

第9回

低温センター研究交流会概要集

Abstract book

The 9th Research Forum of Cryogenic Research Center

■ 日時：

オーラルセッション

平成30年2月20日(火) 13:00~17:20 (伊藤謝恩ホール)

ポスターセッション

平成30年2月21日(水) 9:30~11:30 (多目的スペース)

■ 場所： 伊藤国際研究センター



東京大学 低温センター 設立50周年記念
50TH FOUNDING ANNIVERSARY OF CRYOGENIC RESEARCH CENTER, THE UNIVERSITY OF TOKYO

第9回 低温センター研究交流会 プログラム

■ 研究交流会

オーラルセッション 平成30年2月20日(火) 13:00~17:20
伊藤謝恩ホール

ポスターセッション 平成30年2月21日(水) 9:30~11:30
多目的スペース

■ 設立50周年 記念事業

記念式典 平成30年2月21日(水) 13:30~15:00
伊藤謝恩ホール

記念講演会 平成30年2月21日(水) 15:15~17:30
伊藤謝恩ホール

記念祝賀会 平成30年2月21日(水) 18:00~20:00
多目的スペース

■ 場所：伊藤国際研究センター

■ 一般講演時間：20分（質疑応答5分を含む）

13:00-13:05 はじめに 大越 慎一（低温センター長）

セッション1

座長：田中 雅明(工学系研究科・電気系工学専攻)

13:05-13:25 吉清 まりえ 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）

O-01 イプシロン酸化鉄ナノ磁性体の分光学的および理論的研究
Spectroscopic and theoretical study on epsilon iron oxide nanomagnets

13:25-13:45 遠山 晴子 理学系研究科・物理学専攻・M1（長谷川研究室）

O-02 その場電気伝導測定による半導体基板上のPb超薄膜における超伝導特性
Superconductivity of Pb ultrathin film on semiconductor substrates studied by *in-situ* transport measurements

13:45-14:05 中川 裕治 工学系研究科・物理工学専攻・D1（岩佐・中野研究室）

O-03 層状物質の低キャリア領域における強結合2次元超伝導
Strong-coupling 2D superconductivity in the low carrier density regime of layered materials

14:05-14:25 勝見 恒太 理学系研究科・物理学専攻・M2（島野研究室）

O-04 高強度テラヘルツ波励起によるd波超伝導体Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}におけるヒッグスモードの観測
Higgs mode in a d-wave superconductor Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} excited by an intense terahertz pulse

14:25-14:40

休 憩

セッション2

座長：岩佐 義宏(工学系研究科・物理工学専攻)

- 14:40-15:00 宇佐美 潤 理学系研究科・物理学専攻・M1 (福山研究室)
O-05 超流動ヘリウムフィルムフローの律速メカニズム
Rate Limiting Mechanism of Film Flow in Superfluid Helium
- 15:00-15:20 服部 裕也 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D1 (枝川・徳本研究室)
O-06 PbBi₂Te₄系トポロジカル絶縁体の作製とバルク絶縁性
Fabrication of PbBi₂Te₄-system topological insulators and their bulk resistivity
- 15:20-15:40 西早 辰一 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (川崎研究室)
O-07 ディラック半金属 Cd₃As₂ 薄膜における量子輸送現象とトポロジカル相転移
Quantum transport and topological phase transition in Dirac semimetal Cd₃As₂ thin film
- 15:40-16:00 Le Duc Anh 工学系研究科・電気系工学専攻・助教 (田中・大矢研究室)
O-08 Fe-based narrow-gap ferromagnetic semiconductors: New materials for high-performance spintronic devices

16:00-16:20

休 憩 【コーヒープレイク】

セッション3

座長：田畑 仁(工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻)

- 16:20-16:40 中塚 祐子 生産技術研究所・助教 (井上研究室)
O-09 マンガンホウ酸塩ガラスの磁氣的性質
Magnetic properties of manganese borate glasses
- 16:40-17:00 近都 浩之 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・D2 (分析化学研究室)
O-10 アコヤガイ稜柱層のカルサイト結晶の欠陥に関する研究
Study on the defects of calcite crystals in the prismatic layer of *Pinctada fucata*
- 17:00-17:20 林 義之 理学系研究科・物理学専攻・D2 (高木・北川研究室)
O-11 ハイパーハニカム β -Li₂IrO₃のNMR・磁化測定による高圧相図
High-pressure phase diagram by NMR and magnetization study on hyperhoneycomb β -Li₂IrO₃

- P-01 湯本 真人 附属病院てんかんセンター・センター長
液体ヘリウムで冷却された SQUID 磁束計の臨床応用
Clinical application of SQUID magnetometer cooled by liquid helium
- P-02 荒城 綾香 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・M2 (分析化学研究室)
バイオミネラル内の酸性タンパク質における塩基性残基の役割の解析
Function analyses of basic residues in the acidic proteins of biominerals
- P-03 隣 真一 工学系研究科・電気系工学専攻・学術支援専門職員 (関野研究室)
免疫染色に用いる磁性ビーズの評価
Evaluation of magnetic beads for magnetic immunostaining
- P-04 陸 鵬 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)
好熱菌の鉄結合タンパク質の鉄結合特性に対する pH の影響の解析
pH dependency of iron coordination by TtFbpA, the periplasmic iron-binding subunit of the ABC-type iron transporter from *Thermus thermophilus* HB8, analyzed by solution NMR
- P-05 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)
シアノ架橋配位高分子におけるプロトン伝導性
Proton conductivity of cyanido-bridged coordination polymers
- P-06 Zhendong Liu 工学系研究科・システム工学専攻・助教 (大久保・脇原研究室)
Recent Development in Ultrafast and Continuous Flow Synthesis of Crystalline Microporous Materials
- P-07 秦 峰 工学系研究科・物理工学専攻・D2 (岩佐・中野研究室)
Diameter dependent superconductivity in individual WS₂ nanotubes
- P-08 石 玄 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研究室・PD
構造情報に基づく 4-HIL 合成酵素の立体選択性の制御
Structure-guided optimization of stereoselectivity of 4-HIL synthase
- P-09 中林 耕二 理学系研究科・化学専攻・助教 (大越研究室)
Cyanido-bridged metal assemblies with nano channeled or thermally stable structures
- P-10 兼古 寛之 工学系研究科・システム工学専攻・D2 (堂免・嶺岸研究室)
ソーラー水素製造用半導体光電極に対する表面コーティングの検討
Effect of Surface Coating onto a Semiconductor Photoelectrode for Solar Hydrogen Production
- P-11 浅原 弘勝 工学系研究科・電気系工学専攻・D1 (田中・大矢研究室)
強磁性半導体 GaMnAs を用いた横型スピバルブデバイスにおけるスピン依存伝導
Spin-Dependent Transport of Ferromagnetic-Semiconductor GaMnAs-Based Lateral Spin-Valve Devices

- P-12 上田 健人 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (樽茶研究室)
超伝導 Al-並列二重ナノ細線 InAs-超伝導 Al デバイスでの超伝導電流の非局所信号の検出
Non-Local Signal of Supercurrent in Al – Double Nanowires InAs – Al device
- P-13 池 震棟 理学系研究科・物理学専攻・M2 (藤森研究室)
Orbital magnetic moment anisotropy in heavy metal-Co heterointerfaces studied by x-ray magnetic circular dichroism
- P-14 西野 隆太郎 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (川崎研究室)
イオン液体を用いた PZT/Nb-SrTiO₃ 界面の伝導制御
Control of Electrical Conduction at PZT/Nb-SrTiO₃ Interface through Ionic-Liquid Gating
- P-15 Olaf Stefanczyk 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)
Design and synthesis of chiral Ln(III)-W(V) molecular magnets
- P-16 柏原 悠太 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (岩佐・中野研究室)
絶縁体的遷移金属カルコゲナイドヘテロ界面における電気伝導
Conducting hetero-interface between insulating transition-metal dichalcogenides
- P-17 山崎 翔太 理学系研究科・物理学専攻・M1 (村川研究室)
超低温下で用いるヘリウム3融解圧力型温度計の設計
A design of Helium 3 melting curve thermometer that operates at ultra-low temperature
- P-18 入松川 知也 工学系研究科・原子力国際専攻・D3 (高橋研究室)
マイクロ波信号多重化回路による γ 線 TES 読出実証
Development of microwave SQUID multiplexer for gamma-ray transition-edge sensor array
- P-19 吉田 郁哉 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
集積型 Co-W オクタシアノ錯体のテラヘルツ波吸収特性
Terahertz wave absorption of Co-W cyanido-bridged metal assemblies
- P-20 室谷 悠太 理学系研究科・物理学専攻・D1 (島野研究室)
GaAs の励起子共鳴励起下における光ドレスト状態の観測
Observation of light-dressed states under resonant excitation of excitons in GaAs
- P-21 鈴木 亮太 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢研究室)
p 型ゲルマニウムから注入した共鳴トンネルキャリアによる鉄量子井戸中の量子サイズ効果の検出
Quantum size effect in a Fe quantum well detected by resonant tunneling carriers injected from a p-type Ge semiconductor electrode
- P-22 田中 未羽子 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (樽茶研究室)
2層グラフェンの zLL (ゼロランダウ準位) における非局所輸送測定
Non-local transport in bilayer graphene under magnetic field

- P-23 井元 健太 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
シアノ架橋型 Fe(II)スピントロニクスオーバーネットワーク錯体における金属置換効果
Influence of metal substitution in cyanido-bridged Fe(II) spin-crossover compounds
- P-24 村瀬 秀明 工学系研究科・物理工学専攻・M1（鹿野田研究室）
一軸圧下における θ -(ET)₂I₃ の電気伝導特性
Electrical transport properties of θ -(ET)₂I₃ under uniaxial strain
- P-25 鈴木 尚将 理学系研究科・物理学専攻・M1（村川研究室）
単原子層ヘリウム3 の新奇スピン液体状態の解明に向けた NMR セルの設計・製作
Design and construction of NMR cell for investigation of novel spin liquid state in monolayer helium-3
- P-26 松岡 秀樹 工学系研究科・物理工学専攻・M2（岩佐・中野研究室）
分子線エピタキシー技術を用いて作製した NbSe₂ エピタキシャル薄膜における超伝導
Superconductivity in NbSe₂ epitaxial thin films grown by molecular-beam epitaxy
- P-27 小峯 誠也 理学系研究科・化学専攻・D2（大越研究室）
中心対称性を持たないシアノ架橋型金属集積体における非線形磁気光学効果の観測
Observation of magnetization-induced second harmonic generation in a noncentrosymmetric cyanido-bridged metal assembly
- P-28 大内 祐貴 工学系研究科・物理工学専攻・D3（川崎研究室）
強磁性 Co 酸化物薄膜における磁気輸送特性と電荷移動効果
Magneto-transport properties and charge transfer effect in ferromagnetic Co oxide thin films
- P-29 Chun LIN 理学系研究科・物理学専攻・M2（藤森研究室）
Electron-doped superconductor Pr_{2-x-y}La_yCe_xCuO₄ after protect annealing
- P-30 神永 健一 理学系研究科・化学専攻・D3（長谷川研究室）
LaO エピタキシャル薄膜の超伝導特性
Superconducting properties of LaO epitaxial thin film
- P-31 早川 奈伊紀 工学系研究科・電気系工学専攻・M2（田中・大矢研究室）
Transport and magnetic properties of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As co-doped with Mn ; (In,Fe,Mn)As
- P-32 高山 正行 理学系研究科・物理学専攻・D2（島野研究室）
極低温高密度下におけるバルク GaAs 中の励起子間相互作用と励起子熱化ダイナミクス
Exciton-exciton interaction in a low-temperature and high-density exciton state in bulk GaAs and the exciton thermalization dynamics
- P-33 Kunal Kumar 理学系研究科・化学専攻・M1（大越研究室）
Emission Color Modulation and Slow Magnetic Relaxation in the Series of Trimetallic Complexes

- P-34 若松 浩大 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (鹿野田研究室)
Measurements of thermoelectric effects in the quasi-2D organic conductor κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈
- P-35 吉田 研介 理学系研究科・物理学専攻・M2 (村川研究室)
超流動ヘリウム3における量子アンドレーエフ反射角度依存性観測装置の開発
Development of Equipment to Observe Angle Dependence of Quantum Andreev Reflection in Superfluid Helium Three
- P-36 王 越 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (岩佐・中野研究室)
Transport properties of transition-metal dichalcogenide thin films grown by molecular beam epitaxy
- P-37 WANG Junhao 理学系研究科・化学専攻・M2 (大越研究室)
Cyanido-bridged d-f bimetallic frameworks showing dual functionalities of Dy-centered slow magnetic relaxation and color-tunable photoluminescence
- P-38 丸橋 一輝 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)
SrTiO₃ 基板上の EuTiO₃ 薄膜の高移動度化と磁気輸送特性
Fabrication and magnetotransport properties of EuTiO₃ films on SrTiO₃ substrate
- P-39 山原 弘靖 工学系研究科・電気系工学専攻・助教 (田畑研究室)
Co-Si 置換希土類鉄ガーネット薄膜におけるクラスターガラス状態とスピン波励起
Cluster glass state and spin-wave excitation in Co-Si substituted rare-earth iron garnet thin films
- P-40 中村 祥子 低温センター・研究開発部門・特任助教
電流注入下の s 波超伝導体 NbN 薄膜におけるテラヘルツ線形分光による超伝導ヒッグスモードの観測
Superconducting Higgs mode in a thin film of s-wave superconductor NbN observed by linear THz spectroscopy with supercurrent injection
- P-41 岡本 浩平 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢研究室)
p-InFeAs/n-InMnAs 強磁性ヘテロ接合におけるスピン依存伝導
Spin dependent transport in an all-ferromagnetic p-InMnAs/n-InFeAs heterojunctions
- P-42 Romain Grasset 低温センター・研究開発部門・PD
Higgs spectroscopy in a d-wave superconductor
- P-43 生井 飛鳥 理学系研究科・化学専攻・助教 (大越研究室)
イプシロン酸化鉄のミリ波磁気回転
Millimeter wave magnetic rotation of epsilon-iron oxide
- P-44 稲垣 雄介 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
有機 α -(BEDT-TTF)₂I₃ における電荷秩序相および massless Dirac 電子相の磁気輸送特性
Transport property of Massless Dirac Fermion(MDF) and Charge Order(CO) electrons in α -(BEDT-TTF)₂I₃

- P-45 小川 勝之 理学系研究科・物理学専攻・M2 (福山研究室)
単原子層ヘリウム3の気液相転移の観測
Observation of Gas-Liquid Phase Transition in Monolayer ^3He
- P-46 越川 翔太 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (岩佐・中野研究室)
3次元バルク超伝導体における非相反電荷輸送現象
Unidirectional electric transport in 3D bulk superconductor
- P-47 塚本 聖哉 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
イプシロン酸化鉄の磁気特性における金属置換の効果
The effect of metal-substitution on magnetic properties of epsilon iron oxide
- P-48 中澤 佑介 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (川崎研究室)
化合物半導体基板上に成長した Cd_3As_2 薄膜の結晶性および輸送特性の評価
Crystal structure and transport characterizations of Cd_3As_2 thin films grown on compound semiconductor substrates
- P-49 関 宗俊 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・特任准教授 (田畑研究室)
機能性酸化鉄薄膜を用いた太陽光エネルギー変換素子
Solar energy conversion systems based on functional iron oxide thin films
- P-50 宮内 恵太 理学系研究科・物理学専攻・M1 (長谷川研究室)
Li インターカレートした青リンのエピタキシャル成長とその電気伝導特性
Epitaxial Growth of Li intercalated Blue Phosphorus and Its Electric Transport Property
- P-51 林 洋平 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (千葉研究室)
Pt/Co/Pd/MgO 構造における磁気異方性に対する電界効果の基板依存性
Substrate dependence of electric-field effect on magnetic anisotropy in Pt/Co/Pd/MgO structures
- P-52 丹羽 宏彰 理学系研究科・物理学専攻・M1 (島野研究室)
銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における光誘起準安定相の発見
Discovery of photoinduced metastable phase in the cuprate superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$
- P-53 佐藤 彰一 工学系研究科・電気系工学専攻・研究生 (田中・大矢研究室)
Geometrical effect on spin accumulation signals in a diode structure fabricated on Si substrate
- P-54 金子 竜馬 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (十倉・藤岡研究室)
 $(\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x)_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ のモット臨界点近傍におけるホールドーピング効果
The effect of hole doping nearby quantum critical point on $(\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x)_2\text{Ir}_2\text{O}_7$
- P-55 Andre E. B. Amend 理学系研究科・物理学専攻・D1 (福山研究室)
Scanning Tunneling Spectroscopy Study of Graphene Zigzag Nano-ribbons
- P-56 板橋 勇輝 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (岩佐・中野研究室)
Magnetochiral Hall effect in a 2D trigonal superconductor

- P-57 濱崎 拡 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D2（枝川・徳本研究室）
Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電気的性質
Electrical properties of dislocations in Bismuth-Antimony topological insulators
- P-58 戸田 亮 低温センター・技術専門職員
小型超低温連続冷凍システムの開発 II
Development of a Compact and Continuous Sub-mK Refrigerator II

口頭発表

O-01

イプシロン酸化鉄ナノ磁性体の分光学的および理論的研究 Spectroscopic and theoretical study on epsilon iron oxide nanomagnets

理学系研究科・化学専攻・大越研究室

吉清まりえ、小峯誠也、所裕子、生井飛鳥、大越慎一

酸化鉄 Fe_2O_3 には結晶構造が異なる複数の多形が存在するが、当研究室では、 Fe_2O_3 の中でも希少な相である $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の単相合成に初めて成功し、その磁気特性として室温で 20 kOe という従来の酸化鉄磁性材料の 3 倍以上の大きさの保磁力を有することを見出した[1]。 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ は、その大きな磁気異方性により、182 GHz という高周波の電磁波吸収特性も示す[2]。さらに、Fe イオンを他の金属イオンで置換することにより、磁気特性や電磁波吸収特性を幅広く制御することも可能である[3]。本研究では、Ga イオンを置換金属として用いた Ga 置換型 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ について、第一原理フォノンモード計算を行い、その格子振動および熱力学特性を調べたので報告する[4]。

第一原理フォノンモード計算に用いた $\epsilon\text{-Ga}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{O}_3$ の結晶構造を図 1a に示す。 $\epsilon\text{-Ga}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{O}_3$ には、3 本の音響フォノンモードと 117 本の光学フォノンモードがあり、Fe と Ga の動きが主となっているフォノンモードは 20–370 cm^{-1} の低エネルギー領域に存在し、O の動きに起因するフォノンモードは 370–720 cm^{-1} の高エネルギー領域に存在することがわかった。IR 活性の光学フォノンモードからスペクトルをシミュレーションしたところ図 1b(細線)のスペクトルが得られた。これらのフォノンモードを実験的に観測するために、 $\epsilon\text{-Ga}_{0.48}\text{Fe}_{1.52}\text{O}_3$ の Far-IR、Mid-IR スペクトルを測定したところ、計算により得られたスペクトルと良い一致を示していた(図 1b, 太線)。加えて、フォノンモード計算により、格子比熱(C_{vib})等の熱力学パラメータを計算した。 $\epsilon\text{-Ga}_{0.48}\text{Fe}_{1.52}\text{O}_3$ の比熱測定による実験結果と一貫性のある計算結果となっていた。

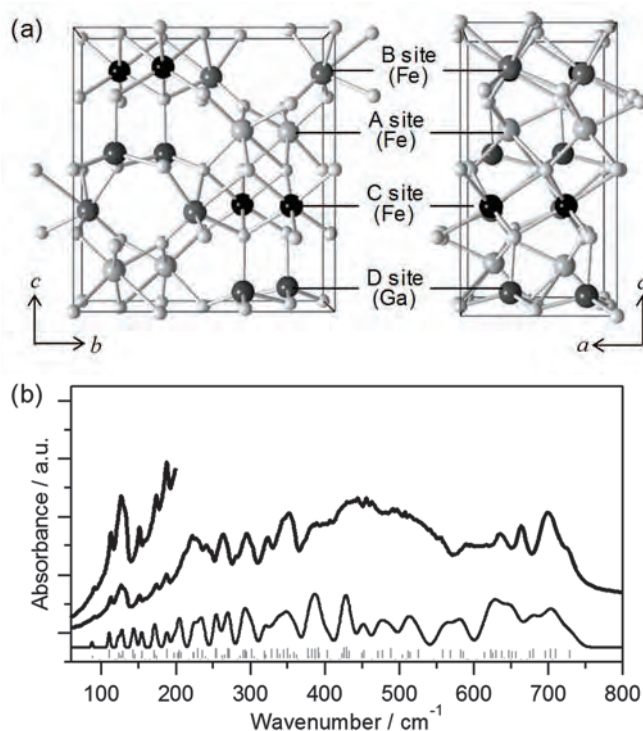


図 1. Ga 置換型イプシロン酸化鉄($\epsilon\text{-Ga}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{O}_3$)の (a) 結晶構造および (b) 実測の赤外吸収スペクトル(太線)とフォノンモード計算により得られた赤外吸収スペクトル(細線)。

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

[2] M. Yoshikiyo, K. Yamada, A. Namai, S. Ohkoshi, *J. Phys. Chem. C*, 116, 8688 (2012).

[3] S. Ohkoshi, S. Kuroki, S. Sakurai, K. Matsumoto, K. Sato, S. Sasaki, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 8392 (2007).

[4] S. Ohkoshi, M. Yoshikiyo, Y. Umetsu, M. Komine, R. Fujiwara, H. Tokoro, K. Chiba, T. Soejima, A. Namai, Y. Miyamoto, T. Nasu, *J. Phys. Chem. C*, 121, 5812 (2017).

その場電気伝導測定による 半導体基板上的 Pb 超薄膜における超伝導特性 Superconductivity of Pb ultrathin film on semiconductor substrates studied by *in-situ* transport measurements

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 長谷川修司研究室
遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, 高山あかり, 長谷川修司

近年、半導体基板の上に成長した 1~数原子層の 2 次元超構造における超伝導特性が注目を集めている。2 次元の超伝導では 3 次元系の場合と異なる特性が報告されており、その起源解明に向けた研究が盛んに行われている。鉛(Pb)は 3 次元結晶の場合 7.2 K で超伝導に転移するが、半導体上の超薄膜や超構造の場合は基板の種類や膜厚の違いによって様々な 2 次元構造を形成し、その輸送特性は構造に依存して異なる。Si 上に成長させた Pb 薄膜の場合、4/3 原子層(ML)の膜厚で striped incommensurate (SIC) 構造が、6/5 ML で $\sqrt{3}\times\sqrt{7}$ 構造が得られ、それぞれ 1.83 K と 1.52 K で超伝導に転移する[1]。しかし、Pb 薄膜の超伝導特性に関する研究の多くが Si 基板を対象としており、同じ半導体である Ge 基板上的 2 次元 Pb 超構造に関する研究は少なく[2]、その伝導特性の詳細は未だ解明されていない。原子層超構造では、基板との相互作用が電子状態や輸送特性に寄与することが示唆されており[3]、物性の深い理解には、基板の違いを比較した議論が重要であると考えられる。

本研究では、表面構造や基板の種類が Pb の 2 次元伝導特性に与える影響を明らかにするため、Ge 基板上的 Pb 超薄膜において極低温その場電気伝導測定を行った。薄膜成長の際は、基板温度と蒸着量によって異なった表面構造が得られる。本研究では Ge(111)表面上に低温で Pb を蒸着することで incommensurate な $I(1\times 1)$ 構造[4]を、室温で 4/3 ML 蒸着することで SIC 構造を成長させた。作成した試料は超高真空下で測定槽まで輸送することで、大気曝露なく実験を行った。図 1 に、膜厚の異なる $I(1\times 1)$ 構造において測定した電気伝導の温度依存性を示す。1 ML 薄膜は 0.8 K 以上で超伝導を観測できなかったが、3 ML 薄膜は超伝導であることを示すゼロ抵抗がはっきりと確認された。2 次元超伝導の理論式を用いたフィッティングより、超伝導転移温度は 3.58 K と見積もった。本発表では薄膜や超構造、島状構造などいくつかの Pb/Ge 2 次元構造の伝導測定結果の詳細を報告し、Si 基板における研究と比較し、基板と超伝導特性の関係性について議論する。

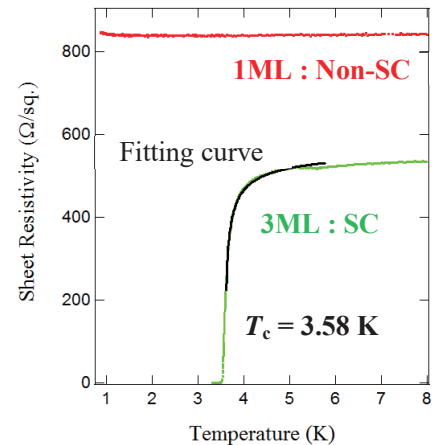


図 1. $I(1\times 1)$ -Pb/Ge(111) 1ML と 3ML のシート抵抗の温度依存性。黒線はフィッティング曲線を示す。

[1] T. Zhang, *et al.*, Nature Phys. **6**, 104-108 (2010).

[2] S. Hatta, *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 245407 (2014).

[3] S. He, *et al.*, Nature Mat. **12**, 605 (2013).

[4] S. J. Tang, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 066802 (2011).

O-03

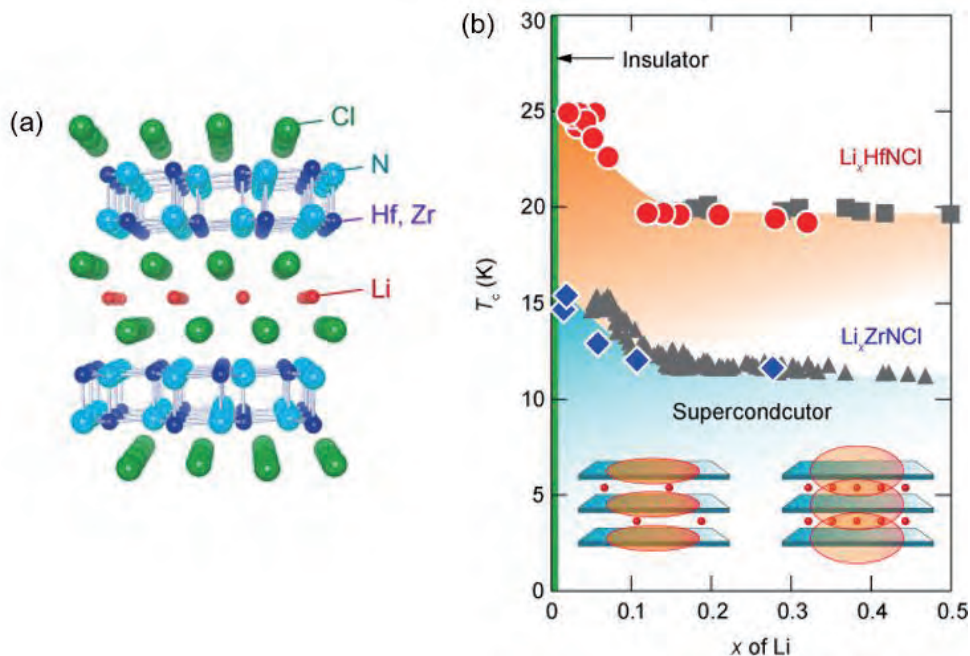
層状物質の低キャリア領域における強結合 2次元超伝導 Strong-coupling 2D superconductivity in the low carrier density regime of layered materials

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐・中野研究室¹,
東北大金研², 広大院工³, 京大院理⁴, 理研 CEMS⁵

中川裕治¹, 斎藤優¹, 野島勉², 犬丸啓³, 山中昭司³, 笠原裕一⁴, 岩佐義宏^{1,5}

キャリアドーピングは超伝導を誘起・制御する最も一般的な手法の1つであり、それによって多数の非従来型超伝導が発見されてきた。中でもわずかなドーパ量で発現する低キャリア超伝導においては、転移温度 T_c 以上での電子対形成などの興味深い性質が報告され、注目を集めている。

本講演では、層状窒化物 HfNCl , ZrNCl における低キャリア超伝導を報告する。電気二重層トランジスタ (EDLT) 構造を応用した単結晶インターカレーションデバイス[1]を用い、ゲート電圧によるドーパ量制御を行った。図に示したように、低ドーパ領域における特異な T_c の上昇によって、 HfNCl では $T_c = 25 \text{ K}$ の超伝導が観測された。電気抵抗測定、トンネル分光測定の結果から、この T_c 上昇は超伝導の2次元化・強結合化を伴っていることも明らかになった。これらの結果をもとに、層状窒化物における超伝導機構について議論するとともに、高い T_c を持つ低キャリア超伝導体としての展望についても議論したい。



図(a) 層状窒化物 HfNCl , ZrNCl の結晶構造。(b) ドーパ量に対する相図。グレーの点は多結晶における結果[2,3]。

[1] W. Shi *et al.*, *Sci. Rep.* **5**, 12534 (2015), [2] Y. Taguchi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 107001 (2006),

[3] T. Takano *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 247005 (2008).

O-04

高強度テラヘルツ波励起による d 波超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ におけるヒッグスモードの観測

Higgs mode in a d -wave superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ excited by an intense terahertz pulse

東大理¹, 理研², JST さきがけ³, ブルックヘブン国立研⁴, ETH⁵, 産総研⁶,
パリ・ディドロ大⁷, 東大低温セ⁸

勝見恒太¹, 辻直人², 濱田裕紀¹, 松永隆佑^{1,3}, R. D. Zhong⁴, J. Schneeloch⁴, G. D. Gu⁴,
青木秀夫^{1,5,6}, Y. Gallais^{1,7,8}, 島野亮^{1,8}

近年 s 波超伝導体において、高強度テラヘルツ (THz) 電磁波パルスを用いた実験により、超伝導のオーダーパラメーターの振幅の振動、いわゆるヒッグスモードの観測がなされ、さらにヒッグスモードが THz 電磁波と 2 次の非線形光学過程で結合することが明らかにされた [1]。以来、ヒッグスモードの観測は、超伝導オーダーパラメーターを高い時間分解能で光学的に検出する新しい手法として高い注目を集めている。例えば、銅酸化物に代表される d 波超伝導体においては、電荷密度波などの超伝導と競合する秩序の解明や、それら多重秩序の光制御の可能性が模索されており、ヒッグスモードの観測はその強力なプローブとなることが期待される。

実際 d 波超伝導体におけるヒッグスモードに関して、近年、多数の理論的研究が報告されるようになったが、実験では未だ観測例はない。そこで我々は、 d 波超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ におけるヒッグスモードの観測を目指し、高強度 THz 波によって誘起された超伝導の非平衡ダイナミクスを近赤外プローブ光 (波長 800 nm) の反射率測定を通して調べた。その結果、 s 波超伝導体と同様に、反射率変化に図(a)のように入射 THz 電場の 2 乗波形に追従して振動する応答を見出した。さらに、その振動は超伝導転移温度 T_c 以下で急増した (図(b))。反射率変化のダイナミクスはプローブ光の偏光角度に無依存な A_{1g} 成分と依存する B_{1g} 成分に分解できること、正孔ドーパ濃度を変化させても A_{1g} 成分が常に支配的であることがわかった。理論計算との詳細な比較から、この A_{1g} 成分がヒッグスモードに由来することを明らかにし [2]、 d 波超伝導体で初めてヒッグスモードの観測に成功した。講演ではその詳細を報告する。

[1] R. Matsunaga *et al.*, *Science* **345**, 1145 (2014)

[2] K. Katsumi *et al.*, arXiv1711.04923, (2017)

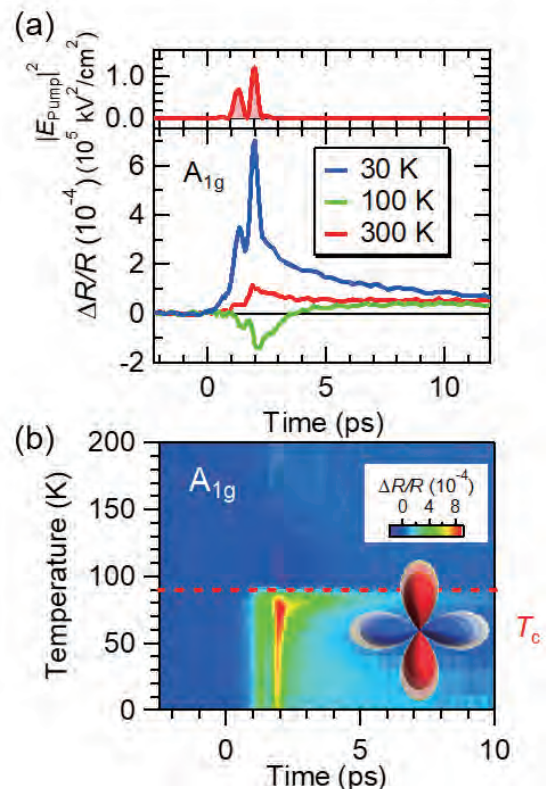


図 : (a) 最適ドーパ試料における THz 波励起後の反射率変化のダイナミクス (A_{1g} 成分)。

(b) 反射率変化の A_{1g} 成分の温度依存性と d 波超伝導ギャップの振動の模式図。

O-05

超流動ヘリウムのフィルムフローの律速メカニズム Rate Limiting Mechanism of Film Flow in Superfluid Helium

理学系研究科・物理学専攻・福山研究室^A、低温センター^B

宇佐美 潤^A、松井 朋裕^A、福山 寛^{A,B}

超流動 ⁴He は粘性がないため、蓋のない容器に入れると、壁面に吸着した膜厚 30 nm 程度の薄膜を伝って流出してしまう。「フィルムフロー」と呼ばれるこの現象は超流動のデモンストレーション実験の定番の一つである。このとき単位時間あたりに単位容器周長を流れ出る流量（フローレート）は、容器材質には依存しない[1]。ところが、容器表面に固体空気の薄膜を吸着させると、フローレートが 1 桁以上増加することが知られている[2]。その原因として、容器壁を粗くしたことによる有効周長の増加と、量子渦のピンニングの強さが変化したことによる臨界速度の増加などが考えられるが、具体的な律速機構は明らかになっていなかった。

そこで我々は、固体空気の代わりに銀微粒子（直径 100 nm）と多孔質ガラス（細孔径 0.5、1 μm）を用いて壁表面のミクロな構造や粗さを大きく変化させ、フローレートとその温度依存性を調べた。SEM 観察と窒素等温吸着法による表面積測定から構築した表面構造のモデルに基づいてミクロな容器周長にあたる有効周長を見積もると、 $T=2.0$ K でのフローレートは 2 桁以上にわたって有効周長にほぼ比例することが分かった。この事実は有効周長モデルを支持する結果である。さらに、単位有効周長あたりの流量（有効フローレート） j_{eff} は容器の材質や表面の構造によらず、nm サイズのピンニングサイトからの量子渦の脱離で規定される超流動臨界速度 v_c [3] で説明でき、 $j_{\text{eff}} = dv_c \rho_s$ (膜厚: d 、超流動密度: ρ_s) とかけることがわかった。この臨界速度の温度依存性は臨界速度を決定する渦心半径の温度依存性に一致している。

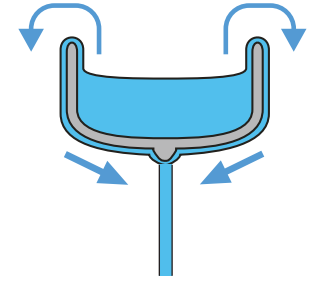


図1 フィルムフローのイメージ

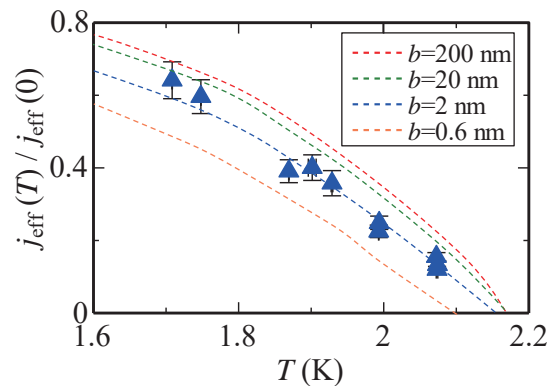


図2 $T=0$ の値で規格化した有効フローレートの温度依存性と理論的臨界速度から求めた曲線。 b は渦心半径の大きさ。

[1] R. S. Chandrasekhar and K. Mendelssohn, Proc. Phys. Soc. A **65**, 226 (1952).

[2] R. Bowers and K. Mendelssohn, Proc. Phys. Soc. A **63**, 1318 (1950).

[3] K. W. Schwarz, Phys. Rev. B **31**, 5782 (1985).

[4] J. Daunt and K. Mendelssohn, Proc. Roy. Soc. London **170**, 439 (1939). R.K. Waring, Phys. Rev. **99**, 1704 (1955).

O-06

PbBi₂Te₄系トポロジカル絶縁体の作製とバルク絶縁性

Fabrication of PbBi₂Te₄-system topological insulators and their bulk resistivity

工学系研究科材料工学専攻 枝川研究室

服部裕也, 徳本有紀, 枝川圭一

トポロジカル絶縁体 (Topological Insulator, TI) は 2005 年に理論的提唱がなされ、2007 年に実験的に存在が確認された比較的新しい物質群である。TI 表面上には二次元電子が存在し、量子力学的位相因子 (ベリー位相) の効果により高い移動度を持ち、p 型 n 型のキャリア制御も電界効果によって容易に行える。これらディラック粒子に共通な性質に加え、TI 表面ではスピン偏極が現れると予想されており、近年実験的にも確認されている。これらの性質から TI は、これまでのデバイスと全く動作原理が異なる量子現象デバイスや、スピントロニクスデバイスに応用されることが期待されている。

しかし TI の多くの系ではバルク絶縁性が確保されていないため、特殊な伝導の観測や利用は一般的に難しい。実際にこれまでバルク絶縁体化に成功した TI は全 30 種中 3~4 種程度と少ない。一方、近年 TI の一種である PbBi₂Te₄ の Bi サイトを Sb で置き換えることで電気特性を n 型 p 型の間で制御できると報告された[1]が、これまでバルク絶縁体的な試料の作製には至っていなかった。そこで当研究室では Sb 分率を精密に制御したサンプルを育成し、バルク絶縁体的な Pb(Bi,Sb)₂Te₄ サンプルの作製に成功した (図 1) [2]。それらは特殊な磁気抵抗を示したが (図 2)、この振る舞いは 3 次元の弱反局在で説明できることがわかった。発表では Pb(Bi,Sb)₂Te₄ に残存するバルク伝導のメカニズムを議論したのち、既存の TI である (Bi,Sb)₂(Te,Se)₃ をしのぐバルク絶縁体性を達成するための材料設計に関して述べる。

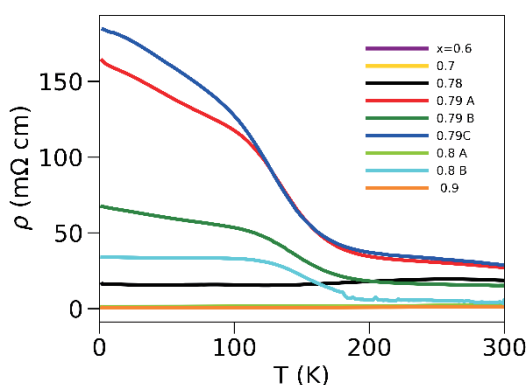


図 1 : Pb(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₄ の抵抗率の温度依存性

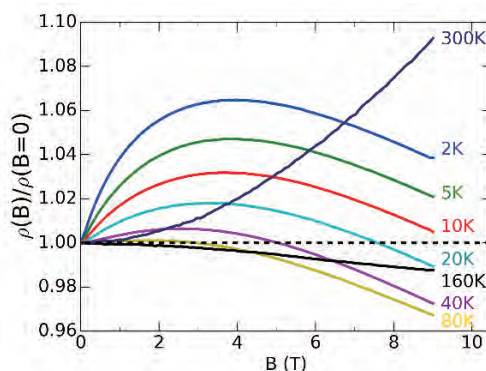


図 2 : Pb(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₄ の特殊な磁気抵抗

[1] S.Souma et al., Phys. Rev. Lett. **108**,116801(2012).

[2] Y. Hattori et al., Phys. Rev. Materials, **1**, 074201(2017).

ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における 量子輸送現象とトポロジカル相転移

Quantum transport and topological phase transition in Dirac semimetal Cd_3As_2 thin film

工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室¹

東京大学 物性研究所², 理化学研究所 創発物性科学研究センター³

西早辰一¹, 打田正輝¹, 中澤佑介¹, 秋葉和人², M. Kriener³, 小塚裕介¹, 三宅厚志²,
田口康二郎³, 徳永将史², 川崎雅司^{1,3}

ディラック半金属 Cd_3As_2 では、バルクバンドの 3 次元的な交差点が結晶の対称性によって安定化され、グラフェンの 3 次元的拡張に相当した特異な電子構造を形成される[1]。このため、 Cd_3As_2 においては、3 次元ディラック性に由来するカイラル異常などのトポロジカルな輸送現象や、対称性・次元性・スピン軌道相互作用の変化に伴ったトポロジカル相転移現象の発現が期待されている[2,3]。本研究では、 Cd_3As_2 の高品質薄膜を作製し、閉じ込め効果や化学置換を用いた電子相制御によって、ディラック半金属に期待される量子輸送現象を詳細に調べた。

パルスレーザー堆積と高温アニールを併用した成膜手法によって、高品質なエピタキシャル Cd_3As_2 薄膜の作製や Zn を用いた系統的な化学置換に成功した。膜厚の薄い試料においては、閉じ込め効果により 2 次元的な電子状態及び量子ホール状態が実現することを明らかにし[4]、Zn 置換での低キャリア濃度化によっては、膜厚 34 nm においても明瞭な量子ホール効果の観測に成功している(図 1)。また、スピン軌道相互作用を弱める Zn 置換は、ディラック半金属から自明な絶縁体へのトポロジカル相転移を誘起することが期待される。この相転移過程において、置換量の異なる試料での磁気抵抗測定を高磁場まで行うことで、ディラック半金属相のカイラル異常に由来する負性磁気抵抗が系統的に変化する様子を明らかにした(図 2)。薄膜試料における一連の結果は、バルク試料が主な対象であったディラック半金属の物性探索に新たな展開をもたらす重要な成果であると考えられる。

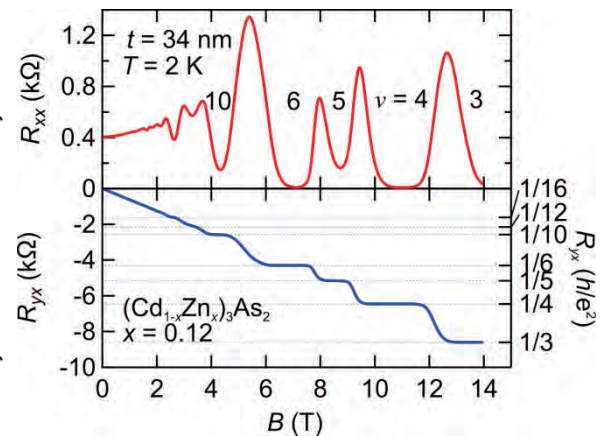


図 1. $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ 薄膜(膜厚 $t = 34$ nm, $x = 0.12$)における量子ホール効果。

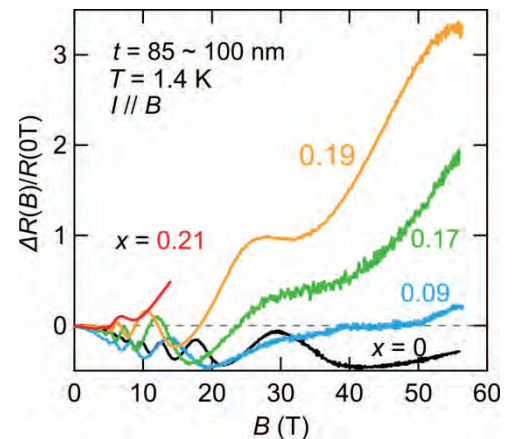


図 2. $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ 薄膜($t = 85 \sim 100$ nm)における平行な電磁場下での負性磁気抵抗の Zn 置換量依存性。

- [1] Z. Wang *et al.*, *Phys. Rev. B* **88**, 125427 (2013). [2] M. Ninomiya *et al.*, *Phys. Lett.* **130B**, 389-396 (1983).
[3] Z. Wang *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 195320 (2012). [4] M. Uchida *et al.* *Nat Commun.* **8**, 2274 (2017).

Fe-based narrow-gap ferromagnetic semiconductors: New materials for high-performance spintronic devices

工学系研究科電気系工学専攻 田中大矢研究室

Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, 田中雅明

Ferromagnetic semiconductors (FMSs) with high Curie temperature (T_C) are highly desired for the realization of semiconductor spintronic devices. So far, however, the mainstream study of FMSs is focused on Mn-doped III-V FMSs whose T_C is much lower than room temperature (RT) (the highest T_C in (Ga,Mn)As is only 200 K). Furthermore, because Mn atoms supply both spins and holes, the Mn-doped III-V FMSs are all p-type with holes in the Mn-related impurity band (IB). Therefore it is challenging to understand the band structure and design functional devices. To go beyond the existing Mn-doped III-V FMSs, there have been world-wide efforts to search for new high-performance FMSs. These research works, inspired by the prediction of the mean-field Zener model [1], were mainly concentrated on wide-gap materials such as oxides and nitrides. However, reliable and systematic results have not yet been presented.

In this study, we present an alternative approach by using Fe instead of Mn as the magnetic dopants in narrow-gap III-V semiconductors; InAs, GaSb, and InSb. Unlike Mn, Fe atoms are in the Fe^{3+} state substituting the group-III sites, which supply neither electrons nor holes. These Fe doped III-V semiconductors have two important advantages over the Mn-doped counterparts: First, the carrier type (electrons or holes) can be controlled independently by co-doping with appropriate nonmagnetic dopants. Second, these carriers, supplied by nonmagnetic dopants (not Fe) would reside in the conduction band (CB) or the valence band (VB) of the host semiconductors and thus can move faster with higher coherency. Using low-temperature molecular beam epitaxy, we have successfully grown both p-type FMS [(Ga,Fe)Sb [2]] and n-type FMSs [(In,Fe)As [3], (In,Fe)Sb [4]]. By optimizing the growth conditions, a significant amount of Fe can be doped in III-V semiconductors while maintaining the zinc-blende structure [Fig. 1(a), the Fe concentrations x are up to 9% in (In,Fe)As, 25% in (Ga,Fe)Sb, and 16% in (In,Fe)Sb]. The most impressive result is the high T_C of these materials: T_C increases monotonically with x ; and there is a tendency that T_C is higher in narrower-gap host semiconductors [Fig. 1(b)]. Intrinsic room-temperature ferromagnetism has been observed in $(\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ with $x > 23\%$ [2] and $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ with $x > 16\%$ [4]. In n-type FMS (In,Fe)As, large s - d exchange interaction energy was estimated [5], and large spontaneous spin splitting (30~50 meV at 3.5 K) in the CB was observed, which is the first in all FMSs [6]. These results, contradicting the conventional mean-field Zener model, raise new issues in the magnetism of semiconductors and indicate that the Fe-doped III-V FMSs are promising for high-performance spintronic devices.

Acknowledgements: This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (No. 26249039, No. 17H04922), CREST of JST, and the Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

1. T. Dielt et al. *Science* **287**, 1019 (2000).
2. N. T. Tu *et al.*, *PRB* **92**, 144403 (2015), *APL* **108**, 192401 (2016).
3. P. N. Hai, *APL* **101**, 182403 (2012).
4. N. T. Tu *et al.*, arXiv:1706.00735 (2017).
5. L. D. Anh *et al.*, *PRB* **92**, 161201(R) (2015)
6. L. D. Anh *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 13810 (2016).

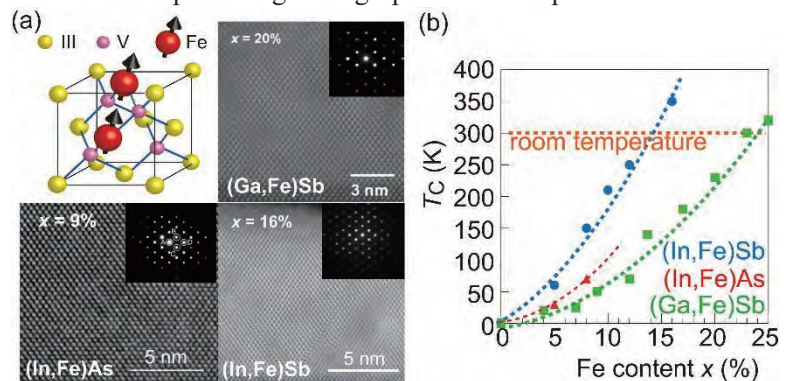


Fig. 1 (a) HR-(S)TEM images of (Ga,Fe)Sb, (In,Fe)As, and (In,Fe)Sb, respectively. (b) T_C as a function of the Fe content x in (In,Fe)Sb, (In,Fe)As, and (Ga,Fe)Sb.

マンガンホウ酸塩ガラスの磁氣的性質 Magnetic properties of manganese borate glasses

生産技術研究所・物質・環境系部門・井上研究室
中塚祐子・岡田健太郎・井上博之

【緒言】

ガラスは、紀元前から広く用いられてきた材料である。均質性が高く、加工成形・大面積化が容易であり、組成変化により物性を連続的に変化させられるという、工業的に優れた特徴を持つ。しかし、光学材料や電子材料としては既に広く応用されている一方で、磁性材料に関してはガラス材料の磁氣的性質についての詳細な研究そのものが少ないのが現状である。多くの酸化物結晶が規則的な原子配列を反映して強磁性体や反強磁性体などに転移する一方で、たいていの磁性ガラスはランダムな原子配列を反映してスピングラス相に転移することが知られている。スピングラスはスピンのランダムな方向を向いて凍結した状態であり、エイジング・メモリー効果などの特異な現象を示す[1,2]。とりわけガラス材料の磁性は典型的なランダム磁性体の観点からも興味深い。磁気構造や磁気転移はほとんど解明されていない。本研究では、熔融急冷法を用いてマンガンホウ酸塩ガラスを作製し、磁氣的性質を調べた。

【実験】

$x\text{MnO} \cdot (100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ ($x = 45, 50, 55$) ガラスを熔融急冷法により作製した。MnCO₃ および H₃BO₃ 粉末を 10 g のガラスが得られるように秤量、混合した後、カーボンるつぼに入れ、4%H₂/96%N₂ 雰囲気グローブボックス中で、1100 °C で 15 分間熔融し、急冷した。X 線回折により、ガラス化しているかどうかを確認した。超伝導量子干渉計を用いて、磁化率の温度依存性を調べた。

【結果と考察】

45MnO・55B₂O₃ ガラスの直流磁化率の温度依存性を図 1 に示す。零磁場冷却と磁場冷却が 3 K において分岐し、分岐の起こる温度で零磁場冷却はピークを示した。この結果から、45MnO・55B₂O₃ ガラスはスピングラス転移を示すと考えられる。

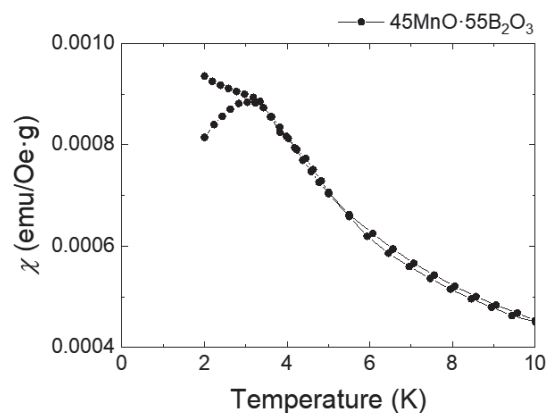


図 1. 45MnO・55B₂O₃ ガラスの直流磁化率の温度依存性

[1]H. Akamatsu, K. Tanaka, K. Fujita, and S. Murai, Phys. Rev. B **74**, 12411 (2006).

[2]H. Akamatsu, S. Oku, K. Fujita, S. Murai, and K. Tanaka, Phys. Rev. B **80**, 134408 (2009).

アコヤガイ稜柱層のカルサイト結晶の欠陥に関する研究 Study on the defects of calcite crystals in the prismatic layer of *Pinctada fucata*

農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・分析化学研究室

近都浩之、奥村大河、根岸瑠美、伊福伸介、小暮敏博、作田庄平、鈴木道生

軟体動物の貝殻は、炭酸カルシウムを主成分としているが、微量の有機基質が無機物の結晶化を厳密に制御し、種に応じた様々な微細構造を形成させている。これらの微細構造は優れた強度や柔軟性などの機能性を有するため、有機-無機相互作用の解明は新規機能性材料の創出に繋がることが期待される。真珠養殖に用いられているアコヤガイの貝殻は、柱状のカルサイトが寄り集まった構造からなる稜柱層を持つ。稜柱層では個々の稜柱が厚い有機基質の枠組みに囲まれ、蜂の巣のような構造をしている。電子顕微鏡を用いた観察によって、アコヤガイ稜柱層カルサイトの内部には、有機物を含まない非生物学的カルサイト単結晶では見られない微小な結晶方位の歪みが報告されている[1]。この結晶欠陥を持つカルサイトは割れにくく硬いという機能的特徴を持つことが知られている。さらに稜柱層カルサイト内では、結晶欠陥に沿って有機物ファイバーがネットワーク状に分布していることが観察されており[2]、欠陥はこの有機物ネットワークによって生じると考えられている。しかし、これまで様々な貝殻内有機基質が同定されている中で、有機物ネットワークの構成成分は不明であり、どのような作用で結晶欠陥が形成されるのかも明らかになっていない。

本研究ではそれらを解明するため、まずカルサイトを酢酸で脱灰しネットワーク成分を抽出した。IRやLC/MS/MSを用いて成分を解析したところ、主成分は多糖のキチンと、更にキチンに結合しているキチン分解酵素であることが判明した。軟体動物ではキチンは石灰化の足場としてよく使われているが、キチンを分解する酵素が石灰化に関わっているという報告はほぼ無い。ネットワーク成分としてキチンとキチン分解酵素が同定されたことから、それらの有機物がどのようにカルサイトの結晶化に関わっているかを調べるため *in vitro* の炭酸カルシウム結晶化実験を行った。まず、キチンをゲル化させたキチンゲルにキチン分解酵素を加えて24時間反応させた。キチンは分解によって細くなっていくと考えられる。その後キチンゲル内で炭酸カルシウムを結晶化させ、合成したカルサイトを電子顕微鏡で観察した。酵素を加えずキチンゲルのみの場合では通常のカルサイトが形成され、酵素濃度が上がるにつれ球状のカルサイトに変化した。またX線回折測定によってカルサイトの結晶欠陥の大きさを算出したところ、酵素濃度が上がるにつれ結晶欠陥は大きくなっていった。従ってキチン分解酵素によって細くなったキチンが結晶欠陥を生じさせていることが示唆された。

キチン分解酵素の作用の有無によるキチン繊維の違いを、通常のSEMでは乾燥し繊維が凝集してしまうため、ゲルを瞬間凍結して凝集させることなく観察できるCryo-SEMを用いて観察した。カルサイト形成後のキチンゲルを観察したところ、分解酵素を作用させていないキチンゲルに比べ、作用させたキチンゲルではより細かいキチン繊維がカルサイトに入り込んでいることが判明した。

[1] Okumura, T., et al. (2010) *Micron* **41**, 821-826

[2] Okumura, T., et al. (2012) *Cryst. Growth Des.* **12**, 224-230

O-11

ハイパーハニカム β - Li_2IrO_3 の NMR・磁化測定による高圧相図 High-pressure phase diagram by NMR and magnetization study on hyperhoneycomb β - Li_2IrO_3

東京大学理学系研究科物理学専攻 高木・北川研究室^A
マックスプランク研究所^B

林義之^A, 北川健太郎^A, 佐々木秀^A, 高山知弘^B, 高木英典^{A,B}

量子スピン液体とは量子相関によって絶対零度までスピンのゆらいだまま秩序しない状態である。その一種であるキタエフ型量子スピン液体は、スピン1/2がハニカム格子上でボンドに依存して強磁性的に相互作用しているモデルの基底状態である[1]。イリジウム酸化物 α - Li_2IrO_3 等でその実現が提案されて以来[2]、盛んに研究されている。同様のモデルはハイパーハニカム格子(図1)上でも定義でき、その基底状態も量子スピン液体である[3]。 β - Li_2IrO_3 でその実現が期待されたが、常圧下では複雑な磁気秩序を示す[4]。しかし圧力をかけることで磁場誘起の磁気モーメントが消失する[4]。圧力誘起の量子スピン液体状態が実現している可能性がある。一方さらに高圧下では構造転移してIrがdimerをなすことが知られている[5]。

我々は β - Li_2IrO_3 単結晶を合成し、高圧下で磁化率とNMRを測定した。磁化率とナイトシフトにおいて高温でdimerへの転移とみられる減少が観測された(図2)。しかし転移の前後で磁気ゆらぎを表す緩和率に大きな変化は見られない。また転移温度が磁場の大きさと方向に大きく依存している。これらは通常の等方的なHeisenberg相互作用によるsinglet dimer形成とは大きく異なると考えられる。スピン軌道相互作用やフント結合によって生ずる、キタエフ相互作用やsymmetric off-diagonal相互作用[6]によって異方的で磁気ゆらぎの大きなdimer相が実現していると考えられる。

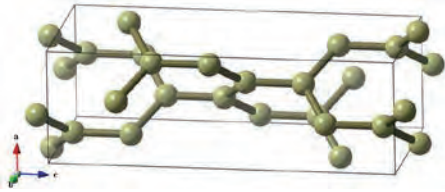


図1. ハイパーハニカム格子。

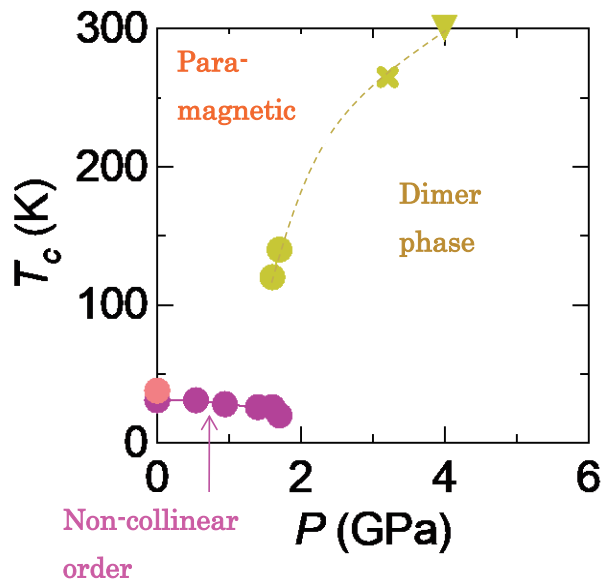


図2. β - Li_2IrO_3 の高圧相図。●は磁化率、XはNMR、▼はXRD[5]で見られた転移点。

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. (N.Y.) **321**, 2 (2006)
 [2] G. Jackeli and G. Khaliullin, Phys. Rev. Lett. **102**, 017205 (2009) [3] S. Mandal, and N. Surendran, Phys. Rev. B, **79**, 024426(2009)
 [4] T. Takayama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 077202 (2015) [5] L. S. I. Veiga *et al.*, Phys. Rev. B. **96**, 140402(R) (2017)
 [6] J. G. Rau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 077204 (2014)

ポスター発表

P-01

液体ヘリウムで冷却された SQUID 磁束計の臨床応用 Clinical application of SQUID magnetometer cooled by liquid helium

附属病院 てんかんセンター

湯本 真人

1972年にマサチューセッツ工科大学で David Cohen らによって、磁気シールドルーム内で超伝導量子干渉素子 (SQUID: superconducting quantum interference device) 磁束計を用いて初めてヒトの脳磁場が記録されて以来、今年で46年が経過した¹。この間に、ヒトの脳磁場を記録する装置(脳磁計)は、同時計測できるチャンネル数を7, 14, 37, 122と増加させ、現在、頭部全体を306チャンネルのSQUID磁束計でカバーする全頭型脳磁計が世界で最も普及している。当院では、1990年代初頭に37チャンネル脳磁計の臨床治験を行い医用脳磁計の国内第一号機として薬事承認されるなど、脳磁場計測の臨床応用に当初から取り組み、現在、306チャンネル全頭型脳磁計 VectorView (Elekta Neuromag, Helsinki) が中央診療棟Ⅱの脳磁図室にインストールされ、稼働している。

ヒトの脳神経細胞群の電氣的活動により頭部外に生じる磁気のオーダは、磁束密度(T)にして 10^{-13} と環境磁場(地磁気 $\sim 10^{-4}$ 、都市ノイズ $\sim 10^{-6}$ 、心磁 $\sim 10^{-9}$)に比べて微弱なため、脳磁計はmu-metalなどの強磁性体で2~3層に囲われた専用の磁気シールドルーム内に設置され(当院は複数の地下鉄線路に囲まれた過酷な磁場環境にあるため、更にシールドルーム外の環境磁場をfluxgateセンサで計測し、シールドルームを3軸方向に取り巻くコイルに電流を流すことでシールドルーム内への混入をadaptiveにcancel outするactive shieldが付加されている)、SQUIDを高感度磁気センサとして機能させるため、磁気センサを収容するデュワー内には液体ヘリウムが充填される。最新の脳磁計にはヘリウムガスの回収・液化装置が装備されているが、当院を含め従来機が設置された施設では、気化したヘリウムガスは大気中に放出されるため、一週間に80~100Lの液体ヘリウムを消費している。

脳磁計は、頭皮に電極を装着して脳電位を計測する脳波計に比べて、運用コスト、装置の価格とも高価であるが、頭皮脳電位では得られない臨床上有益な情報が脳磁場には含まれている。第一に、脳波計では検出できない異常波が、脳磁計で捕えることができる点が挙げられる。脳内の電流を電流双極子と見做すと、特定の電流双極子が頭皮上に作る電位分布と磁場分布は互いに90度向きが異なるため、脳波では相対的に感度が低い頭皮に垂直な脳溝の電気活動を、脳磁計ではより高感度に捕えることができる。臨床検査において脳波と同時に脳磁場を記録すれば、異常波の見逃しを防ぐことができる。第二に、電流双極子の3次元位置推定が、脳電位よりも脳磁場を使った方が正確に行える点が挙げられる。ヒトの頭部組織の導電率は、骨と脳脊髄液で約200倍異なるなど不均一に分布する一方、透磁率はほぼ頭部外の空気を含めて均一分布のため、頭部組織分布に依存しない歪の少ない脳磁場データを用いた方が脳内電流の位置を正確に同定できる。このような特性から、脳磁計は抗てんかん薬で発作がコントロールできないてんかん患者の外科治療において、治療方針の決定に役立つ有益な情報を提供している。

[1] D.Cohen, Science 175 664-66 (1972)

バイオミネラル内の酸性タンパク質における 塩基性残基の役割の解析

Function analyses of basic residues in the acidic proteins of biominerals

農学生命科学研究科応用生命化学専攻分析化学研究室

荒城綾香、降旗一夫、朝倉富子、沼子千弥、保倉明子、永田宏次、鈴木道生

生物が作り出した無機物から成る硬組織をバイオミネラルと呼ぶ。バイオミネラル内のタンパク質には多くの酸性アミノ酸が含まれ、カルシウムなどの金属との相互作用に重要な役割を持つ¹ことが明らかとなっている。一方で、多くの塩基性残基が酸性残基の近傍に存在することが示されてきたが、塩基性残基の役割については未だ不明なことが多い。そこで、本研究では石灰化における塩基性残基の役割の解明を目的とした。

アコヤガイ (*Pinctada fucata*) の真珠層由来の Pif 80² に繰り返し現れる、DDRKDDRKGG という配列に着目し、合成ペプチドを用いて実験を行うことで塩基性の残基の役割の解明を試みた。Pif 80 の繰り返し配列 DDRKDDRKGG を P1 とし、比較対象として DDAADDAAGG(P2)、AARKAARKGG(P3) を準備した。これらのペプチドを用いて等温滴定型熱量測定(ITC)を行ったところ、酸性残基と塩基性残基の両方を有することで、酸性残基のみの場合と炭酸カルシウム結晶との相互作用の様式が異なることが判明した。

ペプチドと炭酸カルシウムの相互作用をより詳細に調べる際、サンプルは液体中で分散している方が好ましいが、炭酸カルシウムは溶解度積が非常に小さく、すぐに固体に凝集してしまう性質がある点が問題となる。そこで、炭酸カルシウムの結晶形成の初期段階に形成する ACC ナノ粒子³ を溶液中で保持することで、解決を試みた。ACC 水溶液を調製し、X線吸収微細構造解析(XAFS)の測定を行うことで、ACC ナノ粒子が溶液中に存在することを確認した。

ペプチドの各残基に着目して ACC 水溶液との相互作用を調べるために、核磁気共鳴(NMR)を用いて実験を行った。ACC 水溶液に各ペプチドを溶解したサンプルとカルシウム水溶液・炭酸イオン水溶液に溶解したサンプルとで ¹H-NMR の化学シフトを比較した。さらに詳細に相互作用を調べるため、飽和移動差(STD: saturation transfer difference)を測定することで、各残基と炭酸カルシウムとの距離を比較した。その結果、P1 のアスパラギン酸残基よりも塩基性残基の方が飽和移動が大きい、つまり炭酸カルシウムの近くにあるということが分かった。

本研究により、生体鉱物の形成過程において、有機物が酸性残基と塩基性残基の両方を有することにより、カルシウムイオンだけでなく炭酸カルシウムとの相互作用が可能になることが明らかになった。

[1] Weiner and Addadi, Trends in Biochemical Sciences **16**, 252 (1991).

[2] Suzuki, Saruwatari, Kogure, Yamamoto, Nishimura, Kato, and Nagasawa, Science (New York, N.Y.) **325**, 1388 (2009).

[3] Loste, Wilson, Seshadri, and Meldrum, Journal of Crystal Growth **254**, 206 (2003).

免疫染色に用いる磁性ビーズと免疫染色装置の開発 Evaluation of magnetic beads using magnetic immunostaining

大学院工学系研究科 電気系工学専攻 関野研究室¹
慶應義塾大学²、iMed Japan³、東京工業大学⁴、マトリックス細胞研究所⁵

隣 真一¹、金子美樹¹、松田 祐子²、桑波田 晃弘¹、並田 将幸¹、斉藤 逸郎³、
坂本 聡⁴、日下部 守昭⁵、関野 正樹¹

迅速診断法は特にがん手術中に行われるがん診断であり、執刀医が術中の患部から組織を摘出し病理医が組織を診断してがんの程度を判定し術式に反映させる目的がある。迅速な診断が求められるので、通常は組織の顕微鏡観察により異形の細胞をがん細胞として特定する方法が取られる。免疫染色法はより高度ながん診断に用いられる方法である。抗体 (Antibody) が抗原 (Antigen) を有するがん細胞と結合する免疫反応を用いる。がん細胞は染色によって特定されるので、がん細胞の位置や種類や形状を正確に知ることができるが、検体作成に時間がかかること、既存の免疫反応自動化装置は組織の破碎等の処理を要するため迅速診断には用いられていない。

我々は、磁力によって抗体を誘導する効果で免疫反応時間を大幅に短縮できる磁気免疫染色法[1]に着目し、術中迅速診断に堪える自動磁気免疫処理装置の開発を行っている。

本研究では、低温センターのMPMSを使用して共同開発中の抗体固定蛍光磁気ビーズ (FF beads) [2]の磁気特性を調べ、粒子成分が超磁性を示す超微細フェライト粒子と強磁性を示す若干のフェライト粒子の複合体からなることを解明した。さらに、磁気粒子の誘導に用いる磁場設計のため、磁場発生源として形状が異なる永久磁石の磁場計算と免疫染色実験による比較検討を行った。その結果、磁極断面が櫛歯形状の磁石(Comb-teeth)は反応時間の短縮に優れ、磁極面にNS磁極が交互に配置された磁石 (N-S) は反応箇所の緻密さに優れるという知見を得た。

本研究はAMEDの支援によって行われた。

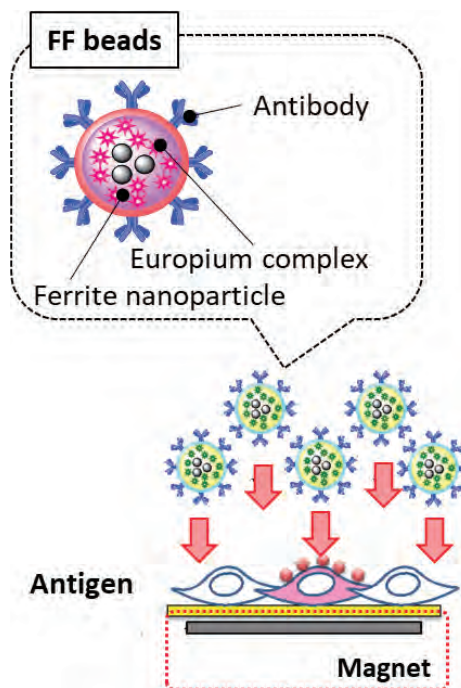


図1. 抗体固定蛍光磁気ビーズを用いた磁気免疫染色法

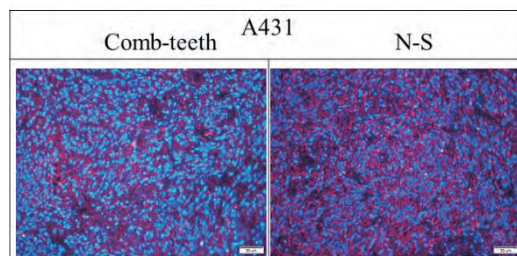


図2. 免疫染色された細胞の分布 (赤色輝点箇所) の磁石形状依存性

[1] R. Liu, et al., Talanta 81 (2010).

[2] S. Sakamoto et al., Clin. Chem. 60 (2014).

P-04

pH dependency of iron coordination by TtFbpA, the periplasmic iron-binding subunit of the ABC-type iron transporter from *Thermus thermophilus* HB8, analyzed by solution NMR

**Department of Applied Biological Chemistry, Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
The University of Tokyo**

**Peng Lu, Yoshiki Kobayashi, Mimin Zhang, Yi Lu, Yukie Katayama, Michio Suzuki, Etsuro
Yoshimura, Koji Nagata**

Introduction

Iron is one of the vital elements in living organisms and the way of absorbing iron from the environment varies a lot. In Gram-negative bacteria, the ATP-binding cassette (ABC) transport system is involved in the iron uptake and named ABC transporters. A typical iron-uptake ABC transporter basically consists of three subunits, namely the iron-binding subunit (FbpA) in the periplasm, the transmembrane subunit (FbpB) in the inner membrane bilayer and the nucleotide-binding subunit (FbpC) in the cytoplasm. Subunit B and C are highly conserved among the ABC transporters, however, FbpA can be exclusively found in Gram-negative bacteria. In our previous study, we have determined the crystal structure of the FbpA subunit from *Thermus thermophilus* HB8 (TtFbpA). This crystal structure of TtFbpA at pH 5.2 shows a six-coordinated form of iron binding with three tyrosine residues, one water molecule, and two bicarbonates. Another crystal structure of TtFbpA at pH 7.5 was reported, which shows a five-coordinated form of iron binding with three tyrosine residues and one carbonate. These two different structures suggest that the iron-coordination manner could be influenced by pH conditions. The objectives of this study are to analyze the iron-coordination manner of TtFbpA at different pH conditions in solution to further understand the mechanism of iron-uptake in Gram-negative bacteria, which will give rise to a new conception of anti-bacteria drug design.

Methods and Result

TtFbpA was overexpressed in *E. coli* and purified as reported. The last purification step was performed by the size exclusion chromatography under several pH conditions ranging from pH 5.0 to 9.0 in the presence or absence of Fe³⁺ ion. 2D NOESY spectra of TtFbpA with or without Fe³⁺ at pH 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 and 9.0 were measured. The cross-peaks of tyrosine side chains were hardly observed in the absence of Fe³⁺. However, some of these signals became observable by the addition of Fe³⁺, suggesting that these tyrosine signals could be involved in Fe³⁺ coordination. The chemical shifts of these tyrosine signals were pH-dependent. the chemical shifts at pH 5.0 and 6.0 were prominently different from those at pH 7.0, 8.0 and 9.0. These results explain the different coordination modes of Fe³⁺ in the two crystal structures of TtFbpA at pH 5.2 and 7.5. These pH-dependent Fe³⁺ coordination modes of TtFbpA are probably based on the pH-dependent equilibrium of bicarbonate and carbonate ions.

シアノ架橋配位高分子におけるプロトン伝導性 Proton conductivity of cyanido-bridged coordination polymers

理学系研究科化学専攻大越研究室

中川幸祐、大越慎一

当研究室はこれまでに、シアノ架橋型金属錯体を用いて、湿度応答磁性体など新規機能性を有するシアノ架橋型金属錯体を報告してきた[1]。2010年には、ヘキサシアノ錯体である $\text{Co}[\text{Cr}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot 4.8\text{H}_2\text{O}$ において超イオン伝導性と強磁性が共存すること、また $\text{V}[\text{Cr}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot 4.2\text{H}_2\text{O}$ において超イオン伝導性と強磁性がカップリングすることを見出している[2]。一方、シアノ基が8つ配位したオクタシアノ金属錯体では、磁気秩序と超イオン伝導性が共存する $\text{Mn}^{\text{II}}_3[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]_2(4\text{-aminopyridine})_{10}(4\text{-aminopyridinium})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [**MnNb(4-NH₂py)**]を見出している[3]。本研究では、Mn-Nb オクタシアノ金属錯体である $\text{Mn}^{\text{II}}-[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8](3\text{-aminopyridine})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [**MnNb(3-NH₂py)**]について、磁気特性とイオン伝導性を検討した。

MnNb(3-NH₂py)は、黄色粉末として得られ、粉末 X 線回折パターンとリートベルト解析の結果から、金属イオンがシアノ基で架橋された3次元正方晶構造を持つことが示唆された。Mn イオンは有機配位子の N 原子が4つとシアノ基の N 原子が2つ配位している擬八面体構造をとり、Nb イオンはシアノ基の C 元素が8つ配位したドデカヘドロン構造をとっていた。水分子は金属イオンとシアノ基が形成する3次元ネットワークの空隙に存在していたが、水分子間において水素結合ネットワークは形成されていなかった。続いて低温センターより供給される液体ヘリウムを用いて **MnNb(3-NH₂py)** の磁気特性の測定を行ったところ、43 K において磁気相転移を示し、**MnNb(3-NH₂py)** が強磁性体であることが示唆された(図 1a)。さらに、室温において **MnNb(3-NH₂py)** の複素インピーダンス測定および Cole-Cole プロット解析を行った結果、湿度 100% での伝導率は $4 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ と見積もられた(図 1b)。超イオン伝導性を示す **MnNb(4-NH₂py)** は構造中に配位水、結晶水およびプロトン化した有機配位子からなる3次元水素結合ネットワークを持つ一方、**MnNb(3-NH₂py)** では水素結合ネットワークが形成されていないことから、高いプロトン伝導性を実現させるためには、バケツリレーのようにプロトンが伝導できる水素結合ネットワークが必要であることが示唆された。

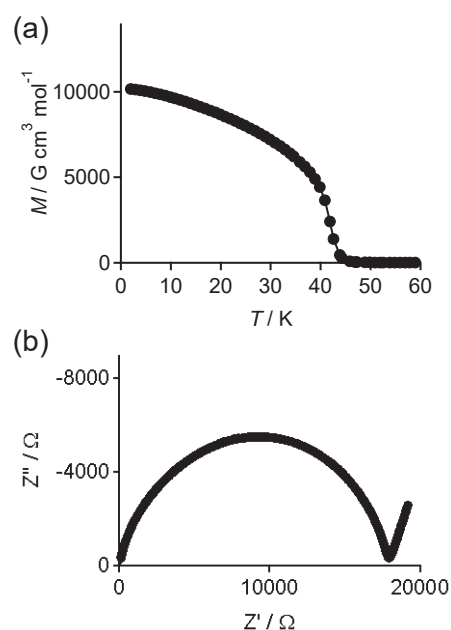


図 1. (a) **MnNb(3-NH₂py)** の磁場中冷却磁化曲線、(b) 室温、湿度 100% における **MnNb(3-NH₂py)** の複素インピーダンス測定結果

[1] S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, K. Hashimoto, *Nature Materials* 3, 857 (2004). [2] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.* 132, 6621 (2010). [3] K. Imoto, K. Nakagawa, H. Miyahara, S. Ohkoshi, *Cryst. Growth Des.* 13, 4673 (2013).

P-06

Recent Development in Ultrafast and Continuous Flow Synthesis of Crystalline Microporous Materials

Zhendong Liu, Toru Wakihara,* and Tatsuya Okubo*

Department of Chemical System Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113-8656, Japan

(*Email: wakihara@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp and okubo@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp)

Crystalline microporous materials such as aluminosilicate zeolites and aluminophosphate-based microporous crystals have long been used in the fields of catalysis and separation, and greatly contributed to modern society.^[1] Hydrothermal synthesis of crystalline microporous materials, however, typically takes a long period ranging from several hours to even several weeks depending on the targeted framework and the chemical composition. Considerable efforts have been devoted to shorten the synthesis period. Fast synthesis of crystalline microporous materials is still a daunting challenge yet highly demanded.

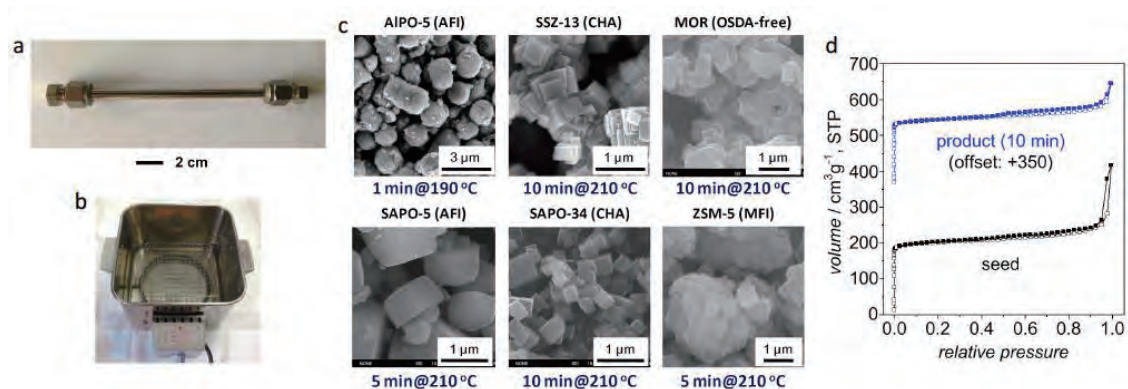


Figure 1 Ultrafast synthesis of crystalline microporous materials on the order of minutes. **a**, The tubular reactor. **b**, The oil bath. **c**, SEM images of the representative crystalline microporous materials synthesized in the tubular reactor (time and temperature below the images represent synthesis time and temperature, respectively). **d**, N₂ adsorption-desorption isotherms for the the fast-synthesized SSZ-13 and SSZ-13 synthesized using autoclave for several days.^[3]

We recently developed a methodology aimed at ultrafast and continuous flow synthesis of crystalline microporous materials.^[2,3] A tubular reactor (Figure 1a) made of stainless steel tube with diameters of several millimeters was introduced to the synthesis of crystalline microporous materials. Because of smaller size and higher surface-to-volume ratio, the tubular reactor is able to achieve a fast heating if a preheated oil bath is employed (Figure 1b). This feature of the tubular reactor, together with rational design of synthesis precursors as well as the use of seeds, enabled us to synthesize a class of crystalline microporous materials on the order of several minutes (Figure 1c). Thanks to the ultrashort synthesis period, the continuous flow synthesis was also easily established. The products of the new synthesis route possessed similar porous and textural properties as characterized by XRD, SEM and N₂ adsorption-desorption (Figure 1d). We also proved that this continuous flow synthesis method can be applied to a wide range of industrially important zeolites.

References

- [1] Davis, M. E. *Nature* 2002, 417, 813.
- [2] Liu, Z.; Wakihara, T.; Nishioka, D.; Oshima, K.; Takewaki, T.; Okubo, T. *Chem. Commun.* 2014, 50, 2526.
- [3] Liu, Z.; Wakihara, T.; Oshima, K.; Nishioka, D.; Hotta, Y.; Elangovan, S. P.; Yanaba, Y.; Yoshikawa, T.; Chaikittisilp, W.; Matsuo, T.; Takewaki, T.; Okubo, T. *Angew. Chem.* 2015, 127, 5775.

Diameter dependent superconductivity in individual WS₂ nanotubes

¹ *The University of Tokyo*

² *Lawrence Berkeley National Laboratory*

³ *Holon Institute of Technology*

⁴ *Weizmann Institute of Science*

⁵ *RIKEN Center for Emergent Matter Science (CEMS)*

Feng Qin¹, Toshiya Ideue¹, Wu Shi^{1,2}, Xiao-xiao Zhang¹, Masaro Yoshida^{1,5}, Alla Zak³, Reshef Tenne⁴, Tomoka Kikitsu⁵, Daishi Inoue⁵, Daisuke Hashizume⁵, Yoshihiro Iwasa^{1,5}

Superconductivity in low dimensional systems based on Transition Metal Dichalcogenides (TMD) materials has been attracting significant attention in recent years. Among them, the TMD nanotube is a fascinating platform for the research of superconductivity due to its unique dimensionality and geometry [1]. Especially, the novel chiral superconducting transport originating from the nanotube chirality has been discovered recently in an individual WS₂ nanotube via electrochemical doping with ionic gate [2].

Here we report the diameter dependence of superconductivity in individual WS₂ nanotubes. The superconductivity is realized by electrochemical doping with ionic gate, in which the diameter of nanotube is estimated from the periodic oscillating magnetoresistance, known as Little Parks effect [3], while the critical temperature of superconductivity is estimated as the half resistance from the temperature dependent resistance during the superconducting transition. As a result, the critical temperature displays a systematic relation as a function of the diameter. The present results might offer the crucial information to understand the microscopic mechanism of superconductivity in individual nanotube.

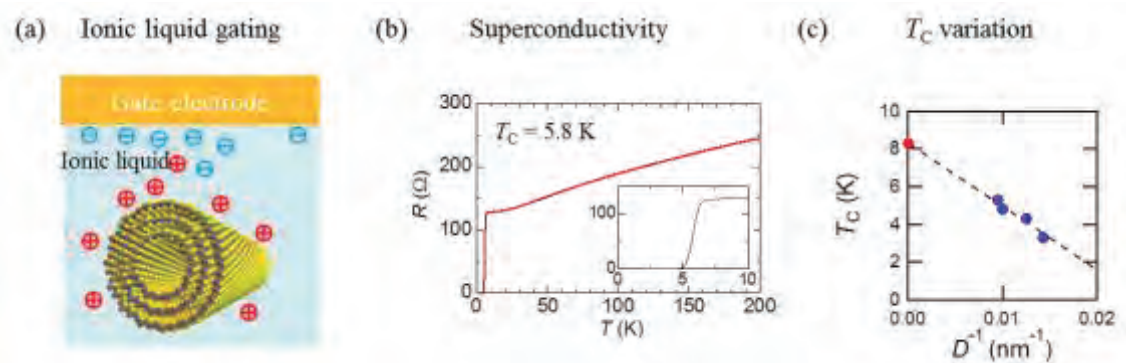


Figure 1. (a) Schematic figure of WS₂ nanotube with ionic liquid gate. (b) The temperature dependent resistance and superconducting transition with T_C of 5.8 K. (c) The critical temperature as a function of the diameter.

[1] R. Tenne *et al.*, *Nature* **360**, 444-460 (1992).

[2] F. Qin *et al.*, *Nature Commun.* **8**, 14465 (2017).

[3] W. A. Little *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 9 (1962).

構造情報に基づく 4-HIL 合成酵素の立体選択性の制御 Structure-guided optimization of stereoselectivity of 4-HIL synthase

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科・応用生命化学専攻

○石玄¹、宮川拓也¹、中村颯¹、侯峰¹、田之倉優¹

² 京都大学大学院農学研究科・応用生命科学専攻

日比慎²、小川順²

4-hydroxyisoleucin (4-HIL) は天然アミノ酸の一種であり、分子内に3つの不斉中心をもつことから8種類の立体異性体をとる。香辛料として利用されているフェヌグリークの種子から4-HILの2種類の異性体が単離され、その一方の2*S*,3*R*,4*S*体はヒトやラットにおいて膵臓を刺激してインスリン分泌活性を示すことが見出されている。また、(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILは骨格筋や肝臓におけるインスリン抵抗性を改善する効果も認められ、その機構としてAMPキナーゼの活性化を介した経路が報告されている。経口糖尿病治療薬として期待される(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILはフェヌグリーク種子にわずか0.5 wt%しか含まれておらず、産業利用のために多様な合成法がこれまで検討されてきた。しかしながら、最も効率的な合成法でも立体選択性の厳密な制御は達成されておらず、最終的に他の立体異性体とのキラル分割が必要となる。最近、2-amino-3-methyl-4-keto pentanoic acid (AMKP) のラセミ体を還元し、(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILを生成する酵素として *Bacillus thuringiensis* 2e2 由来 AMKP還元酵素 HILDH が同定された。本酵素はNADHを補酵素とする還元反応により2*S*,3*R*,4*S*体を生成するが、その純度は13%であり、他に7種類の立体異性体が同時に生成する。

本研究では、(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILの効率合成を目的として、HILDHの構造情報に基づいた酵素改変により、AMKPラセミ体から(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILを高純度で生成する人工酵素の創出を試みた。HILDHと補酵素NADH、さらに基質アナログとしてコハク酸との複合体を結晶化し、X線結晶構造解析により2.35 Å分解能で結晶構造を決定した。コハク酸の結合様式と(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILのドッキングシミュレーションにより、4*R*体と4*S*体の立体選択性が1位のカルボキシル基を認識するアミノ酸残基の違いに起因することを推定した。さらに、(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILが触媒部位に結合した際に、3位のアミノ基の配向を固定するための変異導入位置を推定した。

これらの構造情報に基づいて各種の変異導入を行い、最終的に2カ所のアミノ酸残基の変異により、AMKPラセミ体から(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILを純度>99%で生成するHILDH改変体を創出することに成功した(図1)。これは、3つの不斉炭素を厳密に制御してカルボニル還元反応を触媒する酵素を人工合成した初めての例である。

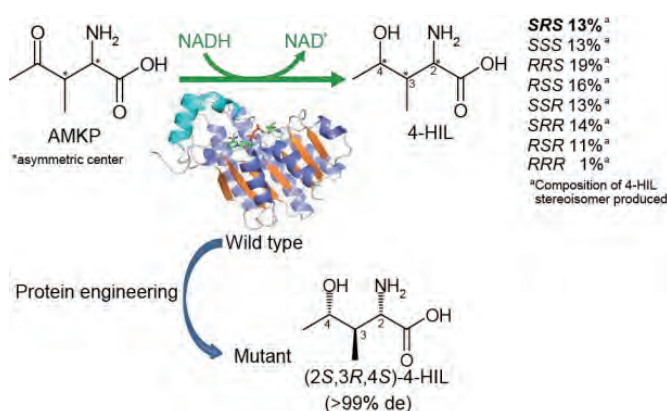


図1. AMKP還元酵素HILDHによるAMKPから4-HILへの還元反応と改変酵素による(2*S*,3*R*,4*S*)-4-HILの立体選択的合成

P-09

Cyanido-bridged metal assemblies with nano channeled or thermally stable structures

理学系研究科化学専攻大越研究室

中林耕二、シモン ホラジー、小峯誠也、大越慎一

シアノ架橋型金属集積体は、構成素子として用いられる遷移金属イオン、溶媒分子、有機配位子を組み合わせることにより、多様な機能性を持った磁性体を構築することができる。当研究室では、これまでに光磁性体やプロトン伝導磁性体などを報告している^{1,2}。本発表では、ナノチャネル構造を有する強磁性体 $\text{Co}^{\text{II}}_7[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]_4\text{Cl}_2 \cdot 29\text{H}_2\text{O}$ (**CoW**) および高い耐熱性を示す層状メタ磁性体 $\text{Cs}_4\text{Co}^{\text{II}}[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]\text{Cl}_3$ (**CsCoW**) について報告する。

ナノチャネル強磁性体 **CoW** は、単結晶として得られ、X線結晶構造解析の結果より、遷移金属イオンがシアノ基で架橋された3次元構造を有することが明らかになった。また、本錯体は、直径 1.4 nm におよぶ大きなチャネル構造を有していた。液体ヘリウムを用いた磁気測定の結果からは、キュリー温度 29 K、保磁力 5500 Oe を示す強磁性体であることが示された³。一方、層状シアノ架橋型金属集積体 **CsCoW** は、単結晶 X線構造解析の結果より、2次元シートが重なった層状構造を有していることが明らかになった。**CsCoW** は、熱に対して安定であり、473 K においても結晶性を保ち、同様の層状構造を有していた。また、磁化測定より、25 K 以下において反強磁性転移を示し、外部磁場印加により反強磁性から強磁性へ変化するメタ磁性的挙動を示すことが明らかになった。メタ磁性の起源は、2次元シート内で強磁性秩序が起こり、その強磁性シート間は互いに反強磁性的に配列するような磁気秩序を形成し、外部磁場により反強磁性相から強磁性相に転移することに由来すると考えられる。

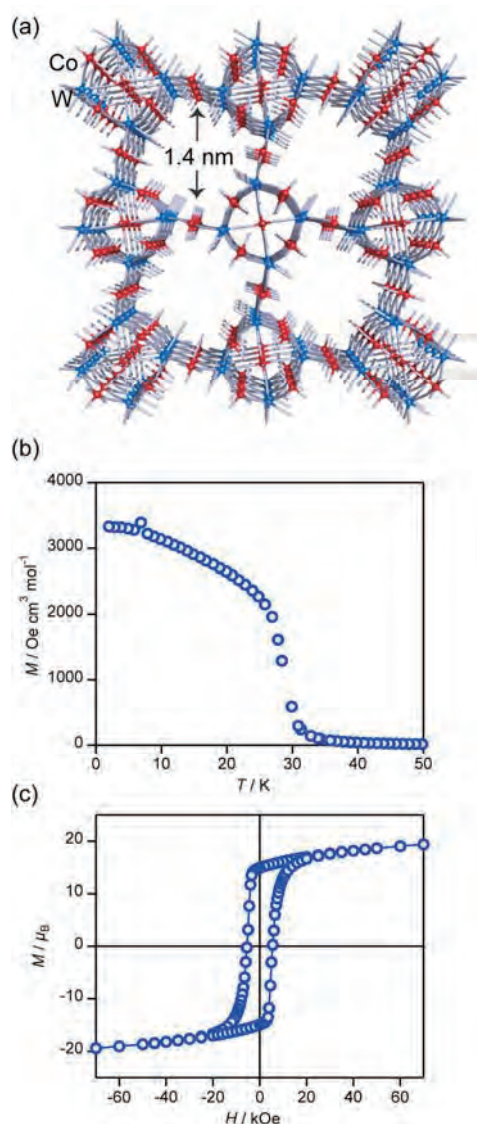


図1. (a) CoW の結晶構造, (b) CoW の温度-磁化曲線 (c) CoW の磁場-磁化曲線.

[1] S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, H. Tokoro, *Nature Chemistry*, **3**, 564 (2011).

[2] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 6620 (2010).

[3] K. Nakabayashi, S. Chorazy, M. Komine, Y. Miyamoto, D. Takahashi, B. Sieklucka, S. Ohkoshi *Cryst. Growth Des.*, **17**, 4511 (2017).

P-10

ソーラー水素製造用半導体光電極に対する表面コーティングの検討 Effect of Surface Coating onto a Semiconductor Photoelectrode for Solar Hydrogen Production

工学系研究科 化学システム工学専攻 堂免・嶺岸研究室

○兼古 寛之・嶺岸 耕・堂免 一成

半導体光電極を用いた光電気化学セルによる水分解反応は、太陽光と水のみから水素を製造する方法の一つとして注目されている。高い太陽光-水素エネルギー変換効率を目標とした場合、光吸収層にはナローバンドギャップ半導体を用いることが望ましい。一方で、ナローバンドギャップ半導体の多くは非酸化物系化合物であるが、このような材料は、特に酸化的な電位や極端な pH において、表面腐食及び反応触媒の脱落による顕著な劣化をしばしば引き起こす点が課題として挙げられる[1]。そこで本研究では、非酸化物半導体光電極の耐久性向上を狙い、 RuO_2 による表面被覆の効果を検討した。光電極表面の観察は、液体窒素トラップを備えた走査型電子顕微鏡 (S-4700, 日立) を用いた。

電極の光吸収層には、比較的長い吸収端波長 (900 nm) と広い動作電位 ($0.9 \text{ V}_{\text{RHE}}$) を両立する材料として最近報告された[2]、 $(\text{ZnSe})_{0.85}(\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2)_{0.15}$ 多結晶薄膜を用いた。光電着法[3]を用いて厚さ 6-10 nm の RuO_2 で表面被覆した後に電極化し、pH 13 に調節したリン酸カリウム水溶液中、3 電極式セルにおいて $0.6 \text{ V}_{\text{RHE}}$ に保持し、擬似太陽炉照射下において 10 h 以上水素生成反応を行った。その結果、 RuO_2 被覆を施さない電極では 3 h 以内に水素生成速度が 10 分の 1 に低下した。一方、被覆した

電極では、約 17 h の間明確な速度低下が観測されなかった。図 1 に反応前後の表面 SEM 像を比較する。無被覆のサンプルでは表面に無数のクラック状の腐食が生じた一方、被覆したサンプルでは表面に有意な形状変化は観測されないことから、 RuO_2 が安定な被覆材として機能することが明らかになった。

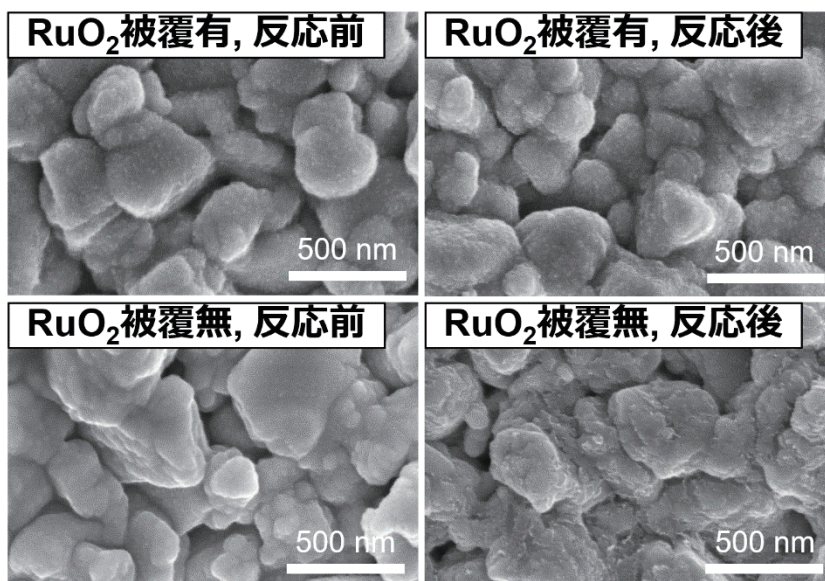


図 1. RuO_2 被覆処理の有無による、水素生成反応前後の $(\text{ZnSe})_{0.85}(\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2)_{0.15}$ 光電極の表面 SEM 像の変化。

[1] N. Guijarro *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **17** 15655 (2015)

[2] H. Kaneko *et al.*, Angew. Chemie Int. Ed. **55**, 15329 (2016)

[3] S. D. Tilley *et al.*, Adv. Funct. Mater. **24** 303 (2014)

Spin-Dependent Transport of Ferromagnetic-Semiconductor GaMnAs-Based Lateral Spin-Valve Devices

H. Asahara¹, T. Kanaki¹, S. Ohya^{1,2,3}, and M. Tanaka^{1,2}

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

² Center for Spintronics Research Network, The University of Tokyo

³ Institute of Engineering Innovation, Graduate School of Engineering,
The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Phone : +81-3-5841-6729 E-mail : asahara@cryst.t.u-tokyo.ac.jp

Spin metal-oxide-semiconductor field-effect-transistors (spin MOSFETs), whose source and drain are composed of ferromagnetic materials, are promising candidates for post-scaling era [1]. In the previous studies of spin MOSFETs, however, the magnetoresistance (MR) ratios reported so far were less than 1% [2, 3]. To improve the MR ratio for practical applications, it is necessary to use ferromagnets that are compatible with semiconductors for the suppression of spin scattering at the interfaces. The ferromagnetic semiconductor GaMnAs is one of the ideal model materials. We can obtain an atomically abrupt interface between GaMnAs and GaAs. In fact, we have recently obtained a high MR ratio up to 60% in a GaMnAs-based vertical spin MOSFET [4]. However, in our previous study of the vertical spin-MOSFET, the gate modulation of the drain current I_D was small ($\pm 0.5\%$) [4]. In this study, we fabricate GaMnAs-based *lateral* spin MOSFET structures, which are suitable for efficient gate modulation, and investigate the spin-dependent transport properties of these devices. We show a large MR ratio up to $\sim 10\%$ and successful gate modulation of I_D of $\sim 10\%$.

We fabricated a GaMnAs-based lateral spin-valve device whose channel length d is 200 nm shown in Fig. 1 (a). We measured the MR characteristics of this device with a magnetic field applied in the plane along the [110] axis [Fig. 1 (b)]. We obtained a high MR ratio ($\sim 10\%$). The MR ratio remained positive for all in-plane magnetic field directions, which confirms that this signal does not originate from tunnel anisotropic magnetoresistance (TAMR) but from the spin-valve effect. Furthermore, we fabricated a lateral spin MOSFET structure with $d = 100$ nm shown in Fig. 2 (a), and successfully modulated I_D by applying the gate voltage V_{GS} [Figs. 2 (b)-(d)].

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research including Specially Promoted Research, Project for Developing Innovation Systems of MEXT, and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

[1] S. Sugahara and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2307 (2004).

[2] R. Nakane, T. Harada, K. Sugiura, and M. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 113001 (2010).

[3] T. Tahara *et al.*, *Appl. Phys. Express* **8**, 113004 (2015).

[4] T. Kanaki, H. Asahara, S. Ohya, and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 242401 (2015).

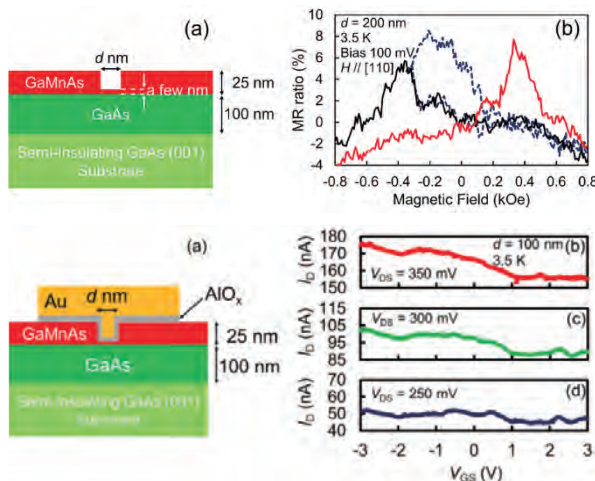


Fig. 1 (a) Schematic sample structure of the GaMnAs-based lateral spin-valve device with the channel length d . (b) Magnetic field dependence of the MR ratio measured at 3.5 K with a source-drain voltage of 100 mV and with a magnetic field applied in the plane along the [110] direction when d is 200 nm.

Fig. 2 (a) Schematic sample structure of the GaMnAs-based spin MOSFET. (b), (c), (d) V_{GS} dependence of I_D with the drain voltage V_{DS} of (b) 350 mV, (c) 300 mV, and (d) 250 mV at 3.5 K when d is 100 nm.

P-12

超伝導 Al-並列二重ナノ細線 InAs-超伝導 Al デバイスでの 超伝導電流の非局所信号の検出

Non-Local Signal of Supercurrent in Al – Double Nanowires InAs – Al device

東京大工^A、理研 CEMS^B、北京大^C、ルンド大^D

上田健人^A、松尾貞茂^A、鎌田大^B、佐藤洋介^A、武重有祐^A、K. Li^C、S. Jeppesen^D、K. Deppert^D、L. Samuelson^D、H. Q. Xu^{C,D}、樽茶清悟^{A,B}

超伝導体中のクーパー対は二つの電子のもつれによって形成される。このもつれ対を空間的に分離できれば、遠隔もつれ相関をもつスピン対を作り出すことができる。まず超伝導体と二つの量子ドットの接合で実験が行われた。量子ドットの静電エネルギーは同じ電極への二つの電子の透過を妨げることができ、それによって効率の良い分離現象が観測された[1]。他にもナノ細線中の量子ドットや自己形成型の量子ドットを介したクーパー対分離現象が研究されてきた[2]。しかし、量子ドットでの分離実験では分離効率が電極とドット間のトンネル結合に依存するため制御が困難であること、ドットを流れる電流量は小さいことから観測が困難であるという欠点がある。

そこで我々は二つの量子細線でのクーパー対分離の実現を目的として研究を行った。量子細線を用いることで局所的な電子対の透過を抑制でき、高効率の分離が期待できるからである[3]。我々はアルミニウムと並列二重 InAs ナノ細線のジョセフソン接合試料を作製し極低温で測定した。図 1 は微分伝導度のゲート電圧依存性である。ゲート電圧により単一ナノ細線のみが伝導に寄与する領域(SNW)と二つの細線の領域(DNW)の制御に成功した。SNW と DNW の領域で伝導度にプラトー構造が出現し、その部分での超伝導電流の観測にも成功した。その結果、DNW 領域のプラトー伝導度 $4e^2/h$ での超伝導電流(11 nA)が二つの SNW 領域のプラトー伝導度 $2e^2/h$ での超伝導電流の和(5 nA)より顕著に大きいことが確認された。これはクーパー対分離による増加と考えられる。この結果はクーパー対分離の新たな実験舞台を与えるとともに、この構造でのマヨラナ粒子の実現[4]へもつながるものである。

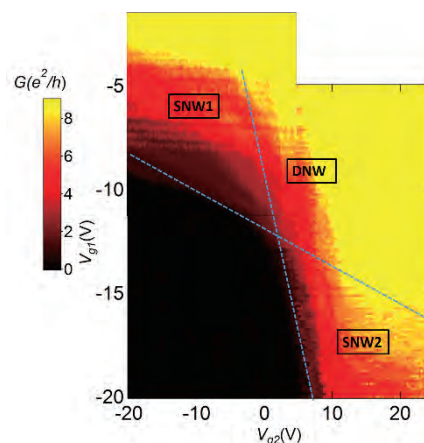


図 1 微分伝導度のゲート依存性

[1] L.Hofstetter, *et al.*, Nature **461**,960 (2009). [2] R. Deacon, *et al.*, Nat. Commun.**6**,7446 (2015). [3] P. richier, D. Loss Phys. Rev. B **65**, 165327 (2002). [4] J. Klinovaja,D. Loss Phys. Rev. B **90**, 045118 (2014).

Orbital magnetic moment anisotropy in heavy metal-Co heterointerfaces studied by x-ray magnetic circular dichroism

¹東大理藤森研、²東大理林研、³NIMS、⁴JASRI/SPRING-8、⁵KEK-PF
池震棟¹、Yongchang Lau^{2,3}、芝田悟朗¹、坂本祥哉¹、野中洋亮¹、
池田啓祐¹、万宇軒¹、鈴木雅弘¹、河村直己⁴、水牧仁一朗⁴、鈴木基寛⁴、
酒巻真粧子⁵、雨宮健太⁵、林将光^{2,3}、藤森淳¹

Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) [1,2] is considered to play an essential role in stabilizing Néel-type domain walls (DW) in 5d heavy metal (HM)/ferromagnet (FM) heterostructures. Such Néel-type DWs could be moved by electric currents due to the existence of spin-orbit torque. This phenomenon makes HM/FM heterostructures a promising candidate for future electrical-control of magnetic memory devices. However, the origin of DMI at the HM/FM interfaces is still unclear, making it a great obstacle to design practical devices. In experiment, it has been found that the strength and direction of DMI at the HM/FM heterointerfaces can be modulated by the HM underlayer [3,4]. Meanwhile, theoretically the orbital magnetic moment anisotropy (OMA) of HM and FM at the HM/FM heterostructures will also be changed by HM underlayers, which has similar HM-element dependence to DMI [5]. It suggests that there should be correlation between DMI and OMA at the HM/FM heterointerfaces.

In this study, the OMA of Co and HM at the HM/Co heterostructures were studied by x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) based on synchrotron radiation. It has been found that the OMA of Co in the HM/Co/HM heterostructures shows HM-element dependence which is similar to that of the strength of DMI (Fig. 1). The XMCD spectra at the Pt L edge of Pt/Co/MgO heterostructures were observed, supporting the fact that the magnetism of Pt can be induced by Co due to proximity effect. However, negligible OMA of Pt was observed in the results.

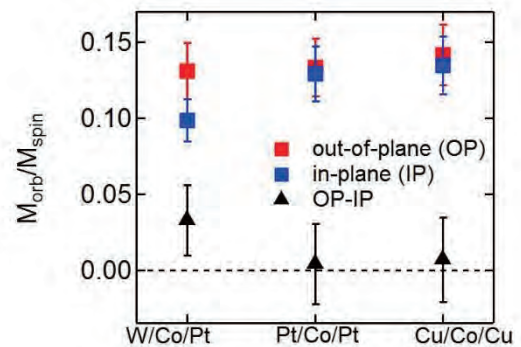


Fig. 1 HM element-dependent orbital magnetic moment of in HM/Co/HM.

Reference

- [1] I. E. Dzyaloshinskii, JETP **5** (6), 1259 (1957). [2] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).
[3] C. Chen *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2671 (2013). [4] J. Torrejon *et al.*, Nat. Commun. **5**, 4655 (2014).
[5] K. Yamamoto *et al.*, AIP Adv. **7**, 056302 (2017)

イオン液体を用いた PZT/Nb-SrTiO₃ 界面の伝導制御 Control of Electrical Conduction at PZT/Nb-SrTiO₃ Interface through Ionic-Liquid Gating

工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室¹, 理化学研究所 創発物性科学研究センター²
西野隆太郎¹, 小塚裕介¹, 賀川史敬^{1,2}, 打田正輝¹, 川崎雅司^{1,2}

【背景】イオン液体をゲート絶縁体とした電気二重層トランジスタでは、イオン液体/半導体界面に電気二重層が形成され、半導体層に 10^{14} cm^{-2} 以上のキャリアが蓄積される[1]。この値は典型的な強誘電体が持つ自発分極値とオーダーで一致するため、イオン液体/強誘電体界面ではキャリアの蓄積ではなく分極反転が生じることが報告されている[2]。本研究ではイオン液体を用いて強誘電体 $\text{PbTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3$ (PZT) の自発分極を反転させ、n型半導体である Nb ドープ SrTiO₃ の輸送特性の変調を行った。

【実験と結果】パルスレーザー堆積法を用いて SrTiO₃ 基板上に PZT/Nb-SrTiO₃ 積層膜を作製した。得られた薄膜を用いて電気二重層トランジスタを作製し、Nb-SrTiO₃ の輸送特性を評価した。図 1(a) に Nb-SrTiO₃ のシート抵抗 R_s のゲート電圧依存性を示す。ゲート電圧 V_G が正(負)の時に R_s は低(高)抵抗状態を示し、これらは $V_G = 0 \text{ V}$ でも維持される不揮発性を示した。また、 R_s はゲート電圧に対してヒステリシスを描き、強誘電体の P - E カーブと似た振る舞いが得られた。Hall 測定から求めた Nb-SrTiO₃ の 150 K でのキャリア密度は、低抵抗状態で $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、高抵抗状態で $5.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ であり、抵抗の変化は主にキャリア数の変化に起因することが示された。以上の結果は、図 1(b) のように強誘電体表面に吸着するイオンの符号が変化することで PZT の自発分極が反転され、Nb-SrTiO₃ のキャリア密度が変調されたことを示している。

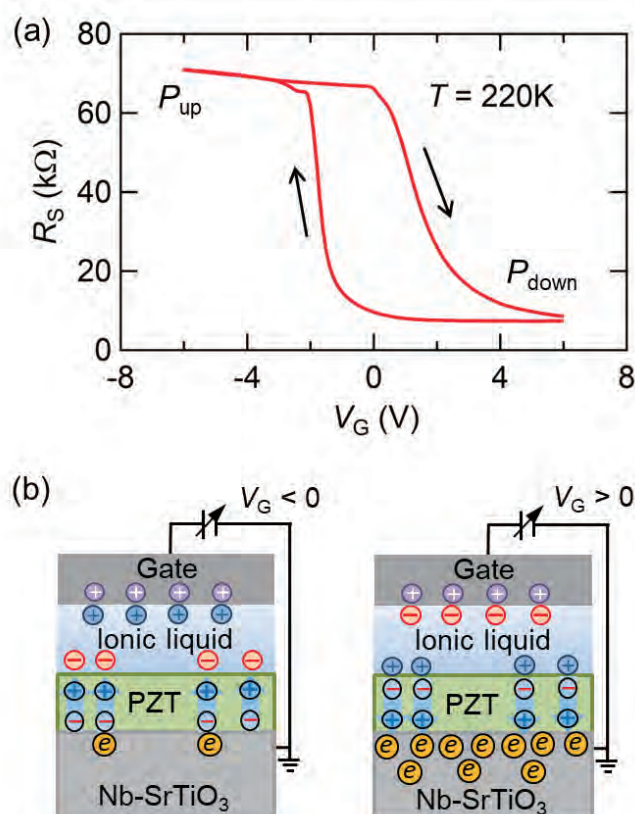


図 1(a) Nb-SrTiO₃ のシート抵抗 R_s のゲート電圧依存性 (b) ゲート電圧が正または負における PZT の分極方向の概略図

[1] H. Yuan, M. Kawasaki, Y. Iwasa *et al.*, *Adv. Func. Mater.* **19** 1046 (2009).

[2] A. Herklotz, H. N. Lee, M. R. Fitzsimmons *et al.*, *Nano Lett.* **17** 1665 (2017).

Design and synthesis of chiral Ln(III)-W(V) molecular magnets

Department of Chemistry, School of Science, Ohkoshi Laboratory

Olaf Stefanczyk, Kenta Imoto, Koji Nakabayashi, Shin-ichi Ohkoshi

The synthesis and design of new enantiopure chiral magnets is one of the major challenge in researches on the multifunctional molecule-based magnetic materials [1]. Interplay between magnetic properties and chirality enables us to observe unique magneto-optical cross-effects such as: magnetic circular dichroism [3], magneto-chiral dichroism [4] and magnetization-induced second harmonic generation (SHG) [2]. In last few years our group has made significant progresses in this scientific field and reported a unique effect of photoswitching of SHG polarization plane in the $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-}[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]^{4-}$ chiral photomagnets [5] and a novel SHG-active family of $\text{Ln}^{\text{III}}\text{-}[\text{Mo}^{\text{I}}(\text{CN})_5(\text{NO})]^{3-}$ molecule-based magnets [6].

In this work, we report 11 isostructural cyanido-bridged $\text{Ln}^{\text{III}}\text{-}[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]$ ($\text{Ln} = \text{Ce}$, **1**; Pr, **2**; Nd, **3**; Sm, **4**; Eu, **5**; Gd, **6**; Tb, **7**; Dy, **8**; Ho, **9**; Er, **10**; Tm, **11**) zigzag chains crystallizing in the non-centrosymmetric space group C2 (Fig. 1). All coordination polymers adopt two mirror-image forms due to the presence of

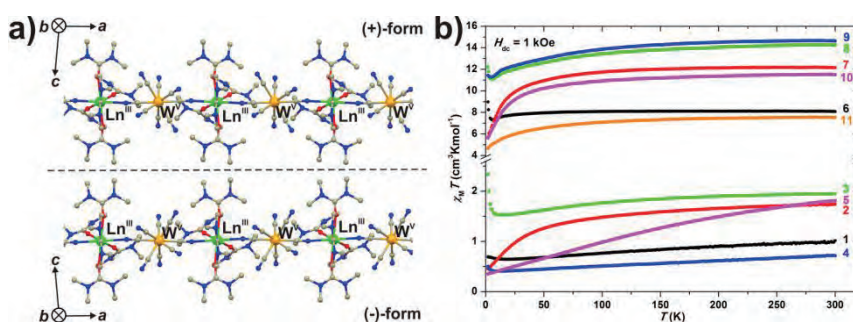


Fig. 1. Zigzag chain structures for both chiral forms of **1** – **11** and $\chi_M T(T)$ plots measured in $H_{\text{dc}} = 1$ kOe.

specific spatial organization of ligands around Ln(III) centres. The enantiopure character of assemblies has been confirmed by natural circular dichroism measurements. Furthermore, these materials reveal non-linear optical effect of second harmonic generation (SHG). Magnetic studies revealed that all assemblies exhibit the depopulation of the M_J sublevels of Ln^{3+} ions due to the splitting of the ground term by the ligand field, weak antiferromagnetic interactions through $\text{Ln}^{\text{III}}\text{-NC-W}^{\text{V}}$ linkages and weak ferromagnetic interaction between spin chains below 6 K for **1**, **3**, **4**, **6**, **8** and **9**. It is worth to notice that dynamic magnetic susceptibility measurements performed with application of an external magnetic field reveal occurrence of frequency dependent signals for **8**, **10** and **11**.

[1] C. Train, M. Gruselle and M. Verdaguer, *Chem. Soc. Rev.*, 2011, 40, 3297; [2] T. Nuida, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Sakurai, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127, 11604; [3] S. Chorazy, R. Podgajny, W. Nitek, T. Fic, E. Görlich, M. Rams, B. Sieklucka, *Chem. Commun.*, 2013, 49, 6731; [4] C. Train, R. Gheorghe, V. Krstic, L. M. Chamoreau, N. S. Ovanesyan, G. Rikken, M. Gruselle and M. Verdaguer, *Nature Materials*, 2008, 7, 729; [5] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai and H. Tokoro, *Nature Photonics*, 2014, 8, 65; [6] M. Komine, S. Chorazy, K. Imoto, K. Nakabayashi and S. Ohkoshi, *Cryst. Eng. Comm.*, 2017, 19, 18.

P-16

絶縁体的遷移金属カルコゲナイドヘテロ界面における電気伝導 Conducting hetero-interface between insulating transition-metal dichalcogenides

工学系研究科物理工学専攻岩佐研究室
柏原 悠太, 中野 匡規, 王 越, 岩佐 義宏

異なる絶縁体を接触させた界面における電気伝導は、良く知られた InAs/GaSb ヘテロ構造のみならず酸化物[1]や有機物[2]の界面においても幅広く観測されており、ヘリカルエッジモード[3]や2次元超伝導[4]など、様々な物理現象の舞台を提供してきた。本ポスター発表では、本研究においてごく最近発見した、IV 族および VI 族の絶縁体的な遷移金属カルコゲナイド (TMDC) を接触させたヘテロ界面における電気伝導について報告する。

分子線エピタキシー法と呼ばれる、物理蒸着法の一つを用いて図 1a に示すような WSe₂ と HfSe₂ あるいは ZrSe₂ を積層させた TMDC ヘテロ構造を作製した。各層の厚さは、反射高速電子線回折

(RHEED) の強度振動をモニターしながら精密に制御し (図 1b, 1c, 1d)、製膜後に X 線回折測定により面内配向が揃ったエピタキシャル成長が実現していることを確認した。

それらの試料に対して電極を蒸着し、電気抵抗の温度依存性を評価したところ、母体材料である WSe₂、HfSe₂ および ZrSe₂ はいずれも絶縁的であり、室温で 10⁷ Ω を超える電気抵抗を示すのに対して、これらを接合したヘテロ界面では有意な電気伝導が生じていることがわかった。発表では、伝導率の層数依存性やホール効果測定の結果なども合わせて、この新しい電荷移動界面の詳細について議論する。

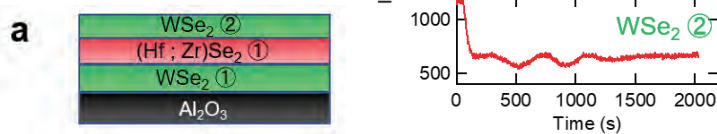


図 1 : a, TMDC ヘテロ構造模式図 b-d, 図中に示した層の成長中における RHEED 強度の時間変化

[1] A. Ohtomo et al., Nature 427, 423 (2004).

[2] H. Alves et al., Nat. Mater. 7, 574 (2008).

[3] I. Knez et al., Phys. Rev. Lett. 107, 136603 (2011).

[4] N. Reyren et al., Science 317, 1196 (2007).

P-17

超低温下で用いるヘリウム3融解圧力型温度計の設計 A design of Helium 3 melting curve thermometer that operates at ultra-low temperature

低温センター・理学系研究科物理学専攻／村川研究室
山崎 翔太 村川 智

非s波超伝導体、超流動体などの異方的BCS状態の物質の中には、その界面の局所的性質がバルクと大きく異なっているものがあることが知られ、トポロジカル超伝導体、超流動体として注目されている。超流動ヘリウム3はトポロジカル物質として知られており、不純物が非常に少ないためにバルクの性質がよく解明されているため、トポロジカル物質の表面状態を調べるのに適している。

転移温度が数mKの超流動ヘリウム3を研究する上で、超低温での正確な温度測定は非常に重要である。しかしながら、超低温における高性能な測温において、GeやRuO₂などの抵抗温度計では、低温になるほど抵抗値が急激に大きくなり、界面熱抵抗も $T^{-2} \sim T^{-3}$ で大きくなるため、ノイズや自己発熱によって被測温度と素子との間に温度差が生じてしまうという問題がある。

このような問題の発生しない、超低温における最適な温度計として、ヘリウム3融解圧力型温度計(MCT)がある。MCTは、ヘリウム3の融解圧力が1 mK程度の低温に至るまで、比較的大きな温度変化を示すことを利用した温度計である。圧力は超低温においても精密に測定できる物理量なので、MCTは高い分解能と再現性をもつ。測温域が $1 \leq T \leq 700$ mKと広い点、自身の発熱が無視できる点、また、ヘリウム3の融解圧曲線に温度定点が存在するため、それ自身が較正可能であるという点でも優れている。発表では、現在進行中のMCTの設計についても説明する。

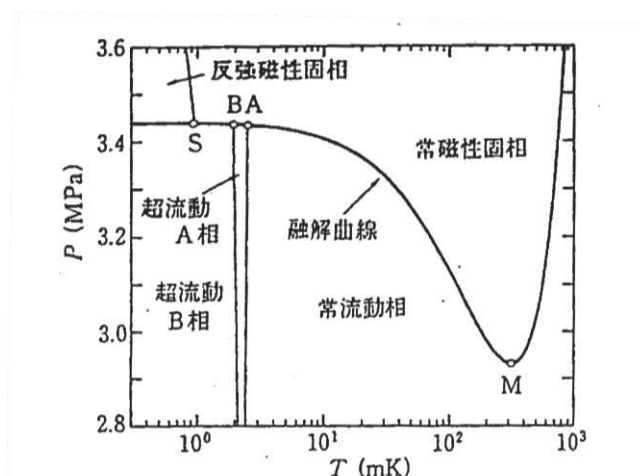


図1. ヘリウム3の相図 [1]

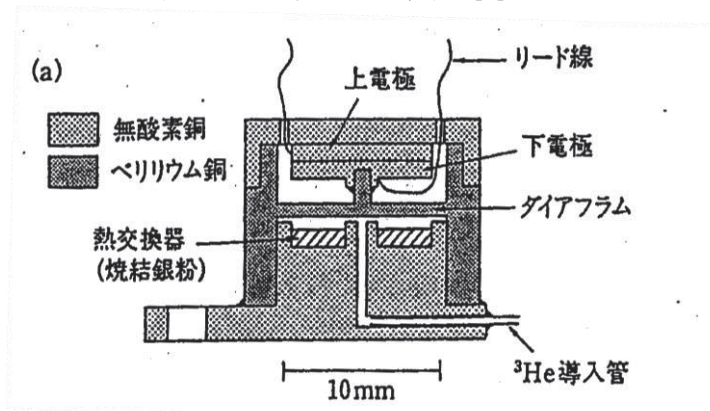


図2. MCTの設計 [1]

[1] 福山寛, 固体物理 vol. 30 938(1995)

P-18 マイクロ波信号多重化回路による γ 線 TES 読出実証

Development of microwave SQUID multiplexer for gamma-ray transition-edge sensor array

^A工学系研究科原子力国際専攻高橋研究室、^B国立研究開発法人 産業技術総合研究所
入松川 知也^{A,B}、大野 雅史^A、高橋 浩之^A、神代 暁^B、平山 文紀^B、山森 弘毅^B

1. 背景・目的

半導体検出器の分光性能を遥かに凌駕する性能が実現可能な超伝導転移端センサ (Transition-edge sensor, TES) は、より高精度の Pu 同位体比測定が可能であることから核物質の非破壊検査への応用が期待されている。しかしながら、TES は単一素子あたりの有感面積や応答速度が小さいため、実用のためには素子のアレイ化による検出効率の改善が必要である。さらに、TES の動作温度は極低温であり、アレイ素子数増大に伴う読出配線による熱流入等が問題になるため、信号多重化回路の開発が不可欠である。

本研究では、一本あたりの読出可能な TES 素子数に有利なマイクロ波信号多重化法 [1] に基づく信号多重読出回路を開発した。マイクロ波信号多重化とは、高 Q 値をもつ超伝導共振器を利用した周波数多重化法の一つである。図 1 に回路の模式図を示す。図のように、マイクロ波伝送線路上に異なる共振周波数 (f_R) をもつ $1/4$ 波長共振器を並べ、SQUID と呼ばれる TES の電流の関数となる可変インダクタンスで終端する。TES の電流変化によって、結合された SQUID のインダクタンスが変化し、共振周波数に変化がするので、TES の電流変化を f_R の変化として読出すことが可能となる。

2. 実験と結果

TES 信号の読出特性を評価するため Ho-166m を用いた γ 線照射実験を行った。実験においては冷凍機の熱浴温度を 100 mK まで冷却し、線源は冷凍機の外側に設置し TES に照射した。読出した γ 線信号の時定数がおよそ 0.130 ms が得られ、従来型単素子読出時と同程度の値となったことから、我々の開発したマイクロ波読出チップが我々の γ 線信号に十分追従する速度をもつことを実証できた。また、 γ 線を積算しエネルギー分解能を評価したところ、 $\Delta E_{FWHM} = 128$ eV, 115 eV @122 keV という値が得られた。読出系の雑音寄与は 60 eV 程度であり、全体の分解能の支配的制約要因とはなっていない。今後は設計の最適化等によりさらなる雑音の低減を図る。

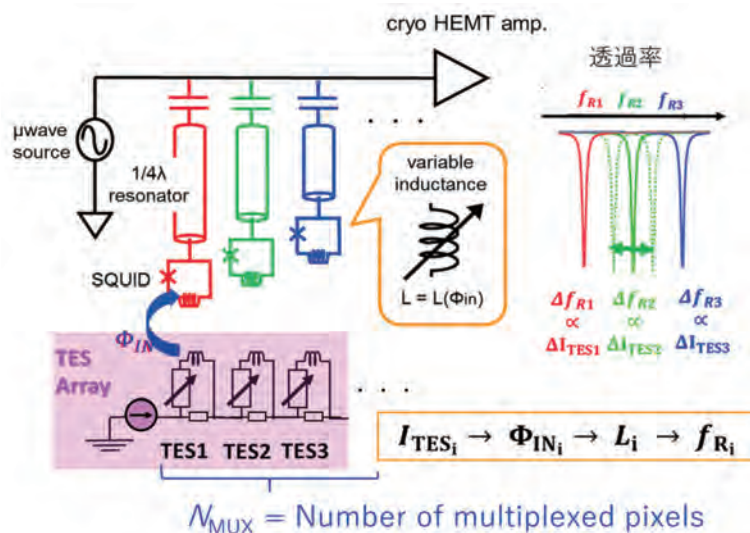


図 1. マイクロ波信号多重化原理模式図

[1] J.A B Mates et al, Appl. Phys. Lett **92**, (2008).

集積型 Co–W オクタシアノ錯体のテラヘルツ波吸収特性

Terahertz wave absorption of Co–W cyanido-bridged metal assemblies

理学系研究科 化学専攻 大越研究室

吉田郁哉、大野拓郎、井元健太、中林耕二、大越慎一

テラヘルツ波は、分子間振動や格子振動、磁性体の強磁性共鳴、プラズモン共鳴などを励起する電磁波であることが知られている。本研究では、電荷移動温度相転移を示すシアノ架橋型二次元層状金属錯体 $A\text{Co}[\text{W}(\text{CN})_8](3\text{-cyanopyridine})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ($A = \text{Rb}$ (**1**), Cs (**2**)[1])を合成し、これらに関するテラヘルツ波吸収を観測したのでこれを報告する。

1 の粉末試料は $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、3-シアノピリジンと RbCl の混合溶液に $\text{Rb}_3[\text{W}(\text{CN})_8]\cdot\text{H}_2\text{O}$ と RbCl の混合溶液を滴下し、24 時間攪拌することで得られた。また、**1** の単結晶は H 字管中で混合溶液を拡散させることで得られた。**2** の粉末試料は既報の方法を用いて合成した。296 K における **1** の単結晶構造解析から、**1** は三斜晶系 (空間群: $P\bar{1}$) に属しており、シアノ基によって架橋された Co と W から構成される二次元層状構造が形成されていることが明らかとなった (図 1)。また **2** は **1** と同形の結晶構造を有していた。層間にはルビジウムイオン Rb^+ 及び水分子が存在していた。また、**1** の 0.5 T 磁場下における磁化率の温度依存性を測定したところ、温度を下げることによってヒステリシスを伴う磁化率の急激な減少が見られた (図 2)。これより、**1** が高温では $\text{Co}^{\text{II}}_{\text{HS}}\text{-W}^{\text{V}}$ の電子状態を示し、低温では $\text{Co}^{\text{III}}_{\text{LS}}\text{-W}^{\text{IV}}$ の電子状態を示していると考えられる。

1 のテラヘルツ領域の吸収特性について、テラヘルツ時間領域分光法にて測定した。その結果、室温において 1 THz 付近に複数の吸収が観測された。また、**2** のスペクトルと比較したところ、1 THz 付近において **1** と異なる周波数に複数の吸収が観測されたことから、この吸収が層間のアルカリ金属イオンと関連したものであると示唆された[2]。また、液体ヘリウムを冷媒としたクライオスタットを用いて **1** の粉末試料のテラヘルツ吸収スペクトルの温度依存性を測定したところ、電荷移動温度相転移に伴って吸収周波数が変化した。

[1] Y. Arimoto, S. Ohkoshi, Z. J. Zhong, H. Seino, Y. Mizobe, K. Hashimoto, *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, 125, 9240. [2] S. Ohkoshi, M. Yoshikiyo, A. Namai, K. Nakagawa, K. Chiba, R. Fujiwara, H. Tokoro, *Sci. Rep.*, 2017, 7, 8088.

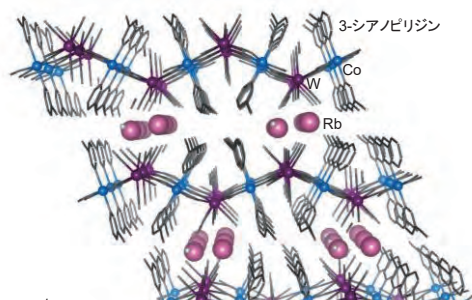


図 1. **1** の a 軸方向からの結晶構造。

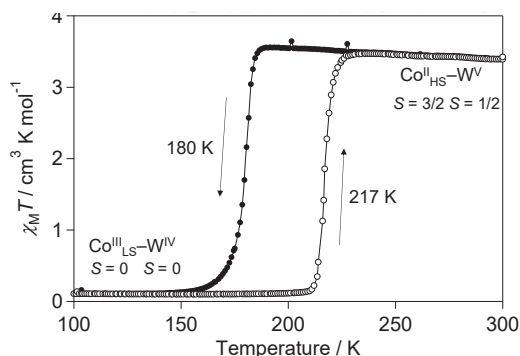


図 2. **1** の磁化率温度依存性。

GaAsの励起子共鳴励起下における光ドレスト状態の観測 Observation of light-dressed states under resonant excitation of excitons in GaAs

理学系研究科物理学専攻・島野研究室^A、物性研究所^B、低温センター^C
室谷悠太^A、金昌秀^B、秋山英文^B、島野亮^{A,C}

半導体に光を照射すると、価電子帯から伝導帯に電子が励起される。このとき、価電子帯に空く穴は正の電荷を持つ準粒子とみなすことができ、正孔と呼ばれる。電子と正孔の間のクーロン引力まで考慮すると、半導体の光吸収は「励起子 (exciton)」という束縛状態によって支配されることがわかる。実際、低温における半導体の光吸収スペクトルは励起子による鋭い吸収線を示す (図1(b)黒線)。

このような吸収線に共鳴した強い光を照射すると、電子正孔対が作る大きな電気分極と光電場が共存した「光ドレスト状態」が作られる。この結果、もっとも単純には吸収ピークが分裂する [1]。しかし強励起下では、励起子同士の相互作用 (多体効果という) が無視できなくなり、光ドレスト状態も複雑化すると考えられる。光ドレスト状態の理解は、外から光を入射することなく自発的に大きな電気分極が生まれる量子凝縮相 (励起子の BEC など) を理解する上でも有力な手がかりとなる。

そこで我々はポンププローブ分光法を用い、5 K に冷やした砒化ガリウム (GaAs) の三次元結晶を対象に光ドレスト状態の光学応答を調べた。この手法では試料に強いポンプ光を照射して光ドレスト状態を作り、ある遅延時間 Δt をつけて弱いプローブ光を入射することで、その時刻における試料の吸収スペクトルを測定する (図 1(a))。その結果を図 1(b)の色つき線として示した。遅延時間の -3 ps はポンプ光の照射中に相当する。ポンプ光は重い正孔励起子 (Heavy Hole Exciton) に共鳴しており、励起強度を上げていくと (寒色→暖色)、励起されたピークの分裂が見られる。しかしながら分裂はもとの吸収ピークに対して非対称であり、多体効果の影響が現れている。講演では励起条件や遅延時間への依存性も示し、観測された分裂の物理的起源について考察する予定である。

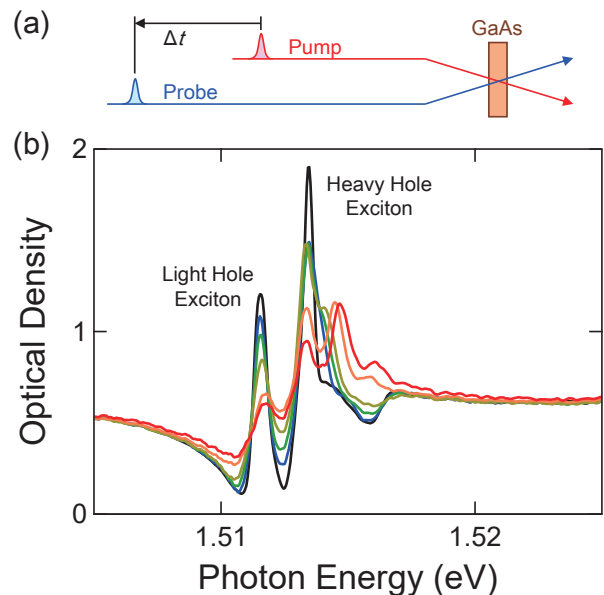


図 1. (a) ポンププローブ法の模式図。(b) 黒線：光励起なしでの吸収スペクトル。二種類の励起子ピークがある。色つき線：光励起したときの吸収スペクトル。寒色から暖色へと励起強度を増やしている。ポンププローブ遅延時間は-3 ps。

[1] M. Saba *et al.*, Phys. Rev. B **62**, 16322(R) (2000).

p 型ゲルマニウムから注入した共鳴トンネルキャリアによる
鉄量子井戸中の量子サイズ効果の検出

Quantum size effect in a Fe quantum well detected by resonant tunneling carriers
injected from a p-type Ge semiconductor electrode

工学系研究科電気系工学専攻 田中・大矢研究室
鈴木亮太, 若林勇希, 岡本浩平, 田中雅明, 大矢忍

Double-barrier magnetic tunnel junctions (DBMTJs) with a ferromagnetic quantum well (QW) are promising for future quantum spintronics devices. The quantized energy levels in ferromagnetic QWs are half metallic and thus are expected to increase tunnel magnetoresistance (TMR) [1]. In DBMTJs, the TMR ratio can be modulated by a bias voltage, which will bring new functionalities to spintronic devices. Until now, in the studies on the double-barrier metal-based MTJs, metal layers have been used for carrier injection [2 – 6]. However, neither negative differential resistance nor TMR enhancement has been reported for DBMTJs. Here, we use a semiconductor (SC) electrode to inject carriers to Fe QWs. SCs have a small Fermi surface and the carriers have small in-plane wave vectors compared to metals. Thus, each subband in the Fe QW will be detected separately when injecting carriers from SCs, which will enhance resonant tunneling and improve the spin-polarization of the tunneling current in the Fe QWs.

In this study, we grew DBMTJs composed of Co (20 nm)/ Fe (20 nm)/ MgO (3 nm)/ Fe QW (d nm)/ MgO (2 nm)/ Ge:B (85 nm) on a p^+ -Ge(001) substrate using molecular beam epitaxy. The thickness d of the Fe QW layer is varied from 5.6 to 7.0 nm, and the boron doping concentration in Ge:B is $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. The TMR ratio was 137 % at 297 K and 237 % at 3.5 K with $d = 6.4$ nm at a bias voltage $V = -10$ mV, where holes were injected from the Ge:B layer to the DBMTJ. Figure 1 shows the $dI/dV - V$ and $d^2I/dV^2 - V$ curves of the DBMTJs with various d . We observed oscillations in the curves. One can see that dips or peaks are continuously shifted with d (see the same color arrows, which are assigned to the same resonant level). Using the phase accumulation model, the dip positions are well reproduced by the resonant levels in the Fe QW detected by holes in the Ge:B layer. We have successfully observed the quantum size effect using holes injected from the p^+ -Ge layer into the Fe QWs for the first time [7]. This work was partly supported by Giants-in-Aid for Scientific Research and Spintronics Research Network of Japan.

[1] Z.-Y. Lu and X.-G. Zhang, Phys. Rev. Lett. **94**, 207210 (2005).

[2] T. Nozaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 027208 (2006).

[3] T. Niizeki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 047207 (2008).

[4] P. Sheng *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102**, 032406 (2013).

[5] R. S. Liu *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 024411 (2013).

[6] B. S. Tao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 157204 (2015).

[7] R. Suzuki *et al.*, submitted.

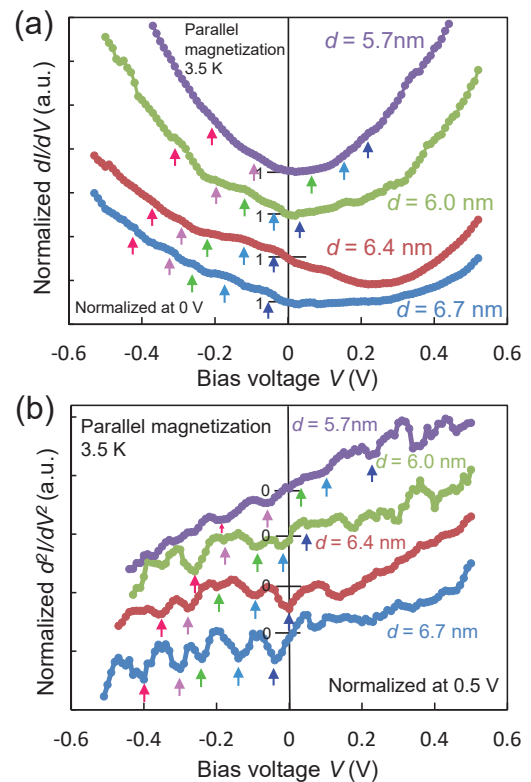


Fig. 1 $dI/dV - V$ and $d^2I/dV^2 - V$ curves of DBMTJs with various d . The oscillations are observed both at positive and negative bias voltages.

2層グラフェンのzLL（ゼロランダウ準位）における 非局所輸送測定

Non-local transport in bilayer graphene under magnetic field

工学系研究科 物理工学専攻 樽茶研究室

田中未羽子、島崎祐也、Ivan Borzenets、谷口尚、渡辺賢司、山本倫久、樽茶清悟

ホール効果は金属や半導体に磁場をかけた状態で電場を印加したとき、電子が電場に対して垂直なローレンツ力を感じて曲がる現象である。磁場がないにもかかわらず電子が電場に対して垂直な力を受ける現象を総称して異常ホール効果と呼ぶ。

炭素原子の蜂の巣格子状2次元物質であるグラフェンでは異常ホール効果の一種である「バレーホール効果」が起こることが知られている。バレーホール効果はバレー曲率が磁場と似た働きをすることで起こるが、バレー曲率はバンドギャップが開いているときのみ有限となる。今までバレーホール効果は外部電場や基板ポテンシャルを使ってギャップをあけた状態で観測されてきた[1][2][3]。

近年数層グラフェンのzLLでは電子相関によってスピンとバレーの対称性が自発的に破れてLAF (layer anti ferromagnetic)という状態が発現し、ギャップが開くことがわかってきた[4][5]。ギャップが開いているならばバレー曲率が生じる可能性がある[6]。我々はzLLのLAFギャップ中でバレーホール効果を観測するための実験を行った。

バレーホール効果はホール電圧を生じないので通常のホール測定で検出することはできず、非局所輸送測定を用いた(図1)。

LAFギャップは数meV以下と小さいので1.6Kの低温でギャップを確認した。電荷中性点(図の中央部)抵抗の極大が観測され、LAFギャップが存在することを確認した後、非局所輸送測定を行った。LAF状態(図の中央部)で非局所抵抗が増大するふるまいが見られた(図下)。

局所抵抗と非局所抵抗の温度依存性はバレーホール効果以外で非局所抵抗を生じる他の要因だけでは説明がつかず、バレーホール効果が起きている可能性が高いと考えている。

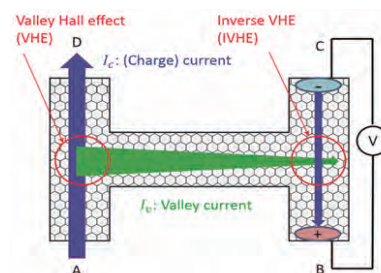


図1. 非局所輸送測定

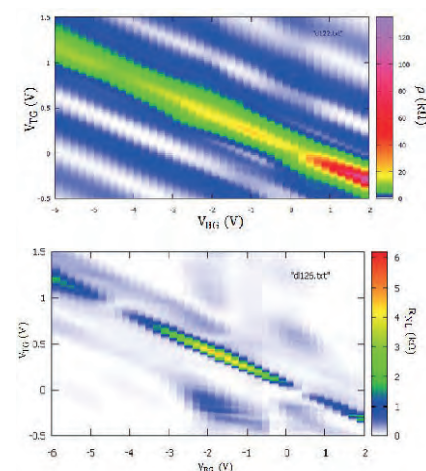


図2. 1.6 K, 2T 磁場下
局所抵抗(上)と非局所抵抗(下)

[1] R.V. Gorbachev, et.al. science **346**, 448 (2014)

[2] M. Sui, et.al. nature phys. **11**, 1027 (2015)

[3] Y. Shimazaki, et.al. nature phys. **11**, 1032 (2015)

[4] M. Kharitonov, et.al. PRB **85**, 155439 (2012)

[5] J. Velasco, et.al. nature nanotechnol. **7**, 156 (2012)

[6] F. Zhang, et.al. PRL **106**, 156801 (2011)

P-23

シアノ架橋型 Fe(II)スピנקロスオーバーネットワーク錯体 における金属置換効果

Influence of metal substitution in cyanido-bridged Fe(II) spin- crossover compounds

理学系研究科化学専攻大越研究室

井元健太、高野慎二郎、大越慎一

【緒言】当研究室では、シアノ基により金属イオンが架橋されたシアノ架橋金属錯体において、光や湿度といった外的刺激による磁気特性制御など様々な物性を報告してきた[1,2]。特に、 $[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]$ と Fe^{II} を組み合わせた系において、光誘起 Fe^{II} スピנקロスオーバーに基づく磁性のスイッチング現象を報告している[2]。本研究では、光誘起スピנקロスオーバー強磁性を観測している $\text{Fe}^{\text{II}}_2[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8](4\text{-ピリジンアルドキシム})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の Fe イオンを Co イオンで部分置換した化合物、 $(\text{Fe}^{\text{II}}_{1-x}\text{Co}^{\text{II}}_x)_2[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8](4\text{-ピリジンアルドキシム})_8 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ ($x = 0, 0.08, 0.29, 0.5, 0.79, 1$)の合成とその磁気特性に関して報告する[3]。

【実験】目的化合物は、 $\text{K}_4[\text{Nb}(\text{CN})_8]$ 水溶液と FeCl_2 、 CoCl_2 、アスコルビン酸、4-ピリジンアルドキシムの混合水溶液の反応により得た。物性評価は元素分析、粉末 X 線回折(XRD)、赤外吸収スペクトル(IR)および液体 He を冷媒として用いた超伝導量子干渉計(SQUID)により行った。

【結果と考察】元素分析より組成は $\text{Fe}_2[\text{Nb}(\text{CN})_8](4\text{-メチルピリジン})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と判明した。粉末 X 線回折パターンの Rietveld 解析結果から、得られた化合物は全て同系の結晶構造を有していることが示唆された。空間群は正方晶 $I4_1/a$ であり、 Fe^{II} サイトには有機配位子の N 原子 4 つとシアノ基の N 原子 2 つが配位し、Nb サイトに配位した 8 つのシアノ基のうち 4 つが Fe サイトと架橋し、残りの 4 つは架橋していなかった。Co の置換量が増加するにつれて、格子定数は少しずつ減少することが判った。これは、 Co^{II} のイオン半径が Fe^{II} (高スピン, $S = 2$)に比べてやや小さいことに起因すると考えられる。磁化率温度積(χ_{MT})の温度依存性の測定の結果、300 K での χ_{MT} 値は Fe^{II} (高スピン, $S = 2$)、 Co^{II} (高スピン, $S = 3/2$)、 Nb^{IV} ($S = 1/2$)の合計から計算される値と一致したが、温度を下げると Fe を含む全ての化合物において 150 K 付近から χ_{MT} 値が減少が観測された。IR スペクトルの温度変化から、 Fe^{II} (高スピン, $S = 2$)から Fe^{II} (低スピン, $S = 0$)へのスピנקロスオーバー現象の発現が示唆された。また、Co の置換量が増加するにつれて、転移温度が下がるとともに転移が緩やかになる傾向が観測された。転移温度の低下は Co のイオン半径が Fe^{II} (高スピン, $S = 2$)と Fe^{II} (低スピン, $S = 0$)の平均に比べて大きいために高スピン状態がより安定化したこと、転移が緩やかになったのは、Fe サイトが Co サイトに置換されるにつれて Fe サイト間の平均距離が大きくなり協同効果が減少したことによると考えられる。また、Co を置換した錯体では、磁気相転移が観測され、 $x = 0.79$ のサンプルは磁気相転移温度 12 K および保磁力 3100 Oe を示すことが判った。

[1] S. Ohkoshi, H. Tokoro, *Accounts Chem. Res.*, 45, 1749 (2012). [2] S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, H. Tokoro, *Nature Photonics* 8, 65 (2014). [3] K. Imoto, S. Takano, S. Ohkoshi, *Inorganics* 5, 63 (2017).

P-24

一軸圧下における θ -(ET)₂I₃ の電気伝導特性 Electrical transport properties of θ -(ET)₂I₃ under uniaxial strain

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室¹, 東京理科大 理工学部 物理学科²
村瀬秀明¹, 竹原陵介¹, 宮川和也¹, 田村雅史², 鹿野田一司¹

硝子とは相互作用する粒子が結晶のような周期性を持たずに、流動性が消失したように見える状態である。その電子版とも言える電子ガラスが有機伝導体 θ -(ET)₂X において近年発見された[1,2]。電子相関が強いとき、電子密度が固有の周期を有した濃淡をつくり長距離秩序化することがある(電荷秩序, 絶縁体)。一方で、自由に電子が物質中を動き回る金属は電子の液体状態とも見なすことができる。電子ガラスは、電荷秩序が期待されるような状況にありながら長距離秩序を示さず、温度の低下とともに電子が関与した測定量の特徴的な時間が大きくなるといった古典的な硝子と同様の性質を示す。このような電子のガラス化の背景には θ -(ET)₂X の結晶格子の幾何学的性質が関係しているのではないかと考えられる。 θ -(ET)₂X は ET が二次元的な伝導層をつくり、ET 分子の配列(θ -型と呼ばれる)は異方的な三角格子とみなせる。また、ET は 2 サイトあたり 1 つの粒子を持つ。この格子で電荷秩序状態を作ろうとすると三角格子に起因して濃淡の配列が一意に定まらず多数の配置が存在する。このような格子の性質は幾何学的フラストレーションとして知られている。

本研究では電子ガラスの物理を解明するため、フラストレーションの大きさにより電子状態がどう変化するかを調べた。実験には既存の θ 系の物質の中で特に正三角格子性が高く、フラストレーションの大きい θ -(ET)₂I₃ を用いた。フラストレーションを変化させるため一軸圧により三角格子を歪ませ、その圧力下で電気抵抗を測定し電子状態を調べた。その結果、圧力とともに金属的な挙動から低温で絶縁体へと電子状態が変化することがわかった。この圧力下では電子ガラス的な振る舞いを見ることはできなかった。このことは三角格子系の電子状態を幾何学的フラストレーションのみで考えることはできず、 θ -(ET)₂I₃ の近傍にある例えば分子配列の対称性が異なる α 相まで含むような、より広い枠組みで考える必要がある。

当日は、この結果の詳細を議論する。

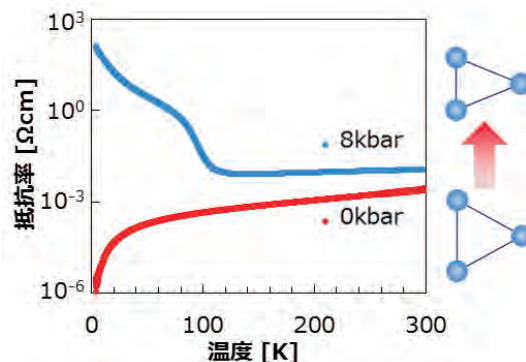


図 1. 一軸圧下の θ -(ET)₂I₃ の電気抵抗

[1] F.Kagawa, T.Sato, K.Miyagawa, K.Kanoda, et al, *Nat. Phys.* 9, 2642 (2013)

[2] T.Sato, F.Kagawa, K.Miyagawa, K.Kanoda, et al, *Phys. Rev. B* 89, 121102(R) (2014)

P-25

単原子層ヘリウム 3 の新奇スピン液体状態の解明に向けた
NMR セルの設計・製作

Design and construction of NMR cell for investigation of
novel spin liquid state in monolayer helium-3

低温センター^A, 理学系研究科物理学専攻^B

鈴木 尚将^A, 小川 勝之^B, 中村 龍司^B, 鎌田 雅博^B, 松井 朋裕^B, 村川 智^A, 福山 寛^{A,B}

グラファイトに吸着した単原子層 ³He は不純物などの影響を受けない理想的な 2 次元フェルミ系を形成する。³He は核スピン $S = 1/2$ を持っており、原子の多体交換を反映した多彩な磁性を示すことが知られている。最近、2 層 HD 膜でプレコートしたグラファイト上 ³He 単原子層膜 (以下、この系を ³He/HD/HD/gr と記す) において詳細な熱容量測定が行われ、面密度 $\rho = 4.74 \text{ nm}^{-2}$ において $T \leq 7 \text{ mK}$ で $C \propto T^{2/3}$ という特異な温度依存性を持つ新たな 2 次元量子相 (C3 相) が発見された[1]。また、C3 相近傍の面密度領域での帯磁率[2]は、 $\rho = 4.8, 5.0, 5.2 \text{ nm}^{-2}$ の面密度において $T \leq 10 \text{ mK}$ で $\chi \propto T^{-1/3}$ という特異な温度依存性を持つように見える。これらのことから、C3 相は $E \propto k^3$ の分散関係を持つ新しいタイプの量子スピン液体 (絶対零度までスピンの秩序しない状態) である可能性がある。しかし、熱容量測定に対して、帯磁率の ρ 依存性は詳細には測定されていない (図 2)。

そこで本研究では、C3 相を含む ³He/HD/HD/gr の様々な量子相の磁気的性質を調べるため、0.1 mK の超低温まで核帯磁率や緩和時間を測定できる新設計の NMR セルを製作している。設計では、交流磁場による渦電流発熱を抑えるため、グラファイト吸着基板と冷凍機との間の銀の熱リンクの形状を最適化したり、積算回数を増やして測定制度を上げるため、より薄いグラファイト基板を使って熱緩和時間を短くするなどの工夫をした。発表では、この NMR セルの設計と製作の詳細を報告する。

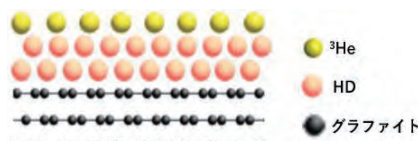


図 1 ³He/HD/HD/gr の概略図

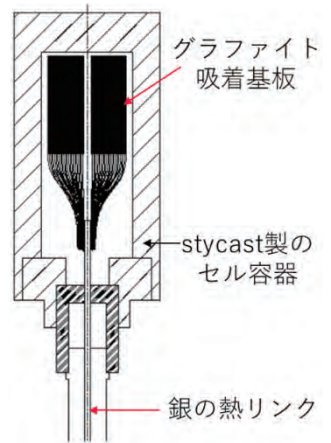


図 3 NMR セル概略図

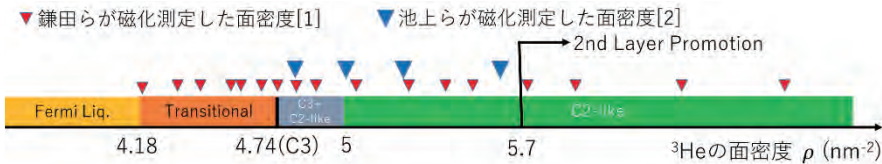


図 2 ³He/HD/HD/gr の低温相図[3]

[1] M. Kamada *et al.*, to be published.

[2] R. Masutomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 025301(2004), H. Ikegami *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5146(2000).

[3] 小川勝之, 東京大学 修士論文(2017).

分子線エピタキシー技術を用いて作製した NbSe₂ エピタキシャル薄膜における超伝導 Superconductivity in NbSe₂ epitaxial thin films grown by molecular-beam epitaxy.

東京大学大学院工学系研究科^A, 理研 CEMS^B

松岡 秀樹^A, 中野 匡規^A, 王 越^A, 柏原 悠太^A, 吉田 訓^A,
石坂 香子^{A, B}, 川崎 雅司^{A, B}, 岩佐義宏^{A, B}

遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition Metal Dichalcogenides, TMDs) は遷移金属とカルコゲンの組み合わせからなる多様な層状物質群である。近年、遷移金属ダイカルコゲナイドが単層極限において発現する様々な新奇物性が注目を集めている。具体例を挙げると、MoS₂やWSe₂などの半導体 TMD における空間反転対称性の破れや強いスピン軌道相互作用に起因するバレー偏極した発光特性・輸送特性や、NbSe₂におけるスピン軌道相互作用と連結した Ising 超伝導、TaS₂における超伝導転移温度の上昇、WTe₂におけるトポロジカル相転移など枚挙に暇がない。これらの二次元物性を詳細に探索し、さらに界面設計を利用した新奇物性の開拓へと広げていくためには、薄膜、特に単層極限の遷移金属ダイカルコゲナイド試料を安定的に得ることが重要となる。

これまで、単層 TMD の主な製造方法は、機械的剥離および化学気相成長であったが、これらの手法にはヘテロ界面作製の安定性や試料サイズといった観点から欠点が存在する。そのような欠点を克服する手法として期待されているのが分子線エピタキシー法(MBE)による薄膜作製である。特に、他グループが分光測定を目的としてグラフェンを始めとする導電性の高い基板における遷移金属ダイカルコゲナイドの薄膜成長を行う一方で、我々のグループは電荷輸送測定のため絶縁体基板上における遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の成長法を模索した (実験概図: 図 1)。その結果、MBE を用いた遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の layer-by-layer 成長を絶縁サファイア基板上において確立するとともに、WSe₂ 薄膜における両極性トランジスタ応答を達成した。[1]

本ポスター発表では、絶縁サファイア基板上におけるエピタキシャル NbSe₂ 薄膜の成長法に触れつつ、NbSe₂ 薄膜において実現した二次元超伝導物性について発表する。

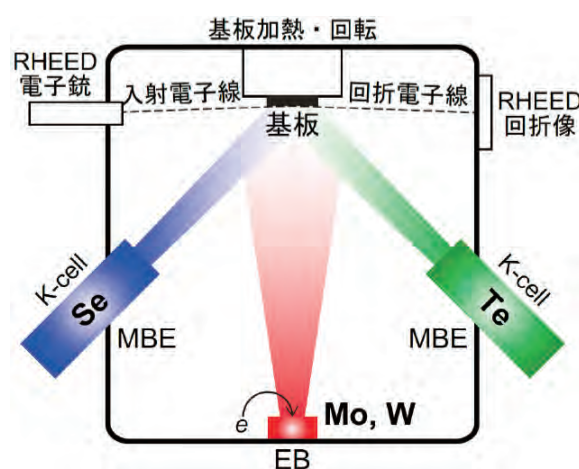


図 1. 本研究における分子線エピタキシー法の概図

[1] M. Nakano *et al.*, *Nano Lett.* **17**, 5595 (2017).

P-27

シアノ架橋型金属集積体における非線形磁気光学効果の観測 Observation of magnetization-induced second harmonic generation in a noncentrosymmetric cyanido-bridged metal assembly

理学系研究科・化学専攻・大越研究室

小峯 誠也、井元 健太、宮本 靖人、中林耕二、大越 慎一

中心対称性を持たない物質はその電気分極により、圧電性や二次の非線形光学効果を示す。さらに、中心対称性を持たない強磁性体は磁性と電気分極の相関により、磁化誘起第二高調波発生 (MSHG) などの特異な物性を示す。当研究室ではヘキサシアノ金属酸イオンやオクタシアノ金属酸イオンを構築素子として用いた集積型錯体において MSHG の観測に成功してきた^[1,2]。本研究では、ペンタシアノニトロシルモリブデン酸イオンを構築素子として用いた強磁性体において MSHG の観測に成功したので報告する。

アルゴン雰囲気下で $\text{Cs}_3[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})]$ と MnCl_2 、 CsCl を水中で混合することによって目的の化合物 $\text{Cs}_{1.26}\text{Mn}_{0.87}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})] \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ (**CsMnMo**) を得た。Rietveld 解析の結果、**CsMnMo** の結晶構造は中心対称性を持たない空間群 $F\bar{4}3m$ に属していることが示唆された (図 1)。

マンガンとモリブデンがシアノ基に架橋されることによって 3次元のネットワーク構造を形成していた。セシウムイオンがその格子間の 2 種類のサイトに異なる占有率で存在することが中心対称性を持たない結晶構造の原因であった。外部磁場 10 Oe における磁場中冷却磁化曲線は 65 K 以下で大きく立ち上がっていることから **CsMnMo** のキュリー温度は 65 K であることが明らかになった。また、2 K における飽和磁化の値は $3.4 \mu_B$ で Mn ($S = 5/2$) と Mo ($S = 1/2$) のスピンの反平行に整列した時の値に近かったことから **CsMnMo** はフェリ磁性体であることが示唆された。室温で **CsMnMo** にナノ秒パルスレーザーを照射したところ、第二高調波の出射が確認された。第二高調波強度の温度変化を図 2 に示す。第二高調波強度は 300 K から 100 K の間はほぼ同じ値であり、さらに温度を下げると強度が増加した。その形状は 5000 Oe における磁化率の温度依存性と似た挙動を示した。室温で観測される第二高調波は結晶構造の反転対称性の破れに起因する。一方、低温で第二高調波強度が増加するのは磁気秩序により結晶構造由来の SHG に加えて、磁気分極由来の MSHG が観測されたことによると考えられる。

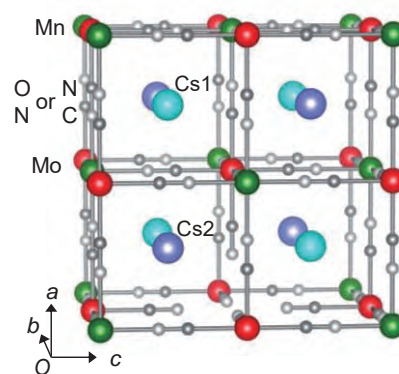


図 1. CsMnMo の結晶構造。

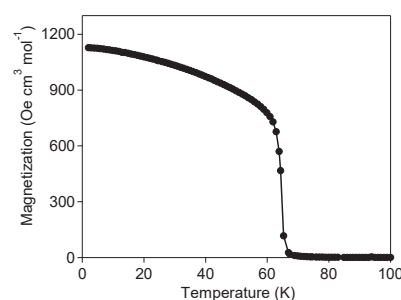


図 2. 10 Oe における磁場中冷却磁化曲線。

[1] T. Nuida, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Sakurai, K. Hashimoto and S. Ohkoshi, *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127, 11604. [2] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, H. Tokoro, *Nature Photonics*, 2014, 8, 65.

強磁性 Co 酸化物薄膜における磁気輸送特性と電荷移動効果 Magneto-transport properties and charge transfer effect in ferromagnetic Co oxide thin films

東京大学大学院工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室
大内祐貴, 松野丈夫, 小塚裕介, 打田正輝, 川崎雅司

空間反転対称性の破れた磁性体では、隣り合う電子スピンの方向をねじる相互作用（ジャロシンスキー守谷相互作用）が生じ、磁気スキルミオンなどのスピントロニクス応用上興味深いスピン構造が誘起される。このようなスピン構造は強磁性体と非磁性体からなる人工的なヘテロ構造薄膜においても実現されるが、その予測は難しく、ヘテロ構造を構成する材料選択とジャロシンスキー守谷相互作用との関係は議論が続いている[1]。金属材料を用いた積層膜で多くの研究が行われてきたが、近年、単結晶基板上にエピタキシャル成長させた酸化物ヘテロ構造においても、非磁性体に強いスピン軌道相互作用を有する Ir 酸化物を用いることでスキルミオン形成が示された[2]。強磁性体を SrRuO_3 としたこのヘテロ構造では、スピン構造の電場制御を示唆する結果も得られており[3]、ヘテロ界面に由来するスピン現象の新たな研究対象として注目されている。

本研究では強磁性体としてペロブスカイト型 Co 酸化物に注目し、その磁気輸送特性を明らかにし、 SrIrO_3 とのヘテロ構造を作製することで、界面におけるスピン構造形成と電荷移動の関係を調べた。本系は界面で比較的大きな電荷移動を有すると期待され、電荷移動とジャロシンスキー守谷相互作用との関係を調べるのに適している。薄膜はパルスレーザー堆積法を用いて酸化物単結晶基板上に作製し、室温から低温（2 K）まで磁気輸送特性と磁化の測定によりスピン構造の電気的な検出を試みた。

各温度においてホール抵抗率の磁場依存性を見ると、強磁性体単膜では、Fig.1 に示すように強磁性に由来する異常ホール効果が符号反転を伴って観測された。これは SrRuO_3 と同様に、波数空間のバンドトポロジーと関連した内因性異常ホールを示唆する。一方、ヘテロ界面形成によるスピン構造形成を示す効果は観測されておらず、単体としてすでに強いスピン軌道相互作用を有する SrIrO_3 の場合、電荷移動が少ない方が界面由来のスピン構造形成に適することが示唆された。

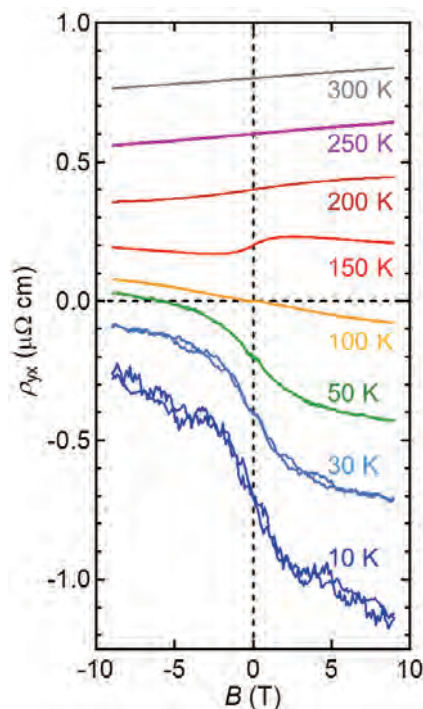


Fig. 1: Magnetic-field dependence of Hall resistivity in SrCoO_3 at various temperatures.

[1] F. Hellman *et al.* Rev. Mod. Phys. 89, 025006 (2017).

[2] J. Matsuno *et al.*, Sci. Adv. 2, e1600304 (2016).

[3] Y. Ohuchi *et al.* Nat. Commun. 9:213 (2018).

Electron-doped superconductor $\text{Pr}_{2-x-y}\text{La}_y\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ after protect annealing

東大理藤森研、高工研 PF^A、分子研 UVSOR^B、上智大理工^C、東北大工^D

C. Lin, M. Horio, K. Koshiishi, S. Nakata, K. Hagiwara, M. Suzuki, K. Ono^A, K. Horiba^A, H. Kumigashira^A, S. Ideta^B, K. Tanaka^B, T. Ohgi^D, T. Kawamata^D, H. Sato^D, Y. Koike^D, T. Adachi^C, and A. Fujimori

Electron-doped high-temperature superconductors (e-HTSC) are usually characterized by a much narrower superconducting (SC) dome and more robust antiferromagnetic phase in their phase diagram than their hole-doped counterparts. On the other hand, the SC state in single crystals of $\text{Pr}_{2-y-x}\text{La}_y\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ can be realized with relatively high T_c and low Ce concentration, in which partial substitution of Pr for La stabilizes the T' structure with electron doping [1]. In such a good system, Adachi *et al.* successfully synthesized bulk SC single crystals of $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (PLCCO) with $x=0.05, 0.10,$ and 0.15 ($T_c \sim 27$ K, Fig. 1, red circles) by utilizing the so-called “protect annealing” method [2]. In protect annealing, powdered samples were used to protect the surface from over-reduction, resulting in higher T_c .

The generally accepted phased diagram of e-HTSC regards the nominal Ce concentration as the electron doping level and shows very narrow SC dome (Fig. 1, blue empty markers [3]). Nevertheless, from angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) studies, we found that the electron concentration estimated from Fermi surface area can significantly deviate from the Ce doping level [3], which has also been confirmed by Song *et al.* who targeted on the conventionally annealed PLCCO [4]. In order to systematically investigate the possibly extended SC dome of protect-annealed PLCCO, we have determined the superconducting critical temperature of single-crystal PLCCO and performed ARPES measurements to estimate the electron concentration. The results in Fig. 1 reveal an extended SC dome, which may provide a clue for disentangling the long-standing puzzle of the asymmetry of phase diagrams of cuprate superconductors.

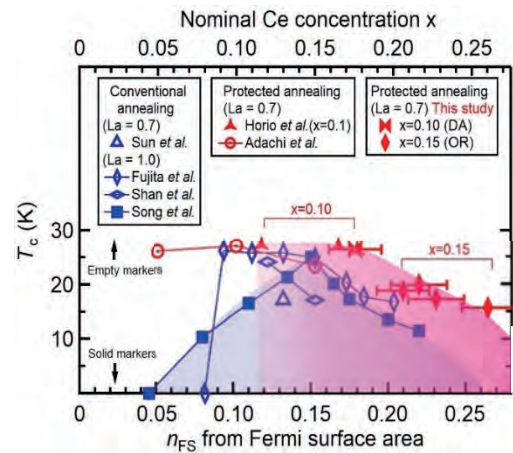


Fig. 1 Phase diagram of PLCCO. T_c vs x (Ce concentration) for empty markers and T_c vs n_{FS} (electron concentration from Fermi surface area) for solid markers.

- [1] Y. Koike *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 31, 2721 (1992).
 [2] T. Adachi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 063713 (2013).
 [3] M. Horio *et al.*, Nat. Commun. 7, 10567 (2016).
 [4] D. Song *et al.*, Phys. Rev. Lett. 118, 137001 (2017).

LaO エピタキシャル薄膜の超伝導特性 Superconducting properties of LaO epitaxial thin films

理学系研究科 化学専攻 固体化学研究室

神永 健一, 岡 大地, 福村 知昭, 長谷川 哲也

【研究背景】 岩塩構造 LaO はこれまで代表的な銅酸化物超伝導体である $(\text{La,Sr})_2\text{CuO}_4$ の層状構造に絶縁性ブロック層として内包されるかたちで存在してきた。一方、LaO の単相は、バルク多結晶試料が 1980 年に合成されている。しかし、それ以降合成報告がなく LaO の詳細な物性は未解明であった [1,2]。今回、我々は LaO の単相を高品質な単結晶のエピタキシャル薄膜として合成することに成功し、最高約 4.5 K の転移温度をもつ超伝導を発現することを発見したので報告する。

【実験結果】 成膜時の酸素分圧を精密に制御し、パルスレーザ堆積法により YAlO_3 (110)単結晶基板に薄膜を成長させた。LaO エピタキシャル薄膜は基板に対して面内方向に 45 度回転して成長し、基板から面内圧縮歪みを受けることで c 軸([001])方向に約 2%ほど伸長していた (Fig.1)。得られた LaO 薄膜の電気抵抗率および磁化率の温度依存性を Fig. 2 に示す。超伝導転移のオンセット温度は 4.56 K で、3.70 K でゼロ抵抗に至った。磁化率から超伝導体積分率は 81 %と見積もられ、バルク超伝導であることが分かった。当日の発表では、LaO の超伝導特性のさらなる詳細について報告する。

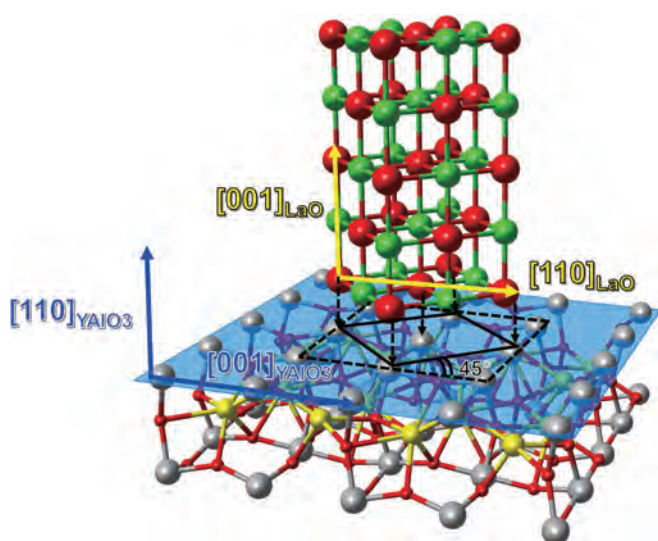


図 1. YAlO_3 (110)基板上的の LaO(001)薄膜の結晶模式図 ($[110]_{\text{LaO}}/[001]_{\text{YAlO}_3}$, $[001]_{\text{LaO}}/[110]_{\text{YAlO}_3}$)。

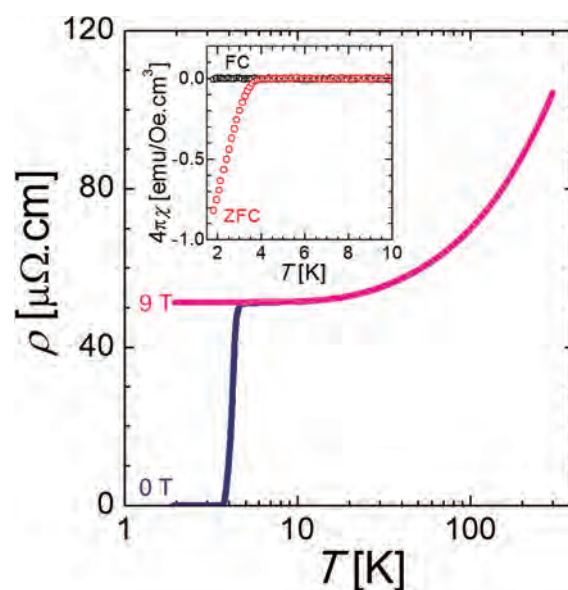


図 2. LaO 薄膜の抵抗率の温度依存性。図中では 10 Oe 下でのゼロ磁場冷却 (ZFC) および磁場中冷却 (FC) における磁化の温度依存性。

[1] J. M. Leger *et al.*, *Phys. Lett.* **80A**, 325 (1980).

[2] G. Krill *et al.*, *Solid State Commun.* **33**, 351 (1980).

Transport and magnetic properties of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As co-doped with Mn ; (In,Fe,Mn)As

○Taiki Hayakawa¹, Le Duc Anh^{1,2}, Kohei Okamoto¹, and Masaaki Tanaka^{1,3}

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

²Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo

³Center for Spintronics Research Network (CSRN), The University of Tokyo

東大工, °(M2)早川 奈伊紀¹, Le Duc Anh^{1,2}, (M2)岡本 浩平¹, 田中 雅明^{1,3}

東京大学工学系研究科¹ 電気系工学専攻、²総合研究機構、³CSRN

E-mail: hayakawa@cryst.t.u-tokyo.ac.jp

Recently, we have successfully grown the first *n*-type carrier-induced III - V ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As¹. It is shown that its magnetic properties can be controlled by strain^{2,3}, quantum confinement^{3,4}, and wavefunction engineering^{3,4}. In this study, in order to control both the carrier characteristics and magnetic properties of (In,Fe)As, we grew *n*-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As thin films co-doped with Mn, (In,Fe,Mn_x)As

We grew, from the top to the bottom, InAs/(In,Fe,Mn_x)As (10 nm, 236°C)/ In_{0.8}Al_{0.2}As (250 nm, 550°C)/ GaAs (100nm, 550°C) thin films by low-temperature molecular beam epitaxy (LT-MBE) on semi-insulating GaAs (001) substrates. While the Fe concentration is fixed at 6%, the Mn concentration *x* is varied; *x* = 0.4, 0.8, 2, 4 and 8%. Fig.1 (a) shows RHEED patterns after the MBE growth of 10 nm-thick (In,Fe_{0.06},Mn_x)As films, indicating zinc-blende crystals. We measured the transport and magnetic properties by Hall and MCD measurements. All the (In,Fe_{0.06},Mn_x)As films are found to be *n*-type. As shown in Fig.1 (b), when *x* is increased from 0.4% to 8%, the electron concentration *n* is decreased from 1×10^{18} to 3×10^{17} cm⁻³ and the Curie temperature *T_C* is also decreased from 16 to 0 K (paramagnetic). These results are reasonable because Mn atoms substitute for the In sites and supply holes, which compensate the electron carriers. As shown in Fig.1 (c), *T_C* increases from 0 to 16 K as *n* increases from 3×10^{17} to 1×10^{18} cm⁻³, confirming the electron-induced ferromagnetism of (In,Fe)As. The threshold *n* value for inducing ferromagnetism in (In,Fe,Mn)As is $\sim 8 \times 10^{17}$ cm⁻³ (at *x* = 2%), which is one order of magnitude lower than that (6×10^{18} cm⁻³) of the previous report¹ for (In,Fe_{0.05})As without Mn. This is advantageous for modulating the magnetic properties in a very wide range of electron concentration.

This work is partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research, and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

References

1. P. N. Hai, et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 182403 (2012); M. Tanaka, S. Ohya and P. N. Hai, Appl. Phys. Rev. **1**, 011102 (2014).
2. D. Sasaki, et al., Appl. Phys. Lett. **104**, 142406 (2014).
3. L. D. Anh, et al., Appl. Phys. Lett. **104**, 042404 (2014).
4. L. D. Anh, et al., Phys. Rev. B **92**, 161201 (2015).

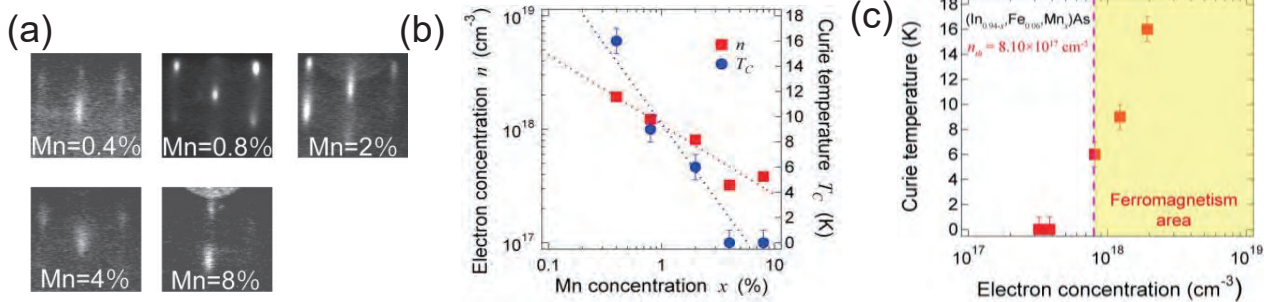


Fig.1 (a) RHEED patterns after the MBE growth of 10 nm-thick (In,Fe_{0.06}Mn_x)As films. (b) Electron concentration and Curie temperature vs. Mn concentration. Red square is Curie temperature and deep blue square is electron concentration. (c) Curie temperature vs. electron concentration.

極低温高密度下におけるバルク GaAs 中の 励起子間相互作用と励起子熱化ダイナミクス

Exciton-exciton interaction in a low-temperature and high-density exciton state in a bulk GaAs and the exciton thermalization dynamics

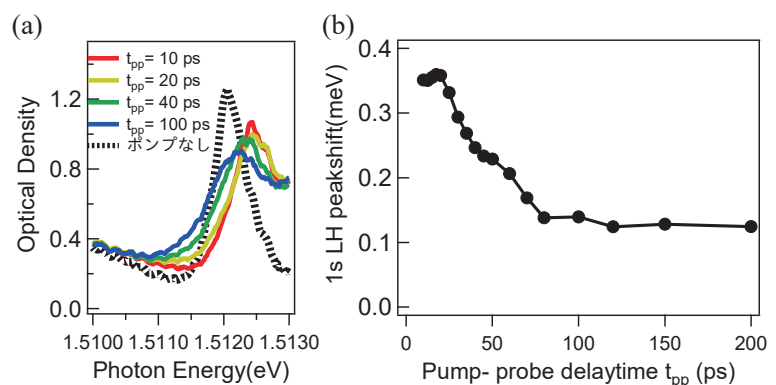
理学系研究科 物理学専攻 島野研究室^A, 東大物性研^B, 東大低温セ^C

高山正行^A, 江馬英信^A, 前田健人^A, 金昌秀^B, 秋山英文^B, 島野亮^{A,C}

擬ボース粒子である励起子は極低温でボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を示すと考えられている。その性質解明のためには、励起子間に働く相互作用のメカニズムを定量的に理解することが重要である。励起子間相互作用は励起子吸収・発光のピークのシフトとして観測され、主

に量子井戸中の2次元励起子系において多くの研究がなされてきた。しかし、3次元系においては励起子間相互作用が2次元系と比べて小さくなり[1]、実験が困難であることから、その定量的な評価は意外なことにこれまでほとんどなされなかった。

最近我々は、高品質の直接遷移型半導体 GaAs バルク結晶を対象に、選択的励起子共鳴励起による近赤外光ポンプ-プローブ分光法を用いて、励起子間相互作用に起因する励起子吸収ピークのブルーシフトの観測に成功し、その励起子密度依存性を詳細に評価することに成功した[2]。今回はこの励起子間相互作用のメカニズムを明らかにするため、ポンプ-プローブの遅延時間を変化させながら吸収スペクトルを測定し、ピークシフトのダイナミクスを詳しく調べた。図には格子温度 5 K、励起子密度 $3.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ での(a)軽い正孔(LH) 1s 励起子ピークシフトの様子と(b)シフト量の時間変化を示した。共鳴励起直後から 20 ps 後程度までは比較的大きなブルーシフトが観測され、その後 50 ps 程度でシフト量は減少し、100 ps 以降は準平衡状態に至っている様子が見てとれる。このピークシフトのダイナミクスは共鳴励起直後の極低温の励起子状態から、音響フォノンを介して格子温度まで熱化していく様子を反映していると考えられる。講演では励起子格子相互作用による励起子の熱化ダイナミクスの理論計算とも比較しながら、励起子の温度変化と励起子間相互作用エネルギーの温度依存性について詳細に議論する。



[1] S. Schmitt-Rink, D. S. Chemla and D. A. B. Miller, Phys. Rev. B **32**, 6601 (1985).

[2] 高山等 日本物理学会 第72回年次大会 20aB14-11.

P-33

Emission Color Modulation and Slow Magnetic Relaxation in the Series of Trimetallic Complexes

¹Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo

²Faculty of Chemistry, Jagiellonian University

Kunal Kumar,¹ Szymon Chorazy,^{1,2} Koji Nakabyashi,¹ Barbara Sieklucka,² Shin-ichi Ohkoshi¹

Inorganic complexes, especially with lanthanide, have diverse applications as tunable laser systems, light-emitting devices, amplifiers for optical communication, low-energy scintillators, optical storage materials, devices for light conversion, chemical sensors, molecular thermometers, photovoltaic light concentrators, and bioimaging tool [2]. Octacyanides and hexacyanides of d-transition metals (Nb^{IV}, Co^{III} etc.) along with organic ligands were used to synthesize many multifunctional materials showing novel properties, such as - switching of polarization of light [1]. In pursuit of multifunctional materials, series of cyano-bridged trimetallic complexes $\{[\text{Eu}^{\text{III}}_x\text{Tb}^{\text{III}}_{1-x}(3\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_4][\text{Co}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($x = 1, 0.8, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0$; compounds **A, B, C, D, E, F, G, H**) have been synthesized [2]. In order to know the structure of complexes, single crystal diffraction analyses were performed which confirmed that all the compounds are arranged in the Zig-Zag 1-D coordination chains parallel to [101] axis, and composed of $[\text{Co}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-}$ and $[\text{Eu}^{\text{III}}(\mu\text{-NC})_2(3\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_4]^+$ in alternate fashion (Figure 1). The emission colors of these complexes can be tuned by the composition ratio of Eu/Tb and excitation wavelengths. (Figure 1). The luminescence color varies from red to green via orange and yellow as indicated in the adjacent figure.

Furthermore, the magnetic properties of all the complexes was also found to be excellent as it shows temperature-dependent paramagnetic behavior mainly due to lanthanide ions. The presence of anisotropic Tb^{III} ions in the complexes **B-H** helps them to behave as a single molecular magnet. The magnetically diluted complex **B** (Figure 1) shows slow field-induced slow magnetic relaxation process with an energy barrier of $\Delta E/k_B$ of 35.8(6) K and $\tau_0 = 1.1(2) \times 10^{-8}$ s at $H_{\text{dc}} = 1500$ dc Oe, showing single-molecule magnet behavior. It shows thermal dependent single relaxation process with one maxima as shown in figure 1.

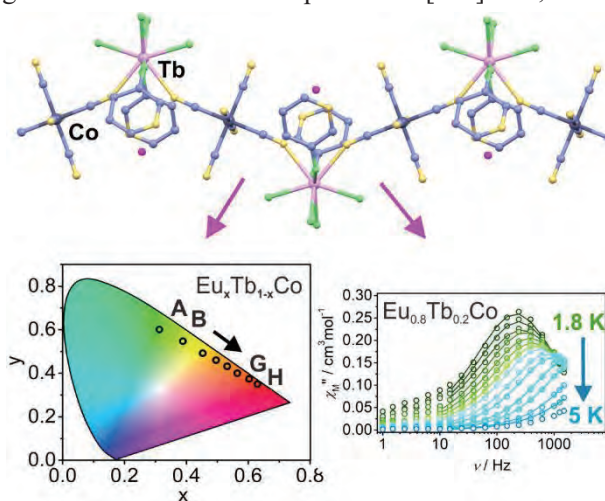


Figure 1. The representative fragment of cyanide bridged chain of all compounds, emission color of compounds **A-H** and the frequency dependence of out of plane component (χ''_M) of ac magnetic susceptibility for compound **B**.

1) S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, and H. Tokoro, *Nature Photonics* 2014, 8, 65-71. 2) S. Chorazy, K. Kumar, K. Nakabyashi, B. Sieklucka and S. Ohkoshi *Inorg. Chem.*, 2017, 56, 5239-5252.

P-34

Measurements of thermoelectric effects in the quasi-2D organic conductor κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室
若松浩大、藤井武則、宮川和也、谷口弘三、鹿野田一司

本研究の対象である物質 κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ は擬2次元有機超伝導体である。有機導体はファンデルワールス結合で弱く結合しているため圧力によるバンド幅制御が可能となっている。一方で、銅酸化物に代表されるような無機物質で行われているバンドフィリング制御は有機導体では困難となっている。 κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ はアニオン層の水銀が不整合な周期で配列しているため、有機導体では例外的な11%ホールドーピングが実現している系であり、ドーピングされた系においてバンド幅制御による物性の研究が可能であり、強相関電子系の理解を深めることができると期待されている。また、

κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ におけるスピン磁化率はスピン液体である物質と同様の振舞いを示す一方、ホールドーピングに起因する伝導性もあることが確認されている。このことから、

κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ はスピン液体にドーピングした系と考えられており[1]、スピン液体と超伝導という観点からも興味深い物質となっている。先行研究によって、得られた温度-圧力相図が図1である。低圧から高圧にかけて非フェルミ液体からフェルミ液体へのクロスオーバーが見られること、超伝導の転移温度が圧力に対してドーム型構造をしていることが特徴として挙げられる。超伝導相においては、上部臨界磁場の測定から見積もられたコヒーレンス長が低圧側と高圧側で異なっており、超伝導の描像も電子相関によって変化していることが示唆されている[3,4]。

本研究では、圧力印加により電子相関を変化させ、熱電効果(ゼーベック効果とネルンスト効果)を測定し、常伝導相と超伝導相それぞれの性質を調べた。

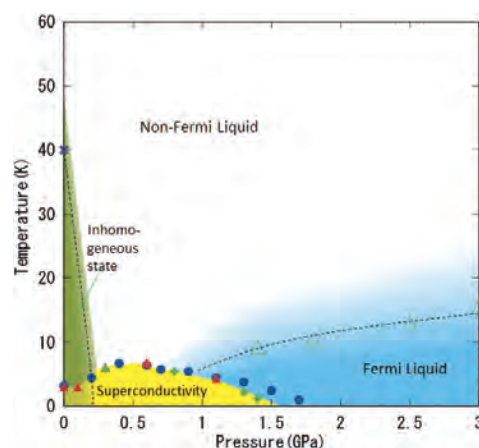


図1. κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ の温度-圧力相図[2]

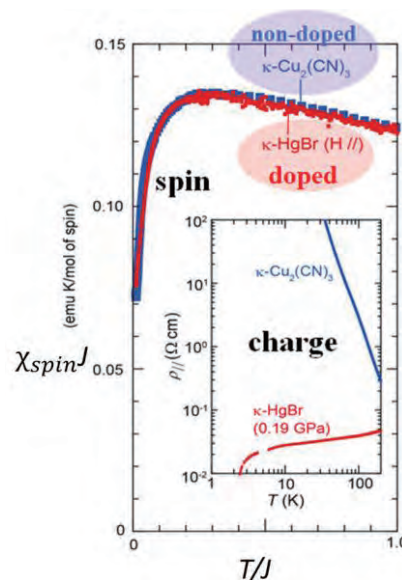


図2. κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ のスピン磁化率と抵抗率[1]

- [1]H. Oike, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 756 (2017).
 [2]H. Oike, Doctoral Thesis (2013).
 [3]H. Oike *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 067002 (2015).
 [4]Y. Suzuki, Master Thesis (2017).

超流動ヘリウム 3 における 量子アンドレーエフ反射角度依存性観測装置の開発

Development of Equipment to Observe Angle Dependence of Quantum Andreev Reflection in Superfluid Helium Three

低温センター 村川研究室

吉田 研介, 村川 智

超流動ヘリウム 3 は、軌道角運動量 $L=1$ 、スピン角運動量 $S=1$ の対をつくり凝縮する p 波三重項超流動体として知られている。1S 超伝導体などにはない多くの自由度を持っているため、A 相、B 相など様々な状態相が存在する。近年、トポロジカル超伝導体をはじめとする“トポロジカル”な物質が物性物理の世界で注目を集めているが、この超流動ヘリウム 3-B 相もトポロジカル超流動体であり、その表面ではギャップが閉じている[1]。この特異な表面状態を記述する準粒子は、粒子と反粒子が等価なマヨラナ粒子であると考えられており、その準粒子の面内方向の波数に対するエネルギー分散はマヨラナコーンと呼ばれる線形分散になると期待される。

我々の研究では、トポロジカル超流動体である超流動ヘリウム 3-B 相の表面状態を解き明かし、マヨラナコーンの実験的観測を目指す。その方法として、表面に励起した準粒子を入射させることで生じる量子アンドレーエフ反射と呼ばれる量子力学的な散乱現象を利用する。先行研究[2]で、自由表面で起こる量子アンドレーエフ反射の直接観測が成されているが、我々は新たに入射準粒子の角度を(即ち面内方向運動量を)変化させて量子アンドレーエフ反射を観測することができる測定セルを開発する。その際、入射角度をコントロールするために用いるステップングモーターと、準粒子を検知するための音叉型水晶振動子(QTF)が必要になる。本発表では、量子アンドレーエフ反射角度依存性観測装置の作成に先駆けて、これら必要なパーツについて行った実験結果について報告する。

図 1 は、液体窒素温度で行った QTF の圧力依存性測定の結果である。圧力が大きくなるにつれ共振周波数が小さくなり、シグナルのピークもつぶれていくことが確認できる。同様の測定を、異なる共振周波数をもつ QTF についても行った。

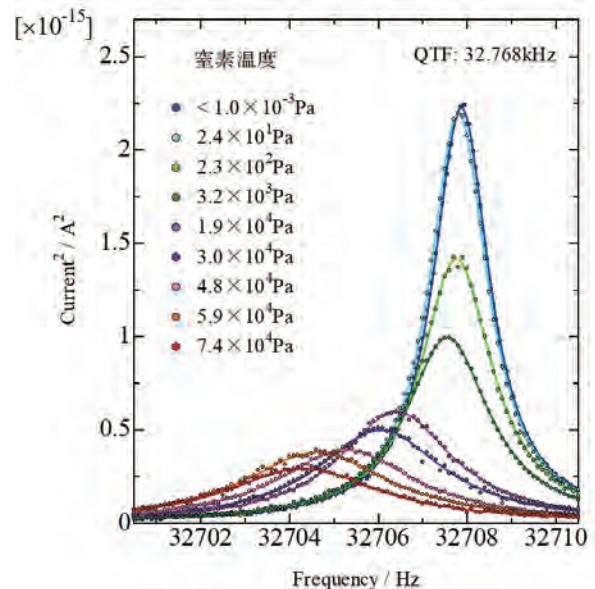


図 1. 窒素温度における QTF の圧力依存性

[1] Y. Nagato, M. Yamamoto, and K. Nagai: J. Low Temp. Phys. 110, 1135(1998).

[2] T. Okuda, H. Ikegami, H. Akimoto, and H. Ishimoto, Phys. Rev. Lett. 80, 2857(1998).

Transport properties of transition-metal dichalcogenide thin films grown by molecular beam epitaxy

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

Y. Wang^A, M. Nakano^A, Y. Kashiwabara^A, M. Onga^A, M. Yoshida^A, and Y. Iwasa^{A,B}

Emerging properties of 2D materials have attracted considerable attention since the discovery of graphene from both fundamental and applied viewpoints. To date, most of the researches have been performed on mechanically-exfoliated nano-thick crystals from top-down approach, while bottom-up approach by thin film growth and heterostructure fabrication technique has been of growing significance to further exploration of physical properties and practical device applications. We have been developing a fundamental route to well-controlled growth of high-quality transition-metal dichalcogenides (TMDCs) thin films, and recently succeeded in growing various TMDCs materials with properties ranging from semiconducting to metallic. We are going to show our growth details with transport data of successful sample, WSe₂ and TiSe₂, which exhibited single crystalline confirmed by X-ray diffraction(XRD). The obtained WSe₂ epitaxial thin films exhibited ambipolar transistor operation upon electrolyte gating with clear Hall signals for hole-accumulation regime with the maximum mobility of about 3 cm²/Vs at T = 150 K[1], which was in the highest level reported for the first-generation MoS₂ thin films grown by chemical-vapor deposition. Obtained 10-monolayer-thick TiSe₂ epitaxial thin films exhibited clear CDW transition at around T = 200 K with the sign change in the Hall coefficient, which is consistent to the behavior reported for bulk TiSe₂.

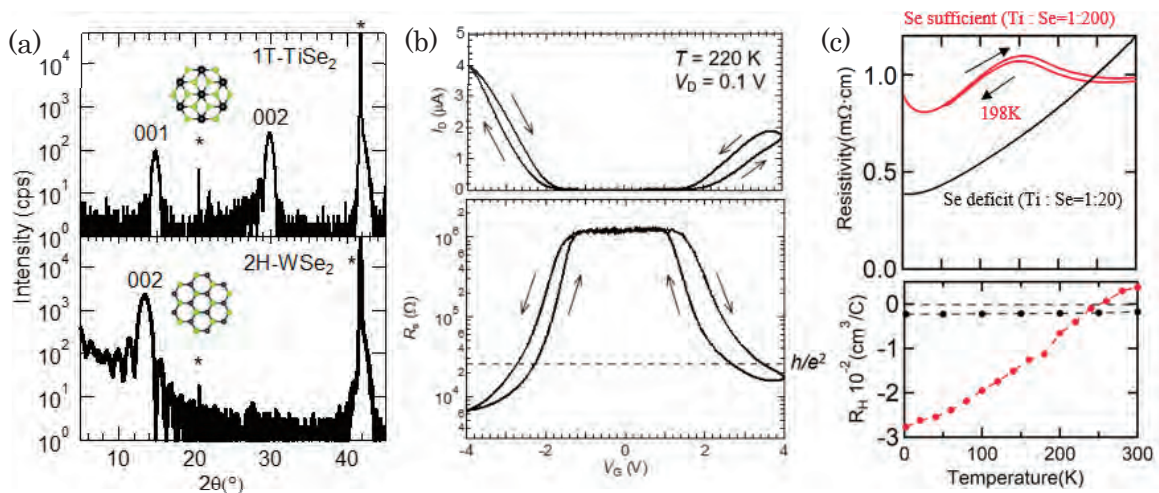


Fig 1. (a) XRD pattern of 1T-TiSe₂ and 2H-WSe₂. Insert is atomic structure of each polytype (top view). (b) ambipolar operation of EDLT device on WSe₂ (top) and sheet resistance (bottom). (c) Transport properties of TiSe₂ with different selenium level. Upper is R-T curve and lower is Hall coefficient.

[1] M. Nakano, Y. Wang, Y. Kashiwabara, H. Matsuoka, and Y. Iwasa. Nano Letters, 17, 5595-5599 (2017)

P-37

Cyanido-bridged d-f bimetallic frameworks showing dual functionalities of Dy-centered slow magnetic relaxation and color-tunable photoluminescence

¹Graduate School of Science, the University of Tokyo;

²Faculty of Chemistry, Jagiellonian University

Junhao Wang,¹ Szymon Chorazy,² Koji Nakabayashi,¹

Barbara Sieklucka,² Shin-ichi Ohkoshi¹

Cyanido-bridged bimetallic frameworks have gained immense scientific attention due to its synergetic effects between magnetism and optics, such as magnetization-induced second harmonic generation, magneto-chiral dichroism, and photo-induced spin-crossover.¹ To enrich this field by combining the single molecule magnet (SMM) behavior and photoluminescence, we report three cyanido-bridged d-f bimetallic materials of two types of structures:

(i) the layered coordination network, $\{[\text{Dy}^{\text{III}}(4\text{-pyridinol})_2(\text{H}_2\text{O})_2][\text{Co}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (**1**),² and (ii) the dinuclear molecule materials, $\{[\text{Dy}^{\text{III}}(4\text{-pyridone})_4(\text{H}_2\text{O})_2][\text{M}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (M = Co, **2a**; Rh, **2b**).³

Magnetic studies revealed the field-induced SMM behavior in **1** with two relaxation processes, and the effective energy barrier for faster process is 15.8(5) K. On the contrary, single slow magnetic relaxation process under zero dc field was revealed in **2a** and **2b**, with significantly enhanced effective energy barriers of 187(6) K, and 214(4) K respectively.

By varying the UV excitation wavelengths, all compounds exhibit the color-tunable emissions from yellow to greenish blue, due to the changing of the emission ratio of the components from Dy^{III} and organic ligand. Additionally, exciting **2b** by 348 nm could achieve the intriguing white light emission at room temperature.

The effects of the structural change and the transition metal substitution on photoluminescence and SMM behavior will be discussed.

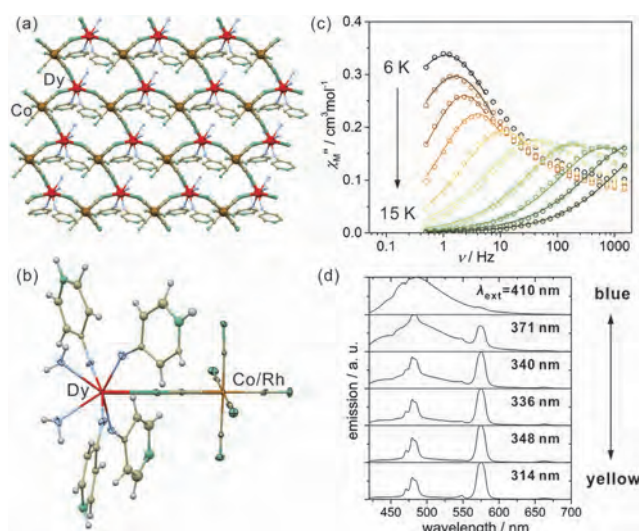


Figure 1. crystal structures of the layered polymer **1** (a) and the dinuclear molecules **2a/2b** (b), the dynamic magnetic properties of **2b** (c), and photoluminescence properties of **2b** (d)

[1] H. Tokoro, S. Ohkoshi, Dalton Trans. **40**, 6825 (2011). [2] S. Chorazy, J. Wang, S. Ohkoshi, Chem. Commun. **52**, 10795 (2016). [3] J. Wang, S. Chorazy, K. Nakabayashi, B. Sieklucka, S. Ohkoshi, J. Mater. Chem. C, DOI: 10.1039/c7tc03963h

SrTiO₃ 基板上的 EuTiO₃ 薄膜の高移動度化と磁気輸送特性Fabrication and magnetotransport properties of EuTiO₃ films on SrTiO₃ substrate

^A 東京大学工学系研究科物理工学専攻、^B 理研 CEMS、^C JST さきがけ
丸橋 一輝^A、高橋 圭^{B,C}、十倉 好紀^{A,B}、川崎 雅司^{A,B}

【背景】 EuTiO₃ は Eu²⁺ サイトに $7\mu_B$ の局在磁気モーメントをもつ反強磁性半導体であり、ネール温度は 5.5 K である。Eu を La に置換することで、電子ドーピングによるキャリア密度の制御と金属化が可能である。また、単純なモデルで近似できるバンド底近傍にキャリアのドーピングが可能であり、スピン偏極電子バンドと磁気輸送特性の関係を調べる理想的な系である。例えば、LSAT (001) 上に成長した圧縮歪み La ドープ EuTiO₃ 薄膜のバンドには、エピタキシャル歪みとゼーマン分裂によりワイル点が存在し、その影響によって異常ホール効果が磁化とキャリア密度の変化に敏感に応答することが分かってきた [1, 2]。今回、圧縮歪みの除去と高温成長による移動度の向上を狙い、EuTiO₃ と格子整合する SrTiO₃ 基板上に有機金属ガス源分子線エピタキシー (MOMBE) 法により薄膜を作成した。

【実験と結果】 チタン源としてチタンイソプロポキシド (TTIP: Ti(OC₃H₇)₄) を用いた MOMBE 法によって、SrTiO₃ (001) 基板上に EuTiO₃ を成膜した。我々の過去の研究では、EuTiO₃ の成長に適した高温・還元雰囲気中で SrTiO₃ 基板上に成膜すると、SrTiO₃ 基板に多くの酸素欠損が生じて金属化し EuTiO₃ 自体の輸送特性評価ができなかった。本研究では、EuTiO₃ のペロブスカイト構造安定化のために成長プロセスを工夫して SrTiO₃ 層とのヘテロ構造を作製し、この問題を解決した (Fig1. (a))。2 K での移動度は $3,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達し (Fig1. (b))、電子ドーピング EuTiO₃ において初めてシュブニコフドハース振動の観測に成功した (Fig1. (c))。さらに高移動度の薄膜を得たことで、異常ホール効果や磁気抵抗にこれまでの薄膜では見られなかった特異な振る舞いが観測され、この結果はこの薄膜の磁気輸送特性がバンドの詳細構造やスピン構造を明瞭に反映していることを示唆している。

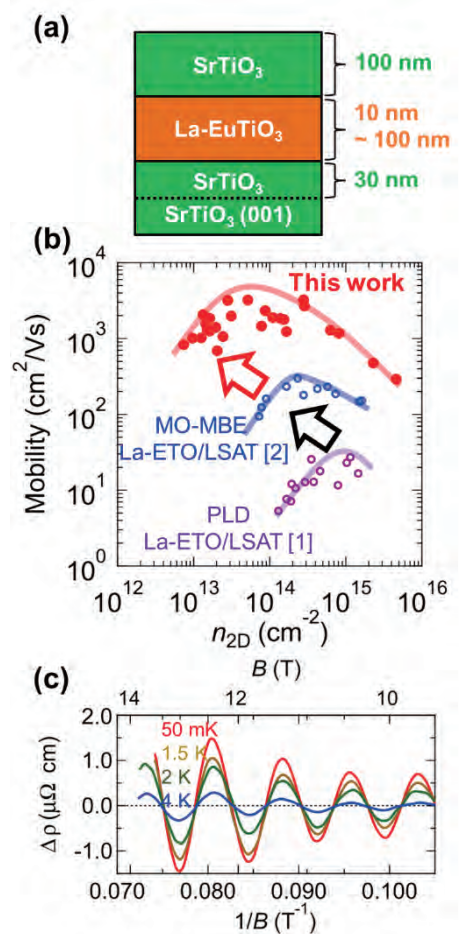


Figure1 (a) Schematic of the heterostructure composed of SrTiO₃ and La doped EuTiO₃ layers. (b) Mobility at 2 K as a function of sheet carrier density for various films. (c) SdH oscillations observed in heterostructure of EuTiO₃ at various temperatures.

[1] K. S. Takahashi *et al.* PRL **103**, 057204 (2009).

[2] K. S. Takahashi *et al.* submitted.

Co-Si 置換希土類鉄ガーネット薄膜における クラスタースピン状態とスピン波励起

Clusterglass Behaviors and Spinwave Excitation in

Co-Si substituted Rare-earth Iron Garnet

工学系研究科・電気系工学専攻・田畑研究室

山原 弘靖、関 宗俊、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光誘起磁性と呼ばれるスピングラスに特徴的な磁気記憶を示し、応用上、興味深い性質として注目されている。本研究では優れたスピン波伝搬材料である希土類鉄ガーネットを対象とし、元素置換により $\text{LuFe}_{5-2x}\text{Co}_x\text{Si}_x\text{O}_{12}$ (LFCS) 薄膜においてクラスタースピン相を実現した。さらに LFCS 薄膜におけるスピンポンピング・逆スピンホール効果電圧の温度依存性について報告する。

試料はパルスレーザー堆積法 (PLD 法) によって LFCS ($x = 0 \sim 0.5$) 単結晶薄膜を $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (111)基板の上に堆積し、磁気特性を低温センター共同設備の超伝導量子干渉計(SQUID)によって調べた。LFCS ($x = 0.5$)はスピン凍結温度 (T_g) を 190–220 K に有するクラスタースピン磁性を示すことを確認している。メモリ効果は Sun らに報告されている方法で評価した[1]。磁場中冷却 (FC, $H = 100$ Oe) 過程において $T_{\text{stop}} = 180$ K で磁気緩和を行い、その後、昇温過程の磁化変化をメモリ磁化 (M_{mem}) とする。 M_{mem} は T_{stop} において特異な磁化変化を示し、磁気緩和を伴わないリファレンスとの差分 ($M_{\text{mem}} - M_{\text{ref}}$) や温度微分 (dM_{mem}/dT) において顕著に表れる。これは磁気緩和を $T_{\text{stop}} = 180, 150, 120$ K で連続的に加えた場合でも同様に見られ、スピングラス特有の熱履歴を記憶するメモリ効果を示している。逆スピンホール電圧の計測は 10 nm 厚の Pt 薄膜を堆積した後、電子スピン共鳴装置 (日本電子) を用いて計測した。元素置換量 x の増加に従いダンピング定数が大きく増加するため、LFCS($x = 0.1$)の試料 ($T_g \sim 180\text{--}200$ K) に対して温度依存性を評価した。温度の低下に従い強磁性共鳴のピーク線幅(ΔH)の増加と共に電圧値の減少が見られるが、スピングラス相を含むスピン凍結温度(T_g)以下の 90 K まで電圧検出を確認した。温度依存性はスピン緩和時間によって説明される。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究 S「生体ゆらぎに学ぶゆらぎエレクトロニクス」、若手 B「履歴記憶素子に向けた酸化物クラスタースピングラスのスピン波研究」および(独)日本学術振興会の「研究拠点形成事業 (A.先端拠点形成型)」の助成を得て遂行された。

[1] M. Adachi et al. Appl. Phys. Express, **8** 043002 (2015)

[2] Y. Sun, M. B. Salamon, Phys. Rev. Lett. **91** 167206 (2003)

P-40

電流注入下の s 波超伝導体 NbN 薄膜における
THz 線形分光による超伝導ヒッグスモードの観測

Superconducting Higgs mode in a thin film of s -wave superconductor NbN
observed by linear THz spectroscopy with supercurrent injection

^A 低温センター・研究開発部門、^B 理学系研究科・物理学専攻・島野研究室、^C JST さきがけ、
^D 情報通信研究機構 (NICT)

中村祥子^A、飯田雄大^B、松永隆佑^{B,C}、寺井弘高^D、島野亮^{A,B}

超伝導転移は、一般に複素数の秩序パラメーター Δ によって特徴づけられる。現象論的には、複素平面に投影された Δ に対する系の自由エネルギーが、図 1(左上) に示すように、高温では単純なパラボラ型だが、低温ではメキシカンハット型になっているので自発的に対称性が破れ、基底状態に特定の有限値 (図中の青球) を選ぶ転移として記述される。その集団励起モードには、動径方向と角度方向 (位相) の振動 (図中の \leftrightarrow) が考えられる。超伝導体の場合、位相モードはゲージ場との結合により消失する一方、動径方向にポテンシャルを駆け上がる、いわゆる超伝導ヒッグスモードは、ごく最近、THz 波発生技術の進歩により観測可能になり、超伝導状態を評価する新たなプローブとして期待されている。

超伝導ヒッグスモードは、電気・磁気分極を伴わないので、通常、電磁波に対する線形応答としては観測できない。そのため、これまでの実験では、高強度の THz 波を用いて、ポテンシャルを変形させたり高次高調波を発生させたりして観測されてきた。しかし、最近、超伝導体に直流電流を印加すると、電流に平行な偏光の電磁波とヒッグスモードが線形に結合し、光学伝導度の実部に $\omega = 2\Delta$ の共鳴ピークが現れることが理論的に提案された [1]。ヒッグスモードが、低強度の THz 波の線形応答として観測できるようになれば、他の光ポンプとも組み合わせることができ、格段に応用範囲が広がる。そこで我々は、図 1(右下) に示したようなセットアップで、 s 波超伝導体 NbN の薄膜試料 (厚さ 25 nm) に、臨界電流密度 ($\approx 3 \text{ MA/cm}^2$) に匹敵する直流電流を流しながら THz 波を入射させ、透過 THz 波を時間分解測定することで、直流電流の注入による THz 光学伝導度の変化を調べた。その結果、電流と平行な偏光では図 2 のように観測されたピークが、電流と直交方向の偏光では消失することを確認した。

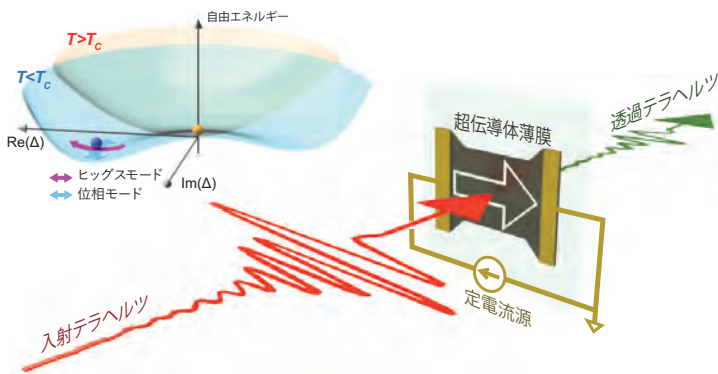


図 1. (左上) 超伝導秩序パラメーター (Δ) と自由エネルギーの関係。(右下) 実験のセットアップ。

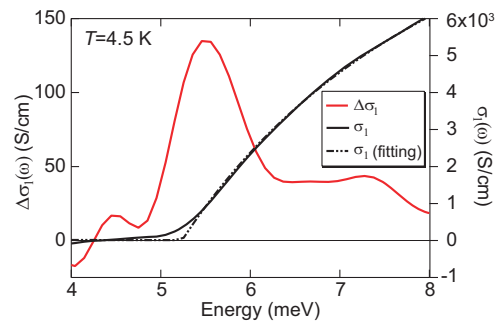


図 2. 光学伝導度の実部 (実験結果は実線、理論曲線は点線) と、その電流 ON/OFF での差分 ($\Delta\sigma$, 赤線)。

[1] A. Moor, A. F. Volkov, E. B. Konstantin, Phys. Rev. Lett. **118**, 047001 (2017).

Magnetotransport in a ferromagnetic (In,Fe)As / (In,Mn)As pn junction

Kohei Okamoto, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka

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

Ferromagnetic pn junctions composed of p- and n-type ferromagnetic semiconductors (FMSs) can be one of the building blocks of future spintronic devices such as spin MOSFET [1]. However, although p-type FMSs are widely studied, the lacking of n-type FMSs was the main obstacle for making ferromagnetic pn junctions. Recently, (In,Fe)As is attracting a lot of attentions as the first n-type III-V FMS [2,3], and by combining with p-type FMS (In,Mn)As, it enables us to realize a nearly lattice-matched ferromagnetic pn junction. In this study, we investigate the epitaxial growth and magneto-transport properties of ferromagnetic pn junctions composed of (In,Fe)As and (In,Mn)As.

We grew $(\text{In}_{0.96}\text{Fe}_{0.04})\text{As}$ (20 nm) / InAs (9 nm) / $(\text{In}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})\text{As}$ (20 nm) / InAs:Be (300 nm, Be concentration: $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) structure on a $\text{p}^+\text{-InAs}$ substrate by molecular beam epitaxy (MBE). *In situ* reflection high energy electron diffraction (RHEED) patterns during the growth showed bright and streaky zinc-blende patterns, indicating a good 2-dimensional growth mode. The sample was treated with ammonium sulfide in order to remove the surface native oxide. Afterwards, electrical contact with a diameter of 80 μm was formed on the top of the sample by using indium and gold wire.

In the transport measurement, the bias voltage polarity is defined as shown in Fig. 1 (a). Figure 1 (b)-(d) shows schematic band profiles and transport mechanisms of the pn junction under various bias voltages V : (b) At negative V , electrons tunnel from the valence band (VB) and the impurity band (IB) of (In,Mn)As to the conduction band (CB) of (In,Fe)As and the conductance increases; (c) at small positive V , tunneling current from the VB of (In,Mn)As should be suppressed by the bandgap, and that from the IB of (In,Mn)As dominates; (d) at large positive V , diffusive current flows between the CBs and VBs of both p and n sides. Figure 2 shows the V dependence of the differential conductance (dI/dV) measured at room temperature (red) and 4 K (blue), in which all the regions (b), (c), (d) were observed. In the region (c), there is a broad peak of dI/dV , which can be attributed to the tunneling related to the IB of (In,Mn)As because such a peak was not seen in the structure of (In,Fe)As / non-magnetic $\text{p}^+\text{-InAs}$ in our previous work [3]. Figure 3 shows magnetoresistance (MR) curves measured at 4 K under different V corresponding to the region (b), (c), and (d) in Fig. 1. Magnetic field direction was in-plane $[-110]$. MRs in three regions show different signs and shapes, corresponding to different transport mechanisms. In the presentation, the origin of MR and the $dI/dV - V$ curves will be discussed in detail.

Acknowledgements This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (No. 26249039, No. 17H04922), CREST of JST, the Murata Science Foundation, and the Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

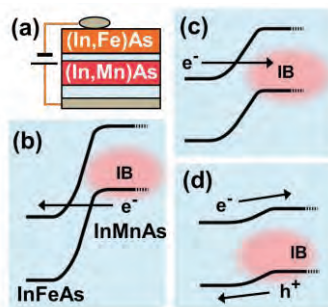


Fig. 1 (a) The schematic of transport measurement. (b)-(d) schematic band profiles under different bias voltages.

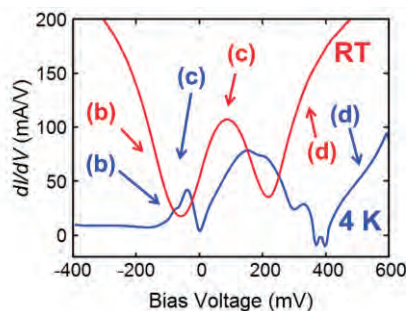


Fig. 2 dI/dV at room temperature (RT) and 4 K. (b)-(d) represent the bias voltage regions shown in fig. 1.

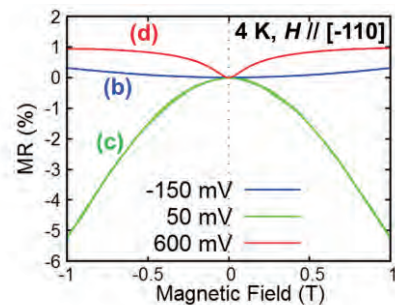


Fig. 3 MR curves at 4 K with $H // [-110]$ under different bias voltages. (b)-(d) represent the bias voltage regions shown in fig. 1.

References

- [1] S. Sugahara *et al.*, J. Appl. Phys. **97** 10D503 (2005).
- [2] P. N. Hai *et al.* Appl. Phys. Lett. **101** 182403 (2012).
- [3] L. D. Anh *et al.* Nat. Commun. **7**, 13810 (2016).

Higgs spectroscopy in a d-wave superconductor

¹Department of Physics, University of Tokyo, Japan

²Cryogenic Research Center, University of Tokyo, Japan

³Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Diderot, France

⁴Department of Physics, University of Maryland, College Park, USA

Kota Katsumi¹, Romain Grasset², Yann Gallais³, Joshua Higgins⁴, Richard Greene⁴
and Ryo Shimano^{1,2}

When a spontaneous breaking of a continuous symmetry occurs, two types of collective excitations of the order parameter emerge. In a superconductor the phase modes, or Goldstone modes, couple to light through the Anderson-Higgs mechanism responsible for the Meissner effect. On contrary the amplitude mode, also called Higgs mode because of its analogy with the Higgs boson of particle physics, does not couple directly to light and its observation has remained elusive until very recently.

In this context, the detection of a Higgs mode in the conventional s-wave superconductor NbN using non-linear THz spectroscopy [1], and the recent confirmation of a Higgs mode observation using Raman spectroscopy in the charge density wave superconductors 2H-NbSe₂ [2], have opened new perspectives on the coupling to the Higgs mode and its study. The Higgs spectroscopy using non-linear THz techniques is now well established in conventional superconductors and has paved the way for the study of more complicated systems such as multi-band or d-wave superconductors [3].

In this study we investigate the Higgs spectroscopy of the d-wave electron doped cuprate superconductor Pr_{2-x}Ce_xCuO. Using strong monocycle and multicycle THz pump pulses, we have successfully observed transient oscillations associated to the Higgs mode. Using a THz probe we are able to directly compare our observations to those of the s-wave superconductor NbN and shed light on the differences between the Higgs mode in these very different systems.

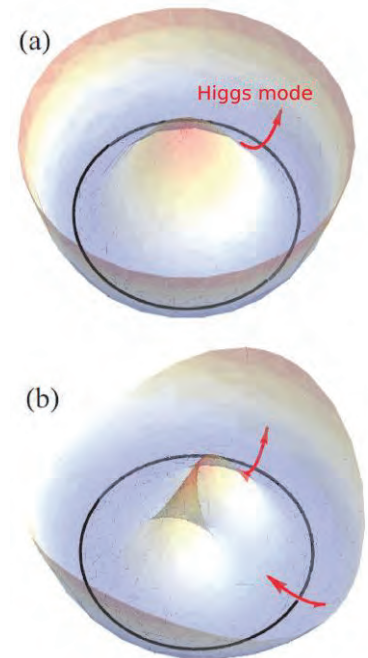


Figure 1: Pictorial representation of the free energy corresponding to (a) s-wave Higgs mode and (b) additional non s-wave Higgs modes [4]

[1] R. Matsunaga and R. Shimano *Phys. Scr.* 92, 024003 (2017)

[2] R. Grasset, T. Cea, Y. Gallais et al *arXiv:1704.04042* (2017)

[3] K. Katsumi, N. Tsuji, Y. I. Hamada, et al *arXiv: 1711.04923* (2017)

[4] Y. Barlas and C. M. Varma *Phys. Rev. B* 87, 054503 (2013)

イプシロン酸化鉄のミリ波磁気回転

理学系研究科・化学専攻・大越研究室
生井飛鳥、吉清まりえ、大越慎一

当研究室では、イプシロン酸化鉄 ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$) および金属置換型イプシロン酸化鉄 ($\epsilon\text{-M}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$) が、ミリ波 (30~300 GHz) と呼ばれる高周波の電磁波を、ゼロ磁場強磁性共鳴により吸収し、その共鳴吸収周波数が磁性体最高であることを報告してきた (図 1a)。本研究では、アルミニウム置換型イプシロン酸化鉄のミリ波領域における偏光特性を調べたので報告する。

試料はゾルゲル法により合成を行った。得られた試料は単相の $\epsilon\text{-Al}_{0.47}\text{Fe}_{1.53}\text{O}_3$ であり、超伝導量子干渉計による測定により、保磁力が 10.4 kOe の強磁性体であることが分かった。粉末状の $\epsilon\text{-Al}_{0.47}\text{Fe}_{1.53}\text{O}_3$ をペレット状に荷重成型し、厚みを変えた試料を作成して測定を行ったところ、いずれの試料も 100 GHz に吸収ピークが観測された。ミリ波回転性能を調べるため、 $\epsilon\text{-Al}_{0.47}\text{Fe}_{1.53}\text{O}_3$ ペレット試料を 8T のパルス磁場で着磁した。垂直偏光のテラヘルツパルス波を試料に照射したところ、試料を透過した後は、楕円偏光となっていた (図 1b)。透過光の水平成分及び垂直成分から、回転角度及び楕円率の周波数依存性を求めたところ、楕円率は共鳴周波数を中心とするピーク型の周波数依存性を示し、着磁したペレット試料の N 極側から入射した場合の最大値は 100 GHz で 0.7 であった。一方、回転角は共鳴周波数を中心とする微分型の周波数依存性を示し、回転角の最大値は 102.2 GHz で $+25^\circ$ 、最小値は 97.0 GHz で -25° であった。磁極の向きを反転させると、楕円率及び回転角の符号が反転した。

観測されたミリ波回転性能は、残留磁化の方向に依存しており、自然共鳴現象における磁化の歳差運動から放射される自由誘導減衰により、このような偏光特性が生じたと考えられる。

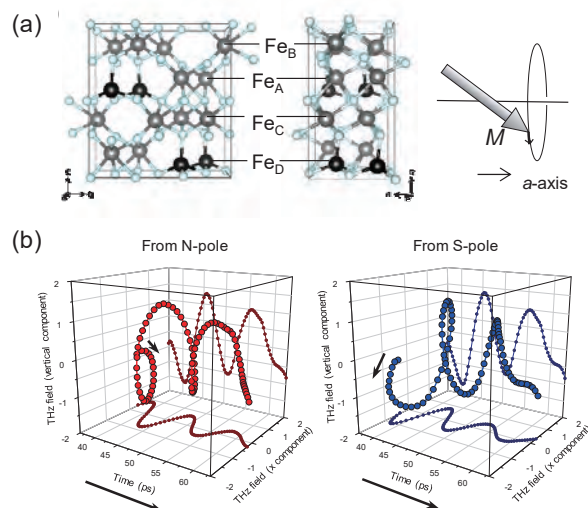


図 1. (a) $\epsilon\text{-Al}_{0.47}\text{Fe}_{1.53}\text{O}_3$ の結晶構造と、ゼロ磁場強磁性共鳴における磁化の歳差運動。(b) 着磁した $\epsilon\text{-Al}_{0.47}\text{Fe}_{1.53}\text{O}_3$ ペレット試料を透過したテラヘルツパルス光の伝播の様子。

- [1] Namai, S. Sakurai, M. Nakajima, T. Suemoto, K. Matsumoto, M. Goto, S. Sasaki, and S. Ohkoshi, *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 1170 (2009).
- [2] A. Namai, M. Yoshikiyo, K. Yamada, S. Sakurai, T. Goto, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, T. Suemoto, H. Tokoro, and S. Ohkoshi, *Nature Communications*, 3, 1035 (2012).
- [3] S. Ohkoshi, A. Namai, T. Yamaoka, M. Yoshikiyo, K. Imoto, T. Nasu, S. Anan, Y. Umeta, K. Nakagawa and H. Tokoro, *Scientific Reports*, 6, 27212 (2016).
- [4] Namai, M. Yoshikiyo, and S. Ohkoshi, *IEEE Magnetic Letters*, 7, 5506704 (2016).

有機 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における 電荷秩序相および massless Dirac 電子相の磁気輸送特性

Transport property of Massless Dirac Fermion(MDF) and Charge Order(CO) electrons in α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻鹿野田研究室¹

東京理科大学理工学部物理学科²

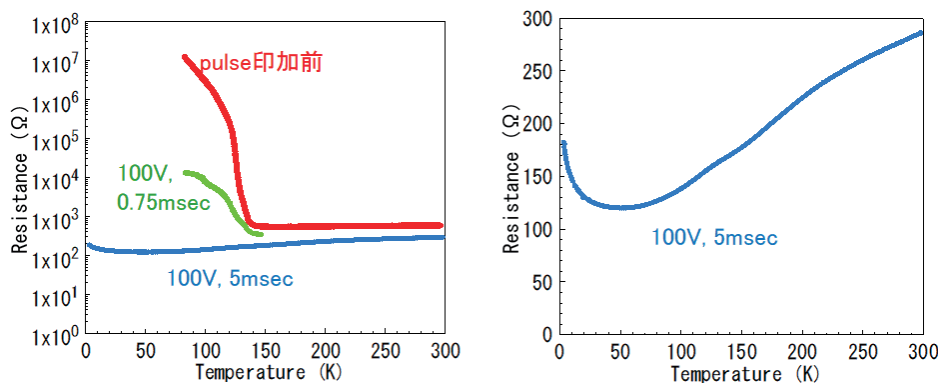
稲垣 雄介¹, 林 祐樹¹, 村瀬 秀明¹, 竹原 陵介¹, 宮川 和也¹, 田村 雅史², 鹿野田 一司¹

質量ゼロの Dirac 電子系(MDF)に磁場を印加すると Landau 準位が形成される。各準位はそれぞれ2つのスピン状態と2つのバレー状態に4重縮退しており、磁場はこれらの縮退を解く効果がある。スピン縮退の分裂は Zeeman 効果によるため印加磁場の絶対値に依存するが、MDF が実現しているとされるグラフェンにおいて、縮退の分裂が層間磁場成分に依存する例もあり[1]、必ずしも Zeeman 分裂で説明できるものではない。一方で MDF が実現しているとされる有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ での NMR 測定では、低温領域において量子スピン強磁性状態が実現しており、Zeeman 効果が支配的となっていることが示唆されている。[2]

今回、有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における Dirac 電子系の磁場による Landau ゼロモードの縮退の分裂を磁気抵抗測定により調べた結果を報告する。この物質の Dirac 電子系圧力をパラメータとして電荷秩序絶縁体相に隣接しているため[3]、電子間相互作用が大きい Dirac 電子系であることが期待される。今回 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の磁気伝導面内抵抗の磁場・角度依存性をいくつかの圧力で測定した。

また常圧下 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の電荷秩序絶縁体状態において、擬二次元伝導層に垂直な方向に高電圧パルス印加すると、135Kでの絶縁体化が消失し、低温まで高伝導状態が維持されることを見出した(下図参照:ただし、高圧を印加した面間2端子での電気抵抗測定)。電気抵抗の温度依存性は、高温で金属的ではあるが温度依存性は弱く、低温で非金属的な振る舞いに変わるなど、質量ゼロの Dirac 電子系と類似な特徴を示す。

発表では、磁場角度に対するゼロモードにおける縮退が解ける振舞いとその圧力依存性、また高電圧パルス印加した時の抵抗の振る舞いについて議論する。



[1] A. F. Young, C. R. Dean, L. Wang, H. Ren, P. Cadden-Zimansky, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Hone, K. L. Shepard and P. Kim, Nature Physics 8, 550–556 (2012)

[2] 松野学(2016) 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士論文(未公開)

[3] K. Kajita, Y. Nishio, N. Tajima, Y. Suzumura and A. Kobayashi, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 072002 (2014).

単原子層ヘリウム 3 の気液相転移の観測

Observation of Gas-Liquid Phase Transition in Monolayer ^3He

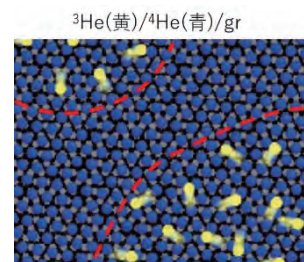
理学系研究科 物理学専攻 福山研究室

小川勝之、鎌田雅博、吉富愛望アビガイル、松井朋裕、福山寛

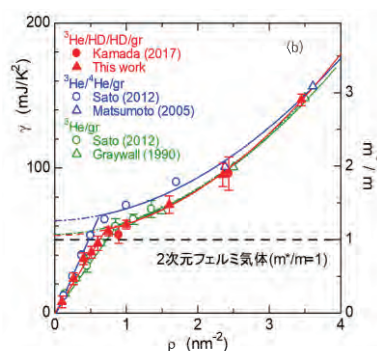
He は質量が軽いことに加えて原子間の引力相互作用が小さいため量子性が極めて高く、常圧では絶対零度でも固化せず液体のまま存在する。2次元に閉じ込めた ^3He の場合、理論計算では有限の面密度にエネルギーの極小値を持たないことから、基底状態は気体であると考えられてきた[1]。しかし、グラファイト上に物理吸着した単原子層 ^3He ($^3\text{He}/\text{gr}$) の熱容量測定の結果、熱容量のフェルミ液体項の係数 γ が面密度 $\rho \leq 0.8 \text{ nm}^{-2}$ では、 ρ の減少と共に直線的に減少することが分かった[2]。これは、吸着した ^3He が自己凝集液体相 (図(a)) を形成していることを意味している。グラファイトを ^4He でプレコートした基板上 ($^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$) や吸着第三層目の ^3He ($^3\text{He}/^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$) でも同様に自己凝集液体相が観測されることから、この自己凝集現象は基板に依らない純粋 2 次元 ^3He の基底状態であると考えられる。その後行われた量子モンテカルロ計算[3] の結果、グラファイト表面や下地の ^4He の周期的な吸着ポテンシャルを加味することで、自己凝集液体相が発現し得るという結果が相次いで報告されているが、これらの理論計算では $\rho = 0$ から気液相分離が生ずるという実験結果を再現できておらず、まだ実験と理論には隔たりがある。

そこで本研究では、これまでとは大きく異なる周期ポテンシャルを持った吸着基板として、グラファイトを重水素化水素(HD) 2 分子層でプレコートした上に吸着した ^3He 単原子層 ($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$) に対して、低面密度域 ($0.10 \leq \rho \leq 3.5 \text{ nm}^{-2}$) で熱容量測定を行った。その結果、これまでの結果と非常に近い自己凝集現象が観測された (図(b))。これは、自己凝集液体相の発現に下地の周期ポテンシャルは決定的な役割を果たさないとするこれまでの主張を補強する結果である。

この様にごく低面密度の自己凝集液体が存在するならば、有限温度で臨界点に対応する比熱異常が期待されるが、これまでの $T \leq 80 \text{ mK}$ での測定では観測されていない。そこで現在、より高温でこの臨界点を探索するための熱容量測定装置を製作中である。本発表ではそれについても報告する。



図(a) 自己凝集液体相のイメージ図

図(b) γ の面密度(ρ)依存性

[1] M. D. Miller and L. H. Nosanow, J. Low. Temp. Phys. **32**, 145 (1978); V. Grau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 045301 (2002).

[2] D. Sato *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 235306 (2012).

[3] M. C. Gordillo and J. Boronat, Phys. Rev. Lett. **116**, 145301 (2016); Phys. Rev. B **94**, 165421 (2016).

P-46

3次元バルク超伝導体における非相反電荷輸送現象 Unidirectional electric transport in 3D bulk superconductor

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐・中野研究室
越川 翔太、井手上 敏也、並木 宏允、笹川 崇男、岩佐 義宏

Keywords: 超伝導、非相反輸送、ダイオード特性

物質の結晶構造の空間反転対称性が破れているとき、様々な興味深い現象が数多く存在することが知られている。これは、空間反転対称性の破れた結晶では、電子バンドのスピンスplitに代表されるように、結晶対称性の破れを反映した特異なスピンス軌道相互作用が固体の電子状態に本質的な影響を与えるためであると考えられる。そのような空間反転対称性の破れに起因する物性の一つに非相反電荷輸送現象[1]がある。この現象は電流を流す向きによって電気抵抗値が変わるというもので、電流に関する二色性(ダイオード特性)と捉えることができる。

本発表では、それぞれ面直方向、面内方向に空間反転対称性の破れた層状化合物である BiTeBr 及び PbTaSe₂ に着目し、三次元バルク物質で金属体だけでなく、超伝導体においても初めて非相反電荷輸送現象を観測すると同時に、その特徴的な振る舞いを明らかにしたことを述べる。

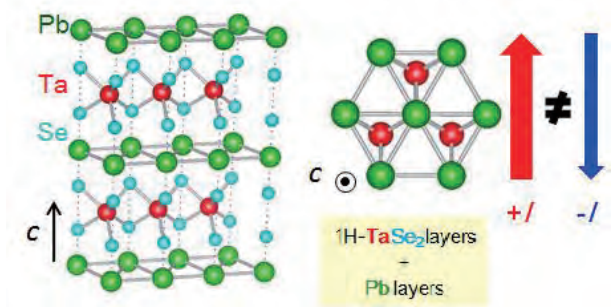


図1. 超伝導体 PbTaSe₂ の結晶構造

Magneto-chiral anisotropy [1], which is the unidirectional electric transport derived from lattice symmetry breaking, is investigated in a non-centrosymmetric bulk superconductor PbTaSe₂.

First observation of the nonreciprocal charge transport in a 3D non-centrosymmetric superconductor and characteristic properties will be discussed.

[1] G. L. J. A. Rikken and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. **94**, 016601 (2005).

イプシロン酸化鉄の磁気特性における金属置換の効果 The effect of metal-substitution on magnetic properties of epsilon iron oxide

理学系研究科 化学専攻 大越研究室所属
塚本聖哉、吉清まりえ、生井飛鳥、大越慎一

イプシロン酸化鉄とは、酸化鉄がとりうるいくつかの相(結晶構造)のうちの一つであり、自然界には存在しない相である。2004年、当研究室ではこの相を単相合成することに初めて成功し、室温下で25kOeを超える保磁力を持っていることと、その結晶構造(図1)について明らかにした[1]。この保磁力は、金属酸化物中で最大であるが、結晶構造中の鉄サイトを他の金属イオンで置換することで、保磁力を含む磁気特性を制御することができることを報告しており[2]、焼成温度を変化させることによって、その粒径を広い範囲で制御できることを報告してきた[3]。

本研究では、これまで金属置換の行われてきた硝酸鉄(III)を出発物質とするゾル-ゲル法とは異なる出発物質を酸化水酸化鉄ゾルとしたゾル-ゲル合成法を用いて、Ga、Ti、Coの三種の金属イオンにより鉄サイトを置換した上で合成条件に変化を加えたイプシロン酸化鉄の合成を目指した。まず出発物質である酸化水酸化鉄ゾルに置換金属(Ga、Ti、Co)を含む化合物を加え、そこにアンモニアを加え、最後にオルトケイ酸テトラエチルを加えることで酸化水酸化鉄がシリカマトリクスに覆われた前駆体を得た。そしてその前駆体を焼成し、シリカマトリクスを水酸化ナトリウム水溶液により除去することで、Ga、Ti、Co置換型イプシロン酸化鉄を得た。また、焼成温度およびシリカマトリクス量を変化させることで粒径の異なる試料を合成した。

得られたGa、Ti、Co置換型イプシロン酸化鉄は、X線回折パターンをリートベルト解析することにより単相であることが確認できた。また、透過電子顕微鏡(TEM)による粒径観察により、シリカマトリクス量が一番少ない条件で合成した試料では、平均粒径が焼成温度を高くすることにより11.8 nmから19.6 nmまで変化し、特に1020 °Cで焼成したサンプルはその粒度分布が24.1%と狭くなっていた。加えて、シリカマトリクス量を増やすことでその平均粒径を11.8 nmから10.4 nmまで制御できた。また、超伝導量子干渉計(SQUID)を用いた磁気測定により磁気特性を確認したので併せて報告する予定である。

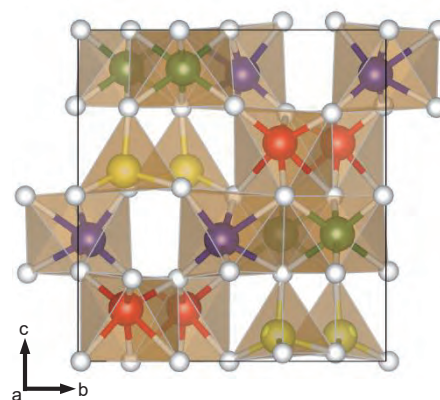


図1. イプシロン酸化鉄の結晶構造

- [1] J. Jin, S. Ohkoshi, and K. Hashimoto, *Adv. Mater.* 16 48(2004)
 [2] S. Ohkoshi, S. Kuroki, S. Sakurai, K. Matsumoto, K. Sato, and S. Sasaki, *Angew. Chem. Int. Ed.* 46 8392(2007)
 [3] S. Ohkoshi, A. Namai, K. Imoto, M. Yoshikiyo, W. Tarora, K. Nakagawa, M. Komine, Y. Miyamoto, T. Nasu, S. Oka, and H. Tokoro, *Scientific Reports*, 10 14414(2015)

化合物半導体基板上に成長した Cd_3As_2 薄膜の 結晶性および輸送特性の評価

Crystal structure and transport characterizations of Cd_3As_2 thin films grown on compound semiconductor substrates

工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室

中澤佑介, 打田正輝, 西早辰一, 小塚裕介, 川崎雅司

Cd_3As_2 は結晶構造がもつ回転対称性に由来して、バンド反転を伴った安定なディラック点を有するトポロジカルディラック半金属として知られる[1]。トポロジカルディラック半金属はフェルミアークと呼ばれる特異な表面状態を持つことに加え、トポロジカル絶縁体をはじめとする様々なトポロジカル物質相へ量子相転移し得る母物質としても期待されている[2]。

これまでに我々は、パルスレーザー堆積法とキャップ層を用いた加熱処理を組み合わせることにより、バルク単結晶を超える結晶性を有する Cd_3As_2 薄膜の作製を実現した[3,4]。このようにして得られた Cd_3As_2 薄膜については、強磁場下における量子ホール効果の観測や Zn ドーピングによるキャリア変調を通じてバンド構造や膜厚に対する次元性の変化、またトポロジカル相転移等の電子構造の解明を進めてきた。一方で、上記の成膜手法の課題として、 Cd_3As_2 薄膜のキャリア密度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度と、フェルミ準位がディラック点から大きく離れてしまい、ディラック点近傍における量子輸送特性を評価することが困難であるということがあった。そこで、キャリア密度を更に低減した Cd_3As_2 薄膜を得るために、最近では化合物半導体基板を有効に用いることや、キャリア増加の原因となる As 欠損を抑えるため、成膜中の As 分圧を大きくすることにより希薄キャリア・高移動度を両立した更なる高品質 Cd_3As_2 薄膜の作製を目指している。このような成膜手法の改善を重ねることにより、現在では $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度までキャリア密度の低減を達成した。このようにして得られた Cd_3As_2 薄膜について、成長方位や結晶性に関する詳細な評価と輸送特性について発表を行う。

[1] Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 125427 (2013)

[2] Z. K. Liu *et al.*, Nat. Mater. **13**, 677 (2014)

[3] M. Uchida *et al.*, Nat. Commun. **8**, 2274 (2018)

[4] Y. Nakazawa *et al.*, submitted

機能性酸化鉄薄膜を用いた太陽光エネルギー変換素子 Solar energy conversion systems based on functional iron oxide thin films

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、
電気系工学専攻・田畑研究室

関 宗俊、張 博棟、周 行、Ameya Sathe、山原 弘靖、田畑 仁

エネルギー問題が地球規模で深刻化する現在、これを解決しうる革新的な材料技術の創成がのぞまれている。太陽光水分解は、無尽蔵の太陽エネルギーを用いて水を直接分解し、クリーンなエネルギー源である水素を製造する技術であり、特に大きな注目を集めている。近年、実用的な水素製造効率の実現に向けて可視光応答型の水分解光触媒・半導体光電極の開発が進められているが、未だ決定的な物質は見出されていない。我々は、無毒で環境親和性が高く、地球上に豊富に存在する資源である酸化第一鉄 (α - Fe_2O_3 、ヘマタイト) に注目し、半導体光電極の開発を進めている。 α - Fe_2O_3 はコランダム型結晶構造を有する n 型酸化物半導体であり、約 2.2 eV のバンドギャップエネルギーを持つため、可視光応答型触媒として有望な候補材料と期待されている。我々は、薄膜試料作製技術としてパルスレーザー堆積法 (PLD 法) を用い、結晶成長方向を制御して光キャリアの伝導特性を最適化することにより、 α - Fe_2O_3 光電極において、可視域において光電流が大幅に増大 ($\lambda=450$ nm において 55%) することを見出した。また、第一原理電子状態計算から、Fe の一部を Rh で置換することにより、 α - Fe_2O_3 の価電子帯上端において、Rh-4d 軌道と O-2p 軌道が混成し、バンドギャップが狭窄化することを確認した。この Rh 置換 Fe_2O_3 に金微粒子を埋め込んだ構造の光電極において、ギャップ狭窄化と局在表面プラズモンの効果により、近赤外光照射により水分解を引き起こすことに成功した。本発表ではこれらの可視・近赤外域応答型の α - Fe_2O_3 光電極の水分解特性・光電気化学特性について詳細を紹介する。また我々は近年、二段階のパルスレーザー堆積法により、室温強磁性・Si 置換 α - Fe_2O_3 光電極の作製にも取り組んでいる。発表当日は、この光電極の光電気化学特性とその磁気特性の相関についても議論する。

謝辞：本研究は、独立行政法人日本学術振興会の「研究拠点形成事業 (A.先端拠点形成型)」の助成を得て実施しました。また、薄膜試料の磁化測定は、東京大学低温センターの SQUID 磁化測定装置 (MPMS-5S) を用いて行いました。ここに記して謝意を表します。

-
- [1] M. Seki and H. Tabata, “*Correlated Functional Oxides: Nanocomposites and Heterostructures*,” (Springer International Publishing AG, Cham, 2016) (Chapter 1: Functional Iron Oxides and Their Heterostructures)
[2] M. Seki, “*Iron Ores and Iron Oxide Materials*,” (InTechOpen, 2018) (Chapter 4: Iron Oxide Epitaxial Thin Films for Solar Energy Harvesting).
[3] M. Seki et al., Appl. Phys. Express 5, 115801 (2012).

P-50

Li インターカレートした青リンのエピタキシャル成長と その電気伝導特性

Epitaxial Growth of Li Intercalated Blue Phosphorus and Its Electric Transport Property

理学系研究科物理学専攻 長谷川研究室

宮内恵太、秋山了太、中西亮介、遠藤由大、長谷川修司

近年グラフェンを始めとする二次元層状物質について、高い移動度、特異な外場応答、超伝導を示すなどの新奇な物性を持つことから盛んに研究がなされている。リンからなる二次元層状物質の一つとしては armchair 状の構造を持つ黒リン(図 1(a))が有名であるが、最近新たに報告されたものとしてワイドギャップ原子層半導体であり、グラフェンと同じくハニカム状の構造を持つ青リン(図 1(b))が注目を集めている[1]。興味深いことに、Li 等のアルカリ金属のドナーを 2 層青リン間にインターカレートさせることで転移温度がおよそ 20K という 2 次元超伝導体としては高温の超伝導が発現することが理論的に予測されている[2]。しかし現在のところ青リンに関する実験報告は STM による構造の局所観測のみであり[1]、電気伝導測定は報告がなく、その評価が待たれている。

本研究では電気伝導測定に耐える大面積青リン単結晶の作製と、Li インターカレーション、およびその電氣的評価を目的としている。まず青リンの下地層として、MBE 法により Si(111)基板上に Cu を 160K で蒸着し Cu シリサイドを 7ML 程度成長させ、続いて Au を 180K で 20ML 程度蒸着することで清浄な単結晶 Au(111)表面を作製した。さらに Au(111)上に黒リンを原料として蒸着し、その後アニールすることで青リンを得た。結晶構造は in-situ で RHEED を用いて評価した。図 2(a), (b)はそれぞれ今回作製した Au(111)表面、青リンの RHEED パターンである。成長温度やアニール時間・温度など各種パラメータの最適化を行うことで大面積の高品質膜の作製に成功した。講演ではさらに青リン層間に Li をインターカレートさせ、その電気伝導測定の結果についても紹介し議論する。

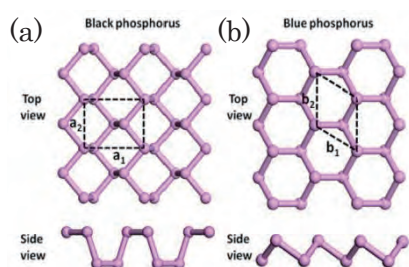


図 1. (a) 黒リン及び(b)青リンの結晶構造

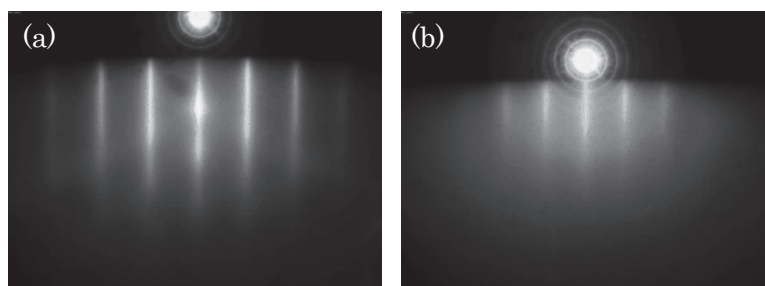


図 2. (a) Au(111)及び(b)青リンの[11-2]入射の RHEED パターン

[1] Jia Lin Zhang et al., Nano Lett. **16**, 4903-4908 (2016).

[2] Jun-Jie Zhang, Shuai Dong, 2D Mater. **3**, 035006 (2016).

P-51

Pt/Co/Pd/MgO 構造における磁気異方性に対する電界効果の基板依存性 Substrate dependence of electric-field effect on magnetic anisotropy in Pt/Co/Pd/MgO structures

¹東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 千葉研究室, ²電力中央研究所, ³東北大学
林 洋平¹, 日比野 有岐¹, 松倉 文礼³, 三輪 一元², 小野 新平², 平井 孝昌¹,
小山 知弘¹, 大野 英男³, 千葉 大地¹

Electric field (EF) effect on magnetic anisotropy (MA) has been intensively studied because of its potential for dramatic reduction in energy consumption of magnetic memory devices. Recently, in the Pt/Co/Pd/MgO system deposited on a GaAs substrate, strong temperature dependence of EF effect on MA and a huge modulation efficiency exceeding $1,000 \text{ fJ/V}^{-1}\text{m}^{-1}$ at 10 K have been reported [1]. In this system, EF is applied to the Pd surface in which the magnetic moment is induced because of the ferromagnetic proximity effect. One possible origin of this strong temperature dependence is a temperature-dependent lattice strain caused by the difference in the thermal expansion coefficients α between Pd and GaAs substrate, and resultant change in the electronic structure in the Pd. In order to confirm this internal strain effect on EF effect, we prepared the same system formed on different semiconductor substrates (GaAs and Si) with different α values and investigated EF effect on MA at various temperature (T) [2].

Ta (2.5 nm)/Pt (2.4)/Co (0.4)/Pd (1.0)/MgO (2.0) layers from the substrate side were deposited on undoped GaAs (001) and Si (001) substrates simultaneously by rf sputtering at room temperature. EF was applied to the Pd surface using a polymer film containing an ionic liquid. Fig. 1 (a) and (b) show the gate voltage (V_G) dependence of the change in the areal MA energy (E_K/S) obtained under various T for two samples, respectively. $\Delta E_K/S$ is defined as the difference between E_K/S at each V_G and that at $V_G = 0 \text{ V}$. As shown in Fig. 1, T dependence of EF effect is clearly different between two samples. Both samples show Λ -shaped V_G dependence at low T , but the peak position for GaAs and Si samples are located around $V_G = 0 \text{ V}$ and -0.5 V , respectively. Furthermore, the MA modulation efficiency at 10 K is $\sim 1,300 \text{ fJ/V}^{-1}\text{m}^{-1}$ on GaAs, while that is $\sim 1,800 \text{ fJ/V}^{-1}\text{m}^{-1}$ on Si. These difference are expected to be related to the difference in internal strain and electronic structure of the Pd between two structures.

This work was partly supported by JSPS KAKENHI and Spintronics Research Network of Japan.

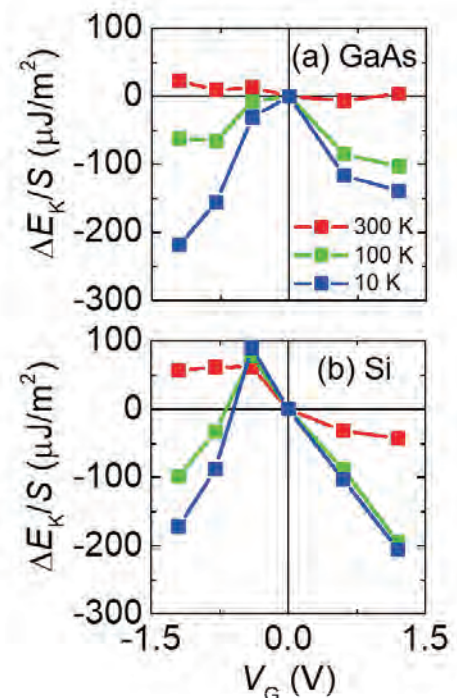


Fig.1 : V_G dependence of $\Delta E_K/S$ at each T for Pt/Co/Pd/MgO on (a) GaAs and (b) Si.

[1] Y. Hibino, *et al.*, *App. Phys. Lett.* **109**, 082403 (2016). [2] Y. Hayashi, *et al.*, *App. Phys. Exp.* **11** 013003 (2018).

P-52

銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における光誘起準安定相の発見 Discovery of photoinduced metastable phase in the cuprate superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

理学系研究科 物理学専攻 島野研究室¹,

JST さきがけ², 東大物性研³, 産総研⁴, 低温センター 研究開発部門⁵

丹羽 宏彰¹, 泊 開人¹, 松永 隆佑^{1,2,3}, Dongjoon Song⁴, 永崎 洋⁴, 島野 亮^{1,5}

超短パルスレーザー技術の発展により物質を超高速に励起した際のダイナミクスや光誘起相転移についての研究が近年盛んである。中でも、銅酸化物超伝導体において光励起により超伝導転移温度以上で超伝導が復活する光誘起超伝導は大きな注目を集めている[1,2]。本研究では、銅酸化物超伝導体のひとつである $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x=0.15$)に着目し、近赤外光でc軸方向に強く励起した際の振る舞いを光ポンプ-テラヘルツ反射プローブ分光により調べた(図1)。その結果、光励起後に準安定的に存在する新たな相の存在を見出した[3]。

図2に示すのは、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の超伝導転移温度以下における平衡状態のc軸方向の反射率と光励起した際の反射率の時間変化の様子である。平衡状態では、超伝導キャリアが超伝導層と絶縁層の積層方向にジョセフソン効果でコヒーレントに移動するジョセフソンプラズマ共鳴(JPR)が生じ、その特徴的なプラズマエッジの構造が見えている。一方で、 3.6 mJ/cm^2 の強い近赤外光で励起すると、JPRのプラズマエッジが2つに分裂し、さらにその状態が350 ps以上も持続していることが確認できる。講演では、この準安定的に現れる相の起源について、解析結果とモデルとの比較から迫っていく。

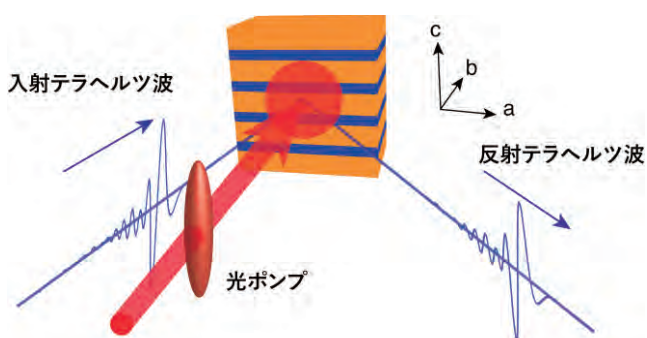


図1. 光ポンプ-テラヘルツ反射プローブ分光の模式図。

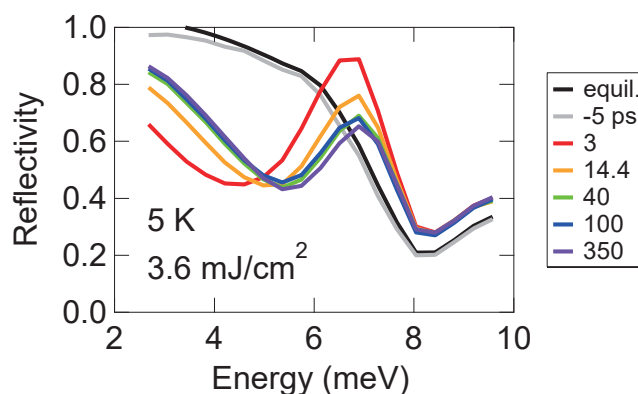


図2. 5 Kにおいて、 3.6 mJ/cm^2 で光励起した後のc軸方向反射率の時間変化の様子。

[1] D. Fausti *et al.*, Science **331**, 189 (2011).

[2] D. Nicoletti *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 100503(R) (2014).

[3] K. Tomari *et al.*, arXiv:1712.05086 (2017).

Geometrical effect on spin accumulation signals in a diode structure fabricated on Si substrate

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

佐藤彰一、中根了昌、羽田崇人、田中雅明

The three-terminal Hanle (3TH) measurement has been frequently used to estimate the spin lifetime τ_s in semiconductors and the spin injection polarization P in ferromagnet(FM)/insulator(I)/semiconductor(SC) tunnel junctions.^[1] However, little attention has been paid to the fact that 3TH signals are affected by the device structure when its electrode size or channel thickness are comparable to the spin diffusion length λ_s .^[2-5] Therefore, the device structure must be carefully considered to understand the spin physics more precisely.

Figure 1(a) shows our FM/I/Si tunnel junction device structure examined in this study. Universal representation of the 3TH signals^[5] ΔV^{3TH} observed in such vertical devices can be written by integrating the impulse response injected at a position \mathbf{r} and detected at another position \mathbf{r}' over the junction area A ;

$$\Delta V^{3TH}(H) = P^2 J \rho \lambda_s \iint_{\mathbf{r} \in A} \frac{dA}{A} \iint_{\mathbf{r}' \in A} \frac{dA}{2\pi\lambda_s |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} \operatorname{Re} \left[\exp \left(-\frac{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|}{\lambda_s} \sqrt{1 + i\gamma H \tau_s} \right) \right], \quad (1)$$

where H is the magnetic field applied perpendicular to the injected spins, J is the current density, ρ is the channel resistance, and γ is the gyromagnetic ratio. In deriving Eq. (1), it was assumed that J is uniform over the junction area. Eq. (1) indicates that, as A decreases, the amplitude of a 3TH signal decreases and its linewidth broadens. Although true P and τ_s can be estimated by fitting Eq. (1) to the data, it is not easy since numerical calculation is needed. Thus, as a fitting function, it is practically convenient to use the following conventional equation;

$$\Delta V^{3TH}(H) = (P^*)^2 J \rho \lambda_s \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + (\gamma H \tau_s^*)^2}}{2 + 2(\gamma H \tau_s^*)^2}}, \quad (2)$$

and then to convert the obtained P^* and τ_s^* to P and τ_s , respectively, using conversion factors P^*/P and τ_s^*/τ_s which can be numerically calculated from Eq. (1). Note that Eqs. (1) and (2) are identical when A is large enough, in that case, $P^*/P = \tau_s^*/\tau_s = 1$.

To experimentally verify the above discussion, we investigated 3TH signals observed in FM/I/Si junctions having a Fe/Mg/SiO_xN_y/n⁺Si injector electrode with various shapes.^[6] Our measurement setup is shown in Fig. 1(a), where $J = 40\text{--}42 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ is applied from the top electrode to the substrate in the spin extraction regime with sweeping H . Three types of shapes were prepared; Sample A: circle with $17.8 \mu\text{m}$ in diameter, Sample B: rectangle with $2 \times 180 \mu\text{m}^2$, and Sample C: circle with $5.6 \mu\text{m}$ in diameter (shown in Fig. 1(b)). Figs. 2(a-c) (red curves) show 3TH signals at 4K. By fitting Eq. (2), we obtained $P^* = 16.5, 15.2,$ and 13.4% , and $\tau_s^* = 7.1, 4.2,$ and 2.9 ns , for Sample A, B and C, respectively. Using the conversion factor, true P and τ_s are estimated; $P = 17.4, 17.9,$ and 16.8% , and $\tau_s = 7.8, 6.5,$ and 3.9 ns , for Sample A, B and C, respectively. Since variation of P and τ_s values are smaller than that of P^* and τ_s^* , our proposed method is valid to estimate true P and τ_s .

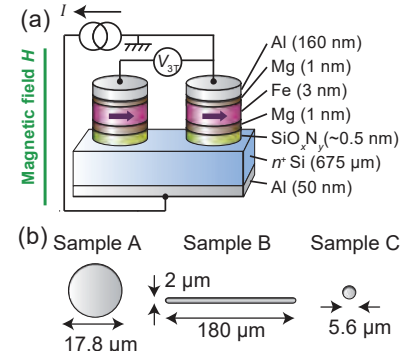


Fig. 1 (a) Device structure and measurement setup. (b) Shapes and size of the spin injection electrode.

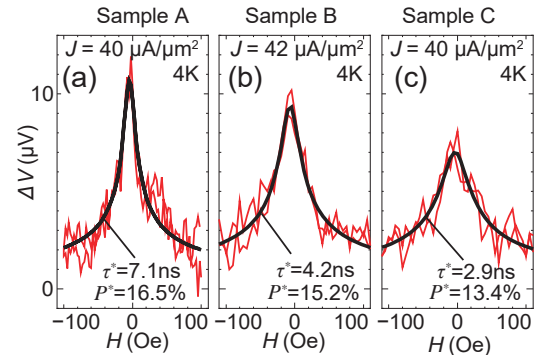


Fig. 2 (a-c) 3TH signals observed in Sample A-C (red lines). Black curves are fitting by Eq. (2).

[1] T. Sasaki et al., IEEE Trans. Magn. **46** (2010). [2] A. Fert and H. Jaffrés, PRB **64** (2001). [3] Y. Takamura et al., JAP **117** (2015). [4] A. Tiwari et al., JJAP **56** (2017). [5] S. Sato et al., PRB **96** (2017). [6] T. Hada et al., JSAP Fall Meeting 2016. This work was partially supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (including (B)) and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

(Nd_{1-x}Pr_x)₂Ir₂O₇のモット臨界点近傍における ホールドーピング効果

The effect of hole doping nearby quantum critical point on (Nd_{1-x}Pr_x)₂Ir₂O₇

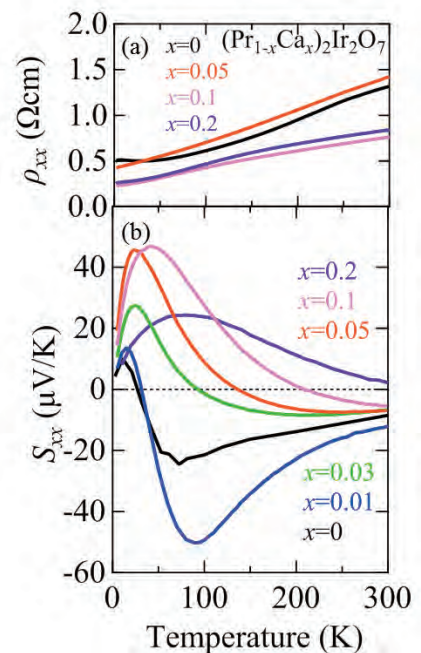
東大工^A, JSTさきがけ^B, 埼玉大理^C, 理研CEMS^D

金子竜馬^A, 上田健太郎^A, 品岡寛^C, 有田亮太郎^D, 藤岡淳^{A,B}, 十倉好紀^{A,D}

パイロクロア型イリジウム酸化物 $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ ($R=\text{Lu-Pr}$)は、非共線的磁気構造 (All-in-all-out 構造) やトポロジカル半金属相の観点から関心が持たれている物質である。 $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は、希土類イオン R を置換することで、一電子バンド幅制御型のモット転移を制御することが可能で、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は、モット転移近傍にあり、フェルミ準位付近で伝導帯と価電子帯が一点で接する“Quadratic band touching”(QBT)を有する“ゼロギャップ半金属”であることが知られている[1]。QBT は、ワイル半金属相との関連[2]や新奇な量子臨界点[3]といった観点から、近年注目を集めている。

今回我々は、QBT が $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の物性に果たす役割を明らかにするため、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の熱電効果について調べ、非単調な温度依存性を有する、大きなゼーベック係数を観測した。また、ホールドーピングによってフェルミエネルギーを変化させると、ゼーベック係数の振る舞いも系統的に変化することが確かめられた。更に、得られた振る舞いが $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の金属相に特有なものであることを検証するため、モット臨界点直下の組成($\text{Nd}_{0.2}\text{Pr}_{0.8}$)₂Ir₂O₇、モット絶縁体 $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においても同様の測定を行った

本発表では、これらの結果について報告する。



図(a) $(\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x)_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の抵抗率温度依存性。(b)ゼーベック係数温度依存性。

[1] T. Kondo *et al.*, Nat. Commun. **6**, 10042 (2015)

[2] M. Hirschberger *et al.*, Nat. Mater. , **15** 1161 (2016)

[3] L. Savary *et al.*, PRX **4**, 041027 (2014)

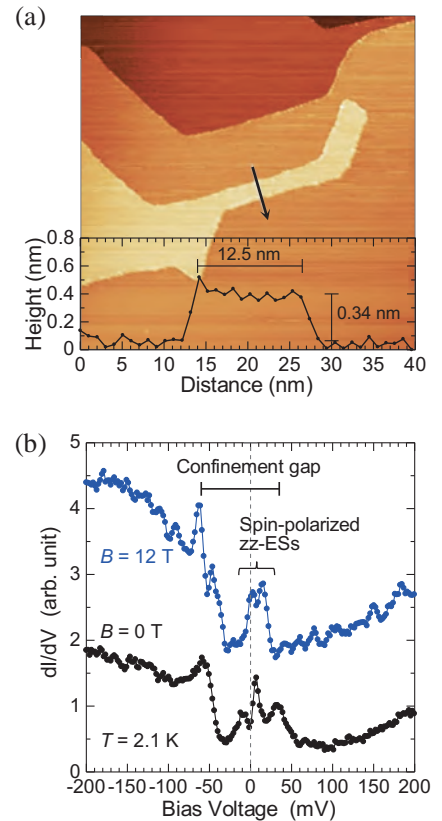
STS Study of Graphene Zigzag Nano-ribbons

¹Department of Physics, The Univ. of Tokyo, ²Cryogenic Research Center, The Univ. of Tokyo

Andre E. B. Amend¹, Tomohiro Matsui¹, Hiroshi Fukuyama^{1,2}

Graphene is a sheet consisting of a two-dimensional honeycomb lattice of carbon atoms. At a zigzag (zz) type edge, graphene hosts an electronic localized state (zz-ES) that causes a peak in the local density of states (LDOS) at the Dirac point, the Fermi energy (E_F) in undoped materials [1-2]. In narrow graphene nano-ribbons (GNR) with zz edges, the zz-ESs are expected to be spin polarized along each edge and have opposite spin directions on different edges. This antiferromagnetic configuration is expected to split the LDOS peak, where the peak separation increases with decreasing ribbon width due to increasing inter-edge interaction. If the spins on both edges align in the same direction by applying magnetic fields, the splitting will disappear. In addition to the edge states, GNRs can feature an energy gap due to quantum confinement. The gap amplitude increases with decreasing ribbon width, but should be insensitive to the magnetic field. Previous measurements of the spin polarized zz-ESs [3-5] are not consistent with each other, and its experimental verification is still left unsettled.

In this study, the LDOS on zz-GNRs were studied by scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S) at temperatures down to 2 K and in high magnetic fields up to 13 T. Zz-GNRs were fabricated on a graphite surface by hydrogen plasma etching [6]. Figure (a) and the inset show the STM image of a zz-GNR of monatomic height and 12.5 nm width and its height profile, respectively. In Fig. (b), we show typical dI/dV spectra taken at $B = 0$ and 12 T on the upper edge of the ribbon. At $B = 0$ T, several distinct peaks are seen around E_F ($V = 0$), while no peaks and a single prominent peak are observed on a much wider terrace and an isolated zz edge, respectively (not shown here). The steep dI/dV suppression near -50 mV accompanied by the two broad peaks at -60 and 35 mV are assigned to a structure caused by the quantum confinement (horizontal bar in Fig. (b)). Within the gap structure, there are two peaks at -10 and 10 mV which could be a spin split zz-ES. By applying a magnetic field of 12 T, the double peak structure is modified. Note that small periodic peaks appeared at $V \geq 30$ mV are those caused by Landau quantization. Further analyses and discussions of these preliminary data will be given.



[1] M.Fujita, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **65**, 1920 (1996).

[2] Y.Niimi, *et al.*, Appl. Surf. Sci. **241**, 43 (2005).

[3] C.Tao, *et al.*, Nat. Phys. **7**, 616 (2011).

[4] G.Z.Magda, *et al.*, Nature **514**, 608 (2014).

[5] M.Ziatdinov, *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 115427 (2013).

[6] T. Matsui, *et al.*, to appear.

Magnetochiral Hall effect in a 2D trigonal superconductor

工学系研究科物理工学専攻 岩佐研究室

板橋 勇輝, 斎藤 優, 井手上 敏也, 岩佐 義宏

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)はその層状性から単層にまで劈開が可能であるため、2次元超伝導やオプトバレートロニクスなど様々な分野で注目を集めている。単層 TMD の重要な性質として、3回対称性が挙げられる。TMD の構造式は MX_2 であり(M は遷移金属原子、X はカルコゲン原子)、単層について1つの M 原子が2つの X 原子に挟まれた形で全体として A サイトと B サイトが非等価なハニカム格子をなしている(図 1)。その結果、単層 TMD は3回対称性を持つ。MoS₂はその TMD に属し、電気二重層トランジスタ構造を用いることで表面1層に超伝導を誘起することができる。本研究では、電界誘起超伝導 MoS₂ における3回対称性に起因する現象である非線形輸送現象に着目し、それを抵抗の倍周波ロックイン AC 測定で検出した。そして、電流の結晶に対する方位と非線形シグナルの方向との関係を明らかにした。

抵抗が電流の向きに依るといふ非線形性は、電流が zigzag 方向と平行な場合の MoS₂ の縦抵抗成分について報告されている[1]。一方、本研究では、電流が armchair 方向と平行な場合のホール抵抗成分についても同じような振る舞いが見られることを発見した。また、このとき、縦抵抗についてのシグナルは観測されなかった。これらの特異な振る舞いは、非線形シグナルが3回対称の結晶ポテンシャルに起因していることを示唆している。

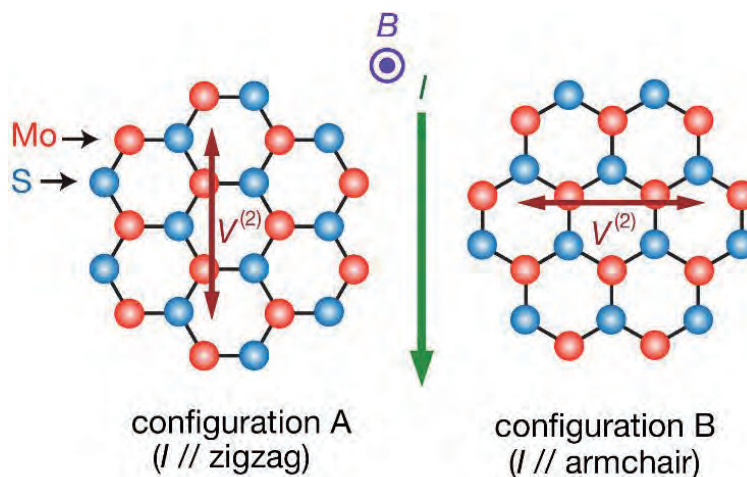


図 1. MoS₂における2種類の方位

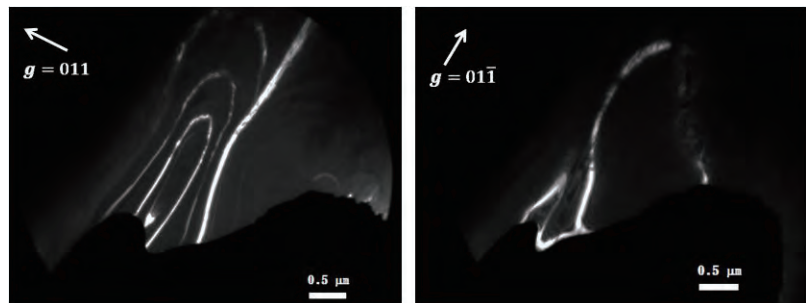
[1] R. Wakatsuki *et al. Sci. Adv.* **3**, e1602390 (2017)

Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電氣的性質 Electrical properties of dislocations in Bismuth-Antimony topological insulators

工学系研究科マテリアル工学専攻 枝川・徳本研究室
濱崎拓、徳本有紀、枝川圭一

三次元トポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体であるが、表面においては特殊な導電性を示すユニークな物質である。この表面の伝導状態は、『トポロジー』と呼ばれる数学的な構造によって保護されており、高いキャリア移動度を持つ、電子スピンの運動方向に応じて固定されているなどの応用に有利な性質を有している。通常の三次元結晶には、転位と呼ばれる一次元の格子欠陥が導入されているが、トポロジカル絶縁体結晶中のこの格子欠陥がある条件を満たす時、これに沿って、表面と似通った特殊な伝導状態が現れることが、理論的に予測されている[1]。トポロジカル絶縁体の伝導状態では完全後方散乱（運動方向を 180 度変える散乱）が禁止されているが、表面に現れる状態は二次元の伝導状態であるため、そこを流れるキャリアは 180 度でない角度で散乱され得る。これと比較して、転位に沿って現れるとされる状態は一次元であるため、キャリアが弾性散乱を受けることのない理想的な量子ワイヤーとして振る舞うものと考えられる。このような性質を利用して、熱電変換性能の大幅な改善などへの応用が期待されている[2]。

本研究では、実際のトポロジカル絶縁体結晶中に、トポロジカルに保護された一次元伝導状態の形成条件を満たす転位が導入されること、および導入された転位に沿って一次元伝導状態が形成されることの実証を目的としている。条件を満たす転位が導入され得るトポロジカル絶縁体として、ビスマスアンチモンを選択し、作製した結晶に塑性変形を施すことによって転位を導入した。導入された転位が条件を満たすか否かを、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて調べた。その結果、変形方位を工夫することで、条件を満たす転位が非常に高密度に導入されることが確認された[3]。また、結晶中の転位の移動速度の違いから、条件を満たす転位の長さは、らせん転位よりも刃状転位の方が大きくなることがわかった。そのため、刃状転位に沿うような方向に電流を流し、伝導転位の導入による電気抵抗の変化を調べた。ビスマスアンチモンはバンドギャップが数十ミリエレクトロンボルトと小さく、室温付近では半金属に近い電気伝導性を持つため、バルクと伝導転位の伝導性を区別するためには低温で測定を行う必要がある。低温センターのPPMSを用い、300K から 2K までの範囲で測定を行った。



塑性変形によってビスマスアンチモン中に導入された転位ループの TEM 暗視野像。左は $g=011$ 、右は $g=01\bar{1}$ のとき。

- [1] Y. Ran *et al.*, *Nat. Phys.* **5** (2009) 298.
 [2] O. A. Tretiakov *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 073108.
 [3] H. Hamasaki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 092105 (2017)

小型超低温連続冷凍システムの開発 II

Development of a Compact and Continuous Sub-mK Refrigerator II

低温センター 共同利用部門^A、理学部 物理学科^B、
低温センター 研究開発部門^C、理学系研究科 物理学専攻 福山研^D
戸田 亮^A、瀧本 翔平^B、植松 祐真^B、村川 智^C、福山 寛^{C,D}

熱揺らぎが低減され、物質固有の性質が顕在化する低温環境は、高感度計測や新奇な物理現象の探索と解明に有用である。今日では自動運転可能な希釈冷凍機が普及し、幅広い分野で 10–20 mK 程度までの極低温環境を利用した研究が行われている。しかし、さらなる低温である超低温環境 (1 mK 以下) は、これを実現する銅核断熱消磁冷凍機が大がかりで、設置運用コストが高いことがネックとなり、その利用が一部の専門分野のみに限られている。この障壁を取り払い、超低温環境の普及による科学研究の進展に寄与するため、我々は、既存の希釈冷凍機にそのまま搭載可能なサイズで、1 mK 弱までの任意の温度を連続発生可能な「小型超低温連続冷凍システム」の開発を進めている [1]。

本システムでは、磁気作業物質として銅より弱磁場でも同等の冷却力を発揮できる増強核磁性体 PrNi₅ を用い、これに 1.2 T 程度の磁場を印加可能な小型超伝導マグネットと漏洩磁場遮蔽用の高透磁率シールドを組み合わせて、冷凍ユニット (φ42, L~180) とする。この小型冷凍ユニットを 2 つ用意し、2 つの熱スイッチを介して希釈冷凍機と直列接続することで連続冷却を実現する (図 1)。多段化による連続冷却の実現と、印加磁場の低下によって可能になる磁気遮蔽により、大幅な省スペース化が可能である。シミュレーション計算の結果、0.8 mK で 10 nW の冷却力を実現するには、熱

スイッチを介した 2 つの冷凍ユニット間の熱抵抗を残留電気抵抗換算で 100 nΩ 程度まで小さくする必要があることがわかった [1]。現在は超伝導熱スイッチと冷凍ユニットの設計を終え、試作を行っている。小型化と良好な熱伝導を両立させるため、熱スイッチ部の超伝導体の亜鉛板と熱リンクの銀板は拡散溶接した (図 2)。試作した熱スイッチの電気抵抗は 4.2 K において 114 nΩ であった。これは予備実験から期待していた抵抗値より若干大きい、実用上は許容範囲内である。小型超伝導マグネット (1.2 T、ボア径 22 mm) の設計では、磁場掃引時の線材自身の磁気発熱とその除却に留意した。磁気シールドの設計では、高透磁率材の種類及び厚みを複数検討し、厚さ 4 mm の Permendur 材を用いることで、φ42 のシールドの外に漏れる磁場を 1 mT 以下に低減できることがわかった。

発表では、これらの詳細や、熱スイッチの直接熱伝導測定の結果について発表する予定である。



図 1. 連続冷凍システム

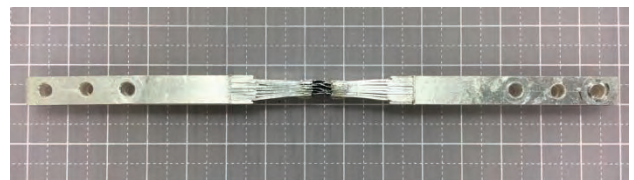


図 2. 製作した熱スイッチ本体

[1] R. Toda, S. Murakawa, and H. Fukuyama, “Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications”, accepted for publication in J. Phys. Conf. Ser. (2018).

第9回低温センター研究交流会
概要集

The 9th Research Forum of Cryogenic Research Center
Abstract book

2018年2月
February 2018

発行者：東京大学低温センター
印刷：大日本印刷株式会社

第9回
低温センター研究交流会
概要集

Abstract book
The 9th Research Forum of
Cryogenic Research Center

お問い合わせ

東京大学低温センター

島野 亮

電話：03-5841-2860（内線22860）

e-mail：conference@crc.u-tokyo.ac.jp

<http://www.crc.u-tokyo.ac.jp>



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO