の金属・半導体といった枠組みでは捉えられないゼロ質量の電子の特異な物性を示す。Dirac 点が波数空間で線状に連なっているのが Dirac nodal line である。Dirac 点が連続的に分布することでさらに新規な物理現象が期待されているが、その候補となるモデル物質は未だ多くは見つかっていない。そんな中、有機半金属[M(dmdt)₂] (M=Ni, Pt) が Dirac nodal line を有することが理論的に予想されている [1]。本研究では、[M(dmdt)₂]中の Dirac nodal line の存在を実験的に検証し、さらに、そこに生まれる新しい物理を探索している。¹³C 置換体多結晶試料に静磁場を印加して NMR 実験を行い、スペクトルシフトと核スピンの格子緩和率 $1/T_1$ (それぞれ静的/動的磁化率に対応する)を測定した。両物質のシフトと $1/(T_1T)$ は、高温では 2 次元 Dirac 電子系的な振る舞いを、低温では金属的な振る舞いを示し、理論的に予測された Dirac nodal line 系のバンド構造と矛盾しない。ところが、 $1/(T_1T)$ は中間温度(30 K)で極大を取った。これは電子スピンの揺らぎの特異な増大を示唆する。現在、この異常が静磁場下で Dirac nodal line が示す特異な Landau 準位構造に起因する可能性を検討している。

[1] B. Zhou *et al.*, *Chem. Commun.*, **55**, 3327(2019)

Co²⁺置換希土類鉄ガーネット薄膜における格子欠陥導入によるスピン凍結温度の高温化 High spin freezing temperature in Co²⁺ substituted rare-earth iron garnet thin films due to introduction of lattice defects

工学系研究科 電気系工学専攻 田畑・松井・関研究室 寺尾健裕、山原弘靖、田畑仁

スピングラスはスピンのランダムネスとフラストレーションの磁気相関により、低温でスピン凍結状態をとる物質である。スピン凍結状態ではメモリ効果やエージング現象と呼ばれる特徴的な磁気記憶を示し、興味深い性質として注目されている。しかしながら一般的なスピングラスにおいてスピン凍結温度 T_g は数 10 K 程度で応用にあたっては室温以上の高温化が望まれる。本研究では元素置換に加えて格子歪みを導入することにより、 T_g の高温化を目指した。

試料はスピン波応用が期待されている希土類鉄ガーネットを対象とし、異方性 Co²⁺と非磁性 Ge⁴⁺を元素置換した Lu₃Fe_{4.8}Co_{0.1}Ge_{0.1}O₁₂ (LFCG)薄膜を Y₃Al₅O₁₂(001)基板上に堆積した。基板と薄膜の格子ミスマッチは 2.1%で臨界膜厚 t_c は 12 nm が計算される。 t_c 以下の膜厚では LFCG は正方晶に歪み、イオン間距離の接近や対称性の低下によって縮退が解けることで交換相互作用の変化を介して T_g の高温化が期待される ($T_g \sim J(D/J)^{1/4}$, J は交換相互作用、 D は磁気異方性) [1]。一方、 t_c 以上の膜厚では LFCG は立方晶に格子緩和し、格子欠陥に磁気ドメインがピンギされることにより保磁場の増加と T_g の高温化が期待される ($H_c \sim \xi^{1/2}$, ξ は転位密度)。磁気特性は低温センターの共通機器である MPMS によって調べ、交流磁化率温度依存性のカスプから得た T_g の膜厚依存性を図 1 に示す。各試料のスピン凍結温度は、膜厚 6 nm の正方晶均一歪領域試料では 320-350 K、膜厚 35 nm の膜厚方向傾斜歪領域試料では 350-360 K、膜厚 50 nm の完全格子緩和領域試料では 370-380 K を示した。これより、結晶膜厚を変化させることで結晶構造を制御し、正方晶から格子緩和させることでスピン凍結温度幅は減少する一方、スピン凍結温度を上げられることが明らかとなった。

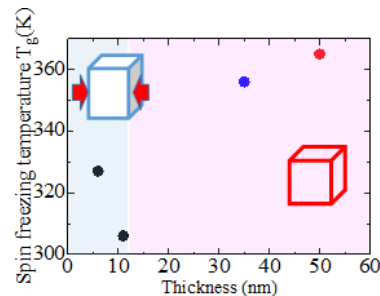


図 1. LFCG 薄膜におけるスピン凍結温度の膜厚依存性

[1] B W Morris et al., J. Phys. C: Solid State Phys. 19 1157 (1986)

トポロジカル超伝導体 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶の成長と超伝導転移に対するアニール効果

Growth of topological superconductor $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ single crystals and annealing effect on the superconducting transition

工学系研究科 物理工学専攻 為ヶ井研究室
松前 拓実

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に対し、Cu、Sr、または Nb 原子を Bi-Se 五重層間にインターカレートすると、超伝導性が発現する[1]。組成式 $\text{A}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($\text{A} = \text{Cu}, \text{Sr}, \text{Nb}$) で表されるこの超伝導体は、トポロジカル超伝導体であると考えられており、またネマティック超伝導状態を発現することでも知られている[2]。本研究では、Sr 仕込み量 x の異なる単結晶試料 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($x = 0.16, 0.17, 0.18, 0.19$) をセルフフラックス法で作製した(クエンチ温度 650°C)。得られた試料における磁化の温度依存性を測定した結果、複数の超伝導転移が存在することが確認された。それぞれの転移温度は、結晶中の Sr 原子位置の違いに対応していると考えられる。そこで Sr 分布の均一化を図るため、得られた単結晶試料を石英管に真空封管し、 560°C でアニール処理を行った。その結果、なだらかだった超伝導転移は急峻なものとなり、 T_{c2} や T_{c3} での転移が抑制され、超伝導特性を改善することに成功した。また、試料作製時の冷却方法を 700°C クエンチ及び炉冷に変更した場合の超伝導特性の変化も調べた。当日は、Nb ドープの場合についても簡単に触れる。

[1] Y. S. Hor *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 057001 (2010).

[2] K. Matano *et al.*, Nat. Phys. **12**, 852 (2016).

TGF- β シグナル主要転写因子 SMAD2/3 の MH2 ドメインにおける特性評価 Characteristics of MH2 domains of SMAD2 and SMAD3 in TGF- β signaling.

東京大学大学院 農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 養生訓を科学する医食農連携寄付講座

○楠林和貴、宮園健一、伊藤友子、栗崎晃、田之倉優

サイトカインの一種である TGF- β の刺激は、細胞内で転写因子 SMAD2 及び SMAD3 (SMAD2/3) のリン酸化へと変換される。SMAD2/3 は、リン酸化依存的に転写因子 SMAD4 とヘテロ 3 量体を形成する。このヘテロ 3 量体は核内へ移行し、多種多様な転写因子等 (SMAD cofactor) との結合を通じて標的遺伝子の発現を制御する (TGF- β /SMAD 経路) [1]。SMAD2/3 が持つ 2 つのドメインのうち、C 末端側に保存された MH2 ドメインの

アミノ酸配列同一性は、SMAD2 と SMAD3 の間で 97% と極めて高いため [2]、MH2 ドメインにおける SMAD2 と SMAD3 の特性の差異は、ほとんど解析されていない。ところが、SMAD cofactor の 1 つである TMEPAI は、SMAD2 と SMAD3 の MH2 ドメインを識別できる可能性が示唆されている [3]。そのため、SMAD2/3 の MH2 ドメインは異なる機能を有することが予想される。本研究では、SMAD2 と SMAD3 の間で、MH2 ドメインに性状の差異が確かに存在することを明らかにした。SMAD2/3 の MH2 ドメインにおける性状を評価したところ、SMAD2 と SMAD3 の MH2 ドメインにおけるわずかな残基の違い (図) は、SMAD cofactor や SMAD4 との相互作用に影響を与えることを明らかにした。TGF- β /SMAD 経路において、SMAD2/3 は MH2 ドメインのわずかな差異をも利用して、標的遺伝子の発現を厳密に制御していることが示唆された。

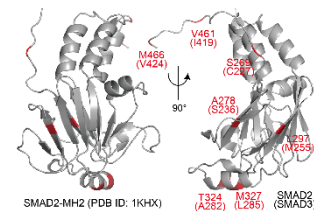


図 SMAD2-MH2 の構造

[1] Shi et al., *Cell*, 2003. [2] Miyazono et al., *Nucleic Acids Res.*, 2018. [3] Watanabe et al., *Mol. Cell.*, 2010.

磁性酸化物 GdTiO₃/EuTiO₃ ヘテロ構造における界面伝導Interface transport properties of GdTiO₃/EuTiO₃ heterostructures工学系研究科・物理工学専攻¹, 理研 CEMS²高原規行¹, 高橋圭², 十倉好紀^{1,2}, 川崎雅司^{1,2}

【背景】EuTiO₃(ETO)は $T_N \sim 5.5\text{K}$ で Eu^{2+} の $7\mu_B$ の磁気モーメントが反強磁性転移する磁性半導体である。一方 GdTiO₃(GTO)は、 Gd^{3+} は ETO の Eu^{2+} と同じ $7\mu_B$ の磁気モーメントを持ち、 $T_C \sim 30\text{K}$ でそのスピンの強磁性的に揃う強磁性 (Ti^{3+} のスピンとは反平行のフェリ磁性) Mott 絶縁体である。Gd³⁺Ti³⁺O₃/Eu²⁺Ti⁴⁺O₃ 界面は電荷不整合界面であり、界面において ETO への電子ドーピングが期待できる。また、GTO/ETO 構造の A サイトの磁気モーメントに注目すると、大きな $7\mu_B$ のスピンの作る磁気秩序のバックグラウンド中に埋め込められた GTO/ETO 界面にだけ伝導電子が存在しうる特殊な系であり興味深い。今回、GTO/ETO 構造を作製し輸送特性を測定することで、電荷不整合界面の電子状態を検証し、A サイトの磁気モーメントが輸送特性に与える影響に注目して解析を行った。

【実験と結果】GTO 上部層と ETO 下部層とのヘテロ構造を、膜厚を変化させて LSAT(001)基板上に作製した。図に GTO(5 nm)/ETO(26 nm)構造と ETO(20 nm)単層膜におけるシート抵抗の温度依存性を示した。GTO/ETO 構造は金属的挙動を示し、ETO のネール温度と同じ $T \sim 5.5\text{K}$ においてキック構造が観察された。本発表では異常ホール効果の結果を示し、界面伝導について詳細に議論する。

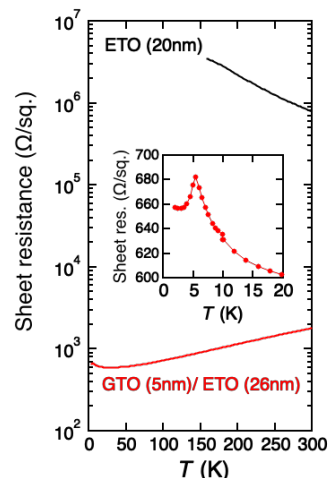


図: ETO(20nm)単層膜と GTO(5nm)/ETO(26nm)ヘテロ構造のシート抵抗の温度依存性。(挿入図: 20K 以下の拡大図)

Design of Thiocyanido-bridged Fe^{II}-Hg^{II} Frameworks Revealing Chirality, Spin-crossover and Photomagnetism

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, School of Science

Guanping LI

Numerous aspects of spin-crossover (SCO) materials such as syntheses, structures, and physicochemical properties have been vigorously researched in last decades.^[1] In this content, the goal of my work is to design and characterize the high dimensional thiocyanido-bridged SCO compounds **1-3** based on iron(II) ions with [Hg(SCN)₄]²⁻ anions and 2-, 3-, and 4-acetylpyridines(2-, 3-, and 4-acpy) respectively. Crystals of compound **1** ({[Fe(2-acpy)][Hg(SCN)₄]}_n) have interesting chiral character due to formation of two mirror-image 3D thiocyanido-bridged networks. Crystals of {[Fe(3-acpy)₂][Hg(SCN)₄]}_n (**2**) consist of 2D folded-layers. For compound **3** {[Fe(4-acpy)₂][Hg(SCN)₄]}_n, it has 3D networks and temperature-dependent structural parameters owing to changes of spin states of Fe^{II} ions. Crystal **1** and **2** remain high-spin states when decreasing the temperature, while crystal **3** reveals partial SCO effect with T_{1/2} = 103 K. The Light-Induced Excited Spin-State Trapping (LIESST) effect can be observed for crystal **3** with 473, 532, 658 and 1064 nm lights, which can be further testified by temperature-dependent UV-Vis and IR spectra.

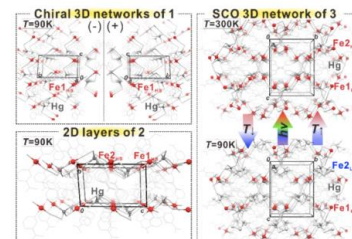


Fig 1. Structures of **1 - 3**

[1] M. Carmen Munoz et al., Coordination Chemistry Reviews. **255**, 2068-2093(2011)

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ における超伝導秩序の光励起ダイナミクスPhotoinduced dynamics of superconductivity in iron-based superconductor $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ ^A理学系研究科・物理学専攻・島野研究室, ^B総合文化研究科・広域科学専攻・前田研究室,^C低温科学研究センター・研究開発部門磯山 和基^A, 吉川 尚孝^A, 勝見 恒太^A, Jeremy Wong^A, 色摩 直樹^B, 崎下 雄稀^B,鍋島 冬樹^B, 前田 京剛^B, 島野 亮^{A,C}

鉄系超伝導体はマルチバンド超伝導体である: 鉄 $3d$ 軌道5つがフェルミレベル近傍に集まり, 多くの場合ブリュアンゾーンの中心(Γ 点)にホールポケットを, 端(M 点)に電子ポケットを形成する. 鉄系超伝導においてはこのマルチバンド性が重要な役割を果たしていると考えられているが, これと関連して, FeSe およびその系は静的なキャリア注入によって超伝導転移温度(T_c)が大きく増強することが知られている(例えばイオン液体を用いた過剰電子ドーブにより T_c は8 Kから40 Kまで上昇する[1]). そこで我々は光による動的なキャリア注入が FeSe 系の超伝導秩序に与える影響に興味を持ち, テラヘルツ(THz)時間分解分光を用いて光照射後の $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ の超伝導秩序の変化を調べた. 特に, 超伝導秩序変数の振幅振動であるヒッグスモードと光との非線形結合によって, 周波数 ω のTHz波を照射すると周波数 3ω のTHz波が放射されるというTHz第3高調波発生(THz-THG)に注目し[2,3], これを測定することで光励起後の超伝導秩序変数の時間発展を0.1 psの時間分解能で観測した. 講演では光励起状態におけるTHz帯光学伝導度の測定結果と合わせて, 超伝導秩序の光励起ダイナミクスについて議論する.

[1] B. Lei *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 077002 (2016). [2] R. Matsunaga *et al.*, *Science* **345**, 1145 (2014).

[3] H. Chu *et al.*, *Nat. Commun.* **11**, 1793 (2020).

Triplon Spin Current in a Spin Peierls System CuGeO_3 Saitoh Lab, Department of Applied Physics

**Yao Chen, Masahiro Sato, Yifei Tang, Yuki Shiomi, Koichi Oyanagi, Takatsugu Masuda,
Yusuke Nambu, Masaki Fujita and Eiji Saitoh**

In many 1-D quantum materials, due to geometrical frustration and quantum fluctuations, long-range magnetic order disappears. Among such quantum spin systems without magnetic order, there is another large ground of spin excitations in dimerized magnets, in which each of two neighboring spins is frozen as $S = 0$ singlets in the ground state. The elementary spin excitations are $S = 1$ triplet states, called a triplon. A typical example of dimerized magnets is 1-D spin-Peierls (SP) system[1]. Triplon excitations are investigated in the context of the quantum spin community but are still a new field in spintronics. As a central concept of spintronics, the spin current is the flow of pure spin angular momentum. Recently, a new spinon spin current in a quantum spin liquid has been discovered[2]. This discovery extends the concept of spin current to quantum spin systems and encourages us to pursue the spin current carried by triplon excitations.

We use CuGeO_3 as a model material of a 1-D spin dimer. The spin current is generated and detected by the spin-Seebeck effect (SSE): spin current in CuGeO_3 propagates along the thermal gradient and reaches a Pt film, in which spin current can be detected as a voltage signal via the inverse spin-Hall effect (ISHE). The SSE was measured by applying a thermal temperature gradient on the c -axis (parallel to the one-dimensional spin chain). The spin Seebeck voltage signal (V_{SSE}) in the Pt wire is measured by a lock-in method.

As a result, a clear voltage signal appears in the low-temperature SP phase. The sign of the V_{SSE} is opposite to that of the magnon-mediated SSE and also depends greatly on crystalline orientation and impurity level, due to the 1-D nature of triplon. To theoretically analyze the spin current in CuGeO_3 , we apply the Boltzmann equation to the bulk triplon transportation process. We use relaxation approximation in the calculation. We consider three phenomenological terms in the relaxation time: the magnetic scattering term due to free spins, the scattering term of non-magnetic impurities, and the temperature-dependent scattering term. The magnetic field dependence of the triplon SSE is well modeled by our calculations.

[1] M. Hase, I. Terasaki, & K. Uchinokura *Physical Review Letters* **70**, 3651–3654 (1993)

[2] D. Hirobe, et al., *Nature Physics* **13**, 30–34 (2017)

Growth and characterization of ferromagnetic Fe-doped InAs quantum dots with high Curie temperature

Affiliations: University of Tokyo, Graduate School of Engineering, EEIS, Tanaka-Ohya Lab

Authors: Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka

Ferromagnetic semiconductor quantum dots (QDs) show low-dimensional confinement of carriers that allows for highly effective gate-voltage control of their magnetic properties and Curie temperature (T_C) [1]. For applications such as single electron spin transistors (SESTs), ferromagnetic QDs with high T_C and good compatibility with semiconductor platforms are essential. In this research, we were successful in the growth of ferromagnetic QDs by doping Fe into InAs QDs. The transmission electron microscopy (TEM) image shows a clear Zinc Blende crystal structure and superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometry measurements (Fig. 1) show that the T_C of these QDs is more than 300K. This result also provides a new way to increase the T_C of (In,Fe)As whose maximum T_C in bulk is far below room temperature.

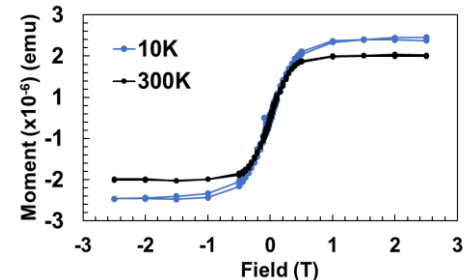


Fig 1: Hysteresis of Fe doped InAs QDs

-
- [1] F. Xiu, Y. Wong, J. Kim, A. Hong, J. Tang, A. P. Jacob, J. Zou and K. L. Wang, Nat. Materials **9**, 337 (2010).
[2] P. N. Hai, S. Sugahara and M. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 6579 (2007).

反転対称スキルミオン物質 Gd_2PdSi_3 におけるトポロジカル磁気光学効果Topological magneto-optical effect in the centrosymmetric skyrmion magnet Gd_2PdSi_3

工学系研究科・物理工学専攻・高橋(陽)研究室

加藤喜大、岡村嘉大、Max Hirschberger、十倉好紀、高橋陽太郎

ナノスケールの渦巻き状の磁気構造であるスキルミオンは、スピントロニクスの情報媒体として注目され、その物性応答について研究が進められている[1]。スキルミオンは物質中において強い有効磁場を創発し、伝導特性に大きな影響を与える。この創発磁場による影響はホール効果とネルンスト効果に現れ、それぞれトポロジカルホール効果・トポロジカルネルンスト効果として知られている。しかし、創発磁場の現れる物性現象は上の2つのみにとどまっている。

本研究では、磁気と結びついた光学応答として磁気光学カー効果(以下カー効果)に着目し研究を行った。巨大なトポロジカルホール・ネルンスト効果を発現する反転対称スキルミオン物質 Gd_2PdSi_3 を対象に広帯域でのカー効果を測定した[2,3]。その結果、赤外領域においてスキルミオンに由来したトポロジカルカー効果が観測された(図 1)。本発表ではカー効果の磁場依存性及びエネルギー依存性の特異なふるまいについて議論する。

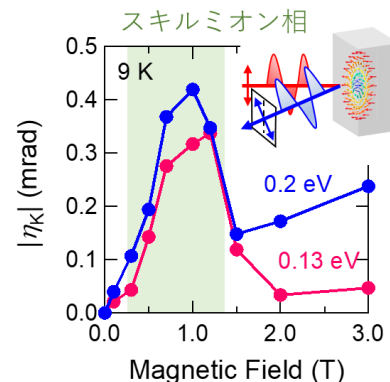


図 1: 9 K におけるカー楕円率の磁場依存性

[1] Y. Tokura and N. Kanazawa, *Chem. Rev.* 10.1021/acs.chemrev.0c00297 (2020).

[2] T. Kurumaji *et al.*, *Science* **365**, 914 (2019). [3] M. Hirschberger *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 076602 (2020).

フリースタンディング 2 層グラフェンにおける Ca インターカレート誘起超伝導 Ca-intercalation-induced superconductivity in freestanding bilayer graphene

東京大学理学系研究科物理学専攻長谷川研究室¹,
東京工業大学理学院物理学系平原研究室², 東京大学物性研究所小森研究室³
遠山晴子¹, 秋山了太¹, 佐藤瞬亮¹, 遠藤由大¹, 保原麗¹, 堀井健太郎²,
橋爪瑞葵², 一ノ倉聖², 平原徹², 飯盛拓嗣³, 小森文夫³, 長谷川修司¹

炭素原子がハニカム構造を持った 2 次元物質であるグラフェンが 2 層重なる場合、その層間に原子や分子が挿入（インターカレート）されると物性が劇的に変化し、Ca の場合は超伝導が発現する[1]。その起源はインターレイヤーバンドによるとされていたが[2]、他の電子構造由来の可能性を排除できていなかった。さらに、従来想定されていた積層構造モデルと実際の構造が異なることが報告され[3,4]、正確な積層構造モデルに基づいた超伝導発現機構の解明が求められている。本研究では、超伝導グラフェン層間化合物において、様々な作製条件下で表面構造・電子状態・電気伝導特性を系統的に調査し、正確な積層構造の特定と、構造と超伝導の関連について明らかにした。発表では発現機構に関する考察なども含め議論する。

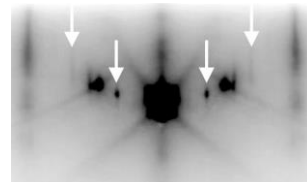


図 1, Ca インターカレートグラフェンの電子回折像。矢印はインターカレートによる周期構造由来の回折スポット。

[1] S. Ichinokura *et al.*, *Acs Nano* **10**, 2761 (2016).

[2] K. Kanetani *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **109**, 19610 (2012).

[3] Y. Endo *et al.*, *Carbon* **157**, 857-862 (2020). [4] J. C. Kotsakidis *et al.*, *Chem. Mater.* **32**, 6464 (2020).

Two dimensional ferromagnetism in Cr_3Te_4 epitaxial thin films grown by molecular beam epitaxy

^ADept. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo, ^BRIKEN CEMS

Yue Wang^A, Masaki Nakano^{A,B}, Satoshi Yoshida^A, Hideki Matsuoka^A, Kyoko Ishizaka^{A,B}, Yoshihiro Iwasa^{A,B}

The discoveries of intrinsic ferromagnetism in atomically-thin van der Waals crystals have opened up a new research field enabling fundamental studies on magnetism at two dimensional (2D) limit as well as development of magnetic van der Waals heterostructures [1-4]. However, 2D ferromagnets with high Curie temperature (T_C) was still missing. Recently we have succeeded in growing atomically-thin chromium telluride epitaxial thin films on insulating sapphire substrates by molecular beam epitaxy (MBE), and identified its phase as Cr_3Te_4 based on the detailed analysis on the structural and magnetic properties. We found that T_C of the as-grown samples were about 160 K, but it increased up to 310 K by post-growth annealing (Fig. 1). Moreover, we found that those with- and without-annealing samples show different thickness dependence of T_C . We will discuss those results in detail.

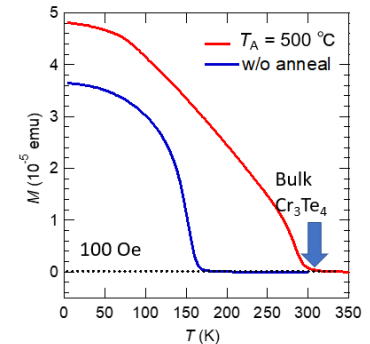


Fig. 1. Increase of T_C by post-growth annealing in Cr_3Te_4 .

-
- [1] C. Gong *et al.*, *Nature* **546**, 265 (2017); [2] B. Huang *et al.*, *Nature* **546**, 270 (2017)
 [3] Z. Fei *et al.*, *Nat. Mat.* **17**, 778 (2018); [4] M. Nakano *et al.*, *Nano Letters*, **19**, 8806 (2019).

Bi 薄膜からの励起ヘリシティ依存するテラヘルツ波放射

Excitation helicity-dependent terahertz emission from Bi thin films

理学系研究科物理学専攻^A, 低温科学研究センター^B

Department of Physics^A, Cryogenic Research Center^B

平井誉主在^A, 吉川尚孝^A, 廣瀬葉菜^A, 河口真志^A, 林将光^A, 島野亮^{A, B}

Yoshua Hirai^A, Naotaka Yoshikawa^A, Hana Hirose^A, Masashi Kawaguchi^A, Masamitsu Hayashi^A, and Ryo Shimano^{A, B}

ビスマス(Bi)はディラック的なバンド分散に起因する高効率のスピンの流・電流変換が期待されている物質である。最近、この Bi の薄膜試料において、円偏光を照射すると、そのヘリシティに依存した光電流が生じることが報告された [1]。

本研究ではこの円偏光照射により誘起される光電流のダイナミクスを観測するため、石英基板上の Bi 薄膜に近赤外フェムト秒パルスレーザーを照射して過渡的な光電流を生成し、その時間変化を放射されるテラヘルツ (THz) 波を通じて観測することを試みた。その結果、励起ヘリシティに依存する THz 波放射を観測することに成功した [2]。本発表ではこのようにして放射される THz 波の偏光、入射角依存性、サンプルの膜厚依存性、温度依存性についての結果を紹介し、光電流の生成・緩和の機構について議論する。

[1] H. Hirose *et al.*, arXiv:2011.06786 (2020)

[2] Y. Hirai *et al.*, Phys. Rev. Appl. **14**, 064015 (2020)

超伝導転移端センサを用いた光子数識別向上の研究

Improvement of the photon number resolving detector with the superconducting transition edge sensor

所属 システム創成学科(原子力国際専攻) 高橋研究室

氏名 上土井 猛、桜 剛、スミス ライアン、三津谷 有貴、大野 雅史、高橋 浩之
量子暗号通信や光量子情報処理を実現するためには近赤外領域において単一光子を検出し、光子数識別能力を有する検出器を実現することが必要不可欠である。

そこで我々は、優れたエネルギー分解能を有す超伝導転移端センサ(TES: Transition Edge Sensor)に着目し、 Au/Ir 近接二重層薄膜を用いて動作温度を低減することで、単一光子検出能力の向上を図った。

本研究では、 850 nm のパルスレーザーを TES の有感領域に照射し、 SQUID を通して増幅し読み出された電気信号を観測することで光応答特性評価を行った。この結果、 850 nm の波長において良好な単一光子検出能力を有することが実証された。

内因的磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Mn}(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_4$ 薄膜の磁気輸送特性

Magnetotransport properties for intrinsic topological insulator $\text{Mn}(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_4$ thin films

工学系研究科/物理工学専攻/十倉・金澤研究室

渡邊竜太、吉見龍太郎、川村稔、金子良夫、塚崎敦、高橋圭、川崎雅司、十倉好紀

トポロジカル絶縁体の表面状態では時間反転対称性を破ることで量子異常ホール効果などの新奇な量子現象が生じる。 MnBi_2Te_4 は内因的な磁性トポロジカル絶縁体であり、磁性元素 Mn の反強磁性秩序により時間反転対称性が破られる。我々は MBE 法によって $\text{Mn}(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_4$ 薄膜試料を作製し電気抵抗特性を系統的に調べた。特に、Sb 組成制御と電界効果によるフェルミ準位制御を組み合わせることで、電荷中性点付近で異常ホール効果が増大する振る舞いを示した。更に、磁化ギャップの大きさに系の乱れを取り入れた計算から、観測された異常ホール効果の磁場/温度依存性が量子化値に近づいていく普遍的な振る舞いと合致していることを示した。

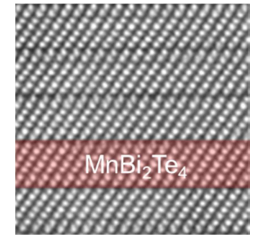


図 1: MnBi_2Te_4 薄膜

The combination of topological band structures and magnetism gives novel topological phases. The recently discovered MnBi_2Te_4 is an intrinsic magnetic topological insulator, which shows spontaneous antiferromagnetic orders. In this study, we performed a systematic study on $\text{Mn}(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_4$ thin films with FET devices. By finely tuning of the Fermi energy with Sb-doping and FET gating, we observe the topological phase transitions with Sb composition and enhancement of the anomalous Hall effect. Moreover, quantitative discussion on the magnetic gap and disorder revealed that our results are consistent with universal behavior towards the quantum anomalous Hall states.

Ratiometric thermometry based on dehydration-enhanced NIR photoluminescence in lanthanide(III)-copper(I) cyanido-bridged frameworks

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, Graduate School of Science

Yue Xin, Szymon Chorazy, Koji Nakabayashi, and Shin-ichi Ohkoshi

Lanthanide-based cyanido-bridged MOF materials have aroused great scientific attention as promising candidates for developing multifunctionality like proton conductivity, humidity-sensitive magnetism, photomagnetism and photoluminescent single-molecule magnet.¹ Lanthanide(III) ions as the functional centers exhibiting both emission and large magnetic anisotropy are beneficial to prompting photoluminescent single-molecule magnet behavior by introducing into cyanido-bridged network.² Moreover, the durability relying on the intrinsic stability of cyanido-bridged complexes is just in need of tolerating external stimuli for solvent driven process. In this regard, our group presents the three-dimensional cyanido-bridged bimetallic network material, $[\text{Nd}(2,2'\text{-bpdo})_2(\text{H}_2\text{O})]_x[\text{Yb}(2,2'\text{-bpdo})_2(\text{H}_2\text{O})]_{1-x}[\text{Cu}_2(\text{CN})_5] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. The NIR luminescent emission can be dramatically enhanced by dehydration, which makes the Yb-Cu(CN)₂ system promising materials to serve as ratiometric luminescent molecular thermometer.

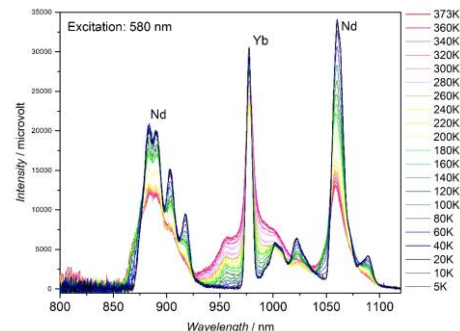


Figure 1. T-dependence of NIR-photoluminescent emission spectra after dehydration ($x=0.71$, $y=0.29$).

[1] a) S. Ohkoshi et al., *Dalton Trans.*, 2011, 40, 6825-6833. b) S. Ohkoshi et al. *Nature Photon.*, 2014, 8, 65.

[2] S. Chorazy and S. Ohkoshi et al., *Chem. Eur. J.*, 2016, 22, 7371

有機導体 θ -(ET)₂X における電荷ガラスの粒子-波動クロスオーバー工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室¹ 長谷川研究室²村瀬 秀明¹, 荒井 俊人², 長谷川 達生², 宮川 和也¹, 鹿野田 一司¹

液体を冷却すると結晶化する。ところが、何らかの方法で結晶化を妨げると、転移温度以下でも過冷却状態として系は液体の性質を保つことができる。さらに系を冷却すると、無秩序なまま粒子の運動が凍結する。これをガラスという。従来、ガラスの研究は、原子・分子やコロイドといった古典粒子を対象に行われてきた。では、量子性を持つ粒子系のガラス(量子ガラス)はどのような振る舞いを示すのだろうか？ 量子ガラスを研究する上で、有機導体 θ -(ET)₂X は格好のモデル物質である。この物質中の伝導電子は、低温で電荷結晶となるが、急冷により結晶化を妨げると電子は低温でガラス状に凍結する(電荷ガラス)[1,2]。電子は従来のガラスより遥かに量子性が強く、量子ガラス特有の振る舞いが期待される。

伝導電子は異方的三角格子を成す ET 分子上に存在しており、電子のガラス化には三角格子の異方性が強く関わっていることが知られている[3]。本研究では、異方性が異なる三つの物質 θ -(ET)₂X (X=TlCo(SCN)₄, RbZn(SCN)₄, CsZn(SCN)₄)を対象とし、それぞれの電荷ガラス相における ET 分子上の電荷密度分布をラマン分光法で調べた。その結果、電荷密度は、格子が正三角形に近くなるほど、[0, 1]に近い古典粒子的な二極分布から波動的な連続分布へと変化することが分かった。この粒子-波動クロスオーバーは量子ガラスに特有な現象であると考えられる。

[1] F. Kagawa, *et al.*, Nat. Phys. **9**, 149 (2013).

[2] T. Sato, *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 121102(R) (2014).

[3] T. Sato, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083602 (2014).

単一元素トポジカル物質 α -Sn における高移動度表面状態及びバルク状態の量子伝導 Quantum transport of surface and bulk states with high mobility in elemental topological material α -Sn

東大電気, 東大総合研究機構, JST さきがけ, 東大 CSRN
高瀬健吾, Le Duc Anh, 瀧口耕介, 田中雅明

単一元素で構成されるトポジカル物質 α -Sn は、その組成の単純さから、新奇トポジカル物性の探索やスピントロニクス応用に際して有望である[1]。今回我々は、超高品質な単結晶 α -Sn を InSb(001)面上に成膜し、量子輸送物性を解析することで、 α -Sn が示すトポジカル物性を初めて詳細に明らかにした。 α -Sn の 2 次元トポジカル表面状態は、非自明なベリー位相(= $-0.62 \sim -0.93 \pi$)と軽いサイクロトロン質量(= $0.035 m_0$)を持ち、その量子移動度は $30000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ にまで達した。これは、先行研究の約 10 倍の値であり[2]、トポジカル物質全体を見渡しても非常に高い値である。加えて、今回は α -Sn のバルクバンドの量子振動も同時に観測することに成功した。発表では、これらの量子振動が持つ温度・角度・膜厚依存性についても議論する。本成果は、 α -Sn がトポジカル物性探索における新たなモデル材料になりうることを実験的に示すとともに、半導体ベースのスピントロニクス応用への展望を開拓するものである。

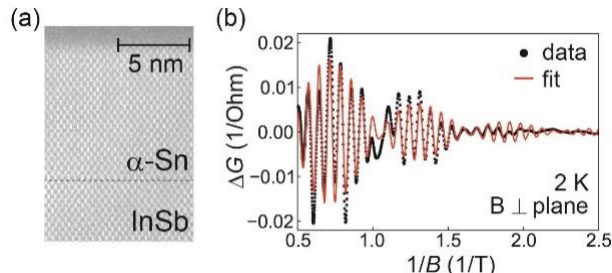


Fig. 1. (a) α -Sn の STEM 像 (b) 2 K で観測された明確な量子振動

RuO₂/TiO₂ 超格子における巨大エピタキシャル歪みと超伝導の制御

Controlling giant epitaxial strain and superconductivity in RuO₂/TiO₂ superlattices

工学部・物理工学科・川崎研究室

安波貴広 打田正輝 武藏摩紀 川崎雅司

RuO₂ 薄膜は、TiO₂(110)基板上に作製し、c 軸方向に巨大エピタキシャル歪みをかけることによって、超伝導特性を示す。また、膜厚が厚くなると転位や空隙の影響が支配的になり、巨大エピタキシャル歪みを維持できなくなる。そのため、20nm-40nm という限られた膜厚の RuO₂ 薄膜のみ超伝導特性を示すことが知られている [1]。

本研究においては、分子線エピタキシー法を用いて、RuO₂/TiO₂ 超格子を TiO₂ 層の厚さを 0.7nm に、全体の膜厚を 50nm 程度に固定して、TiO₂(110)基板上に作製した。TiO₂(110)基板上に作製した RuO₂ 単膜においては 50nm 程度の膜厚では、巨大エピタキシャル歪みを維持することはできない。しかし、格子定数のミスマッチより RuO₂ の格子を歪ませると予想される TiO₂ をバッファー層として用いることによって、50nm 程度の超格子構造においても巨大エピタキシャル歪みを維持することに成功した。TiO₂ 層の厚さは 0.7nm という非常に薄い膜厚であることを考慮すると、基板から巨大エピタキシャル歪みがかかっている場合は、非常に薄い基板と同じ物質のバッファー層を用いることで、膜厚を厚くした際も巨大エピタキシャル歪みを維持することができると言える。また、超格子構造を利用することによって、巨大エピタキシャル歪みの制御に成功した結果、50nm 程度という RuO₂ 単膜においては超伝導を示さない膜厚においても、超伝導特性を示すことに成功した。

[1] M.Uchida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 147001 (2020)

Earth and planetary sciences using the superconducting quantum interference device magnetometers

理学系研究科・地球惑星科学専攻
佐藤雅彦

In this talk, I will introduce the superconducting quantum interference device (SQUID) rock-magnetometer (Model 755, 2G Enterprise) and the magnetic equipment, and its application for Earth and planetary sciences. As the application, I will introduce the shock remanent magnetization (SRM), acquired as a result of the shock wave propagation in a magnetic field.

Knowledge of the SRM structure is crucial to interpret the spatial changes in magnetic anomalies observed over the impact crater. This study reports the SRM intensity and stability structures of single-domain titanomagnetite-bearing basalt based on the SRM acquisition experiments, remanence measurements for divided subsamples, and impact simulations. The SRM properties systematically change with increasing pressure, and three distinctive aspects are recognized at different pressure ranges: (1) constant intensity below 0.1 GPa, (2) linear trend as intensity is proportional to pressure up to 1.1 GPa, and (3) constant intensity and increasing stability above 1.9 GPa. The SRM intensity and stability structures suggest that the crustal rocks containing the single-domain titanomagnetite originally had an SRM intensity structure according to the distance from the impact point, which changed depending on the remanence stability after the impact.



図 1: SQUID 磁力計

Anisotropic Critical Current Densities in $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ Superconductors with Splayed Columnar Defects

Department of Applied Physics, The University of Tokyo, Japan¹

Nishina Center, RIKEN, Japan²

Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, Japan³

*Jiachen Wang¹, Ayumu Takahashi¹, Sunseng Pyon¹, Atsushi Yoshida², Tadashi Kambara²,
Yue Sun³, Haruhisa Kitano³, Tsuyoshi Tamegai¹

Columnar defects (CDs) were proved to enhance the critical current density (J_c) in cuprate superconductors [1], and further enhancement is reported by splaying the direction of CDs [2]. In the case of $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$, the J_c enhancement also occurs with a non-monotonic field dependence, namely the anomalous peak effect [3,4].

In the present study, $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ crystals were irradiated by 2.6 GeV U ions from two directions, each with a dose-equivalent magnetic field $B_\Phi = 4$ T. By introducing splayed CDs, which break in-plane symmetry, J_c is expected to have an in-plane anisotropy [5]. As a result, the two components J_{para} and J_{perp} that are parallel and perpendicular to the splay plane, respectively, need to be figured out to determine which component contributes more to the anomalous peak effect. After picking up two rectangular pieces with different aspect ratios from the original sample, J_c in the two directions were evaluated to reveal the splayed CDs-induced anisotropy in in-plane J_c . Calculated magnetic field dependence of in-plane anisotropy of J_c clearly shows that J_{para} contributes more to the anomalous peak effect at around 25 kOe.

[1] L. Civale *et al.*, Phys. Rev. Lett. **67**, 648 (1991).

[2] L. Krusin-Elbaum *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76**, 2563 (1996).

[3] A. Takahashi *et al.*, J. Phys. Soc, **89**, 094705 (2020).

[4] A. Park *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 064516 (2018).

[5] A. Park *et al.*, Physica C **530**, 58 (2016).

小型連続核断熱消磁冷凍機の開発

Development of a Compact and Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator

^A 理学系研究科物理学専攻, ^B 低温科学研究センター

瀧本 翔平^A(村川研), 戸田 亮^B, 村川 智^B, 福山 寛^B

近年, トポロジカルな物質や量子ビットの研究, 人工衛星に搭載される X 線検出器の冷却など, 様々な分野で超低温環境下の実験が行われている. 市販の希釈冷凍機を用いることで 10 mK 程度までの温度を得ることができるが, 数 mK 以下の温度を実現するためには, 核スピンのエントロピー変化を利用した核断熱消磁冷凍機 (NDR) を製作する必要がある. Cu 核スピンのを用いた一般的な NDR は単発式の冷却システムであり, また大型で取り回しが悪い, 冷凍機の導入に対するハードルが高いという欠点がある. そこで我々は, 低温技術の非専門家にとっても取り扱いが容易で, 一般的な希釈冷凍機にそのまま搭載できるほど小型で, かつ 1 mK 程度以下までの任意の温度を連続的に発生できる小型連続核断熱消磁冷凍機 (CNDR) の開発に取り組んでいる [1]. CNDR は 2つの PrNi₅ 核ステージを 2つの熱スイッチで直列接続した構造をもつ (図 1). その実現には, いずれも小型で高性能な (A) 熱スイッチ, (B) 高透磁率材で磁場遮蔽された超伝導マグネット [2], (C) 亜鉛はんだを用いた PrNi₅ 核ステージの開発が必要である. NDR の原理と CNDR の冷却サイクル, および (A)~(C) の詳細について発表する.

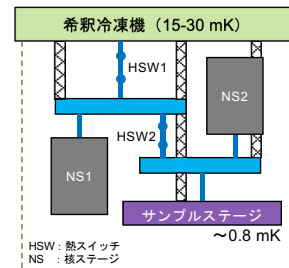


図 1: CNDR の模式図

近年, トポロジカルな物質や量子ビットの研究, 人工衛星に搭載される X 線検出器の冷却など, 様々な分野で超低温環境下の実験が行われている. 市販の希釈冷凍機を用いることで 10 mK 程度までの温度を得ることができるが, 数 mK 以下の温度を実現するためには, 核スピンのエントロピー変化を利用した核断熱消磁冷凍機 (NDR) を製作する必要がある. Cu 核スピンのを用いた一般的な NDR は単発式の冷却システムであり, また大型で取り回しが悪い, 冷凍機の導入に対するハードルが高いという欠点がある. そこで我々は, 低温技術の非専門家にとっても取り扱いが容易で, 一般的な希釈冷凍機にそのまま搭載できるほど小型で, かつ 1 mK 程度以下までの任意の温度を連続的に発生できる小型連続核断熱消磁冷凍機 (CNDR) の開発に取り組んでいる [1]. CNDR は 2つの PrNi₅ 核ステージを 2つの熱スイッチで直列接続した構造をもつ (図 1). その実現には, いずれも小型で高性能な (A) 熱スイッチ, (B) 高透磁率材で磁場遮蔽された超伝導マグネット [2], (C) 亜鉛はんだを用いた PrNi₅ 核ステージの開発が必要である. NDR の原理と CNDR の冷却サイクル, および (A)~(C) の詳細について発表する.

[1] R. Toda *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **969**, 012093 (2018).

[2] S. Takimoto *et al.*, *J. Low Temp. Phys.* **201**, 179-186 (2020).

(Eu,Y)MnO₃ のエレクトロマグノン共鳴における電気磁気光学効果の全体像**Comprehensive study of optical magnetoelectric effect via electromagnon resonance in (Eu,Y)MnO₃**

工学系研究科物理工学専攻高橋研究室

荻野慎子、金子良夫、十倉好紀、高橋陽太郎

ペロブスカイトマンガン酸化物 ($RMnO_3$) に代表されるマルチフェロイクスでは、スピン秩序に由来した強誘電性が発現するために巨大な電気磁気効果を示す。これは電気磁気光学効果として光学応答にも現れる。電気磁気テンソルの非対角項、対角項はそれぞれ非相反方向 2 色性、旋光性複屈折と呼ばれる強度や偏光に関する非相反（光の進行方向により符号が異なる）現象を示す。いずれも $RMnO_3$ のエレクトロマグノン共鳴において観測されている[1,2]。 $RMnO_3$ は希土類イオンの半径により格子歪を介して磁気相互作用が大きく変調され様々な磁気相が実現する。特に $Eu_{1-x}Y_xMnO_3$ は希土類イオンのスピン磁性がないため、連続的な磁気相互作用の変化が生じる。本研究では $Eu_{1-x}Y_xMnO_3$ ($x=0.3, 0.4, 0.45, 0.5$) の 4 つの組成において、非相反方向 2 色性と旋光性複屈折の測定を行った。その結果、非相反方向 2 色性の大きさの組成依存性は電気分極の組成依存性にスケールするのに対して、旋光性複屈折の大きさは異なる組成依存性を示した。これは各光学効果を示すエレクトロマグノンが静的な分極の生じる機構と対応しているか否かに依存すると考えられる。

[1] Y. Takahashi et. al., Nat. Phys. 8, 121 (2012).

[2] M. Ogino et al., Phys. Rev. Research. 2, 023345 (2020).

強誘電的に分極が保持される銅-オクタシアノモリブデン錯体電気化学薄膜 Electrochemical Thin Film of Copper-octacyanomolybdate Assembly Showing Ferroelectric Polarization Retention

Ohkoshi laboratory, Department of Chemistry, School of Science

Yusuke Ikeda, Kosuke Nakagawa, Kenta Imoto, Koji Nakabayashi, Shin-ichi Ohkoshi

Cyanido-bridged metallic assemblies, which is composed of metal cations alternately bridged by cyanido ligands, have been paid much attentions due to their novel physical properties and functionalities. Our group has reported copper-octacyanomolybdate assembly ($\text{Cu}^{\text{II}}_2[\text{Mo}^{\text{IV}}(\text{CN})_8] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) show photo induced magnetization and ferroelectricity in its powder sample.¹ In this research, thin film type of copper-octacyanomolybdate assembly was synthesized in the electrochemical method, and the polarization retention was observed and evaluated by PUND method.²

Thin film type of copper-octacyanomolybdate assembly (**CuMo**) was synthesized by applying the voltage at a constant potential condition of +500 mV vs Ag/AgCl reference electrode to a HNO_3 aqueous solution where $\text{Na}_3[\text{Mo}^{\text{V}}(\text{CN})_8] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Cu}^{\text{II}}(\text{NO}_3) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dissolve. From the characterization of **CuMo**, the chemical formula proved to be $\text{Cu}_2[\text{Mo}(\text{CN})_8] \cdot 8.0\text{H}_2\text{O}$ and cyanide ligands bridge between Cu^{II} and Mo^{IV} . Next, we conducted electric property measurement of **CuMo**, and the hysteresis loops were observed at several temperatures. In order to examine these hysteresis loops in detail, we evaluate its polarization retention by the PUND method. As a result, the small polarization which is 0.1-1 nC/cm² was retained without electric field, and these polarization retention was relaxed gradually (Figure 1).

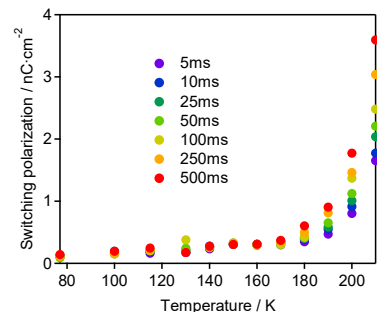


Figure 1: Polarization retention plot

[1] S. Ohkoshi, N. Machida, Z. J. Zhong, K. Hashimoto, *Synth. Met.*, **122**, 523 (2001).

[2] J. F. Scott, C. A. Araujo, H. Brett Meadows, L. D. McMillan, A. Shawabkeh, *J. Appl. Phys.*, **66**, 1444 (1989).

非相反テラヘルツ第2高調波発生から見る 超伝導 NbN における磁束量子ダイナミクス Vortex dynamics in superconducting NbN illuminated by nonreciprocal THz SHG

^A 低温科学研究センター・研究開発部門、^B 理学系研究科・物理学専攻・島野研究室、
^C 情報通信研究機構(NICT)・未来 ICT 研究所
中村祥子 ^A、勝見恒太 ^B、寺井弘高 ^C、島野亮 ^{A,B}

流れの方向によって輸送特性が変化する「非相反性」は、流れの方向を反転させる座標変換（例えば空間反転や時間反転）に対して変化する（＝対称性が破れた）系において現れる。そこで、等方的な第II種超伝導体NbNの薄膜に直流電流を注入して人為的に空間・時間反転対称性を破った状態で、狭帯域テラヘルツ波パルスを照射すると、透過波に、非相反性に由来する巨大な第2高調波(SH)が現れた[1]。

SH強度の温度依存性には共鳴ピークが観測された。温度上昇や電流注入により磁束量子のピン止めを弱めると共鳴周波数が低下するので、ピン止めされた磁束量子がSHの起源では、と考え、試料を磁場中(1 Oe)で冷却すると、たしかにSHの強度が増大した。そこで、図1のように、直流電流によって傾けられたピン止めポテンシャルの底で、テラヘルツ電場に誘起された超伝導電流に駆動され、振動し、電磁波を放射する磁束量子のモデルを立て、共鳴周波数から磁束量子の質量、共鳴の線幅から粘性を決定したところ、観測されたSH電場を定量的に説明できた。この非相反テラヘルツ第2高調波は、磁束量子の超高速ダイナミクスの新しいプローブとなると期待される。

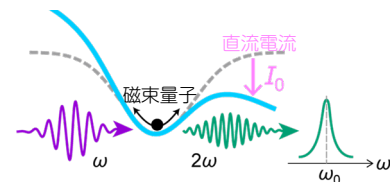


図 1: ピン止めされた磁束量子の運動と第2高調波発生 の概念図。

[1] S. Nakamura, K. Katsumi, H. Terai, and R. Shimano, Phys. Rev. Lett. **125**, 097004 (2020).