

第10回

低温センター研究交流会概要集

Abstract book

The 10th Research Forum of Cryogenic Research Center

■日時： 平成31年2月22日（金）

9：30～18：00（講演会）

18：00～20：00（懇談会）

■場所： 小柴ホール（理学部1号館中央棟2階）

東京大学低温センター

Cryogenic Research Center

第10回 低温センター研究交流会 プログラム

- 日時： 平成31年2月22日（金）
講演会 9:30~18:00
利用者懇談会 18:00~20:00
- 場所： 小柴ホール（理学部1号館中央棟2階）
- 一般講演時間：20分（質疑応答5分を含む）

9:30- 9:35 はじめに 大越 慎一（低温センター長）

セッション1

座長：岡本 徹(理学系研究科・物理学専攻)

- 9:35-9:55 山田 林介 工学系研究科・物理工学専攻・M1（十倉研究室）
O-01 強相関ディラック半金属 CaIrO_3 における高移動度電子と巨大磁気抵抗
Unusually high mobility electron with giant magnetoresistivity in strongly correlated Dirac semimetal CaIrO_3
- 9:55-10:15 根岸 真通 理学系研究科・物理学専攻・D1（高木・北川研究室）
O-02 ペロブスカイト型イリジウム酸化物薄膜におけるディラックノード電子の相制御
Phase control of Dirac node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO₃ thin films
- 10:15-10:35 中澤 佑介 工学系研究科・物理工学専攻・D1（川崎研究室）
O-03 希薄キャリアディラック半金属薄膜の作製と量子輸送特性
Growth and quantum transport properties of Dirac semimetal films with low carrier density
- 10:35-10:50 休憩

セッション2

座長：大矢 忍(工学系研究科・電気系工学専攻)

- 10:50-11:10 竹原 陵介 工学系研究科・物理工学専攻・博士研究員（鹿野田研究室）
O-04 電荷-スピン-格子結合系有機物質におけるトポロジカル励起による新しい電気伝導機構
A new electrical conduction mechanism by topological excitations in the charge-spin-lattice coupling organic system
- 11:10-11:30 Olaf Stefanczyk 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
O-05 Functionalization of poly(4-vinylpyridine) polymer with cobalt(II) single-molecule magnets
- 11:30-11:50 立原 義宏 工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・M2（カブラル研究室）
O-06 液体窒素を用いた高分子の凍結乾燥を有効活用した pH 応答性高分子ミセルの開発
Development of pH-sensitive polymeric micelles effectively utilizing polymer freeze drying by liquid nitrogen
- 11:50-13:00 昼食

13:00-15:20 ポスターセッション**於：小柴ホール・ホワイエ**

※ポスターは9時からセッション2の開始までの間に貼って下さい。また、ポスターセッション終了後から15時30分までに撤去して下さい。

13:00-14:10 偶数番号

14:10-15:20 奇数番号

セッション3**座長：藤森 淳(理学系研究科・物理学専攻)**

- 15:30-15:50 黒山 和幸 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (樽茶研究室)
O-07 GaAs 横型二重量子ドットにおける非平衡フォノンによる電子スピン散乱の研究
Research on Electron Spin Scattering by Non-equilibrium Phonon in a GaAs Double Quantum Dot
- 15:50-16:10 佐藤 彰一 工学系研究科・電気系工学専攻・研究生 (田中・大矢・中根研究室)
O-08 Fe/Mg/MgO/SiO₂/Si 構造を用いたほぼ理想的なスピン注入：デッドレイヤーの抑制とトラップ密度の低減
Nearly ideal spin injection efficiency in Fe/Mg/MgO/SiO_x/Si structure : suppressing the deadlayer and lowering the trap density
- 16:10-16:30 富田 圭祐 理学系研究科・物理学専攻・D3 (島野研究室)
O-09 鉄系超伝導体 FeSe_{0.5}Te_{0.5}におけるヒッグスモード
Higgs modes in the iron-based superconductor FeSe_{0.5}Te_{0.5}
- 16:30-16:50 板橋 勇輝 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (岩佐研究室)
O-10 Nonreciprocal transport in electric field induced 2D superconductors

16:50-17:05

休 憩

17:05-17:50

特別講演**座長：島野 亮 (低温センター・研究開発部門)**

樽茶 清悟 工学系研究科・物理工学専攻・教授
前東京大学低温センター長
ナノ構造の量子状態制御と量子情報への応用

17: 50-

閉会の挨拶 島野 亮 (低温センター・研究開発部門)

18:00-20:00 利用者懇談会**於 小柴ホール・ホワイエ**

※参加費：2,000円 (講演会に参加した学生は無料)

19:30-

ベストプレゼンテーション・アワード、ベストポスター・アワード授賞式

ポスターセッション (13:00-15:20)

- P-01 吉川 尚孝 理学系研究科・物理学専攻・助教（島野研究室）
鉄セレン薄膜のテラヘルツ磁気光学分光
Terahertz magneto-optical spectroscopy of FeSe thin film
- P-02 田中 勇貴 工学系研究科・物理工学専攻・M1（岩佐研究室）
分子線エピタキシー法により作製した TaSe₂ 薄膜の輸送特性
Transport properties of TaSe₂ thin films by molecular beam epitaxy
- P-03 礒山 和基 理学系研究科・物理学専攻・M1（島野研究室）
FeSe 薄膜の中赤外光ポンプ-テラヘルツ光プローブ分光
Mid-infrared pump-terahertz probe spectroscopy in FeSe thin film
- P-04 若松 浩大 工学系研究科・物理工学専攻・M2（鹿野田研究室）
Thermoelectric effects in a doped spin liquid candidate κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈
- P-05 輿石 佳佑 理学系研究科・物理学専攻・D3（藤森研究室）
Te アニール FeTe_{1-x}Se_x の高分解能角度分解光電子分光
High-resolution ARPES Study of Te-annealed 11-type Iron-based Superconductor FeTe_{1-x}Se_x
- P-06 高橋 泰賀 工学系研究科・物理工学専攻・M1（鹿野田研究室）
一種類の分子から成る有機導体で発現する多彩な電子状態の NMR 研究
NMR study on a variety of electronic states in single-component organic conductors
- P-07 勝見 恒太 理学系研究科・物理学専攻・D1（島野研究室）
高強度テラヘルツ波パルス誘起ヒッグスモードを用いた Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} 薄膜における超伝導ゆらぎの研究
Superconducting fluctuation in Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} thin films revealed by the intense terahertz pulse-induced Higgs mode
- P-08 Ke Gu 理学系研究科・化学専攻・M2（長谷川研究室）
単結晶 SrRuO₃ シートの作製
Synthesis of single crystalline SrRuO₃ sheet
- P-09 丹羽 宏彰 理学系研究科・物理学専攻・M2（島野研究室）
銅酸化物超伝導体 La_{2-x}Sr_xCuO₄ の光誘起非平衡状態
Light-induced nonequilibrium state in the cuprate superconductor La_{2-x}Sr_xCuO₄
- P-10 吉田 郁哉 理学系研究科・化学専攻・M2（大越研究室）
二次元層状 Co-W シアノ架橋型金属錯体におけるテラヘルツ波応答性
Study on terahertz wave absorption properties of two-dimensional layered Co-W cyanido-bridged metal assemblies
- P-11 宇佐美 潤 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 4 の比熱と超流動性の同時測定装置の開発
Development of an apparatus for simultaneous measurements of specific heat and superfluidity in monolayers of helium 4

- P-12 浦井 瑞紀 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (鹿野田研究室)
有機モット転移系における乱れ誘起量子現象
Disorder-induced quantum phenomena in an organic Mott system
- P-13 中村 祥子 低温センター・特任助教 (島野研究室)
電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第2高調波発生
Terahertz second harmonic generation in a thin film of an s-wave superconductor NbN under supercurrent injection
- P-14 林 悠大 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (高橋研究室)
Magneto-optical spectroscopy on Weyl points for anomalous and topological Hall responses in MnGe
- P-15 Huang Hongrui 理学系研究科・物理学専攻・D1 (長谷川研究室)
Two-dimensional superconductivity on SIC phase of Pb/Ge(111) studied by in situ transport measurement
- P-16 西早 辰一 工学系研究科・物理工学専攻・D2 (川崎研究室)
ディラック半金属薄膜における表面量子化伝導の制御
Quantized surface transport controlled in Dirac semimetal thin films
- P-17 濱崎 拓 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D3 (枝川・徳元研究室)
マイクロメートルサイズに加工した Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電気抵抗測定
Electrical resistivity measurements for dislocations in micrometer-sized Bi-Sb topological insulators
- P-18 武重 有祐 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (樽茶研究室)
トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜上に作製したゲート変調可能な Josephson 接合における交流 Josephson 効果
The a.c. Josephson effect of gate tunable Josephson junction on topological insulator $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ film
- P-19 高城 拓也 理学系研究科・物理学専攻・M1 (長谷川研究室)
磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ の作製とその評価
Fabrication and Evaluation of Magnetic Topological Insulator Heterostructure $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$
- P-20 佐藤 慎 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)
新規磁性半導体 EuAs 薄膜の磁気輸送特性
Magneto transport properties of new magnetic semiconductor EuAs films
- P-21 末次 祥大 理学系研究科・物理学専攻・D2 (高木・北川研究室)
アンチペロブスカイト Sr_3PbO における三次元ディラック電子の巨大軌道反磁性
Giant orbital diamagnetism of three-dimensional Dirac electrons in antiperovskite Sr_3PbO
- P-22 村瀬 秀明 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
電子ガラスの結晶化の実空間観察
Real-space observation of electron glass crystallization
- P-23 山田 太郎 工学系研究科・化学システム工学専攻・特任上席研究員 (堂免研究室)
水の光触媒分解素材窒化タンタルの電子物性観測
Physical electronic observations of tantalum nitride as a material for water photosplitting catalyst

- P-24 中林 耕二 理学系研究科・化学専攻・助教（大越研究室）
多様な構造を有するシアノ架橋型金属集積体の磁気特性
Magnetic properties of cyanido-bridged metal assemblies with various structures
- P-25 鈴木 尚将 理学系研究科・物理学専攻・M2（村川研究室）
2次元ヘリウム3の新奇量子スピン液体状態の解明に向けた低発熱 NMR セルの開発
Development of NMR cell with low heat dissipation for investigation of novel spin liquid state in two-dimensional helium-3 films
- P-26 野崎 翔平 農学生命科学研究科・応用生命科学専攻・D3（養生訓科学寄付講座）
植物ホルモン・ブラシノステロイド情報伝達におけるマスター転写因子の X 線結晶構造解析
Crystal structure analysis of the master transcription factor in brassinosteroid signaling
- P-27 白石 勇太郎 薬学系研究科・生命物理化学教室・博士研究員
区分同位体標識を用いた $\beta 2$ アドレナリン受容体のリン酸化によるシグナル制御機構の解明
NMR analyses of the phosphorylation of $\beta 2$ -adrenoceptor using segmental isotopic labeling
- P-28 Prashant Kandwal 農学生命科学研究科・応用生命科学専攻・D3（植物栄養・肥料学研究室 藤原研）
Isolation and characterization of the EMS rice mutant with high molybdenum in grain
- P-29 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）
乳房非触知病変を摘出するための磁性マーカーシステム
Development of a magnetic marker system for excising non-palpable breast lesions
- P-30 瀧口 沙希 農学部・応用生命科学課程生命化学・工学専修・B4（食品生物構造学研究室）
新規 NMR 測定法を用いた国産蜂蜜の包括的成分分析と品質評価
Rapid and Comprehensive Quantitative Analysis of Organic Compounds in Japanese Honey
- P-31 山崎 翔太 理学系研究科・物理学専攻・M2（村川研究室）
超低温で用いるヘリウム3融解圧力温度計の開発
Development of Helium 3 melting curve thermometer operated at ultra-low temperature
- P-32 KUNAL KUMAR 理学系研究科・化学専攻・M2（大越研究室）
The cyano-bridged metal assemblies revealing white light emission and acting as a temperature sensor based on its ratiometric and colorimetric nature
- P-33 スミス ライアン 工学系研究科・システム創成学科（原子力国際専攻）・B4（大野研究室）
超伝導転移端センサによる重粒子線カロリメトリ
Calorimetry of Heavy Charged Particle by superconducting transition edge sensor
- P-34 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
高い磁気相転移温度を示すペンタシアニドニトロシルモリブデン錯体
Pentacyanidonitrosylmolybdate-based magnet showing a high magnetic transition temperature
- P-35 瀧本 翔平 理学系研究科・物理学専攻・M1（村川研究室）
小型超伝導マグネットの開発
Development of a Compact Superconducting Magnet

- P-36 Yue Xin 理学系研究科・化学専攻・M1（大越研究室）
NMR Dehydration driven reversible photoluminescent SMM property in a three-dimensional cyanido-bridged Dy-Co network
- P-37 鈴木 雅弘 理学系研究科・物理学専攻・M2（藤森研究室）
ファンデルワールス強磁性体の光電子分光と X 線磁気円二色性による研究
Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of a van der Waals ferromagnets
- P-38 北折 暁 工学系研究科・物理工学専攻・M1（十倉研究室）
MnGe 単結晶におけるヘッジホッグ格子の変形と創発磁気現象
Transformation of hedgehog-lattice and emergent magnetic phenomena in MnGe single crystal
- P-39 高瀬 健吾 工学系研究科・電気系工学専攻・B4（田中・大矢・中根研究室）
室温強磁性半導体(Ga,Fe)Sb ヘテロ構造における巨大磁気抵抗効果
Giant magnetoresistance in ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb heterostructures with high Curie temperature
- P-40 川畑 慎太郎 理学系研究科・化学専攻・D1（大越研究室）
鉄(II)およびオクタシアノニオブ(IV)酸イオンを構築素子とした二元金属錯体におけるサイト選択的 2 段階スピントスオーバー現象
Iron(II)-octacyanidonioate(IV)-based bimetal assembly exhibiting site-selective two-step spin-crossover
- P-41 Shobhit Goel 工学系研究科・電気系工学専攻・D3（田中・大矢・中根研究室）
Magnetic anisotropy switching in heavily-Fe-doped high-Curie-temperature ferromagnetic semiconductor (Ga_{0.7},Fe_{0.3})Sb with a critical thickness
- P-42 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 Co(II)/Fe(II)-Nb(IV)錯体の磁気特性およびスピントスオーバー現象
Magnetic and spin-crossover properties of cyanido-bridged Co(II)/Fe(II)-Nb(IV) trimetallic systems
- P-43 Sarker Md Shamim 工学系研究科・電気系工学専攻・M1（田畑研究室）
Spin wave detection by CPW with additional electrodes for external field modulation to the neuromorphic application
- P-44 田畑 智弘 理学系研究科・化学専攻・M1（大越研究室）
シアノ架橋型鉄-ニオブ集積型金属錯体における磁気光学効果
Magneto-optical effect on a cyanido-bridged Fe-Nb metal assembly
- P-45 Jiang Miao 工学系研究科・電気系工学専攻・D2（田中・大矢・中根研究室）
Spin-orbit torque strength and efficiency in a perpendicularly-magnetized ferromagnetic semiconductor GaMnAs single thin film
- P-46 室谷 悠太 理学系研究科・物理学専攻・D2（島野研究室）
バルク GaAs における励起子の高密度光子ドレスト状態
High-density photon-dressed state of excitons in bulk GaAs
- P-47 荻野 槇子 工学系研究科・物理工学専攻・M2（高橋研究室）
極性サイクロイド型磁性体における自然旋光性
Natural optical activity in polar cycloidal helimagnet

- P-48 高山 正行 理学系研究科・物理学専攻・D3（島野研究室）
バルク GaAs における励起子間相互作用エネルギーと励起子 s 波散乱長
Exciton-exciton interaction energy and exciton s-wave scattering length in bulk GaAs
- P-49 井口 照悟 工学系研究科・物理工学専攻・D1（高橋研究室）
マルチフェロイクスのエレクトロマグノン共鳴におけるコヒーレント分極変調
Coherent polarization modulation through the electromagnon resonance in multiferroics
- P-50 荒木 大晴 工学系研究科・電気系工学専攻・M2（田中・大矢・中根研究室）
ペロブスカイト酸化物単結晶エピタキシャルヘテロ構造 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ における高効率スピン流電流変換
Efficient spin-to-charge current conversion in a perovskite-oxide $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ epitaxial single-crystal heterostructure
- P-51 長谷川 顕登 工学系研究科・物理工学専攻・M2（千葉研究室）
界面酸化層の挿入による強磁性金属/重金属接合膜におけるスピン軌道トルクの増大
Enhancement of spin-orbit torque by inserting oxidation layer into ferromagnetic metal/heavy metal interface
- P-52 Le Duc Anh 工学系研究科・電気系工学専攻・助教（田中・大矢・中根研究室）
Ultra-low power bias-driven magnetization switching by quasi-Fermi level control at an interface of a $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ -based magnetic tunnel junction
- P-53 吉田 訓 工学系研究科・物理工学専攻・D3（石坂研究室）
単層 CrSe_2 のポリタイプ制御とその電子構造に関する研究
Electronic structure of T- and H-type CrSe_2 monolayer thin film
- P-54 山崎 浩樹 工学系研究科・電気系工学専攻・M2（田中・大矢・中根研究室）
ナノスケール構造における GaMnAs の電界制御異方性磁気抵抗
Electrical control of the anisotropic magnetoresistance in a nano-scale GaMnAs structure
- P-55 藤井 武則 低温センター・研究開発部門・助教
カーボンナノチューブの熱および電気輸送特性
Thermal and electrical transport properties of carbon nanotubes
- P-56 André Amend 理学系研究科・物理学専攻・D2（福山研究室）
STM/S Studies of H-plasma Etched Graphene on SiC(0001)
- P-57 畑田 大輝 工学系研究科・物理工学専攻・M1（川崎研究室）
強誘電半導体 SbSI のシフト電流における電極の影響
Impact of electrodes on shift current in ferroelectric semiconductor SbSI
- P-58 菅沼 大貴 理学系研究科・物理学専攻・M1（島野研究室）
電荷密度波物質 TaSe_2 の超高速光励起ダイナミクス
Ultrafast photo-excitation dynamics of charge-density-wave compound TaSe_2
- P-59 池田 侑典 理学系研究科・化学専攻・M1（大越研究室）
銅-オクタシアノモリブデン集積体の電気化学薄膜における強誘電性
Ferroelectricity of an electrochemical thin film composed of copper-octacyanomolybdate assembly

- P-60 阿部 美玲 低温センター・液化供給部門・技術専門職員
本郷キャンパスの月初ヘリウムデータ報告と液体ヘリウム使用料金
Monthly reports of “helium data” by users and expenses for liquid helium usage in Hongo campus
- P-61 戸田 亮 低温センター・共同利用部門・技術専門職員
低温センター共同利用装置の紹介
Introduction of joint-use equipments in the Cryogenic Research Center

口頭発表

強相関ディラック半金属 CaIrO_3 における

高移動度電子と巨大磁気抵抗

Unusually high mobility electron with giant magnetoresistivity in strongly correlated Dirac semimetal CaIrO_3

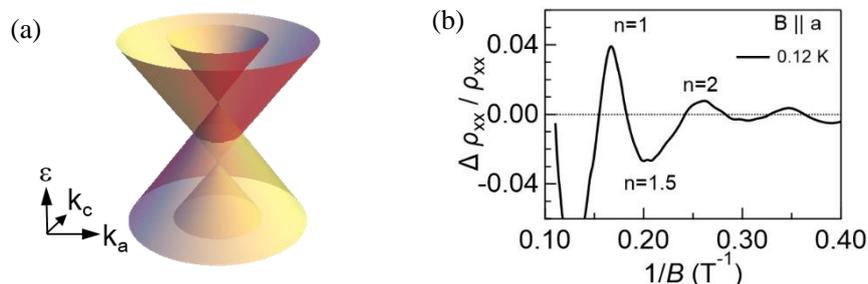
東大工学部^A, JST さきがけ^B, 筑波大^C, 理研 CEMS^D

山田林介^A, 藤岡淳^{B,C}, 川村稔^D, 大川達也^A, 酒井志朗^D, 平山元昭^D,

有田亮太郎^{A,D}, 橋爪大輔^D, 星野学^{B,D}, 十倉好紀^{A,D}

トポロジカル物質は近年の物性物理学における最先端の課題の一つである。その一つであるトポロジカル半金属では、相対論的な方程式で表されるディラック電子やワイル電子が三次元バルク中に生じる。トポロジカル半金属の特徴の一つは電子移動度が極めて高く巨大磁気抵抗効果やカイラル異常に由来する量子伝導が見られる点である。既に Cd_3As_2 や Na_3Bi などの化合物半導体や半金属物質を中心に数多くの報告がなされている[1][2]。一方で、電子間のクーロン相互作用が強い強相関物質においてもトポロジカル半金属状態が生じる可能性が提案されている。例えば、パイロクロア型Ir酸化物やペロブスカイト型Ir酸化物 AIrO_3 ($\text{A}=\text{Ca}, \text{Sr}$) では、磁性による磁気ワイル半金属相[3]やモット転移近傍においてディラック半金属相[4]が生じる可能性が指摘されている。しかし、強相関物質では一般に強い電子相関により電子が局在する傾向にあり、ディラック電子やワイル電子に特徴的な量子伝導現象はこれまでほとんど観測されて来なかった。

本研究では、強相関ディラック半金属における新奇量子伝導現象を観測することを目的に、ペロブスカイト型 CaIrO_3 の単結晶を合成し、その磁気輸送特性を調べた。その結果、低温で電子の移動度が急激に増大し、量子振動が見られることが分かった。当日は量子極限において見られた巨大磁気抵抗効果の結果も合わせて議論する。



(a)ディラックラインノード近傍の線形なバンド分散。(b)縦磁気抵抗における量子振動。

[1] T. Liang, *et al.*, Nat. Matter. **14**, 280 (2015)

[2] J. Xiong, *et al.*, Science **350**, 6259 (2015)

[3] K. Ueda, *et al.*, PRL **115**, 056402 (2015)

[4] M. Zeb, *et al.*, PRB **86**, 085149 (2012)

ペロブスカイト型イリジウム酸化物薄膜における ディラックノード電子の相制御

Phase control of Dirac node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO₃ thin films

^A理学系研究科物理学専攻, ^B物性研究所,

^C理研放射光科学研究センター, ^Dマックスプランク研究所

根岸真通^A, 平岡奈緒香^A, 浜根大輔^B, 大隅寛幸^C, 高木英典^{A, D}

イリジウム酸化物では、電子相関・スピン軌道相互作用・結晶場が同程度のエネルギースケールをもち、これらの協奏効果によって多様な新奇量子相が実現すると考えられている[1]。中でも、ペロブスカイト型 (Pv-) の結晶構造をもつ AIrO_3 ($A = \text{アルカリ土類金属元素}$) は、電子のバンド構造に、時間反転対称性・結晶対称性に保護された線状のノードを有すると理論的に予想されている[2]。実験的にも、 Pv-SrIrO_3 が、移動度の高いディラック的な電子キャリアをもった半金属であることが分かっている[3]。また、低次元化によって磁性絶縁体相が現れること[4]から、 Pv-SrIrO_3 の電子状態においては電子相関も潜在的に重要である。以上の先行研究から、我々は、 Pv-AIrO_3 が、ディラック線ノード半金属と相関磁性絶縁体の相境界近傍に位置する特徴的な物質であると考えている。

我々は、 Pv-AIrO_3 の電子相関を人工的に制御することによって、半金属状態がどのように変調するかを調査した。具体的には、 $\text{Pv-SrIr}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ における磁性絶縁体相の発現を報告した先行研究[5]から着想を得て、 Pv-SrIrO_3 および Pv-CaIrO_3 薄膜試料の Ir^{4+} サイトを Sn^{4+} で部分置換することによって、 Ir サイト間の跳躍効果を抑制し、相対的に電子相関を増幅することを試みた。物性評価の結果、 Pv-SrIrO_3 および Pv-CaIrO_3 どちらも、 Sn 置換によって常磁性半金属から反強磁性絶縁体へ転移することが分かった。さら

に、 Pv-SrIrO_3 および Pv-CaIrO_3 における電子相関の実効的大きさの違いが、電子状態の相図の違いとして現れることが明らかになった (図 1)。これらの結果は Pv-SrIrO_3 、 Pv-CaIrO_3 がそれぞれ電子相関のスケールが異なる半金属であることを示しており、双方がディラックノードにおける相関効果を調べる上で有効な舞台であると考えられる。

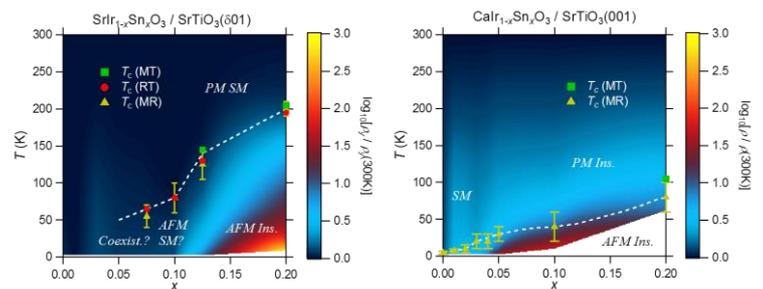


図 1. $\text{Pv-SrIr}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ および $\text{Pv-CaIr}_x\text{Sn}_x\text{O}_3$ の相図

- [1] W. Witczak-Krempa *et al.*, *Ann. Rev. of Cond. Matt. Phys.* **5**, 57-82 (2014).
 [2] J.-M. Carter *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 115105 (2012).
 [3] Y.F. Nie *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016401 (2015).
 [4] J. Matsuno *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 247209 (2015).
 [5] Q. Cui *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 176603 (2016).

希薄キャリアディラック半金属薄膜の作製と量子輸送特性 Growth and quantum transport properties of Dirac semimetal films with low carrier density

^A工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室、^BJST さきがけ
中澤 佑介^A、打田 正輝^{A,B}、西早 辰一^A、佐藤 慎^A、川崎 雅司^A

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始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、低温における量子ホール効果の観測[3]や Zn ドーピングによるキャリア変調[5,6]を通じてバンド構造や膜厚に対する次元性の変化、及び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。そこで本研究では、更なるキャリア密度の低減のため、分子線エピタキシー法を用いた Cd_3As_2 薄膜の作製を行った。As 分圧を始めとする成膜条件を最適化することにより、 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ までのキャリア密度の大幅な低減及び、 $3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える電子移動度を有する Cd_3As_2 薄膜の作製を達成した。このようにして作製した Cd_3As_2 薄膜では、三次元の電子状態を有する膜厚領域 ($t > 100 \text{ nm}$) においても、ホール抵抗測定において、二次元的な電子状態の存在を示唆する結果が観測され、これはトポロジカルディラック半金属の特異な表面状態に由来するものと考えられる。

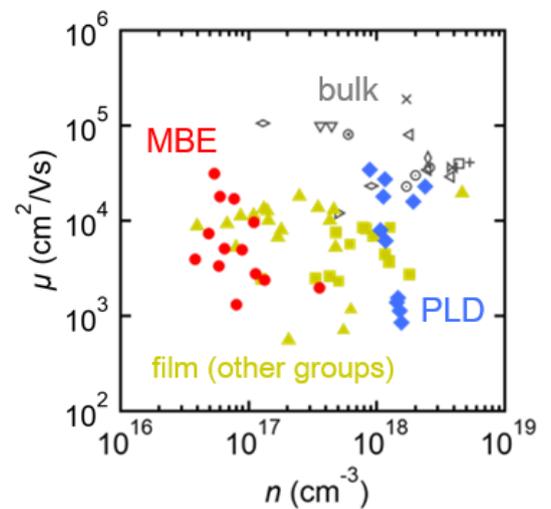


図 1 : 代表的な Cd_3As_2 試料の電子移動度 μ とキャリア密度 n 。

- [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 (2017) [4] Y. Nakazawa *et al.*, Sci. Rep. **8**, 2244 (2018)
[5] S. Nishihaya *et al.*, Sci. Adv. **4**, eaar5668 (2018) [6] S. Nishihaya *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 245103 (2018)

O-04

電荷-スピン-格子結合系有機物質におけるトポロジカル励起による新しい電気伝導機構

A new electrical conduction mechanism by topological excitations in the charge-spin-lattice coupling organic system

東京大学工学系研究科物理工学専攻鹿野田研究室

東京大学新領域岡本・貴田研究室¹, 産総研², 理研³

竹原陵介, 須波圭史, 宮川和也, 宮本辰也¹, 岡本博^{1, 2}, 堀内佐智雄², 加藤礼三³, 鹿野田一司

トポロジーの概念は物性物理学に広く適用され、新たな電子状態の発見につながってきた。代表的な例として、3次元表面または2次元境界線に現れるディラック・ワイルフェルミオンといったエキゾチックな粒子が挙げられる。これらの系では異なるトポロジーの境界は静的なものであり、そこにギャップレスで粒子が励起する構造を持つ。一方本研究で着目したのは、この境界自体の持つ自由度である。1次元系における境界は0次元となり、この境界自体が一種の粒子として振舞うことが可能になると予想される。本研究では擬1次元系の有機物質において、ドメインウォール (DW) と呼ばれるトポロジカル励起が電気伝導を担うことを示す結果が得られた。

対象としたのは擬1次元有機物質 TTF-CA と呼ばれる物質である。この物質は中性-イオン性転移と呼ばれる現象を示すことで知られており、常誘電バンド絶縁 (中性) 相とクロスオーバーでつながった常誘電モット絶縁 (イオン性) 相、そして低温の強誘電モット絶縁 (イオン性) 相の3つの相を持つ [1]。このクロスオーバー領域では、2つの絶縁相の境界であるにもかかわらず室温での1次元鎖方向の電気伝導度が ~ 7 S/cm に達し他の有機伝導体並みに高くなること、伝導度が極めて高い1次元性を持つこと、さらにその活性化エネルギーが ~ 0.05 eV と、1粒子励起エネルギーよりも1桁も小さいことが明らかになった。これらの結果は、従来の準粒子ではなく、理論的に予測された DW による伝導を支持しており [2, 3]、クロスオーバー領域において、トポロジカル電荷を持った中性-イオン性 DW が励起され、それが電気伝導を担うという描像で理解できる。さらにトポロジカル電荷による定常電流にはスピソリトンと呼ばれる別のトポロジカル励起が必要であるが [2-4]、当日は NMR 測定の結果も元にスピソリトンも含めた電気伝導機構について話をする。

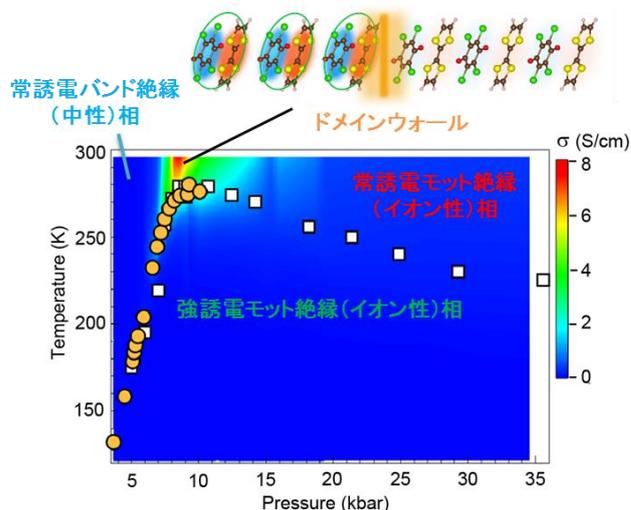


図. TTF-CA の温度-圧力相図、電気伝導度のカラープロット、および DW の模式図。中性-イオン性クロスオーバー領域で極めて高い電気伝導度が観測される (赤色の領域)。

[1] R. Takehara, *et al.*, *Phys. Rev. B* **98**, 054103 (2018).

[2] N. Nagaosa, *J. Phys. Soc. Jap.* **55**, 2754 (1986). [3] M. Tsuchiizu, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jap.* **85**, 104705 (2016).

[4] H. Fukuyama, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jap.* **85**, 023702 (2016).

O-05

Functionalization of poly(4-vinylpyridine) polymer with cobalt(II) single-molecule

School of Science, Department of Chemistry, Ohkoshi Laboratory
Olaf Stefanczyk, Shin-ichi Ohkoshi

The design of new functional magnetic materials for application in the high-density memory storage or in the new field of molecular spintronics found considerable interest among the material research community. In this work, we focused on preparation and characterization of magnetic thin films combining the qualities of cobalt(II) based single ion magnets, displaying slow magnetic relaxations phenomena, and the merits of polymers, being easy to process and widely used to produce thin films.[1] Cross-linking of cobalt(II) bromide with a polymeric matrix of poly(4-vinylpyridine) (P4VP) resulted in the formation of 190 nm magnetic thin films showing slow magnetic relaxation (Figure 1), confirmed by using superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer.

The coordination of Co(II) was confirmed by a series of methods including secondary ion mass spectroscopy (SIMS) or high-resolution X-ray photoelectron spectroscopy (HRXPS). The magnetic relaxation times reached up to 5×10^{-6} s and they can be controlled by dilution (ratio between CoBr_2 and P4VP), making this new material a semi-solid solution. By this approach, a new path is formed to connect molecular magnetism and polymer science, showing that the easy polymer processing can be used in forming self-organizing functional magnetic thin films.

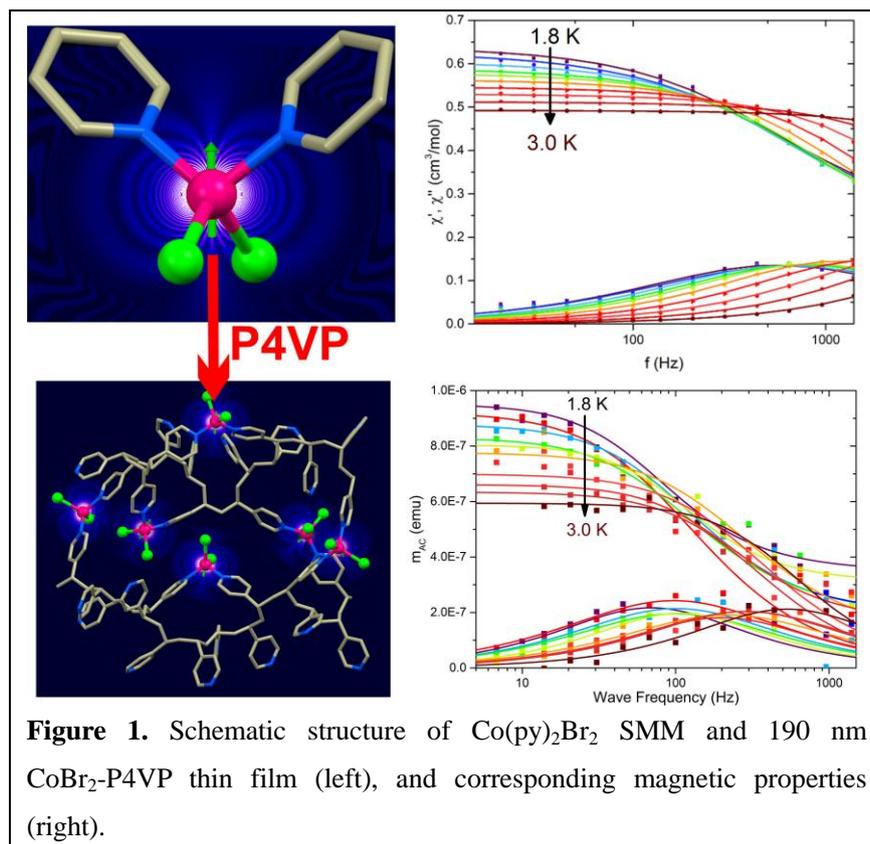


Figure 1. Schematic structure of $\text{Co}(\text{py})_2\text{Br}_2$ SMM and 190 nm CoBr_2 -P4VP thin film (left), and corresponding magnetic properties (right).

[1] A. M. Majcher, P. Dąbczyński, M. M. Marzec, M. Ceglarska, J. Rysz, A. Bernasik, S. Ohkoshi and O. Stefanczyk, *Chem. Sci.*, 2018, 9, 7277.

液体窒素を用いた高分子の凍結乾燥を有効活用した pH 応答性高分子ミセルの開発

Development of pH-sensitive polymeric micelles effectively utilizing polymer freeze drying by liquid nitrogen

工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・カブラル研究室
立原 義宏、安楽 泰孝、カブラル オラシオ

昨今隆盛を極めるボトムアップナノテクノロジーとの関連から、ブロック共重合体の自己組織化を利用し溶液中においてナノ構造体(高分子ミセル、高分子ベシクル、高分子ナノチューブなど)を形成し、医療を中心とする幅広い分野での応用が検討されている。とりわけ、血管壁の透過性が亢進した固形がんへの薬剤送達システム(DDS)のキャリアとして注目され、発表者の所属する研究室で開発した抗がん剤を搭載した高分子ミセル型ナノキャリアは、既に臨床試験にまで進んでいる[1]。抗がん活性を有する薬剤としては、低分子医薬や抗体医薬のような高分子医薬があるが、近年では主に環状ペプチドからなる中分子医薬が注目を集めている。環状化合物には、標的選択性・結合能が著しく高いといった高分子医薬の特徴と、細胞膜透過性が高くかつ安価であるといった低分子医薬の特徴を併せ持つことから将来有望な薬剤である。一方で、標的とする疾患部位への選択的な送達能力が低いといった問題から、臨床応用されている薬剤は非常に少ない。そこで発表者は、難治性がんである膵臓がんの治療を指向して、抗がん活性を有する環状化合物バリノマイシン(Val)を高分子ミセルに搭載し、がん細胞環境の pH 変化に応答して Val を選択的に放出する革新的 DDS の開発を検討している[2]。

ここで高分子ミセルに環状化合物を担持させるための高分子合成には、4ステップの合成経路(重合、末端アセチル化、アミノリシス反応、pH 応答性結合反応)を経る。高分子重合時、反応物が水との反応性が高いため、禁水下で反応を行わなければならない。禁水下での反応では蒸留溶媒装置から脱水性の有機溶媒を使用する際、トラップとして液体窒素を使用している。また反応後は有機溶媒中で生成物を再沈殿させて、吸引ろ過瓶を用いて生成物を回収している。その際、有機溶媒が水道に流れないように液体窒素を含んだデューワー瓶中にトラップを使用するなど本研究を実施する上で、低温センターより供給して頂いた液体窒素を多くの場面で使用している。当日はこれまでの研究の進捗と合わせて、液体窒素の活用方法など併せて紹介する。

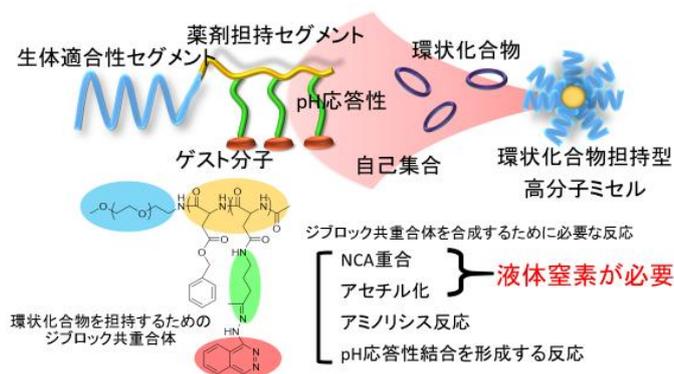


図1 本研究で用いる高分子ミセルの構成

[1] H. Cabral, K. Kataoka K, *J. Control. Release.*, **190**, 465 (2014).

[2] 特願 2018-229598 立原義宏 他 4 名, ホスト-ゲスト相互作用による環状化合物の送達, 権利者:東京大学

GaAs 横型二重量子ドットにおける 非平衡フォノンによる電子スピン散乱の研究

Research on Electron Spin Scattering by Nonequilibrium Phonons in a GaAs Double Quantum Dot

工学系研究科物理工学専攻樽茶研究室

黒山和幸, 松尾貞茂, 村本文, S. R. Valentin,
A. Ludwig, A. D. Wieck, 都倉康弘, 樽茶清悟

半導体量子ドット中の電子は、量子ビットへの応用にとどまらず、熱力学的な諸現象の観測においても重要な研究対象である[1, 2]。これらの研究は量子ドットの実時間の電荷状態検出を用いて行われ[3]、近年では、二重量子ドットのパウリスピン閉塞効果と組み合わせることにより、スピン反転現象を実時間で観測する手法が確立している[4, 5]。しかし、ドットへ捕捉される電子のスピン自由度が関与した熱的な物理現象はこれまでにほとんど研究されていない。

本講演では、GaAs 横型二重量子ドットの電子スピンを実時間測定することによって、スピンが環境中に生成したフォノンにより散乱される現象を観測した結果について報告する。量子ドット試料を希釈冷凍機で 25 mK に冷却し、面内方向に 100 mT の外部磁場を印加した(図 1)。さらにフォノン源としては二重ドット(青色)の右側にある単一ドット(黄色)を用いた。このドットにバイアス電圧 V_{PS} を印加することにより、 V_{PS} に対応する最大エネルギーを持ったフォノンが生成される[3]。

実験では電圧 V_{PS} をパラメータとして、スピン反転を伴うトンネルを観測し、そのレートを求めた。 V_{PS} がある閾値電圧よりも大きくなると、スピン反転を伴うトンネルレートが急激に増大する(図 2)。さらに、電子がドット間を左または右へトンネルする過程のスピン反転レートを評価した。その結果、 V_{PS} が小さい領域では 2 つのスピン反転レートは等しいが、大きい領域では右から左のドットへトンネルする過程のスピン反転レートが他方よりも大きくなることが分かった。本研究の結果は、フォノン誘起のスピン反転現象に関する微視的なメカニズムの解明につながるほか、メソスコピック系において実現する熱スピン変換[6]などの技術応用が期待される。

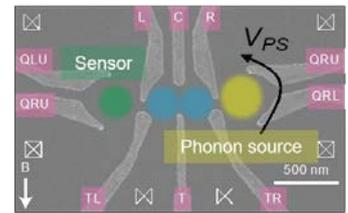


図 1. 二重量子ドットの電子顕微鏡写真。左側のドット(緑色)の伝導度で二重ドットの電荷状態を読み出す。右側のドット(黄色)へバイアス電圧を印加することで、フォノンを生成する。

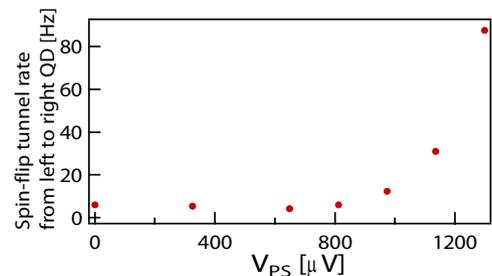


図 2. 異なるバイアス電圧 V_{PS} で測定した左から右のドットへトンネルする過程のスピン反転レート。

[1] B. Küng et al., PRX 2, 011001 (2012). [2] K. Chida et al., Nat. Comm. 8, 15301 (2017). [3] W. Lu et al., Nature 423, 422 (2003). [4] V. F. Maisi et al., PRL 116, 136803 (2016). [5] T. Fujita et al., PRL 117, 206802 (2016). [6] G. Granger et al., Nat. Phys. 8, 522 (2012). [7] K. Uchida et al., Nature 455, 778 (2008).

O-08

Fe/Mg/MgO/SiO₂/Si 構造を用いたほぼ理想的なスピン注入：デッドレイヤーの抑制とトラップ密度の低減

Nearly ideal spin injection efficiency in Fe/Mg/MgO/SiO_x/Si structure: suppressing the deadlayer and lowering the trap density

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、一原充希、田中雅明

電子スピン自由度を積極的に用いた半導体デバイスは、次世代の電子デバイスとして注目されている。とりわけ MOSFET のソース・ドレイン電極を強磁性体金属に置き換えた構造を持つ Spin MOSFET は、不揮発に情報を保持することが可能で、様々な応用が期待されている[1,2]。Spin MOSFET を実現するためには、強磁性体中のスピン偏極した電子流をシリコン中へ偏極率を維持したまま注入する必要がある。強磁性体とシリコンの間にトンネル絶縁体を挿入することで高効率なスピン注入が可能であると期待されているが[3]、これまで報告されてきたスピン注入分極率 P_S は強磁性体中のスピン分極率 P_F よりも小さく、また P_S が低下する物理的要因も不明であった。本グループでは強磁性体/絶縁体界面の磁氣的デッドレイヤーと、絶縁体/シリコン界面の界面準位密度に着目し、Fe/Mg/MgO/SiO₂/Si 構造においてほぼ理想的なスピン注入 ($P_S/P_F \sim 0.92$) を実現した[4,5]。

Figure 1 に今回作成したデバイス構造を示す。高ドーパの n 型シリコン基板 ($N_D \sim 5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) 上に電子線蒸着によって MgO を $t_{\text{MgO}} (= 0.8 - 1.2 \text{ nm})$ 成膜し、その後 MgO 表面をプラズマ酸素に $T_{\text{ox}} (= 0 - 3 \text{ min})$ 暴露し、MgO/Si 界面に SiO_x を形成した。その後 Mg を $t_{\text{Mg}} (= 0 - 2 \text{ nm})$ 、Fe を 3 nm、Mg を 1 nm 蒸着し、Al で上部、及び下部電極を形成した。Fig. 1 に示すようなセットアップを用いて三端子ハンル(3T Hanle)測定[4]を行い、スピン注入分極率 P_S を見積もった(Fig. 2)。

Fig. 2(a)に示すように $t_{\text{Mg}} = 0 \text{ nm}$ ではスピン注入は観測できなかった($P_S \sim 0$)が、 $t_{\text{Mg}} = 1 \text{ nm}$ において $P_S = 16\%$ を得た。また Fig. 2(b)に示すように、プラズマ酸化処理によって P_S は向上し、 $T_{\text{ox}} = 1 \text{ min}$ において $P_S = 38\%$ を得た。これらの P_S の依存性は、強磁性体/絶縁体界面のデッドレイヤーと、絶縁体/シリコン界面の界面準位密度と強く関係していることが磁化測定と交流測定によって確認された。本研究で得られた結果は、強磁性/絶縁体/シリコンにおけるスピン散乱機構の解明に大きく貢献すると期待される。

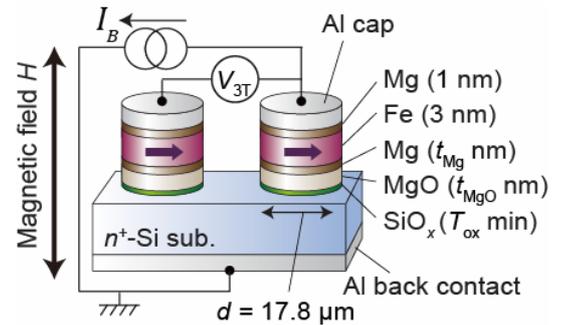


Figure 1 Device structure and 3T Hanle measurement setup.

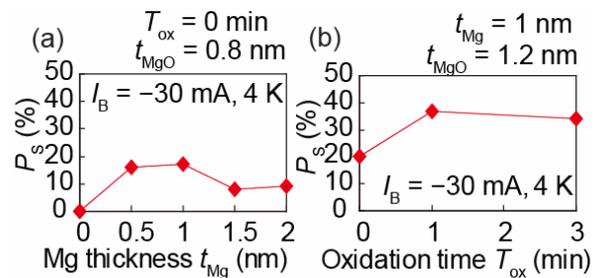


Figure 2 Spin injection polarization P_S estimated from 3TH measurement at 4 K. (a) t_{Mg} dependence and (b) T_{ox} dependence.

[1] S. Sugahara and M. Tanaka, APL **84**, 13 (2004). [2] S. Sugahara and M. Tanaka, ACM Trans. on Strage **2**, 197 (2006). [3] A. Fert and H. Jaffres, PRB **64**, 184420 (2001). [4] S. Sato, *et al.*, PRB **96**, 235204 (2017). [5] R. Nakane *et al.*, Phys. Rev. Mat. (in press).

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ におけるヒッグスモード Higgs modes in the iron-based superconductor $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$

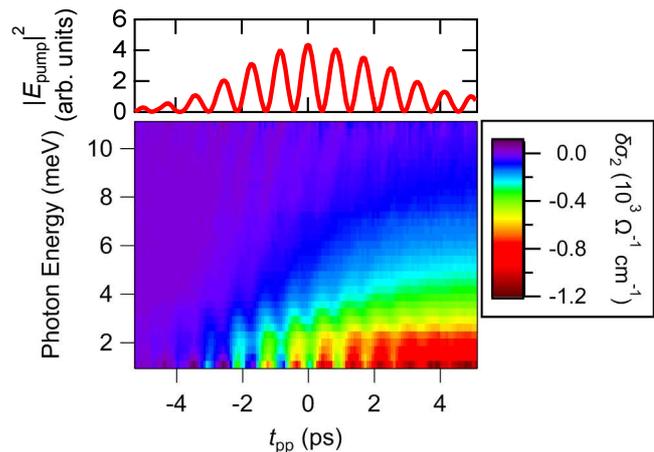
理学系研究科物理学専攻・島野研究室¹,

総合文化研究科広域科学専攻・前田研究室², 低温センター・研究開発部門³

富田 圭祐¹, 磯山 和基¹, 吉川 尚孝¹, 色摩 直樹², 石川 智也², 鍋島 冬樹²,
前田 京剛², 島野 亮^{1,3}

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ は Γ 点と M 点の周りに 2 種類のフェルミ面をもち、そのそれぞれに異なる大きさの秩序変数を有するマルチバンド超伝導体であり、その超伝導の発現にはバンド間相互作用が重要な役割を果たしていると考えられている。2 種類の秩序変数に対応して、その振幅の振動である振幅モード（ヒッグスモード）は少なくとも 2 種類存在すると考えられるが、バンド間相互作用はこれらのモードにも影響を与えることが期待される。そこで、我々は未だ観測例のない、鉄系マルチバンド超伝導体のヒッグスモードに関する知見を得ることを目的に研究を行った。

超伝導におけるヒッグスモードは線形応答領域では電磁場と結合しないためこれまで観測が難しかったが、最近高強度テラヘルツ (THz) 波を用いた実験により、非線形応答領域において電磁波とヒッグスモードは相互作用することが明らかにされた[1]。そこで我々はパルスレーザー堆積法により作成された CaF_2 基板上の $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜に対して THz 波を用いたポンプ-プローブ分光を行い、非平衡状態のダイナミクスの観測を行うことでヒッグスモードの観測を試みた。ポンプとして電場尖頭値 4 kV/cm、中心周波数 0.6 THz (光子エネルギー 2.5 meV) のマルチサイクル THz 波パルスを用いた。図上段にはこのポンプ THz 波の自乗の時間波形を示している。図下段に示すのは 4 K における、ポンプ THz 波を照射した際の THz 帯における光学伝導度虚部 σ_2 スペクトルの変化のダイナミクスである。THz 波の自乗波形に追従する振動が明瞭に現れている。 σ_2 のスペクトル重みは超流動密度に対応することから、その振動は秩序変数の振動、則ちヒッグスモードであると解釈できる。特に Γ 点の超伝導ギャップエネルギー ($2\Delta_\Gamma \sim 1$ meV) に相当する低周波数側で大きな振動が見られる一方で、 M 点の超伝導ギャップに相当する高周波数領域 (> 6 meV) でも振動が観測された。興味深いことに、その振動の位相は低エネルギー側とで反転しており、これはバンド間相互作用の効果であると考えられる。講演では温度依存性の実験結果も含めてマルチバンド超伝導体のヒッグスモードの詳細について議論する。



図：ポンプ THz 電場の自乗波形（上段）とその照射下の σ_2 スペクトルの変化のダイナミクス（下段）

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

Nonreciprocal transport in electric field induced 2D superconductors

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室¹, UCSB², 理研 GEMS³, 東北大金研⁴
板橋 勇輝¹, 斎藤 優², 井手上 敏也¹, 清水 直³, 野島 勉⁴, 岩佐 義宏^{1, 3}

界面や 2 次元物質において近年報告されている高結晶性 2 次元超伝導体の多くは、界面での電界や特徴的な結晶対称性を有した、空間反転対称性が破れた超伝導体である。そのような空間反転対称性の破れた物質では一般に、結晶対称性を反映した整流特性である非相反伝導 (図 1) の発現が期待され [1,2]、物質の電子状態やスピン分裂等を調べる有用な輸送現象として注目を集めている [3,4]。本研究では、空間反転対称性の破れた電界誘起 2 次元超伝導体である SrTiO₃ 及び MoS₂ において非相反伝導を測定し、2 次元超伝導体特有の超伝導ボルテックスの運動や電子状態の解明に取り組んだ。

電界誘起 SrTiO₃ 界面超伝導では、超伝導秩序変数の振幅揺らぎ及び位相揺らぎがそれぞれ重要となる温度領域において特徴的な非相反応答を観測し、超伝導相での非相反応答の増大と複数の機構のクロスオーバー、対称性の破れに起因するスピン-重項-三重項混成の可能性を見出した。また、2 次元 MoS₂ 超伝導相では、ボルテックスのラチェット効果による非相反伝導を詳細に調べ、ボルテックスのトンネル効果が支配的な量子金属状態で非相反応答が抑制されることを明らかにし、ボルテックスの古典的運動と量子的運動が非相反応答によって明確に区別できることを示した。

本研究結果は、非相反伝導が空間反転対称性の破れた超伝導体における新機能であるだけでなく、超伝導特性の解明に極めて有用であることを示唆している。

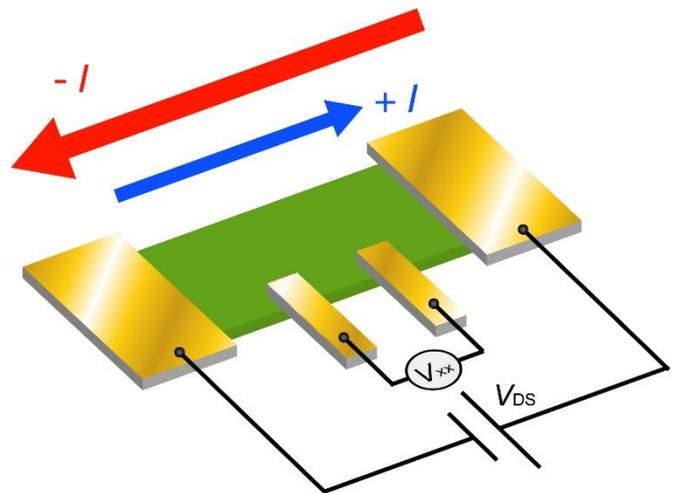


図 1 非相反伝導現象の概念図

-
- [1] S. Hoshino *et al.*, *Phys. Rev. B* **98**, 054510 (2018).
 - [2] R. Wakatsuki *et al.*, *Sci. Adv.* **3**, e1602390 (2017).
 - [3] T. Ideue *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 578–583 (2017).
 - [4] P. He *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 266802 (2018).

ポスター発表

鉄セレン薄膜のテラヘルツ磁気光学分光 Terahertz magneto-optical spectroscopy of FeSe thin film

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

吉川 尚孝¹, 高山 正行¹, 色摩 直樹², 石川 智也², 鍋島 冬樹², 前田 京剛², 島野 亮^{1,3}

鉄系超伝導体の1つである鉄セレン (FeSe) は、 $T_s \sim 90$ Kにおいて電子ネマティック秩序を伴う構造相転移を示すが、他の鉄系超伝導体と異なり反強磁性秩序が現れないことが特徴であり、鉄系超伝導の性質を調べる上で重要な物質である。バルク FeSe の超伝導転移温度 T_c は約 9 K であるが、圧力下で $T_c \sim 38$ K まで上昇し[1]、SrTiO₃ 基板上の単層 FeSe は 100 K を超える T_c を示す[2]。また、イオンゲートによる電子注入によっても T_c が大幅に増強するなど[3]、様々な方法で超伝導増強が報告されている。このような FeSe の超伝導特性は、その電子的性質と密接に関係している。FeSe のフェルミ面は電子ポケットとホールポケットからなり、その有効フェルミエネルギーが極端に小さくキャリア密度が小さいことが知られている。そのため例えば電子注入によってホールポケットだけを消失させることが可能であり、これによって超伝導が劇的に増強したのだと考えられる。このような背景のもとで、FeSe における超伝導発現機構などを理解するためには、キャリアの基礎的な性質を明らかにすることが不可欠であるといえる。しかし、電子ポケットとホールポケットからなる複数のフェルミ面を持つため、特にネマティック転移を含むような広い温度領域で直流抵抗測定などからキャリアの性質を決定することは困難であった。

そこで本研究では、FeSe 薄膜のテラヘルツ (THz) 波による磁気光学分光を行った。試料はパルスレーザー堆積法によって LaAlO₃ 基板上に成長した、超伝導転移温度 $T_c \sim 3$ K、構造相転移温度 $T_s \sim 80$ K を示す厚み 46 nm の FeSe 薄膜を用いた。試料垂直方向に磁場を印加した FeSe 薄膜による THz 波の偏光回転および楕円率の変化を測定することで、図に示す THz 周波数 (光子エネルギー meV) 領域のホール伝導度の実部・虚部が求められる。磁場なしの通常の透過分光と異なり、ホール伝導度の正負によってキャリアの電荷 (正 or 負) を区別できることが特徴である。得られたホール伝導度スペクトルは電子とホールの2種類のキャリアを仮定したドルーデモデルでよく再現でき、フィッティングによって電子とホールそれぞれの有効質量・キャリア密度・散乱時間を求めた。また、ホール伝導度スペクトルの温度依存性を調べると、ネマティック転移に伴うバンド構造の変化を反映して、キャリア密度に特徴的な変化が現れることが明らかになった。

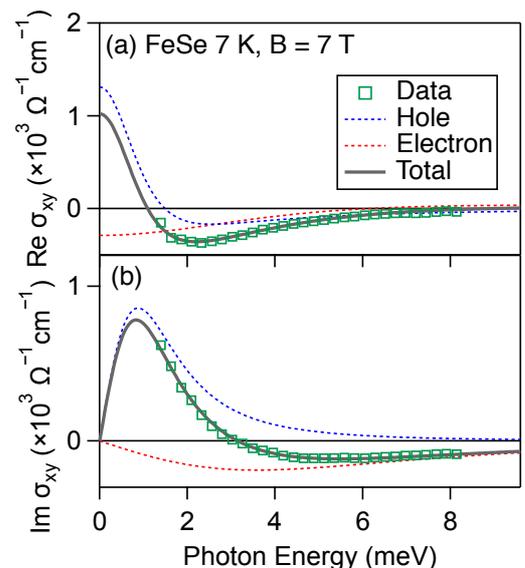


図. 試料温度 7 K, 磁場 7 T における FeSe 薄膜のホール伝導度スペクトルの (a) 実部、(b) 虚部。2 キャリアを仮定したドルーデフィッティングの結果も示す。

[1] J. Sun et al., *Nat. Commun.* **7**, 12146 (2016).

[2] J. Ge et al., *Nat. Mater.* **14**, 285 (2015).

[3] B. Lei et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 6040 (2016).

P-02

分子線エピタキシー法により作製した TaSe₂ 薄膜の輸送特性

Transport properties of TaSe₂ thin films by molecular beam epitaxy

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐・中野研究室

田中勇貴、松岡秀樹、中野匡規、岩佐義宏

【概要】

グラフェンの発見を皮切りに二次元層状物質は特異な物性を示す物質系として注目を集めてきた。なかでも遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) の超薄膜は、空間反転対称性の破れと大きなスピン軌道相互作用に起因した特異な物性が発現するために大きな注目を集めているが、特に金属 TMD の一種である NbSe₂ や TaS₂ の超薄膜は、スピン軌道相互作用と連結し面直方向にスピンのロックした特異な超伝導状態 (イジング超伝導) を示すため、非常に興味深い物質系である。

本研究では、同じく金属 TMD であり、かつ非常に大きなスピン軌道相互作用により特徴的なスピン分裂バンドをもつ TaSe₂ に注目し、分子線エピタキシー法による高品質なエピタキシャル薄膜の作製、ならびに輸送特性の評価を行った。

具体的には Fig. 1 に示すプロセスでサファイア基板の上に TaSe₂ 薄膜を成長させた。薄膜成長前に基板を Se 雰囲気下で高温熱処理 (1st annealing) し、その後、蒸気圧の低い Ta を電子線蒸着により供給して薄膜を成長させ (Film growth)、製膜後に高温でポストアニールを行った (2nd annealing)。Se は薄膜作製の過程で K-Cell を用いて継続的に供給した。X 線回折測定から、このプロセスで作製した TaSe₂ 薄膜は面直・面内配向が揃ったエピタキシャル薄膜であることが確認された。発表では薄膜作製の詳細および超伝導特性をはじめとした輸送特性について述べる。

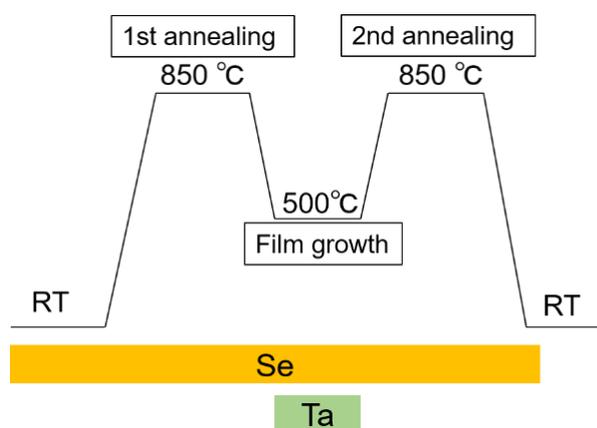


Fig. 1 製膜プロセス

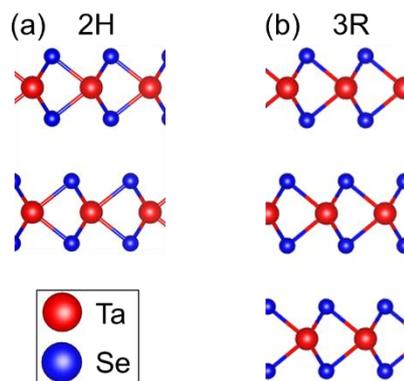


Fig. 2 TaSe₂ の主な構造多型(a)2H(b)3R

P-03 FeSe 薄膜の中赤外光ポンプ-テラヘルツ光プローブ分光

Mid-infrared pump-terahertz probe spectroscopy in FeSe thin film

^A 理学系研究科・物理学専攻・島野研究室、^B 総合文化研究科広域科学専攻・前田研究室、
^C 低温センター・研究開発部門

磯山 和基^A、吉川 尚孝^A、富田 圭祐^A、色摩 直樹^B、石川 智也^B、鍋島 冬樹^B、前田 京剛^B、
島野 亮^{A,C}

鉄系超伝導体は銅酸化物系超伝導体に続く新たな非従来型超伝導体である。中でも最も単純な構造の FeSe (超伝導転移温度, $T_c \sim 8$ K) は SrTiO₃ 基板上や高圧下で T_c が上昇するなどの特徴から注目を集めている。鉄系超伝導体は銅酸化物系超伝導体と同様に多様な秩序状態をとり、超伝導発現機構の解明にはこれら秩序相の相関を理解することが重要である。FeSe の場合超伝導相, ネマティック相, 圧力下でのスピン密度波相の他, Se を同族軽元素 S もしくは重元素 Te で置換するとより複雑な相を示す [1, 2]。最近ではフェルミ面近傍のバンド構造が秩序相に与える影響に着目した研究が行われており, 成膜する基板を変えることでバンド構造を変調するとネマティック秩序が抑制される, 電場印加によってキャリアを注入すると T_c が上昇する, などの結果が報告されている [3, 4]。本研究では光励起による光キャリア注入に注目し, その非平衡ダイナミクスを超伝導ギャップ周波数帯であるテラヘルツ (THz) 帯において観測した。

本研究で用いた試料は直流抵抗測定でネマティック相転移が明瞭に観測される LaAlO₃ 基板上 FeSe 薄膜 (FeSe/LAO, $T_c \sim 3$ K) およびネマティック秩序は弱い T_c の高い CaF₂ 基板上 FeSe 薄膜 (FeSe/CaF₂, $T_c \sim 14$ K) である。パルスレーザー堆積法により作成されたこれらの試料に対して, 強束縛模型から計算される Γ 点でのバンド間遷移に対応する 2.2 μm (~ 0.56 eV) もしくは 2.4 μm (~ 0.52 eV) を励起光源に用いた中赤外光ポンプ-THz 光プローブ分光を行ない, 平衡状態での光学伝導度および光励起状態での過渡光学伝導度を測定した。図 1 に 4 K における差分光学伝導度実部を横軸をポンプ-プローブ遅延時間として示した。どちらの試料についても始めの 1 ps 程度で低周波側の光学伝導度が増加する, 光キャリア注入に由来すると考えられる振る舞いが見られた一方, 2 ps 以降は試料によって異なる振る舞いが観測され, 特に FeSe/LAO の場合には差分光学伝導度が振動する特異な振る舞いが見られた。これは主には基底状態の違い (4 K では FeSe/LAO は常伝導相である一方 FeSe/CaF₂ は超伝導相である) によるものであると考えられるが, 基板によるネマティック秩序の強弱を反映している可能性がある。ポスターでは観測された過渡光学伝導度から考えられるダイナミクスを FeSe 薄膜の基板ごとの特性も含めて議論する。

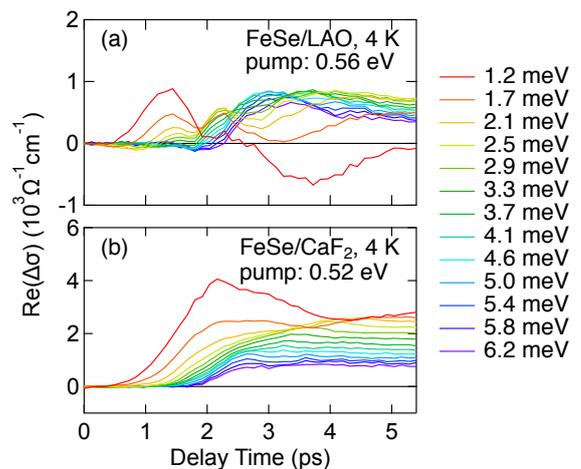


図 1. 差分光学伝導度 (光励起状態における過渡光学伝導度と平衡状態での光学伝導度との差分) の実部の時間発展。

- [1] K. Matsuura *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 1143 (2017).
- [2] F. Nabeshima *et al.*, *JPSJ* **87**, 073704 (2018).
- [3] G. N. Phan *et al.*, *PRB* **95**, 224507 (2017).
- [4] S. Kouno *et al.*, *Sci. Rep.* **8**, 14731 (2018).

P-04

Thermoelectric effects in a doped spin liquid candidate κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈

東大工, 東大低温セ^A, 埼玉大理^B

若松浩大, 藤井武則^A, 鈴木悠司, 宮川和也, 谷口弘三^B, 鹿野田一司

強相関電子系の研究において、分子の弱い結合から成る有機導体は、圧力でバンド幅を大きく変えることができるという特徴をもつが、一般に、銅酸化物に代表される無機物質で行われているバンド充填の制御は不得意である。表題物質 κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ (κ -HgBr)は、絶縁層の水銀と伝導層の ET 分子の格子の不整合により、有機導体では例外的にバンド充填が 1/2 から僅かにずれた (11% だけホールドーピングされた) 擬 2 次元有機物質系であることから、加圧により、ドーピングされた系においてバンド幅制御の研究を可能にする。また、 κ -HgBr は、ホールドーピングにより金属となっているが、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ことが確認されており、ドーピングされたスピン液体と考えられている[1]。電気抵抗は、電子相関の強い低圧側で非フェルミ液体(NFL)的に、電子相関の弱い高圧側でフェルミ液体(FL)的に振る舞う[2,3]。ホール係数の測定から、低圧側ではドーピングされたキャリアのみが伝導を担う低キャリア密度の金属相が示唆されている[4]。また、低温で起こる超伝導については、そのコヒーレンス長が低圧側で極端に短くなることが分かっている[3]。以上のことから、 κ -HgBr は常伝導相では NFL-FL クロスオーバー、超伝導相では BEC-BCS クロスオーバーが示唆される興味深い系となっている。

本研究では、 κ -HgBr において示唆される上記の 2 つのクロスオーバーを熱電効果の測定から調べた。常伝導相のゼーベック係数は NFL 相で対数的な温度依存性を示し絶対値が増大する。この温度依存性は量子相転移が示唆される物質において同様に観測されており、 κ -HgBr における量子相転移の存在を示唆している。また、ゼーベック係数の絶対値の増大は超伝導転移温度が最大となる 0.5 GPa 付近の量子臨界点による臨界揺らぎを反映していると解釈される。超伝導相のネルンスト電圧は、電子相関の強い低圧ほど広い磁場領域で大きくなり、超伝導転移温度に対してより高い温度から信号が立ち上がる。ドーピングされたスピン液体では揺らぎの大きな超伝導が実現していることが明らかとなった。

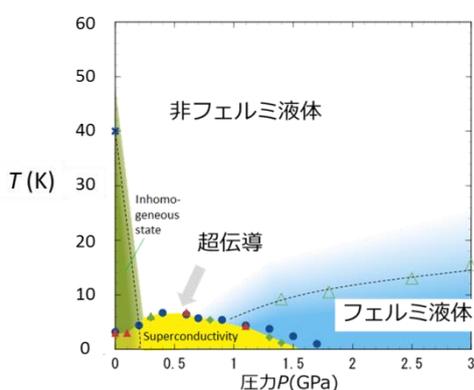


図1. κ -HgBrの温度-圧力相図[2]

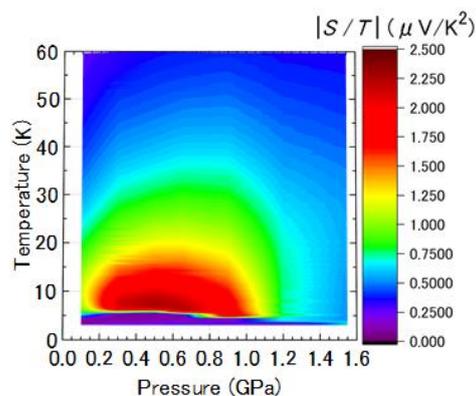


図2. κ -HgBrの $|S/T|$ のカラープロット

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

Te アニール FeTe_{1-x}Se_x の高分解能角度分解光電子分光 High-resolution ARPES Study of Te-annealed 11-type Iron-based Superconductor FeTe_{1-x}Se_x

東大理^A、弘大理工^B、高エネ研 PF^C、分子研 UVSOR^D
 奥石佳佑^A、大塚匠^B、中田勝^A、萩原健太^A、C. Lin^A、Y. Wan^A、鈴木雅弘^A、
 小野寛太^C、組頭広志^C、堀場弘司^C、出田真一郎^D、
 田中清尚^D、渡辺孝夫^B、藤森淳^A

11 型鉄系超伝導体 FeTe_{1-x}Se_x は、アニール処理で過剰鉄を除去することによって広い Se 置換領域($x \geq 0.05$)でバルク超伝導($T_c \sim 14$ K)が発現することが知られており[1]、近年発見された Te 雰囲気下でのアニールでは低ドープ領域($x \sim 0.2$)においても過剰鉄が良く除去された単結晶が得られる[2]。最適ドープ試料($x=0.4$)では、ホール係数が高温から低温にかけて正から負に変化することから、ホールと電子両方のキャリアが存在し、超伝導発現に両方が寄与していると考えられている。一方、Te アニールした低ドープ試料($x=0.2$)において、低温でもホール係数が正の値を示し、ホールキャリアが支配的であるという結果が最近報告された[3]。また、ホール係数の温度依存性から示唆されるキャリアの変化が高圧下での FeSe においても報告されている[4]。置換量によって異なるホール係数の温度依存性は擬ギャップに由来する可能性が考えられている。今回我々は、Te アニールした FeTe_{1-x}Se_x の電子状態とその温度依存性を明らかにするために角度分解光電子分光(ARPES)の実験を行った。

低温領域における低ドープ試料と最適ドープ試料の面内 Fermi 面マッピング及び Γ 点近傍の E - k プロットを図 1 に示す。典型的な鉄系超伝導体と同様、両組成ともブリルアン域中央にホール的な分散、角に電子的な分散を持つバンドが観測された。一方で、低ドープ試料では一番重い γ バンドが Fermi 準位を横切り大きなホール面を形成するのに対し、最適ドープ試料では E_F 下に沈み込んでいて大きなホール面が消失している。この組成変化に伴う Fermi 面の変化は、低温におけるホール係数の符号反転と矛盾しない。また、電子面の温度依存性の測定では、最適ドープ試料において温度上昇とともに E_F 近傍の光電子強度が著しく減衰する結果が得られた。この結果は、高温において電子面で電子が非コヒーレント状態になる、あるいは擬ギャップが開いていることを示唆している。この電子状態の変化に伴うキャリアの変化がホール係数の温度依存性に大きく寄与しているのではないかと考えられる。

- [1] Y. Sun *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 32290 (2016).
 [2] Y. Koshika *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 023703 (2013).
 [3] T. Otsuka *et al.*, 2016 JPS autumn meeting.
 [4] J. P. Sun *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 147004 (2017).

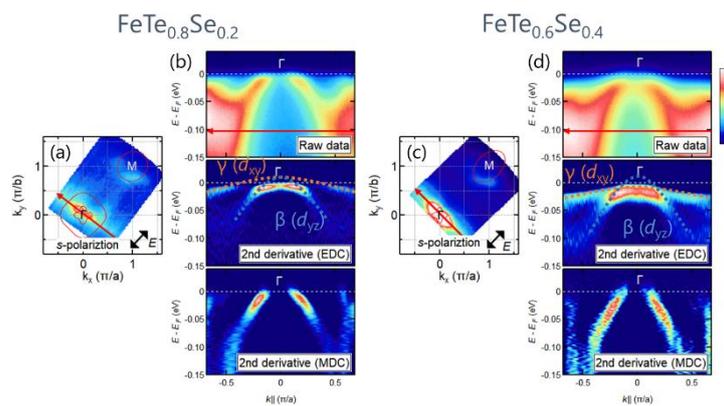


図 1. FeTe_{1-x}Se_x の ARPES スペクトル. (a) 低ドープ試料の面内 Fermi 面マッピング. (b) 低ドープ試料の Γ 点近傍のエネルギー-運動量プロットと 2 回微分. カットはマッピング内の赤矢印に沿ったカット. (c), (d) 最適ドープ試料に対してそれぞれ(a), (b) と同様.

P-06

一種類の分子から成る有機導体に発現する多彩な電子状態の NMR 研究 NMR study on a variety of electronic states in single-component organic conductors

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室, 理研 CEMS^A, 日本大学文理学部^B
高橋泰賀, 須波圭史, 宮川和也, 高木里奈^A, 周彪^B, 小林昭子^B, 鹿野田一司

一種類の分子 $M(\text{tmdt})_2$ から成る有機導体は、金属イオン M の d 軌道とその両端の tmdt 配位子に広がる π 軌道 (図 1) の混成によって、多彩な電子状態を示す。本発表の対象物質である (I) $\text{Pd}(\text{tmdt})_2$ と (II) $\text{Zn}(\text{tmdt})_2$ は、 π 電子が電子間のクーロン反発によって局在した Mott 絶縁体と呼ばれる絶縁体であるが、低温における π 電子が担う磁性は、(I) 反強磁性[1]、(II) 非磁性[2]と大きく異なっている。本研究では、これらの物質の π 電子のスピンの状態を微視的に調べるために、 π 電子との結びつきの強い tmdt 上の ^{13}C 核を用いた NMR (核磁気共鳴) 測定を行った (図 1)。

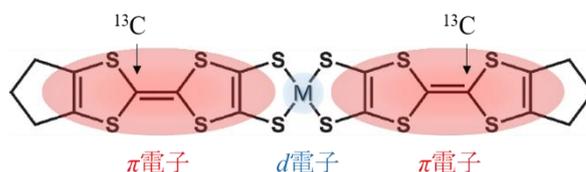


図 1 $M(\text{tmdt})_2$ 分子

(I) 粉末試料 $\text{Pd}(\text{tmdt})_2$ の常圧下 ^{13}C NMR

^{13}C NMR 緩和率 $1/T_1$ (^{13}C 核周りの電子スピン揺らぎの強度を表す物理量) の温度依存性を見ると、70 K 付近でなだらかなピークが観測され、反強磁性転移を確認することができた (図 2)。一方、200 K 以上の高温領域では、金属で期待される Korringa 則 ($1/T_1 \propto T$) に従うような振る舞いが見られた。これらの結果は、 $\text{Pd}(\text{tmdt})_2$ が Mott 転移と呼ばれる金属絶縁体転移の近傍に位置する物質であることを示唆している。

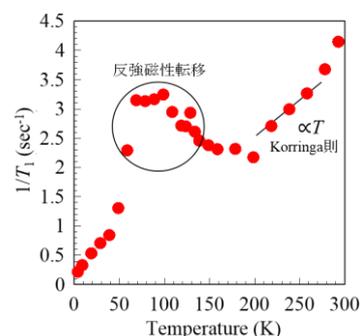


図 2 $\text{Pd}(\text{tmdt})_2$ の ^{13}C NMR 緩和率の温度依存性

(II) 粉末試料 $\text{Zn}(\text{tmdt})_2$ の圧力下 ^{13}C NMR

$\text{Zn}(\text{tmdt})_2$ は、 $\text{Pd}(\text{tmdt})_2$ とは異なり、低温で隣接する分子の tmdt の間でスピン一重項を形成し、非磁性となる[2]。我々は、有機物の構造的な柔軟さを活かして、 $\text{Zn}(\text{tmdt})_2$ を加圧し、分子間距離を短くして電子の遍歴性を高めることで、Mott 転移が生じる可能性を追求した。10 kbar の圧力を印加した結果、常圧で $\Delta=1400$ K[3]であったスピンギャップは、 $\Delta=1800$ K と変化したものの、金属への転移は見られなかった (図 3)。これは、加圧によって、スピン一重項を形成する tmdt 間の移動積分が増大していることを示唆しているが、電荷励起ギャップは 1800 K 以上であるはずなので、 $\text{Zn}(\text{tmdt})_2$ が依然として強い Mott 絶縁体に止まっていることを意味している。

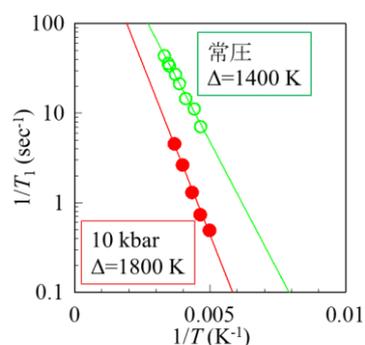


図 3 $\text{Zn}(\text{tmdt})_2$ の常圧下および 10 kbar 加圧下での ^{13}C NMR 緩和率 $1/T_1$ の温度依存性

[1] S. Ogura *et. al.*, *Inorg. Chem.* **55**, 7709–7716 (2016). [2] K. Yamamoto *et. al.*, *Chem. Lett.* **34**, 1090 (2005).
[3] R. Takagi *et. al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 224427 (2017).

P-07

高強度テラヘルツ波パルス誘起ヒッグスモードを用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 薄膜における超伝導ゆらぎの研究

Superconducting fluctuation in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ thin films revealed by the intense terahertz pulse-induced Higgs mode

^A 理学系研究科・物理学専攻・島野研究室、^B パリ・サド大学固体物理研究所、
^C パリ・ディドロ大学、^D 低温センター

勝見 恒太^A, Z. Z. Li^B, H. Raffy^B, Y. Gallais^C, 島野 亮^{A, D}

銅酸化物高温超伝導体においては超伝導の前駆現象である超伝導ゆらぎが発現する。この超伝導ゆらぎは高温超伝導の発現機構解明の観点から、テラヘルツ(THz)周波数帯の光学伝導度やネルンスト効果の測定など様々な実験手法を用いて調べられてきた。しかし、超伝導ゆらぎのオンセット温度 T_{onset} は実験手法ごとに異なり、いまだ統一的な理解は得られていない。一方で、超伝導オーダーパラメーターの振幅の集団励起であるヒッグスモードは、超伝導における対称性の自発的破れに起因するため、超伝導の位相コヒーレンスが発現しないと励起されないことから、 T_{onset} を直接決定する上で強力な手法となりうる。ヒッグスモードは、高強度 THz 波パルスを超伝導体に照射すると誘起され、これまで従来型超伝導体 NbN [1]や銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO)[2]において観測された。そこで我々は、高強度 THz 波パルス誘起によってヒッグスモードを誘起し、その温度依存性から T_{onset} を調べることにした。

今回我々は、不足ドーピングと過剰ドーピングの BSCCO 薄膜試料に対して高強度 THz 波パルスを照射し、誘起されたヒッグスモードの振幅を近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。さらに、THz 周波数帯の光学伝導度を測定し、2 流体モデルにより超流動密度 N_s を求め、ヒッグスモードの振幅と比較した。図 1 に示すように、2 種の正孔ドーピング濃度の試料においてヒッグスモードの振幅は THz 周波数帯の光学伝導度から求めた N_s と類似した温度依存性を示し、さらに両者のオンセット温度は一致することが分かった。本発表では BSCCO 薄膜試料に加えて、文献[2]でヒッグスモードを観測した BSCCO 単結晶試料におけるヒッグスモードのオンセット温度の正孔ドーピング濃度依存性について議論する。

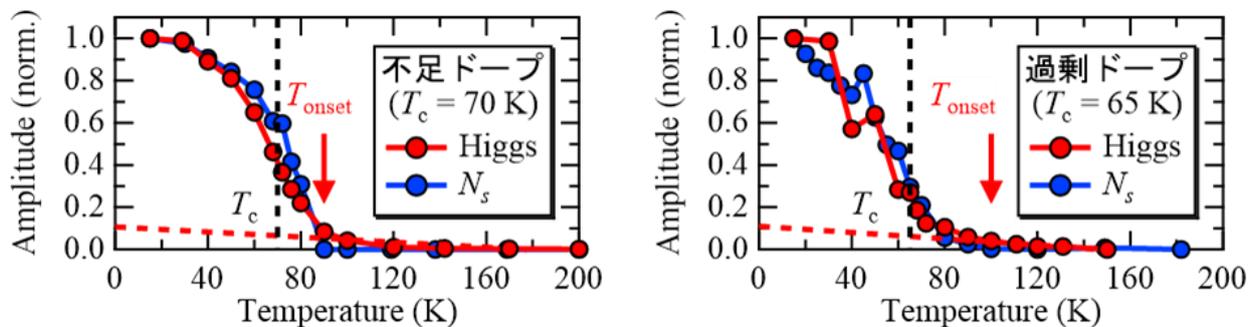


図 1 : ヒッグスモードの振幅と THz 周波数帯の光学伝導度から求めた N_s の温度依存性。実験データは最高温度のデータを引いた後に 15 K における値で規格化した。

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

[2] K. Katsumi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 117001 (2018).

Synthesis of Single Crystalline SrRuO₃ Sheet

Ke Gu (M1)¹, T. Katayama¹, S. Yasui², A. Chikamatsu¹, M. Itoh², T. Hasegawa¹

¹The Univ. of Tokyo, ²Tokyo Institute of Technology

E-mail: guke@chem.s.u-tokyo.ac.jp

Introduction: Oxides show many fascinating functional properties ensuring their promising future in applications, e.g. flexible electronic devices [1]. However, bulk single crystals and thin films on traditional substrates are incapable of realizing many types of applications, especially those requiring flexibility. Besides, direct film fabrication on flexible substrates, e.g. organic polymers, is difficult due to the high-temperature growth conditions for oxides. Recently, freestanding perovskite oxide sheets such as La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ (LSMO) became available by using a water-soluble oxide material, Sr₃Al₂O₆ (SAO), as a sacrificial layer [2]. This leads to a new way of obtaining oxide sheets on flexible substrates [1]. For oxide electronics applications, preparation of conductive oxide sheets is crucial. However, to date, very limited research has been done to fabricate perovskite oxide conductive sheets using SAO [3,4]. In this study, we synthesized SrRuO₃ (SRO) oxide sheets by using SAO as a sacrificial layer.

Experimental: SRO/SAO bi-layer films were fabricated on SrTiO₃ (100) (STO) substrates using PLD. After the fabrication, SRO sheets were obtained on glass substrates by dissolving SAO layers in deionized water and lift-off process. Crystal structure and roughness of the films and sheets were measured by X-ray diffraction (XRD) and atomic force microscopy, respectively.

Results: Fig. 1 shows the out-of-plane 2θ - θ XRD patterns of the SRO/SAO bi-layer film and the SRO sheet. Unlike the bi-layer film, the SRO sheet showed only SRO $n00$ diffraction peaks, confirming that SRO single crystalline sheet was successfully synthesized. After the lift-off process, the 200 diffraction peak shifted toward lower angle. The out-of-plane axis length of the SRO sheet (0.3928 nm) is larger than that of the bi-layer film (0.3925 nm) but is similar to that of bulk one (0.393 nm), suggesting the release of strain from the substrate. The size of the sheet is about 4 mm² (the inset of Fig. 1). FWHM of rocking curves of SRO 200 diffraction peak of the sheet (0.542°) is similar to that of the bi-layer film (0.401°) (Fig. 2), suggesting that crystallinity does not deteriorate so much through the lift-off process.

<References> [1] L. Shen, *et al.* Adv. Mater. **29**. 1702411 (2017). [2] D. Lu, *et al.* Nat. Mater. **15**. 1255 (2016). [3] D. Paskiewicz, *et al.* Nano Lett. **16**. 534 (2016). [4] S. Bakaul, *et al.* Nat. Commun. **7**. 10547 (2016).

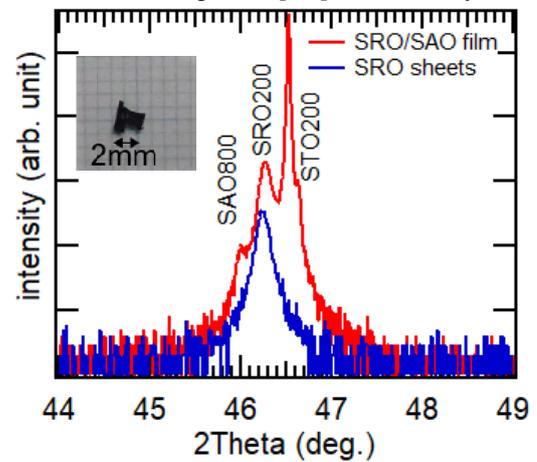


Fig. 1 θ - 2θ XRD patterns of bi-layer film and SRO sheet. The inset shows a photograph of the SRO sheet.

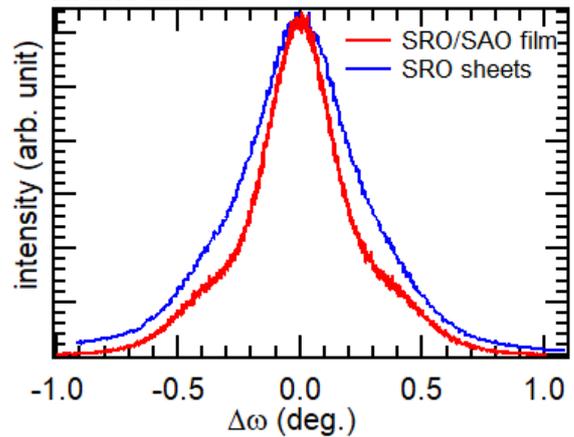


Fig. 2 Intensity plots of SRO 200 diffraction along the ω direction for bi-layer film and SRO sheet.

銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光誘起非平衡状態Light-induced nonequilibrium state 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, 産総研², 低温センター 研究開発部門³
丹羽 宏彰¹, 吉川 尚孝¹, Dongjoon Song², 永崎 洋², 島野 亮^{1,3}

銅酸化物超伝導体は超伝導と共に多様な秩序状態を有し、それらの間の競合・共存関係の解明を目指して、銅酸化物超伝導体を光励起した際の超高速ダイナミクスに関する研究が盛んに行われている。中でも注目されている結果として、超伝導を抑制する静的ストライプ秩序を近赤外光により破壊することにより超伝導が過渡的に増強・ T_c 以上で復活するという「光誘起超伝導」の報告がある [1]。しかし、近年では超伝導状態において光励起すると平衡状態とは異なる準安定状態が現れることが報告されており [2,3]、超伝導状態における光励起ダイナミクスは依然として共通理解が得られていない状況にある。

そこで、本研究では純粋に超伝導状態の光励起ダイナミクスに注目するため、競合する静的ストライプ秩序の存在しない典型的な銅酸化物超伝導体のひとつである $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x = 0.14$) に着目し、近赤外光で c 軸方向を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)。 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x = 0.14$) の 5 K の超伝導平衡状態における c 軸方向のエネルギー反射率と、励起強度 $1.3 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ で光励起した際のエネルギー反射率の時間発展の様子を図 2 に示す。平衡状態では、超伝導キャリアが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ことによ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られている。この状態で強い近赤外光励起を行うと、JPR が低エネルギー側へとシフトし、その状態が 100 ps 経過した時点でも持続していることが確認できる。講演ではこの光励起により生じるスペクトル構造の変化に関して、複数の解析手法から得られた結果を比較しながら、銅酸化物超伝導体の光誘起非平衡ダイナミクスを詳細に議論する。

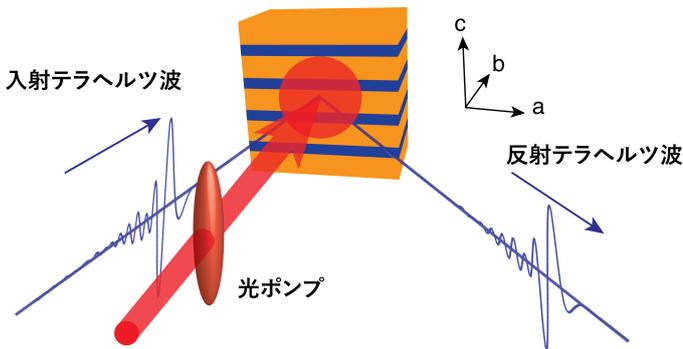


図 1. 光ポンプ-テラヘルツ反射プローブ分光の模式図。

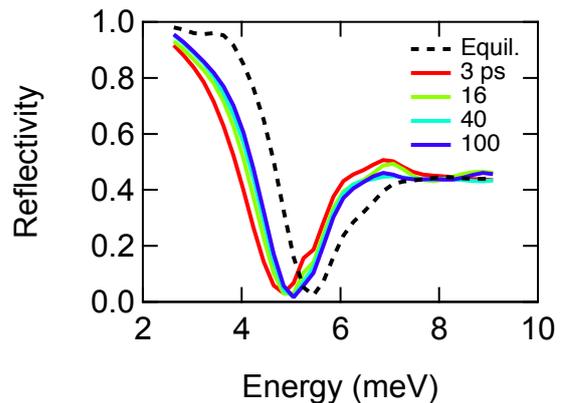


図 2. 5 K において、 $1.3 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ で光励起した際の c 軸方向エネルギー反射率の時間発展。

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

[2] S. Zhang *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 020506 (2018). [3] K. Cremin *et al.*, arXiv:1901.10037 (2019).

二次元層状 Co-W シアノ架橋型金属錯体における テラヘルツ波応答性

Study on terahertz wave absorption properties of two-dimensional layered Co-W cyanido-bridged metal assemblies

所属 理学部化学科大越研究室

氏名 吉田郁哉、中林耕二、所裕子、吉清まりえ、千葉貢治、大越慎一

テラヘルツ波 (0.1–10 THz) は物質の格子振動や強磁性共鳴、プラズモン共鳴などに対応する周波数域であり、分光学の発展に伴い研究面及び応用面において興味を持たれている。当研究室では分子磁性体におけるテラヘルツ波の応答性について、プルシアンブルー類似体 $\text{Cs}_x\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$ が 1.4 THz に吸収を示し、この吸収が 3 次元格子中にトラップされた Cs^+ イオンのフォノン振動であることを明らかにした[1]。本研究では、アルカリ金属イオンを層間を含む 2 次元層状シアノ架橋型金属錯体 $\text{Rb}[\text{Co}(3\text{-cyanopyridine})_2][\text{W}(\text{CN})_8]$ (**1**) に注目し、アルカリ金属イオン周囲の次元変化に伴うフォノンモード振動挙動について調べた。

1 の保水状態である $\text{Rb}[\text{Co}(3\text{-cyanopyridine})_2][\text{W}(\text{CN})_8] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (**1**· H_2O) は、 $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、3-cyanopyridine と RbCl の混合水溶液に $\text{Rb}_3[\text{W}(\text{CN})_8] \cdot \text{H}_2\text{O}$ と RbCl の混合溶液を滴下し、室温において反応させることによって得られた。**1**· H_2O は真空下に放置または 320 K に昇温することによって、脱水状態である **1** へと変化した。300 K 及び 130 K における単結晶構造解析の結果から、両温度において **1** は空間群 $P1$ の三斜晶系に属しており、シアノ基によって架橋した Co 及び W が ab 平面方向に二次元層状構造を形成していることが明らかとなった (図 1)。この二次元層間には Rb^+ イオンが存在しており、その周囲には水分子脱離に伴う空隙が存在していた。また、300 K においては Co–N 結合平均距離が 2.11 Å、130 K においては Co–N 結合平均距離が 1.95 Å であった。この結果及び **1** の磁化率の温度依存性測定から、**1** の電子状態が 300 K においては $\text{Co}^{\text{II}}_{\text{HS}}\text{–W}^{\text{V}}$ (高温相)、130 K においては $\text{Co}^{\text{III}}_{\text{LS}}\text{–W}^{\text{IV}}$ (低温相) から構成されており、**1** は温度変化に伴って電荷移動誘起スピン転移 (CTIST) を示すと考えられる。この変化に伴って格子体積は $V_{\text{HS}} = 1240.15$ (12) Å³ から $V_{\text{LS}} = 1144.6$ (4) Å³ となり、-7.7 % の減少が観測された。

1 のテラヘルツ吸収特性について、テラヘルツ時間領域分光法を用いて測定を行なった。その結果、**1** は 1 THz 付近に複数の吸収ピークを持っていることが明らかとなった (図 2 赤点)。このような吸収ピークは類似構造を持つアルカリ金属イオンを含まない Co–W オクタシアノ金属錯体においては観測されなかったことから、アルカリ金属イオンのフォノンモード由来の吸収であると予想される。特に **1** は 0.77 THz の格子振動の中でも非常に低い吸収周波数を持っている。これは ab 平面上の Rb^+ イオンの振動は周囲の層から受ける力が弱いから、ゆっくりとした振動が可能になるからであると考えられる。また、**1** のテラヘルツ吸収特性の温度依存性について、液体ヘリウムを寒剤として用いて測定を行なった。その結果、**1** は温度相転移に伴ってテラヘルツ吸収特性が変化し、110 K において低温相の **1** は 0.88 THz に吸収を持つことが明らかとなった (図 2 青丸)。このことから、電荷移動誘起スピン転移に伴う格子体積の縮小が、 Rb^+ イオンのフォノンモード振動周波数に影響を与えていると考えられる。

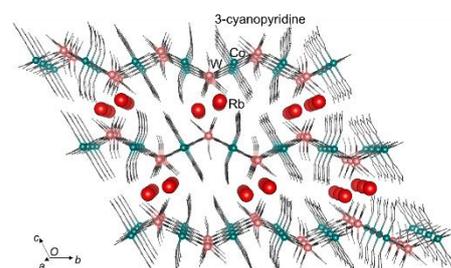


図 1. **1** の結晶構造。

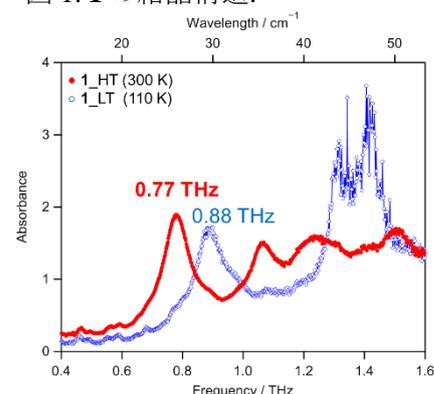


図 2. **1** の 300 K (赤点) 及び 110 K (青丸) におけるテラヘルツ吸収スペクトル。

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

単原子層ヘリウム4の比熱と超流動性の同時測定装置の開発

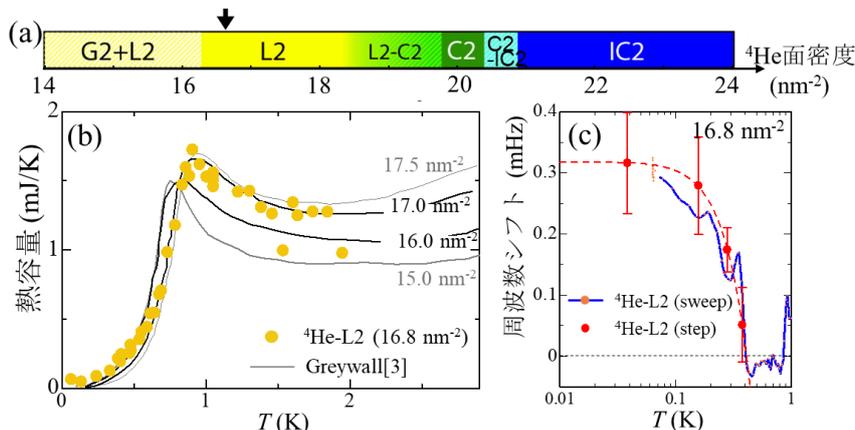
Development of an apparatus for simultaneous measurements of specific heat and superfluidity in monolayers of helium 4

理学系研究科・物理学専攻・福山研究室^A、低温センター・共同利用部門^B、同・研究開発部門^C

宇佐美 潤^A, 戸田 亮^B, 中村 祥子^C, 松井 朋裕^A, 福山 寛^{A,C}

He原子は低温でグラファイト基板にlayer by layerで吸着し、2次元系を形成する。吸着2層目の単原子層⁴Heでは、面内密度の増加と共に液相(L2)→低密度局在相(C2)→不整合固相(IC2)と相変化するが(図a)、中間のC2相は部分的に空間対称性の破れた「量子液晶相」である可能性が比熱測定[1]から指摘されている。それだけでなく、過去の複数のねじれ振り子実験では、0.3 K以下でC2相周辺密度で超流動応答が観測されている [2]。もし本当にC2相あるいはIC2相が超流動性を示すのであれば、超流動性を示す液晶や固体などといった新奇な量子状態が実現していることになる。しかし、基板には必ず一定量の不均一部分が偏在しており、その量は各実験によって異なるため、試料の密度スケールの不定性が大きく、実際にどの相が超流動性を示すのか詳細は明らかになっていない。

我々は、低温で作成した2層目⁴He試料に対してねじれ振り子と比熱の同時測定を行うことで、この新奇超流動の有無を調べている。従来、両者は条件が相反するため同時測定は困難とされてきたが、熱的および力学的シミュレーションからアルミナ断熱支持具を注意深く設計すれば同時測定は可能であるとの結論を得て、装置を実際に製作した。そして、希釈冷凍機に搭載して、熱容量測定から正確な相決定が可能であること(図b)、40 mKまでのねじれ振り子測定で実際にL2相の超流動応答と考えられる周波数シフトを観測した(図c)。



[1] S. Nakamura et al., Phys. Rev. B **94**, 180501 (2016).

[2] P.A. Crowell and J.D. Reppy, Phys. Rev. B **53**, 2701 (1996); Y. Shibayama et al., J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 032096 (2009); J. Nyéki et al., Nature Physics **13**, 455 (2017).

[3] D. S. Greywall, Phys. Rev. B **47**, 309 (1993).

有機モット転移系における乱れ誘起量子現象 Disorder-induced quantum phenomena in an organic Mott system

工学系研究科物理工学専攻鹿野田研究室¹

東理大理²、埼玉大院理工³、東北大金研⁴

浦井 瑞紀¹、古川 哲也²、宮川 和也¹、谷口 弘三³、佐々木 孝彦⁴、鹿野田 一司¹

強相関電子系では、強い電子間クーロン反発によって電子が各サイトに局在するモット絶縁体状態が実現することが知られる。一方で、結晶中の乱れの存在下では、電子波の干渉効果に起因する局在現象(アンダーソン局在)が生じる。モット絶縁体が電子の粒子性を強く反映した絶縁化機構であるのに対し、アンダーソン局在は電子の波動性をその起源とする絶縁化機構であり、強い電子相関と乱れの共存する系では、両者の拮抗によって非自明な電子状態が実現することが期待される。

有機伝導体 κ -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Cl は、常圧で反強磁性を示す典型的なモット絶縁体で、加圧により 1 次のモット転移を起こし金属に転移する。近年、この物質に X 線を照射することで、照射時間に応じた乱れを導入する方法が注目されており、X 線照射により電気抵抗率が大きく減少する[1]、反強磁性秩序が消失する[2]といった電子状態の変化が報告されている。

本研究では、本系のモット転移とその臨界性に対する乱れの効果を調べるため圧力下電気抵抗測定を行った。結果、モット臨界終点が X 線照射により劇的に低下し、更にこれと対照的に、照射後も高温域の抵抗の量子臨界スケールリングが保持され(図(a))、その特徴的なエネルギーは照射により減少することがわかった。これは X 線照射による乱れの導入でモット転移の量子臨界揺らぎが増大したことを示唆する。

また、磁性に関して、常圧 ¹H NMR 測定により、本系の反強磁性秩序が X 線照射によりランダムにスピンの凍結したスピングラス状態に変化し、更に照射時間を増やすことで、このスピングラス状態は低温(~1.6 K)まで磁気転移の兆候を示さない量子スピン液体状態に変化することがわかった (図(b))。

以上の結果は、いずれも X 線照射による乱れの導入によって本系の電荷・スピン両自由度の量子力学的揺らぎが増大することを示している。

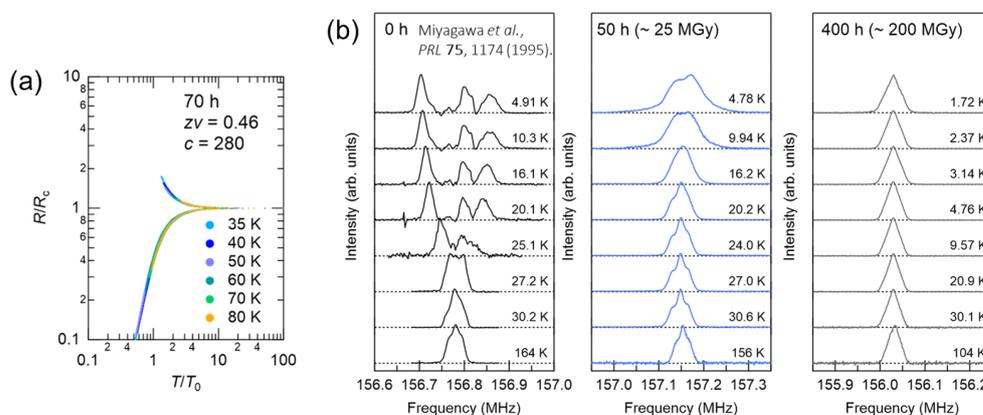


図. (a) X 線照射後の電気抵抗の量子臨界スケールリング. (b) ¹H NMR スペクトル.

[1] T. Sasaki, Crystals **2**, 374 (2012). [2] T. Furukawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 077001 (2015).

P-13

電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生 Terahertz second harmonic generation in a thin film of an s-wave superconductor NbN under 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情報通信研究機構(NICT)・未来 ICT 研究所
中村祥子^A、富田圭祐^B、勝見恒太^B、寺井弘高^C、島野亮^{A,B}

物質中を光が通過すると、光と物質の相互作用により物質に分極が生じる。強い光を入射すると、一般に、非線形相互作用により、入射した光の n 倍の周波数で振動する第 n 高調波が生じる。この高調波は、物質中の、光に線形応答しない励起にも共鳴しうるので、等方的な物質で最低次となる第 3 高調波 (TH) は、超伝導体の集団励起であるヒッグスモード (後述) の観測に用いられている [1]。

今回、我々は、もともと等方的な超伝導体である NbN の薄膜に大電流を注入し、反転対称性を破ることで第 2 高調波 (SH) を発生させた。図 (a) に測定の設定アップを示す。生じる SH は電流の有無で存否が変わるので、電流の有無による透過波の差分を調べることで、極めて高感度な測定が行える。観測された SH について詳細に温度依存性を測定したところ、転移温度直下の特定の温度で SH は共鳴的に増強し、図 (b) に示すように、パワースペクトルに明確なピークとして観測された。

超伝導秩序変数 Δ に対する自由エネルギーポテンシャルを図 (c) に示す。TH の共鳴によって観測されてきたヒッグスモードは、青球で示した基底状態から動径方向に振動するモードだが、今回観測された SH の共鳴が起因するのは、ポテンシャルの底を回転方向に振動する位相モードで、転移温度の極近傍でのみ存在可能な Carlson-Goldman モード (CG) [2] だと考えられる。CG は、アルミニウムのトンネル接合で発見されて以来、異方的超伝導、多バンド、と理論研究は進むものの実験は困難で、他の物質・手法では観測できていなかったが、本手法を用いることで観測の対象を大幅に広げられると期待される。

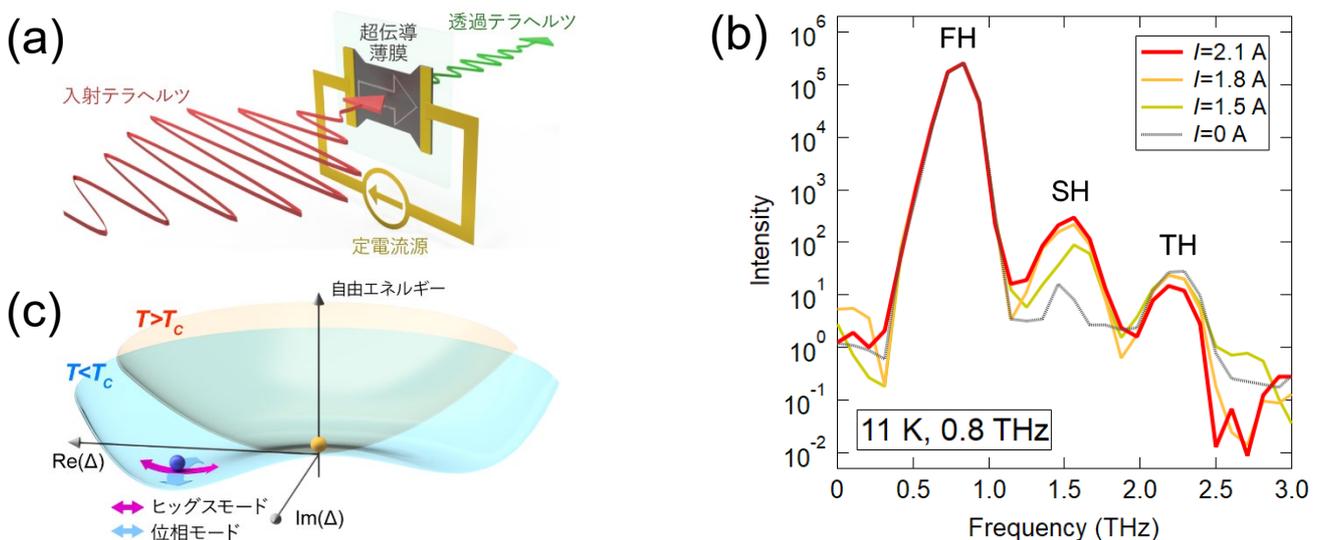


図 (a) 測定の設定アップ。(b) 電流注入下の NbN 薄膜に狭帯域テラヘルツ波パルス (電場尖頭値 2.5 kV/cm) を照射したときの透過テラヘルツ波のパワースペクトラム。FH, SH, TH は順に基本波、第 2 高調波、第 3 高調波。(c) 超伝導秩序変数 Δ と自由エネルギーの関係。

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

[2] R. V. Carlson and A. M. Goldman, Phys. Rev. Lett. **31**, 880 (1973).

Magneto-optical spectroscopy on Weyl points for anomalous and topological Hall effects in MnGe

林悠大^A、岡村嘉大^A、金澤直也^A、塚崎敦^B、市川昌和^A、
川崎雅司^{A,C}、十倉好紀^{A,C}、高橋陽太郎^A

東京大工^A、東北大金研^B、理研 CEMSC^C

異常ホール効果は、磁性体において生じるホール効果であるが、その発現機構は長年の間議論が続いてきた。近年、バンドのトポロジーによって巨大な異常ホール効果が発現することが理論的に明らかにされ[1,2]、様々な物質を用いて巨大な異常ホール効果の探索が行われている。その過程において、これまでの理論的枠組みの中では完全には理解できない物質も報告され、さらなる研究が求められている。

本研究では、テラヘルツ偏光分光測定を行うことで、異常ホール効果のエネルギー構造を明らかにし、その起源の解明手法と巨大化の指針を確立することを目指した。ここで扱った MnGe は B20 型合金に分類され、大きな異常ホール効果を示すことが知られている。さらに最近では、スキルミオンと呼ばれる磁気構造に由来した巨大なトポジカルホール効果が観測され、大きな注目を集めている[3]。MnGe の磁気光学スペクトルからホール伝導度スペクトルを算出したところ、1.2 meV という非常に低エネルギー領域に共鳴構造を観測した。さらに、その共鳴構造から異常ホール効果とトポジカルホール効果のそれぞれに対応する 2 つの共鳴構造を同定することができた。本研究の成果はこれからの巨大異常ホール効果研究の研究基盤を構築したといえる。

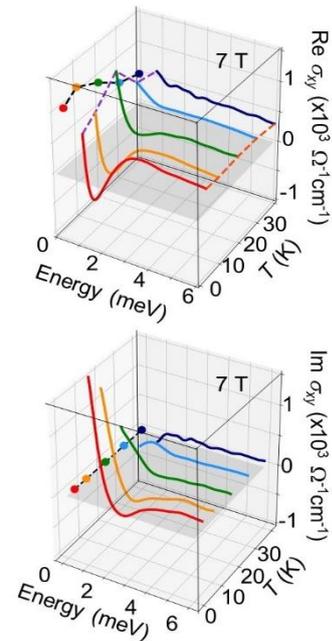


図 1 ホール伝導度スペクトルの
温度依存性

- [1] T. Jungwirth, Qian Niu, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. Lett. **88**, 207208 (2002). [2] S. Onoda and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 19-22 (2002). [3] M. Lee, W. Kang, Y. Onose, Y. Tokura, and N. P. Ong, Phys. Rev. Lett. **102**, 186601 (2009).

Two-dimensional superconductivity on SIC phase of Pb/Ge(111) studied by *in situ* transport measurement

H. Huang¹, H. Toyama¹, T. Nakamura¹, L. V. Bondarenko², A.Y. Tupchaya², D.V. Gruznev², R. Akiyama¹, A. Takayama¹, A.V. Zotov^{2,3}, A.A. Saranin^{2,3} and S. Hasegawa¹

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

² Institute of Automation and Control Processes, 5 Radio St., 690041, Vladivostok, Russia

³ School of Natural Science, Far Eastern Federal University, 8 Sukhanova St., 690950

Vladivostok, Russia

Two-dimensional metal-on-semiconductor systems are an attractive topic in recent years, because of innumerable theories and attractive experiment results of possible novel physics. It has been shown that there exists two-dimensional superconductivity which adjoins the Pb islands on fourth monolayer Pb on Ge(111) [Ge(111)- $\beta\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Pb phase]. The superconductivity originates from the proximity effect caused by the Cooper pairs from Pb islands [1]. On the other hand, on the striped incommensurate (SIC) phase of Pb/Ge(111) with more Pb coverage, the transport properties remains unexplored because of the difficulties in making the SIC structure on Ge(111). Here, we performed *in situ* electrical transport measurements on the Ge(111)-SIC-Pb phase at ultralow temperature to observe superconductivity and investigate the mechanism of transport properties.

Fig. 1 (a) shows the temperature dependence of sheet resistance for different thicknesses of Pb. We obtain the drop of resistance like superconductivity behavior around 1 K in all samples. The curves can be fitted well by the two-dimensional superconductor formula including Aslamazov-Larkin theory (the black curves). We can see that although the thickness of the sample is different, the critical temperatures (T_c) obtained by the fitting are almost the same (~ 0.79 K) for all. This may be because the thicker samples only contain higher/larger Pb islands with the wetting layer unchanged when the Pb thickness increases. Fig. 1 (b) shows the temperature dependence of sheet resistance (Pb coverage = 2.9 ML) under different out-of-plane magnetic fields. With the increase of the magnetic field, the T_c gradually decreases and finally the systems show a superconductor-insulator transition, a characteristic of the 2D superconductivity [2]. In this presentation, we will report the details about our measurements and the dependence of T_c on the magnetic fields. We will also give a possible mechanism for the origin of this superconductivity behavior.

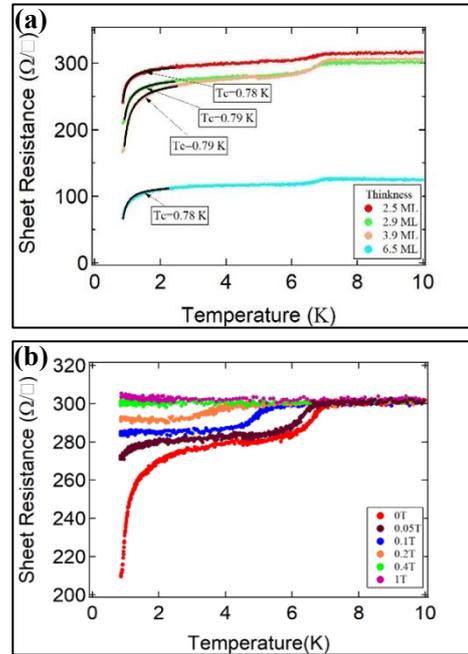


Figure 1: (a) Temperature dependence of sheet resistance for different thickness of Pb. (b) Temperature dependence of sheet resistance with different out-of-plane magnetic fields.

[1] H. Kim *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **29**, 084006 (2016).

[2] M. Yamada *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 237001 (2013).

ディラック半金属薄膜における表面量子化伝導の制御 Quantized surface transport controlled in Dirac semimetal thin films

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, 栗原綾佑², 秋葉和人², M. Kriener³, 三宅厚志²,
田口康二郎³, 徳永将史², 川崎雅司^{1,3}

ギャップレスなトポロジカル相であるトポロジカルディラック半金属は、結晶の対称性に守られた 3 次元的なバンド交差点 (ワイル点) を持つバルク状態とそれに付随した表面状態によって特徴づけられる[1]。特に、フェルミアークと呼ばれる表面状態は、対となるワイル点間のみ存在し、波数空間で閉じないフェルミ面構造を持っている点で従来の物質とは大きく異なり、その輸送現象に注目が集まっている。本研究では、ディラック半金属の代表物質である Cd_3As_2 について、高品質エピタキシャル薄膜の作製と化学置換・電界効果によるキャリア濃度の制御を行うことで、膜厚 100 nm の 3 次元的な試料において表面状態に由来する量子ホール効果が現れることを新たに発見した。

図 1 に Zn 置換をした低キャリア濃度 ($n \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)・高移動度 ($\mu \sim 4 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)・膜厚 100 nm の Cd_3As_2 薄膜において、磁場の印加角度を変化させた場合の磁気抵抗とホール抵抗の変化を示す。磁場 B を電流 I 方向に印加した場合 ($\theta = 0^\circ$) における明瞭な量子振動が示すようにバルク状態は 3 次元的なフェルミ面構造を持ちながらも、面直磁場成分の増加とともに 2 次元の量子化伝導が生じていることが分かる。さらに、我々は次元性 (膜厚)・キャリア濃度 (電界効果)・バンドトポロジー (Zn 置換) を制御し、それらに対する依存性を詳細に調べることで、観測された量子化伝導がディラック半金属の表面状態とバルク状態の両方が関わる特異な量子ホール状態であることを明らかにした。

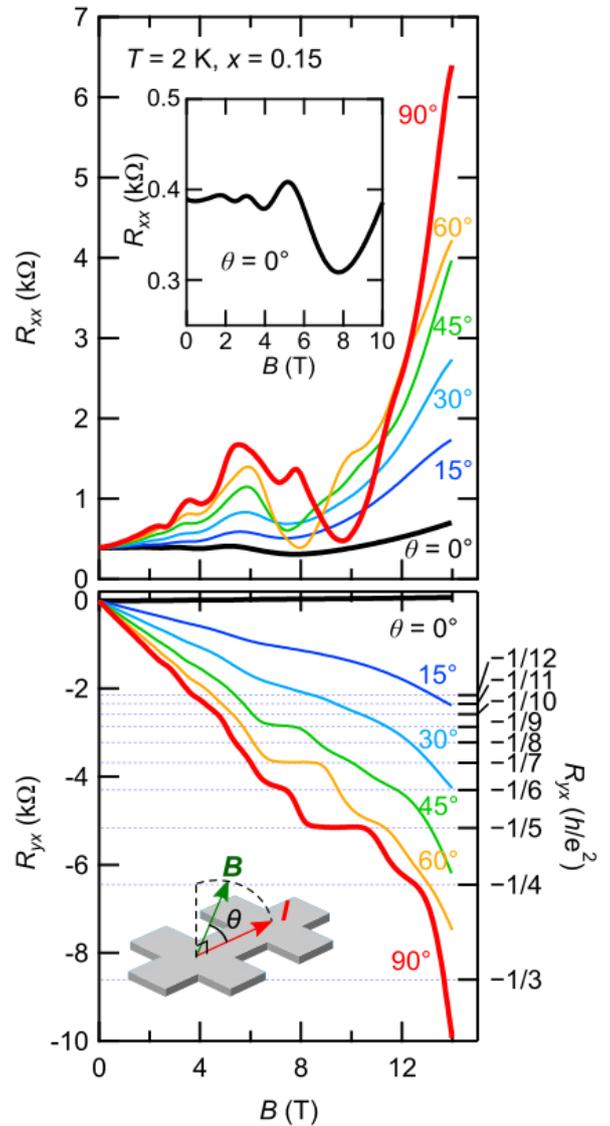


図 1: $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ 薄膜 (膜厚 100 nm、 $x = 0.15$) における量子ホール効果の磁場角度依存性。

[1] N. P. Armitage *et al.*, *Rev Mod. Phys.* **90**, 015001 (2018).

P-17

マイクロメートルサイズに加工した Bi-Sb トポロジカル絶縁体中 転位の電気抵抗測定

Electrical resistivity measurements for dislocations in micrometer-sized Bi-Sb 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高密度に導入されることが確認された[3]。

伝導転位の伝導を直接観測するためには、転位の典型的な長さよりも全長の小さい試料において測定を行う必要がある。成長結晶のへき開面上の濃度分布を EPMA で調べ、Sb 濃度が均一になっている、かつすべり線が明瞭に観察される領域から FIB によってマイクロメートルサイズの試料を切り出した。切り出した試料に FIB-SEM 内で Pt 配線した。Pt 配線は、Pt が化合したガスを導入し、イオンビームを照射することで狙った部分にのみガスから遊離した Pt を堆積させるという手法で取り付けた。

以上の手順で作製した試料において、四端子法により 2-300K の温度範囲で電気抵抗測定を行った。測定には低温センターの PPMS を用いた。

[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)

トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜上に作製したゲート変調可能な Josephson 接合における交流 Josephson 効果

The a.c. Josephson effect of gate tunable Josephson junction on a topological insulator $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ film

^A 大学院工学系研究科樽茶研究室, ^BJST さきがけ, ^C 理研, ^D Penn State Univ.^D,
 武重有祐 ^A, 松尾貞茂 ^{A,B}, Russell S. Deacon^C, 上田健人 ^A, 佐藤洋介 ^A, Yi-Fan Zhao^D,
 Ling Zhang^D, Cui-Zu Chang^D, 石橋幸治 ^C, 樽茶清悟 ^{A,C}

Kitaev による超伝導体中におけるマヨラナ粒子実現可能性の提案[1]以降、マヨラナ粒子の探索が盛んに行われている。マヨラナ粒子には非可換統計性の物理の探究や、トポロジ的に保護された量子計算への応用が期待されることから、その実現には大きな期待が集まっている。我々は超伝導体とトポロジカル絶縁体の接合[2]で予測されるマヨラナ粒子に着目した。このマヨラナ粒子の実現には、フェルミエネルギーを制御し、表面状態のみが伝導に寄与する状態を作ることが鍵となる。

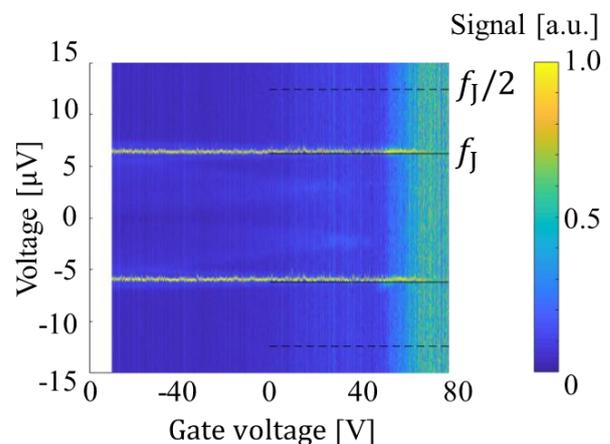
我々は Josephson 接合をトポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 上に作製し、常伝導抵抗及びスイッチング電流がゲート電圧によって制御可能であることを確認した。このゲート制御可能な Josephson 接合において、Majorana Fermion の兆候を交流 Josephson 効果(Shapiro step、Josephson 放射)で捉えることを目指した。

Shapiro step は高周波を Josephson 接合に印加した際の I-V 特性において、電圧が通常の場合には $hf/2e$ の整数倍に量子化する現象である。Majorana Fermion が存在する場合にはこの量子化が整数倍ではなく偶数倍に量子化するため、奇数番目のステップが消失する。従って、Shapiro step の観測により Majorana Fermion の有無を判定できる。また、もう1つの交流 Josephson 効果である Josephson 放射は接合に電圧を印加した際に高周波が放出される現象で、通常の場合

はこの周波数 f_J は印加電圧 V と $(f_J = \frac{2eV}{h})$ の関係がある。Majorana Fermion が出現した場合にはこの周波数は半分になるため、これによっても Majorana Fermion の有無を判定できる。

今回2つのデバイスで測定したが、結果として Shapiro step の奇数番目は消失しなかった。また Josephson 放射測定でも Josephson 放射は通常の周波数 f_J での放射のみが得られた(図 1)。これらの結果は Majorana Fermion の出現に否定的である。我々はこの原因として基板の大きな比誘電率を考えている。

本研究は、3次元のトポロジカル絶縁体を用いて、フェルミエネルギーのゲート電圧制御の元でジョセフソン放射を観測した初めての実験であり、マヨラナ粒子探索における重要な知見を与えている。



(図 1) Josephson 放射のゲート依存性。ゲート電圧によらず通常の周波数(f_J)での Josephson 放射が生じている。

[1] A. Y. Kitaev, Physics-Uspekhi, **44**, 131 (2001). [2] L. Fu & C. L. Kane, PRL, **100**, 096407(2008).

磁性トポロジカル絶縁体へテロ構造

MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ の作製とその評価東大理, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS ^A,School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University ^B高城 拓也, 秋山 了太, I. A. Kibirev ^{A,B}, A. V. Matetskiy ^{A,B}, 遠山 晴子,A. V. Zotov ^{A,B}, A. A. Saranin ^{A,B}, 長谷川 修司

Fabrication and Evaluation of Magnetic Topological Insulator Heterostructure

MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃Dept. of Phys., Univ. of Tokyo, ^A Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, ^B School of Natural Sciences, Far Eastern Federal UniversityT. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev ^{A,B}, A. V. Matetskiy ^{A,B}, H. Toyama,A. V. Zotov ^{A,B}, A. A. Saranin ^{A,B}, and S. Hasegawa

磁性秩序が付加されたトポロジカル絶縁体(TI)は時間反転対称性の破れによりディラック点(DP)近傍でギャップが開く。このときフェルミ準位(E_F)がそのギャップ中に位置するとヘリカルエッジ電流を伴う量子異常ホール効果(QAHE)が生じる。しかし、これまでの多くの研究では磁性元素がドーピングされた系を扱っているため、結晶性の悪化や磁化の不均一性などの理由で未だ極低温でしかQAHEは観測されていない。これらの問題への解決策として、我々のグループでは以前自己組織化により強磁性Mn単原子層を含んで生成される高品質結晶の強磁性層/TI接合(MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃)の作製を報告した[1]。しかし、その系では E_F がバルク伝導帯を横切ることが課題であった。そこで我々は今回、TIとして E_F 位置の調整が可能な(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ (BST)[2]を採用し、適切な E_F のチューニングを目指した。ARPESの結果から、BST上にMnTeを積層するとホールドーピングにより E_F が価電子帯側に0.12 eVほどシフトすることが分かった。そこで、あらかじめ E_F が伝導帯側に調整されたBST($x = 0.89$)を作製し、その上にMnTeを積層させたところ、最終的に E_F をDP近傍にチューニングでき(図1.(a),(b))、QAHE観測に有為な試料を得た。

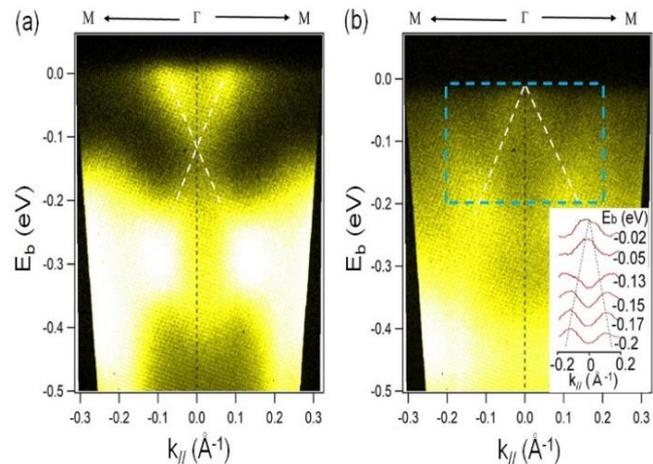
[1] T. Hirahara *et al.*, *Nano Lett.* **17**, 3493 (2017).[2] J. Zhang *et al.*, *Nat. Commun.* **2**, 574 (2011).

図 1. E - k dispersion images by ARPES of (a) (Bi_{0.11}Sb_{0.89})₂Te₃ and (b) MnTe/(Bi_{0.11}Sb_{0.89})₂Te₃ at 77 K. The inset of (b) shows momentum-distribution curves (MDCs) taken at blue dashed square region.

新規磁性半導体 EuAs 薄膜の磁気輸送特性

Magneto transport properties of new magnetic semiconductor EuAs films

工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室¹,

工学系研究科 物理工学専攻²

JST さきがけ³, 理研 CEMS⁴, 東大物性研⁵

佐藤 慎¹, 打田 正輝^{1,3}, 中澤 佑介¹, M. Kriener⁴, 栗原 綾佑^{4,5}, 三宅 厚志⁵,
M.S.Bahramy², 西早 辰一¹, 田口 康二郎⁴, 徳永 将史^{4,5}, 川崎 雅司^{1,4}

希土類モノクタイド RX は伝導電子と局在スピンの相互作用により様々な電子状態や磁気秩序を示す。さらに近年は、トポロジカル物質の候補としても注目を浴びるなど、多くの観点から研究が行われている。一方で、図 1 に示すように、EuAs は希土類モノクタイドの中でも NaCl 型ではなく六方晶の構造をとる特異な物質である。Eu-As 二元系において組成の異なる相が数多く存在することから、これまで単結晶の作製例はなく、その電子構造や磁気構造については明らかになっていなかった[1,2]。

本研究では、分子線エピタキシー法を用いることで、 $Al_2O_3(0001)$ 基板上に c 軸方向に配向した単結晶 EuAs 薄膜の作製に成功した。また、走査透過型電子顕微鏡観察と組み合わせた電子エネルギー損失分光測定の結果、Eu の価数は 2 価であることが明らかとなった。

図 2 に示すように、本物質の抵抗率は半導体的な温度依存性を持ちながら、20 K 付近と低温で反強磁性転移と考えられるキंक構造を示した。さらに Eu^{2+} の持つ巨大な磁気モーメントに由来して、 10^4 程度の巨大な負の磁気抵抗を示すことが明らかになった。本発表ではこれらの結果についてまとめる。

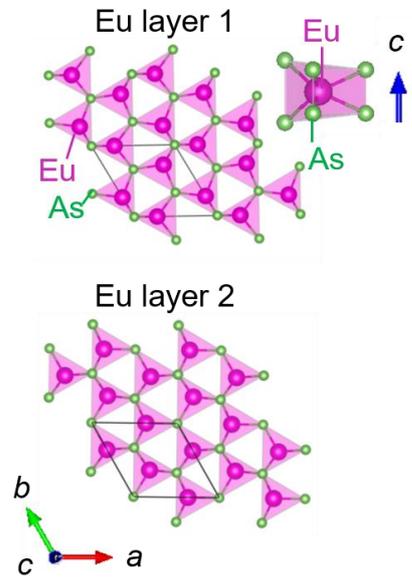


図 1 EuAs の結晶構造の c 軸方向から見た図。Eu 原子が交互に配置している。

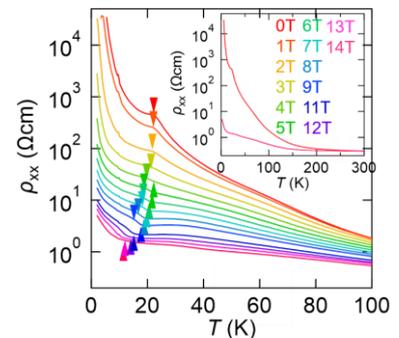


図 2 各磁場下における抵抗率 ρ_{xx} の温度依存性

[1] S. Ono *et al.* J. Less-Common Met. **25**, 287-294 (1971)

[2] A. Iandelli *et al.* J. Less-Common Met. **30**, 211-216 (1973)

P-21

アンチペロブスカイト Sr₃PbO における三次元ディラック電子の 巨大軌道反磁性

Giant orbital diamagnetism of three-dimensional Dirac electrons in antiperovskite Sr₃PbO

東大理^A, NIMS-MANA^B, マックス・プランク研究所^C

末次祥大^A, 北川健太郎^A, 苅宿俊風^B, 葉山慶平^A, A. W. Rost^C, J. Nuss^C, C. Mühle^C,
小形正男^A, 高木英典^{A,C}

アンチペロブスカイト A_3EO ($A=Ca, Sr, Ba; E=Sn, Pb$) は 3 次元ディラック電子以外のフェルミ面を持たないとバンド計算により予測されている[1]。以前より我々は Sr₃PbO の磁気輸送測定[2]や NMR 測定を行い、線形分散を反映した非常に軽い有効質量やスピン格子緩和率 $1/T_1$ の温度依存性などを観測し、Sr₃PbO が三次元ディラック電子系であることを初めて明らかにした。

ディラック電子系はバンドギャップ中で極大値を取るといった異常な化学ポテンシャル依存性を示す巨大な軌道反磁性[3]などの従来とは異なった物性探索の舞台となる。この軌道反磁性は古くから Bi で議論されてきたが、これまでの実験では観測された反磁性の微視的な起源は明らかにされておらず、他のディラック電子系においても巨大な g 因子によるスピン磁化率をはじめとした他の寄与によって軌道磁化率の詳細は不明のままであった。

そのため我々は Sr₃PbO において NMR(図 1)やバルク磁化率の測定、理論計算との比較を行った。 $1/T_1$ のキャリア密度依存性はバンド計算とよく一致し、バルク磁化率と NMR ナイトシフト K (図 2 右下)では Bi と同様なキャリア密度依存性を観測した。さらに、 $1/T_1$ とナイトシフト K を用いてスピン磁化率の寄与を推定することにより(図 2)、ディラック電子の軌道磁化率の寄与を分離することに初めて成功した。発表では温度依存性やキャリア密度依存性などの軌道反磁性の詳細まで議論する予定である。

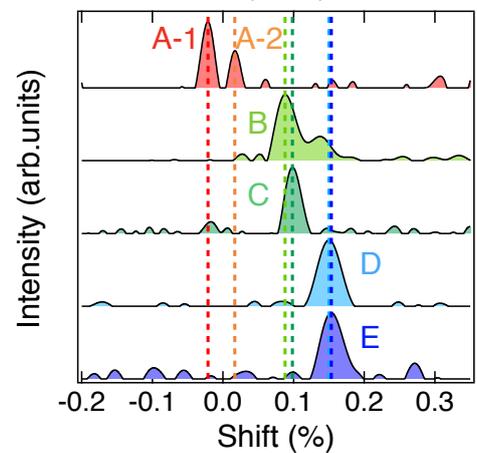


図 1 NMR スペクトル

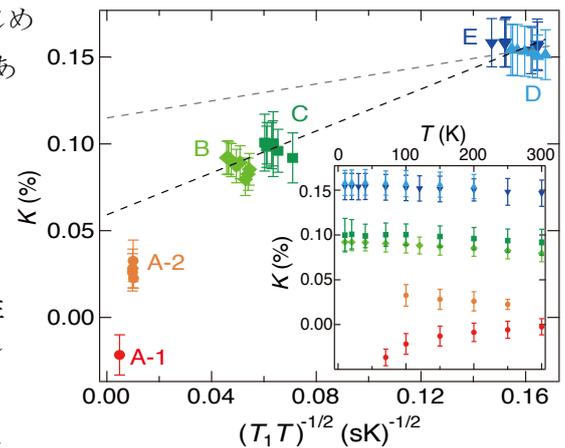


図 2 スピン格子緩和率と
ナイトシフトの比較

[1] T. Kariyado and M. Ogata, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 083704 (2011)

[2] S. Suetsugu et. al., Phys. Rev. B **98**, 115203 (2018)

[3] H. Fukuyama and R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn. **28**, 570-581 (1970)

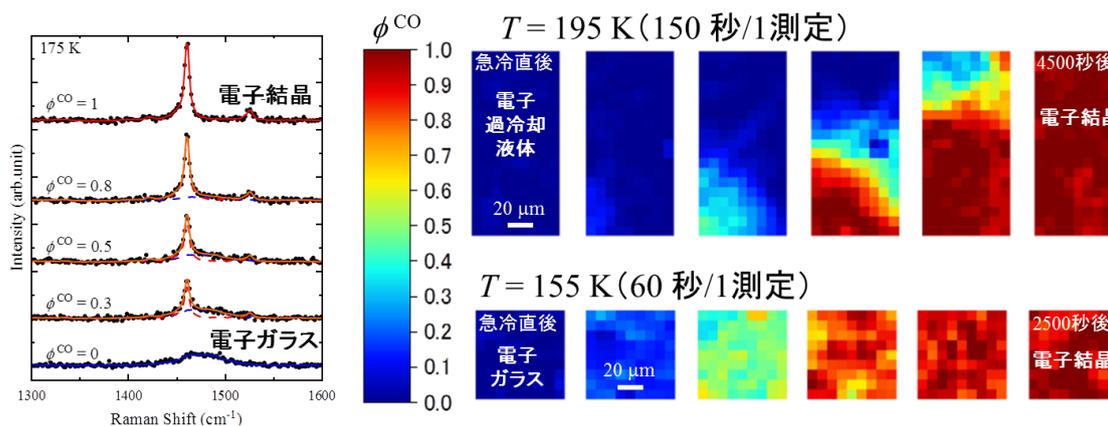
電子ガラスの結晶化の実空間観察

Real-space observation of electron glass crystallization

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室¹, 長谷川研究室²村瀬 秀明¹, 荒井 俊人², 平川 友也², 長谷川 達生², 宮川 和也¹, 鹿野田 一司¹

近年、有機物質において電子が過冷却液体状態を経てガラス化する現象が発見された[1,2]。擬二次元系有機導体 θ -(BEDT-TTF)₂RbZn(SCN)₄ (以下 θ -RbZn) 中の電子は、高温では自由に運動できるが(電子液体)、徐冷すると(< 1 K/min)、200 K 付近で周期的に配列する(電子結晶)のに対し、急冷すると(>5 K/min)、転移温度以下でも液体の性質を保持したまま、低温に向ってその運動が減速し(電子過冷却液体)、やがて凍結する(電子ガラス)。さらに先行研究では、電気抵抗測定と NMR 測定により、電子ガラス・過冷却液体が電子結晶へと緩和することが明らかとなった。一般的に、高温では、結晶核の生成確率は低いが、ひとたび結晶核が生じると急速に成長するため、不均一に結晶化が起こるのに対し、低温では、多数の微結晶が生成するが、個々の微結晶の成長が緩やかなため、均一に結晶化が進む(核生成・核成長機構)。しかし、量子性を有する電子においてもこの機構で結晶化するかは、まだ明らかになっていない。

本研究では、電子の核生成・核成長の直接的な証拠を得るため、電子の結晶化の実空間・実時間観測を行った。実験では、 θ -RbZn を 30 K/min で急冷した後、結晶表面の各点・各時間でラマンスペクトルを測定した。観測された各スペクトルは、結晶とガラスのスペクトルの重ね合わせとして記述できる(図左)ことから、スペクトル中の結晶の比率 ϕ^{CO} をマッピングすることで結晶領域の空間分布を画像化した。その結果、高温(195 K)では、測定領域の外で生成した結晶核が領域内へと成長していく様子が観測された(図右上)。一方、低温(155 K)では、分解能($\sim 6.5 \mu\text{m}$)より遥かに小さいサイズの微結晶が多数生成して全体が一様に結晶化する振舞が観測された(図右下)。これらの結果により、電子が核生成・核成長機構で結晶化することが明らかとなった。当日は以上の結果から電子の結晶化を議論する。



図(左) 試料中のラマンスペクトル ($6.5 \mu\text{m}$ 四方) の典型的な時間変化。曲線は、電子の結晶とガラスの二成分フィッティング。(右) ϕ^{CO} の実空間マッピングとその時間発展。高温(上)、低温(下)。

[1] F.Kagawa, *et al*, *Nat. Phys.* **9**, 2642 (2013). [2] T.Sato, *et al*, *Phys. Rev. B* **89**, 121102(R) (2014). [3] T.Sato, *et al*, *Science* **357**, 1378–1381 (2017). [4] S.Sasaki, *et al*, *Science* **357**, 1381–1385(2017).

水の光触媒分解素材窒化タantalの電子物性観測

Physical electronic observations of tantalum nitride as a material for water photosplitting catalyst

工学系・化学システム工学専攻・堂免研
山田太郎・片山正士・堂免一成

我々は太陽光エネルギーを利用して水を光触媒的に分解して水素ガス・酸素ガスを製造し、将来の環境負荷低減エネルギー産出を目指した研究開発を行っている。その中心課題は、太陽光を吸収して励起状態となり、発生した固体内の電子と正孔により直接水分子を電気分解する、光触媒物質の開発にある。光触媒物質は半導体であり、キャリアを水中のプロトンや水分子に渡して水素分子、酸素分子を生成する助触媒物質で修飾することにより、太陽光エネルギーを高効率で水素エネルギーに変換することが可能となる。例えば SrTiO₃ 粉末に助触媒 RhCrO_x を組みあわせて、太陽エネルギー変換効率 0.6% の大型の酸素発生装置が組み立てられている[1]。SrTiO₃ は量子収率こそ 60% 以上まで高められ、洗練された物質となっているが、何分太陽光中約 3% しかない紫外線にのみ活性であり、全体としてはこの効率に止まらざるを得ない。そこで太陽光中の大部分を占める可視光を吸収する物質の開発が望まれる。既存の太陽電池物質 Si や GaAs は原理的に高効率であるが、大規模スケールで展開する際に多結晶や粉末や薄膜の形態で利用してローコストを目指すことが困難であり、そこに新規半導体の探索開発の余地が生まれる。

我々のグループでの新物質開発は多岐にわたっているが、その中でも酸素ガス発生に好適な可視光吸収物質である一連の遷移金属酸窒化物が有望である。その中で Ta₃N₅ (窒化タantal) は薄膜作製法が近來進展し[2-5]、光電気化学的な水溶液中酸素発生光電極に作り込むことにより、アルカリ性水溶液中酸素発生電位での光電流密度が 8 mA cm⁻² (現状、太陽エネルギー変換効率 10% 近辺に相当) まで高められてきている。Ta₃N₅ 薄膜の多結晶的組織構造、ドーパントや不純物と触媒活性を結びつけることは今後の開発手順上好ましいが、そのためにはキャリア物性をその仲立ちとして知ることが必要である。まだ薄膜形成プロセスが完全に制御できる段階ではないが、作製できた試料の比抵抗温度変化、ホール効果、光 IV 特性等を測定用試料作製法を考案して測定に掛かったところであり、ことに PPMS (Physical Property Measurement System) を用いた強磁場ホール効果や低温比抵抗等の測定結果から、製膜法開発の方針が占める段階に至っている[6]。

[1] Y. Goto et al., *Joule* **2** (2018) 509.

[2] M. Zhong et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **56** (2017) 4739.

[3] Y. Asakura et al., *Sustainable Energy & Fuels* **2** (2018) 73.

[4] E. Nurlaela et al., *J. Mater. Chem. A* **6** (2018) 15265.

[5] T. Higashi et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* (2019) in press.

[6] T. Yamada et al., *ChemEngineering*, **2** (2018) 36.

P - 24

多様な構造を有するシアノ架橋型金属集積体の磁気特性 Magnetic properties of cyanido-bridged metal assemblies with various structures

理学系研究科化学専攻大越研究室

中林耕二、大野拓郎、シモン ホラジー、宮本靖人、大越慎一

分子磁性体は、金属イオンや配位子などの構成素子を組み合わせることにより、多様な構造および機能を有する磁性体を構築することが可能である。当研究室では、シアノ架橋型金属集積体を研究対象として、これまでに球状、鎖状、層状、3次元網目状といった様々な形状の磁性錯体を合成し、光磁性、非線形光学効果、プロトン伝導などの機能性を見出している。本発表では、球状および鎖状、層状、3次元網目状のシアノ架橋型金属集積体の構造、磁気特性および機能性について報告する。

シアノ基で架橋された球状金属集積体 $\text{Fe}_{9-x}\text{Co}_x[\text{W}(\text{CN})_8]_6$ では、金属置換量に応じて、電荷移動相転移および遅い磁気緩和現象を示すことが明らかになった。希土類金属イオンを導入した鎖状錯体 $\{\text{Dy}(\text{3-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_4\}[\text{Co}(\text{CN})_6]$ においては、白色発光および遅い磁気緩和現象を示すことを見出した。また、層状錯体 $(\text{H}_5\text{O}_2)[\text{Co}(\text{4-bromopyridine})_2\{\text{W}(\text{CN})_8\}]$ では、光照射により電荷移動相転移が誘起され、強磁性体に変化することを明らかにしている。さらに、3次元網目状錯体 $\{\text{Co}_7[\text{W}(\text{CN})_8]_4\text{Cl}_2 \cdot 29\text{H}_2\text{O}\}$ では、直径 1.4 nm のナノチャンネルを有する強磁性体であることが明らかとなっている。このナノチャンネル強磁性体は、溶媒環境に応じて、ナノチャンネルが閉じた構造に結晶状態を保ったまま変化し、それに付随して磁気特性も変化することが明らかになった。

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

[2] S. Chorazy, J. Stanek, W. Nogas, A. Majcher, M. Rams, M. Koziel, E. Juszyńska-Gałązka, K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, B. Sieklucka and R. Podgajny, *J. Am. Chem. Soc.*, 138, 1635 (2016).

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

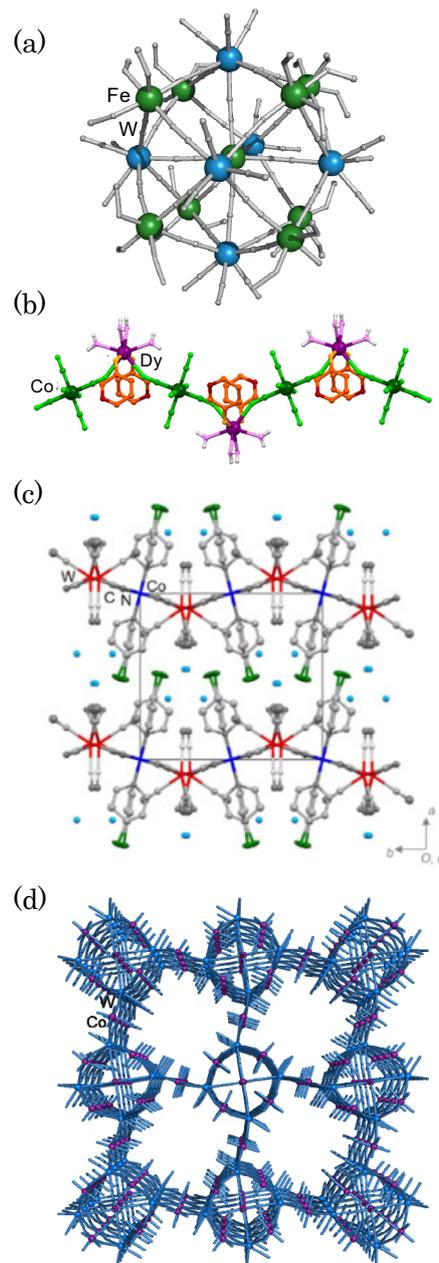


図1. 球状(a)および鎖状(b)、層状(c)、3次元網目状(d)錯体の結晶構造

2次元ヘリウム3の新奇量子スピン液体状態の解明に向けた 低発熱 NMR セルの開発

Development of an NMR cell with low heat dissipation for investigation of the novel spin liquid state in two-dimensional helium-3 films

低温センター^A, 理学系研究科物理学専攻^B
鈴木 尚将^A, 松井 朋裕^B, 村川 智^A, 福山 寛^{A,B}

ヘリウム原子はグラファイト表面上に一層ずつ吸着し、理想的な単原子層膜を形成する。核スピン $S = 1/2$ を持つ ^3He の固体では、2体だけでなく6体程度までの多体交換も大きく磁性に寄与するので、交換粒子数の偶奇によって相互作用の正負が変わり強い磁気フラストレーションが生まれる。そのため、グラファイト上2層目の2次元固体 ^3He は量子スピン液体の候補物質として提案されてきた[1]。2層HD膜でプレコートしたグラファイト上 ^3He 単原子層膜も同じようにスピン液体磁性を示すが、より大きな交換相互作用 (10 mK オーダー) を持つため、磁気基底状態を探るには適した系である。最近行われたこの系の詳細な熱容量測定では、面密度 4.74 nm^{-2} で特異な比熱の温度依存性 ($C \propto T^{2/3}$) を持つ新たなスピン液体相 (C3相) が発見された[2]。また、それ以前に行われた測定[3,4]の再解析から、C3相は $\chi \propto T^{1/3}$ という特異な帯磁率の温度依存性を持つと考えられる[2]。これらは磁気素励起の分散関係が $E \propto k^3$ という新しいタイプの量子スピン液体である可能性を示している。

C3相の磁気基底状態の解明には、スピン-スピン緩和時間(T_2)など動的物理量の情報が重要となる。電子スピン系と異なり、磁性を担う ^3He 核スピンそのもののNMR測定ができることが、この系の特色である。 T_2 は不均一磁場の影響を受けづらいスピンエコー法で測定するが、超低温ではrfパルスによる金属部品の渦電流発熱が深刻な問題となる。そこで、100 μK の温度でもスピンエコー法で T_2 測定ができる低発熱のNMR試料セルを新たに開発した(図1)。設計では、渦電流発熱を抑えるため測定周波数を約1 MHzと低く設定し、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も最適化した。また、試料の熱緩和時間を短くするためにより薄いグラファイト基板(127 μm)を使うなどの工夫を施した。

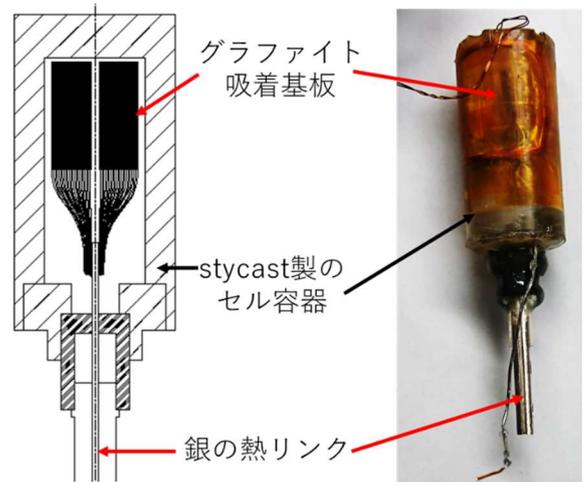


図1 NMRセルの断面図[5]と外観写真

[1] K. Ishida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 3451 (1997).

[2] 鎌田雅博, 東京大学 博士論文 (2018).

[3] R. Masutomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 025301 (2004).

[4] H. Ikegami *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5146 (2000).

[5] 小川勝之, 東京大学 修士論文 (2018).

植物ホルモン・ブラシノステロイド情報伝達における マスター転写因子の X 線結晶構造解析

Crystal structure analysis of the master transcription factor in brassinosteroid signaling

所属 農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 養生訓科学研究室

氏名 野崎 翔平、宮川 拓也、徐 玉群、中村 顕、平林 佳、
浅見 忠男、中野 雄司、田之倉 優

ブラシノステロイド (BR) は植物に普遍的に存在する植物ホルモンであり、植物において葉や茎などの器官成長促進、植物細胞分裂・伸長・分化の制御、受精促進、葉緑体制御から、植物の自然免疫やストレス耐性向上などの環境応答機構にもおよぶ多岐にわたる生理活性を有する。しかし、BR は非常に高価な化合物であり、農業や植物バイオマス増産には利用されてはいない。BR の生合成に関する研究は大部分が明らかになっているが、BR の情報を特異的に伝達する仕組みは明らかにされてはいなかった。本研究では BR の情報伝達に必要な不可欠な転写因子 (ゲノム DNA に特異的に結合し、遺伝子応答を引き起こすタンパク質の一群) である BIL1/BZR1 タンパク質に着目した。そして、この BIL1/BZR1 がゲノム上の標的 DNA を特異的に認識し多様な BR 遺伝子応答を引き起こすための仕組みを原子レベルで解明することを目的とした。

生体高分子の三次元構造を可視化する X 線結晶構造解析を用いて、高等植物間で高度に保存される BIL1/BZR1 転写因子が標的 DNA を認識する立体構造の解明を試みた。結晶化においては、結晶化促進タグとしてマルトース結合タンパク質 (MBP) を BIL1/BZR1 に融合させたキメラタンパク質を利用した。MBP と BIL1/BZR1 を繋ぐリンカーの長さ、および標的 DNA の長さ・形状・塩基配列を検討することで、高分解の X 線回折データを与える結晶の作製に成功した。この BIL1/BZR1-DNA 複合体の立体構造を詳細に解析することにより、BIL1/BZR1 の DNA 塩基配列認識機構を原子レベルで明らかにすることができた。本研究で明らかにした BIL1/BZR1 転写因子の DNA 認識特異性の分子メカニズムは、BR 応答遺伝子の多様さを生み出す仕組みそのものであるといえ、多様な生理機能を制御する BR 情報伝達の理解に大きく貢献する知見と考えられる。

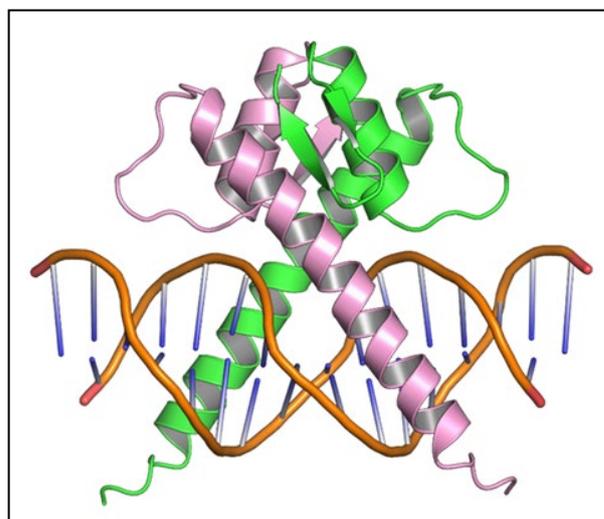


図 1. BIL1/BZR1 が標的 DNA を認識する複合体の立体構造

参考文献 Nosaki, S., Miyakawa, T., Xu, Y., Nakamura, A., Hirabayashi, K., Asami, T., Nakano, T. & Tanokura, M. (2018). Structural basis for brassinosteroid response by BIL1/BZR1. *Nature Plants* **4**, 771–776.

P-27

区分同位体標識を用いた β_2 アドレナリン受容体のリン酸化によるシグナル制御機構の解明

NMR analyses of the phosphorylation of β_2 -adrenoceptor using segmental isotopic labeling

東京大学大学院 薬学系研究科 生命物理化学教室

○白石 勇太郎、夏目 芽依、幸福 裕、今井 駿輔、中田 國夫、水越 利巳、
上田 卓見、岩井 秀夫、嶋田 一夫

【目的】 作動薬により活性化した G タンパク質共役型受容体 (GPCR) は、GPCR キナーゼ (GRK) によりその C 末端がリン酸化され、アレスチンを介したシグナルを誘起する。本研究は、リン酸化された β_2 アドレナリン受容体(β_2 AR) の構造を溶液 NMR 法により解析することで、GPCR C 末端のリン酸化がアレスチンの結合を誘起する機構を解明することを目的とした。

【方法】Protein trans-splicing (PTS) を利用して、C 末端領域のみが安定同位体標識された β_2 AR を調製し、これが作動薬依存的にリン酸化されるか否かをリン酸化アッセイにより評価した。非リン酸化状態・リン酸化状態で ^1H - ^{15}N 相関スペクトル測定、交差飽和実験を行い、GRK2 によりリン酸化される残基、リン酸化に伴う構造変化、リン酸化に伴う分子内の相互作用を解析した。

【結果・考察】 リン酸化アッセイの結果から、PTS により調製した全長 β_2 AR が、作動薬依存的にリン酸化されることを示した。 ^1H - ^{15}N 相関スペクトルの比較から、 β_2 AR C 末端のうち、膜貫通領域に近い領域は、膜貫通領域から離れた領域よりも効率的にリン酸化されることを示した。交差飽和実験の結果から、 β_2 AR C 末端のうち、膜貫通領域に近い領域がリン酸化依存的に膜貫通領域または脂質表面と結合することを示した。以上の結果から、GPCR C 末端がリン酸化に伴い膜貫通領域と相互作用することにより、膜貫通領域のキャビティーと C 末端のリン酸基が近接する結果、アレスチンがこの両者と同時に相互作用することが可能となることを提唱する。この機構は他の GPCR に対しても適用可能であり、アレスチンが多種の GPCR に対してリン酸化依存的に結合するための共通の構造基盤であると考えた[1]。

[1] Shiraishi *et al.*, *Nat. Commun.* (2018) **9**(1) 194

Isolation and characterization of the EMS rice mutant with high molybdenum in grain

**Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizers,
Department of Applied Biological Chemistry,
Graduate School of Agricultural and Life Sciences**

Prashant Kandwal, Toru Fujiwara, Takehiro Kamiya

Molybdenum is essential for plants, serving as a cofactor for enzymes such as nitrate reductase, aldehyde oxidase, sulfite oxidase and xanthine dehydrogenase. Molybdenum itself is biologically inactive until unless it bounds with pterin to form molybdenum cofactor (Moco) which serve as the active compound for Mo-enzymes. The only exception is bacterial nitrogenase, where it bounds with Fe to make FeMo-cofactor. In nature, oxyanion molybdate (MoO_4^{2-}) is the only form of Mo that is available for plants in a soil at pH higher than 4.2, therefore increases in the availability while decrease in the acidity of soil. The loss of activity of all Mo-enzymes during the deficiency of Mo leads to the altered morphology of leaves, poor development of seeds, impairment of flower production and a decrease in the overall plant growth ultimately decrease in agricultural productivity. The transporter of Mo, MOT family, has been identified in several plant species, but in rice, the transporters are still unknown.

We performed ionome screening of 3000 lines of ethyl methanesulfonate (EMS)-mutagenized rice (*Oryza sativa* c.v. Hitomebore) for 22 elements and selected mutants with altered concentration of elements. 1003_a is a mutant showing the high Mo concentration in grain. To identify the causal gene, F2 crosses between mutant and parental line were applied for next generation sequencing analysis following Mo concentration measurement. The causal gene was on chromosome 1 where no known Mo transporters are present. We are carrying out further experiments to know the function of the gene.

P-29

乳房非触知病変を摘出するための磁性マーカーシステム Development of a magnetic marker system for excising non-palpable breast lesions

大学院工学系研究科 電気系工学専攻 関野研究室¹ マトリックス細胞研究所²
隣 真一¹、桑波田 彰弘¹、日下部 守昭²、関野正樹¹

早期乳がんなどの乳房非触知病変に対しては、切除領域を最小限にとどめた低侵襲な手術を行うため、術前に超音波等のガイド下でワイヤー付きステンレスマーカーを病変へ留置し、術中に執刀医が病変の位置を確認するための手段としているが、目視やワイヤーに触れる手の感覚に頼るため、病変の位置の把握が主観的になることが課題である。そこでわれわれは、マーカーの磁気特性に着目し、執刀医が磁気プローブによる測定に基づいてマーカーの位置を客観的に把握する手法を、肺がん手術用ガイディングマーカー[1]を乳がん手術用に転用した臨床試験を併用して研究している。

本研究では、医療機器で用いられるオーテスナイト系ステンレス材をロッド加工し、DC 磁気特性を、**SQUID** にて評価した。

その結果、ロッドの軸方向の磁化は径方向に比較し比透磁率比で3~4倍大きいこと、残留磁化はロッド径の二乗にほぼ比例することなどがわかった。

得られた結果は今後の早期乳がん手術用マーカーの開発に活用してゆく予定である。

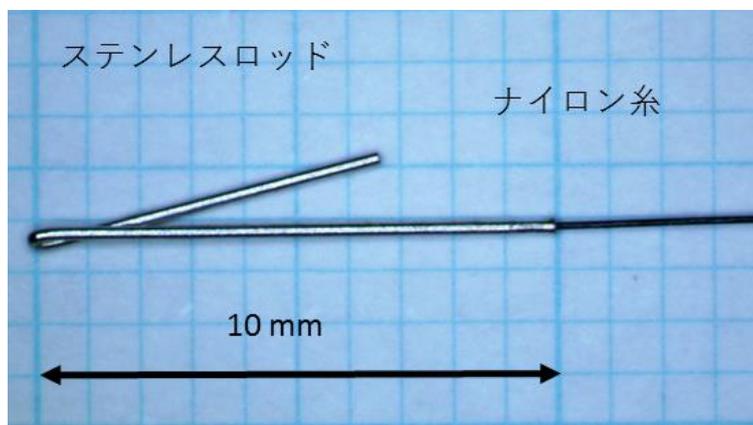


図1. ガイディングマーカーシステム
φ0.28 L = 17 mm のステンレスロッドの先端が折り返し加工されており、φ0.5 L = 5 mm のロッドと同体積

表1. オーテスナイト系ステンレスロッドの磁化特性

ロッド直径(mm)	SUS302				SUS304			
	0.4		0.5		0.4		0.5	
ロッド長 (mm)	5							
ロッド長の方向	B //	B ⊥	B //	B ⊥	B //	B ⊥	B //	B ⊥
比透磁率	8.81	2.66	8.00	2.58	11.45	2.90	10.93	2.91
磁化特性指数(目標>300)	46.2	9.8	64.6	14.5	61.7	11.2	91.6	17.7
残留磁化 (x 10 ⁻⁵ Am ²)	17.4	1.08	22.7	1.54	18.9	0.864	23.8	14.4

[1]http://www.info.pmda.go.jp/ygo/pack/630065/20800BZZ00459000_A_01_05/

P-30

新規 NMR 測定法を用いた国産蜂蜜の包括的成分分析と品質評価 Rapid and Comprehensive Quantitative Analysis of Organic Compounds in Japanese Honey

農学部 応用生命科学課程生命化学・工学専修 食品生物構造学研究室

瀧口 沙希、伊藤 光洋、盧 翌、片山 幸江、岡本 研、鈴木 道生、降旗 一夫、永田 宏次

1. 背景と目的

蜂蜜は乾燥重量の 95%が糖類であり、その他微量のアミノ酸、有機酸などからなる。その成分組成は蜜源植物や産地の違いに応じて異なるが、見た目での判別が難しく、偽装が横行している。NMR による成分分析は迅速に多成分を観測できるという長所があるが、これを食品分析に応用する際には、有限のダイナミックレンジにより微量成分の検出が困難であるという問題がある。2014 年に降旗らにより開発された Broad Band WET (BB-WET) 法は主要成分の NMR シグナルを抑えることで、微量成分を検出可能にする。本研究では、BB-WET 法を蜂蜜の成分分析に適用することにより、蜂蜜の成分に関する新たな知見の取得と鑑別方法の確立を目的としている。

2. 蜂蜜の迅速かつ包括的な分析への BB-WET 法の適用

国産蜂蜜 7 種類と、産地と価格の異なるあかしあ蜂蜜 8 種類を対象に NMR 分析を行った。BB-WET 法の適用により、主要成分（糖類）と微量成分（アミノ酸、有機酸等）の同時検出が可能になり、スペクトル上で品種間の違いを見出した。NMR スペクトルの解析と添加実験により 32 成分を同定し、その積分値から 21 成分を定量した。蜜源植物の特徴を反映した各蜂蜜の微量成分組成を決定した。

3. NMR による蜂蜜の各種鑑別モデルの構築

上記 15 種類の蜂蜜の NMR データを、多変量解析法によりさらに分析した。糖類の情報を用いた主成分分析 (PCA) では、国産蜂蜜 7 種類の分類は困難であったが、微量成分情報を用いることにより 7 種類すべての分類に成功した。産地と価格が異なるあかしあ蜂蜜についても同様に PCA を行った結果、産地が同じであっても価格の違いに応じた分類に成功し、さらに、部分最小二乗法判別分析 (OPLS-DA) より価格のマーカ成分を推定し、より精度の高い鑑別モデルの構築に成功した。

4. NMR による保存に伴う成分の経時変化の追跡

25°C と 37°C において新鮮な百花蜂蜜を保存し、半年間の成分変化を追跡した。両温度において、初めの 1 ヶ月でスクロースとマルトースが大きく減少した。これは、蜂蜜中の酵素による二糖の構成単糖への分解によると考えられる。37°C では、劣化のマーカ成分であるヒドロキシメチルフルフラール (HMF) が 2 ヶ月目から検出され、その後経時的に増加した。また、芳香族アミノ酸の減少が観測された。

5. 総括

上記の成果により、単一成分の分析に基づく鑑別の信頼性の低さ、NMR の微量成分の検出の難しさ、前処理による一部成分の損失といった先行研究の問題点を解決することができた。この手法により、信頼性の高い鑑別が可能となり、蜂蜜の公正な取引の実現に繋がるだけでなく、各蜂蜜の成分組成の違いに基づいた蜂蜜の特徴づけやブランディングに役立つと期待される。

P-31

超低温で用いるヘリウム3融解圧力温度計の開発 Development of Helium 3 melting curve thermometer operated 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

超流動ヘリウム3B相はトポロジカル超流体であり、界面ではそのエネルギーギャップが閉じることが理論的に示されている。我々の研究グループではヘリウム3B相の表面状態を解明することを目的としている。

ヘリウム3を研究する上で、温度を正確に測定することは非常に重要である。しかしながら、超低温における温度測定で、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、界面熱抵抗も増加するため、被測物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。[1]

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融解圧力温度計(MCT)がある。ヘリウム3は、低温においても固体の核スピンの自由度が残るために、図1. に示す通り、融解圧力が低温でも大きく変化する。MCTは、ヘリウム3の融解圧力を測定し、既存の融解圧曲線を用いて温度を導く二次温度計である。MCTは圧力を測定するため自己発熱が小さく、高い分解能と再現性をもち、測温域 $1 \leq T \leq 700$ mK で高精度な温度測定ができる。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、それ自身が校正可能であるという点でも優れており、この温度範囲において理想的な温度計であると言える。

本発表では、MCTを最良の条件で使用するための設計、MCTセルの製作、温度定点による校正、温度の解析について述べる。

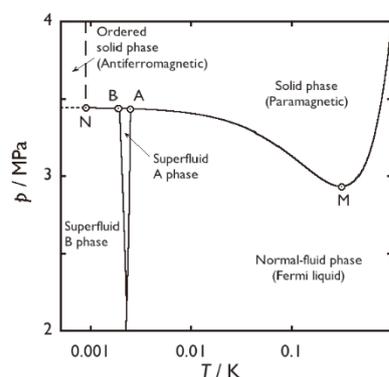


図1. ヘリウム3の相図

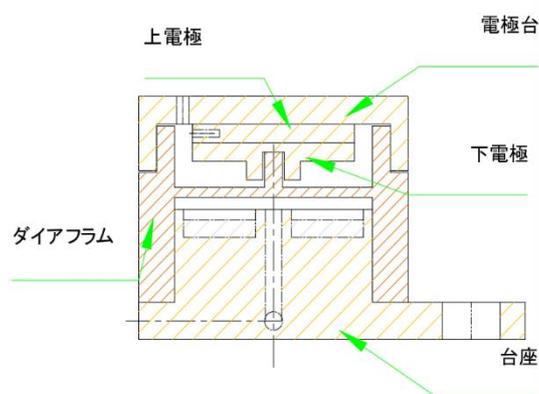


図2. MCTセルの設計

[1] 福山寛, 固体物理 vol. 30(1995)

P-32

The cyano-bridged metal assemblies revealing white light emission and acting as a temperature sensor based on its ratiometric and colorimetric nature

(¹Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo, ²Faculty of Chemistry, Jagiellonian University, ³Rigaku Corporation) Kunal Kumar,¹ Szymon Chorazy,^{1,2} Koji Nakabyashi,¹ Hiroyasu Sato,³ Barbara Sieklucka,² Shin-ichi Ohkoshi¹

Synthesis of cyano-bridged material with novel properties including light-induced spin crossover ferromagnet¹ and polarization switchable photomagnet² has attracted the attention of scientists all over the world. However, temperature sensing behavior of such complexes has been barely investigated unlike metal organic frameworks. Therefore in this work, we prepared cyanido-bridged bimetallic $\{[\text{Tb}^{\text{III}}(4\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (**A**) (4-OHpy = 4-hydroxypyridine), and a trimetallic $\{[\text{Tb}^{\text{III}}_{0.5}\text{Dy}^{\text{III}}_{0.5}(4\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (**B**) layered complexes **A** and **B** which can act as a colorimetric as well as ratiometric thermometer as shown in figure 1.³ They exhibit room temperature visible various photoluminescence colour ranging from white to green via yellow and orange light emission, tunable by the applied lanthanide ions, and switchable by excitation light through selective excitation of green emissive Tb^{III} , yellow emissive Dy^{III} , blue luminescent 4-OHpy, and red luminescent $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$ components. Emission properties of **A** and **B**, including the energy transfer from organic ligands and cyanide complexes towards lanthanide ions, are strongly modulated by change of temperature in the broad 120 – 300 K range. Furthermore, **B** can easily detect the temperature based on the ratio between the intensities of emission lines coming from Tb^{III} and Dy^{III} that makes it a promising candidate for the ratiometric thermometer (Figure 1). The sensitivity and uncertainty for the temperature detection were evaluated in the measurement range.

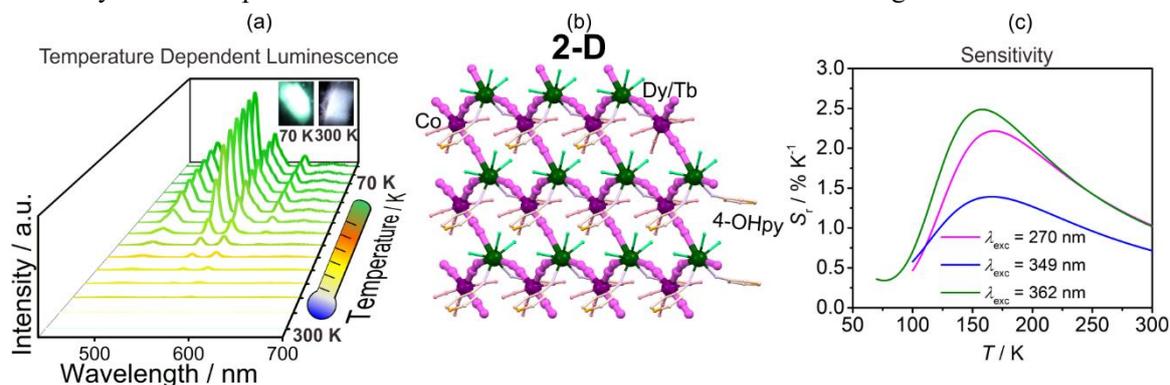


Figure 1. The representative fragment of cyanide bridged chain of all compounds, emission color of compounds **A-H** and the frequency dependence of out of plane component (χ''_M) of ac magnetic susceptibility for compound **B**.

1) I. S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, H. Tokoro, *Nature Chemistry* 2011, 3, 564. 2) S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, and H. Tokoro, *Nature Photonics* 2014, 8, 65. 3) K. Kumar, S. Chorazy, K. Nakabyashi, H. Sato, B. Sieklucka, S. Ohkoshi *J. Mater. Chem. C* 2018, 6, 8372.

超伝導転移端センサによる重粒子線カロリメトリ Calorimetry of Heavy Charged Particle by superconducting transition edge sensor

所属 システム創成学科（原子力専攻/原子力国際専攻） 大野研究室
氏名 スミス ライアン、 三浦 義隆、 大野 雅史、 高橋 浩之

重粒子線絶対線量評価の高精度化は、線量集中性に優れた高い生物効果が得られる粒子線がん治療の治療計画において、体内の吸収線量分布と生物効果を予測する計算精度の向上をもたらすものと期待される。さらに重粒子線の生物学的効果のメカニズムを把握するには、生体内の粒子線飛跡に沿った電離、2次電子放出や励起状態の把握、即ち細胞サイズ以下の極めて極小領域単位での空間的なエネルギー分布の評価が鍵を握るものと考えられる。そこで本研究では、極低温カロリメータを導入し、個々の重粒子が持つエネルギーの精密な計測の実証を目指している。

比熱が極小化する極低温下において入射放射線のエネルギーを熱に変換し、生じる温度上昇を常伝導/超伝導転移領域での急峻な温度抵抗変化を用いて検出する超伝導転移端センサ (TES: Transition Edge Sensor) は究めて高い精度を有するエネルギースペクトロメータである。また TES は検出素子構造において重粒子吸収部と超伝導薄膜温度センサ部を分けることが可能であり、したがって半導体のような放射線損傷によるダメージを抑制し、優れた耐久性が期待される。本実験課題では、重粒子線ビームにおける個々の粒子の精密なエネルギー検出することを目指し、超伝導 Ir/Au 薄膜温度センサ (超伝導転移温度 $T_c=140\text{mK}$) の上に金バンプポストを介してバルクのズズやタンタルから成る重粒子線吸収体部 ($0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$) を搭載した検出素子を開発して[1]、これを寒剤フリー希釈冷凍機に組み込んだ検出システムを構築する。

HIMAC の PH2 実験ポートに TES 冷却用寒剤フリー希釈冷凍機システムを持ち込み、He および C イオン入射による TES の信号応答検出に成功した。He ビーム (100MeV/u) をアルミニウム製減衰板に導き、エネルギーを適度に減衰させた後、冷凍機内に設置した TES 検出器の厚さ 0.3mm のズズ製重粒子線吸収体に垂直に照射させた。TES で観察された重粒子の入射応答パルスは先端部が平らにつぶれた飽和波形を示しており (下図参照)、これは粒子入射に伴う温度上昇が TES の超伝導転移領域を飛び越えて、一時的に完全に常伝導状態に移行していることを表している。このような飽和信号応答が得られる場合、電流波形の全積分あるいは、飽和している時間長さにより、その入射エネルギーを特定しうることが実証されており、本実験においても入射応答の飽和時間が入射エネルギー量に対応しているものと考えて、He ビーム (100MeV/u) の入射応答におけるアルミ減衰板厚さ毎の飽和応答時間の分布をとったところ、アルミ減衰板の厚さと TES の検出エネルギーにある程度の相関が認められ、ゆえに TES の信号応答の飽和時間を計測することにより入射粒子のエネルギーを検出できるものと考えられる。

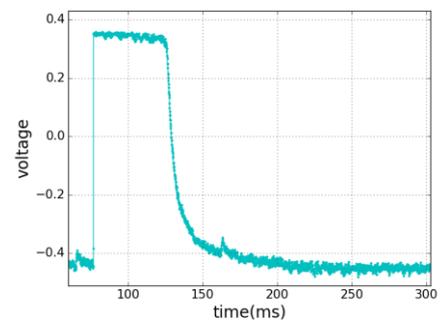


図. TES による He イオン入射応答波形

[1] M. Ohno, et.al., IEICE TRANSACTIONS on ELECTRONICS, Invited Paper, Vol.E100C No.3 pp.283-290

**高い磁気相転移温度を示す
ペンタシアニドニトロシルモリブデン錯体
Pentacyanidonitrosylmolybdate-based magnet
showing a high magnetic transition temperature**

理学系研究科化学専攻大越研究室
中川幸祐、小峯誠也、井元健太、大越慎一

シアノ架橋型金属錯体は様々な磁気機能性を有する磁性体を合成できることから、注目を集めてきており、当研究室はこれまでに、イオン伝導性磁性体[1]や湿度応答磁性体[2]など新規機能性を有するシアノ架橋型金属錯体磁性体を見出し報告してきている。中でも、高い相転移温度を示す分子磁性体を合成することは、たいへん興味深い。一方、ペンタシアニドニトロシル錯体は、光に応答し得るニトロシル基を持つことから、魅力的な構築素子である。特に中心金属が Mo^I であるペンタシアニドニトロシルモリブデン酸イオンは、モリブデンイオンの 4d 軌道の広がりから磁気特性の点でも魅力的である。本研究では、ペンタシアニドニトロシルモリブデン酸イオンを用いた新規金属錯体 $\text{K}_{0.82}\text{V}_{1.06}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})]\cdot 3.8\text{H}_2\text{O}$ (**1**) の合成およびその磁気機能性について報告する[3]。

錯体 **1** は、アルゴン雰囲気中、反応系を -8°C に保持した環境下で、 $\text{K}_4[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の脱酸素水溶液を VCl_3 の脱酸素水溶液と混合することによって得た。組成分析の結果から、錯体 **1** は $\text{K}_{0.82}\text{V}_{1.06}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})]\cdot 3.8\text{H}_2\text{O}$ という組成であることが明らかとなった。また赤外分光スペクトルを測定した結果、シアノ基およびニトロシル基の伸縮振動に帰属されるピークが観測された。このピークから、バナジウムイオンおよびモリブデンイオンの価数が決定された。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、錯体 **1** の磁気特性を測定したところ、外部磁場 10 Oe における磁場中冷却磁化曲線において、200 K 以下で自発磁化が観測された。したがって、本錯体 **1** は磁気相転移温度が 200 K であることが明らかとなった (図 1)。錯体 **1** が、200 K という高い磁気相転移温度を示したのは、モリブデンイオンの広がった 4d 軌道によって、シアノ基を介した超交換相互作用が強くはたらいたためであると考えられる。

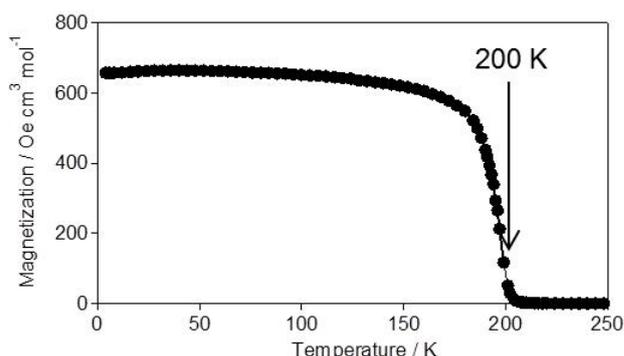


図 1 錯体 **1** の磁場中冷却磁化曲線

- [1] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.* 132, 6620 (2010). [2] S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, K. Hashimoto, *Nature Mater.* 3, 857 (2004). [3] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, R. Yamada, M. Takemura, N. Ozaki, K. Tomono, K. Imoto, K. Nakabayashi, H. Tokoro, T. Taguchi, K. Okamoto, T. Ogino, M. Komine, *Inorg. Chem. Commun.* 91, 20 (2018).

小型超伝導マグネットの開発

Development of a Compact Superconducting Magnet

低温センター^A, 理学系研究科物理学専攻^B

瀧本 翔平^{A,B}, 戸田 亮^A, 村川 智^{A,B}, 福山 寛^{A,B}

近年、トポロジカルな物質に関する研究や衛星に搭載される X 線検出器の冷却など、様々な分野において低温環境下での実験が盛んに行われている。市販の希釈冷凍機を用いることで 20 mK 程度の環境は実現できるが、1 mK 以下の温度を得るには、核断熱消磁冷凍機 (NDR) を製作する必要がある。また、一般的に使われる銅核ステージを用いる場合、8 T もの磁場を印加するための大型の超伝導マグネットを運用できる、高さ方向に十分な長さを確保できる実験室が必要であり、冷凍機の取り回しも容易ではない。そこで我々は、既存の希釈冷凍機にそのまま搭載できるほど小型で、かつ 1 mK 程度以下までの任意の温度を連続的に実現できる小型連続核断熱消磁冷凍機 (CNDR) の開発を行っている[1]。

CNDR では、核ステージ物質として銅の代わりに増強核磁性体である PrNi₅ を用いており、PrNi₅ に磁場を印加すると、超微細相互作用により Pr 核に実効的に 12 倍の磁場がかかるため、1.2 T 程度の弱磁場でも銅と同等の冷却力を得ることができる。CNDR は 2 つの PrNi₅ 核ステージを 2 つの熱スイッチで直列接続した構造になっている (図 1)。核ステージに磁場を印加するための超伝導マグネット ($\phi \sim 40$, $L \sim 160$) は NbTi 超伝導線を用いており、また高透磁率材である FeCoV のシールドで覆うことで磁場遮蔽している。数値シミュレーションにより、6 A の電流を流すことで、超伝導マグネットの中心に 1.3 T の磁場が発生し、かつ磁気シールドの外では速やかに 1 mT 以下に減衰することがわかった。この結果をもとに超伝導マグネットを設計・製作し、磁場分布測定を行ったところ、シミュレーションに一致する結果が得られた (図 2)。また、超伝導線の磁化曲線はヒステリシスをもつため、磁場を増減させるとヒステリシス損失による発熱が発生する。この発熱量についても発表する予定である。

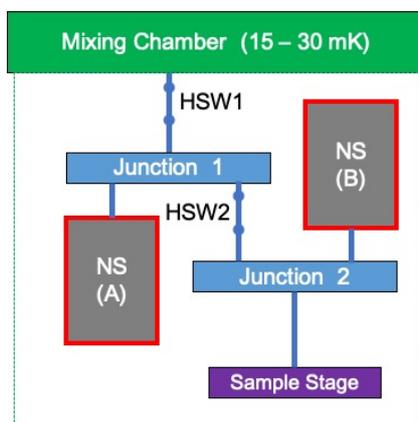


図 1 : CNDR の模式図

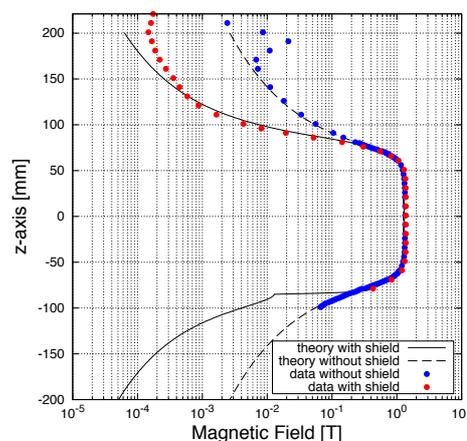


図 2 : 超伝導マグネットの磁場分布

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

Dehydration driven reversible photoluminescent SMM property in three-dimensional cyanido-bridged Dy-Co network

Yue Xin,^A Junhao Wang,^A Szymon Chorazy,^{A,B} Koji Nakabayashi,^A and Shin-ichi Ohkoshi^A
^AGraduate School of Science, University of Tokyo; ^BFaculty of Chemistry, Jagiellonian University

Cyanido-bridged bimetal assemblies have aroused great scientific attention as promising candidates for developing multifunctionality like multiferroicity, humidity-sensitive magnetism, photomagnetism, magnetization-induced second harmonic generation and photoluminescent single-molecule magnet.¹ The introduction of lanthanide(III) ions into cyanido-bridged network is beneficial to prompting photoluminescent single-molecule magnet behavior, contributing from the extraordinary properties of lanthanide in both luminescence and magnetism.² Furthermore, concerning the durability relied on the inherent stability in the three-dimensional coordination networks, it is worthwhile to search for switchability of magnetic and luminescent properties to external stimuli in such lanthanide(III) inserted three-dimensional polycyanidometalates.

In this regard, our group presents the three-dimensional cyanido-bridged bimetallic network material, Dy^{III}[Co^{III}(CN)₆]₂·4H₂O (**1**), with its dehydrated phase Dy^{III}[Co^{III}(CN)₆]₂ (**1deh**). Unlike the absence of SMM property in **1**, significant magnetic anisotropy after modification of coordination structure driven by dehydration leads to a zero-field SMM behavior of the dehydrated phase **1deh**, showing slow magnetic relaxation with an anisotropic thermal energy barrier of 51.7(5) K with $\tau_0 = 2.47 \times 10^{-6}$ s based on magnetic study from 5 K to 18 K. In addition, color-tunable photoluminescent emission between nearly white (**1**) and light yellow (**1deh**) was also observed in respond to dehydration/rehydration process. The intensity of Dy-centered photoluminescent peaks, as well as fine structure revealed by photoluminescence study at 3.5 K, can be reversibly altered with dehydration/rehydration process.

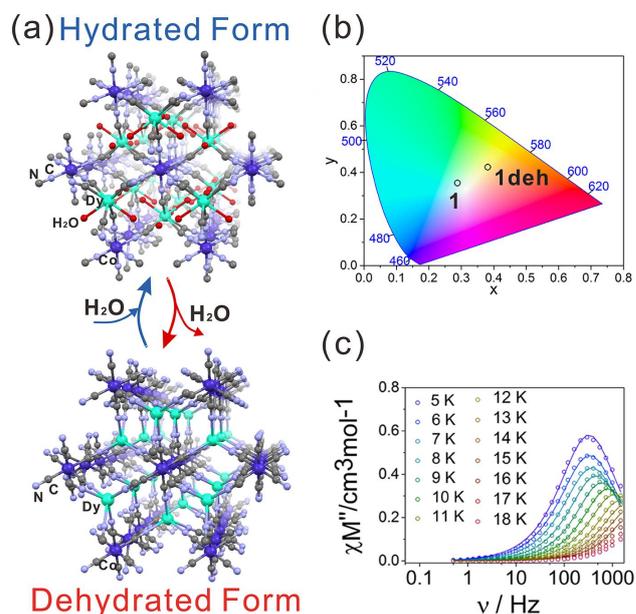


Fig. 1. The 3D network structures of **1** and **1deh** with illustration on magnetic and luminescent properties.

[1] a) S. Ohkoshi et al., *Dalton Trans.*, 2011, 40, 6825-6833. b) S. Ohkoshi et al. *Nature Photon.*, 2014, 8, 65.
 [2] S. Chorazy and S. Ohkoshi et al., *Chem. Eur. J.*, 2016, 22, 7371.

ファンデルワールス強磁性体の 光電子分光と X 線磁気円二色性による研究

Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of van der Waals ferromagnets

東大理^A, ラトガス大^B, 高エネ研^C, 原研^D, 広島大^E, ソウル大^F, 東工大^G
 鈴木 雅弘^A, Bin Gao^B, Alemayehu Solomon^B, 芝田 悟朗^A, 坂本 祥哉^A, 奥石 佳佑^A,
 野中 洋亮^A, 池田 啓祐^A, 池 震棟^A, 中田 勝^A, 萩原 健太^A, 林 春^A, 万 宇軒^A, 堀場 弘司^G,
 小野 寛太^C, 組頭 広志^C, 竹田 幸治^D, 田中 新^E, Sungmo Kang^F, Seungjin Kang^F, J. Yu^F,
 小林 正起^G, Sang-Wook Cheong^B, 藤森 淳^A

各層が van der Waals 力で結合した二次元的な結晶構造を持つ van der Waals 強磁性体はスピントロニクスで近年注目を集めつつあり[1]、その物性が盛んに研究されている。その一つである $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ (CGT) は Curie 温度が 61 K の強磁性半導体である[2,3]。今回我々は、電子構造を調べることを目的として、CGT などの van der Waals 強磁性体に関して、角度分解光電子分光 (ARPES)、および X 線磁気円二色性 (XMCD) の測定を行った。

図 1 には CGT の ARPES スペクトルを運動量方向に積分したスペクトルを示す。実験で得られたスペクトルを再現するためにはクーロン相互作用 U_{eff} を考慮する必要がある、この値は $U_{\text{eff}}=1.1$ eV であると見積もられた。理論計算は CGT の強磁性発現にはクーロン相互作用の大きさが影響することを示唆しており、実験結果を再現するために見積もられた U_{eff} は面内では強磁性を発現する値、面間では強磁性と反強磁性どちらも取りうる値となった。この結果は、 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ における強磁性発現機構に対するクーロン相互作用の重要性を示す。

CGT の XMCD スペクトルに関しては、印加する磁場の方向を変えた場合に形状に違いが見られ、クラスター計算の結果は、 CrTe_6 クラスターの歪みがこの違いを生んでいる可能性があることを示唆した。しかし、クラスター計算では磁気異方性を説明できず、クラスター間での相互作用などを考慮する必要があることを示唆する結果を得た。

さらに、類似物質である Fe_3GeTe_2 についても磁場方向を変化させた XMCD の測定をおこなったので、それらについても報告をする。

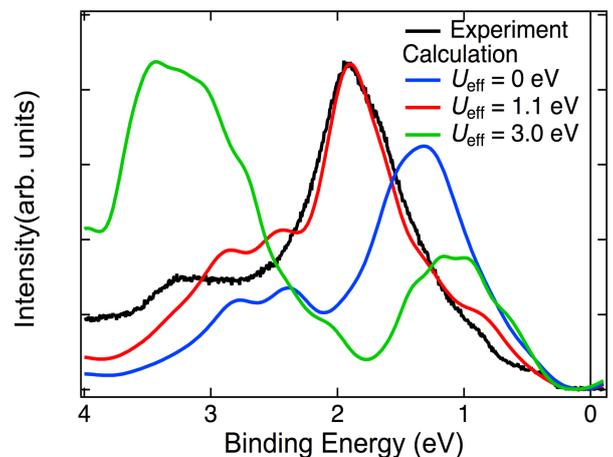


図 1. CGT の積分スペクトルと各電子軌道の光電離断面積を考慮した DFT+U 計算

[1] N. Smith, Nature **546**, 216 (2017).

[2] X. Zhang et al., Jpn. J. Appl. Phys **55**,033001 (2016)

[3] C. Gong et al., Nature **546**, 265 (2017)

MnGe 単結晶における ヘッジホッグ格子の変形と創発磁気現象 Transformation of hedgehog-lattice and emergent magnetic phenomena in MnGe single crystal

東京大学工学系研究科物理工学専攻十倉・金澤研究室¹、理化学研究所 CEMS²

¹北折 暁、¹金澤 直也、^{1, 2}十倉 好紀

カイラルな結晶構造を有する磁性体である MnGe では、3つの互いに直交するらせん構造の重ね合わせである $3q$ 状態が形成される(図 1)。これはヘッジホッグ構造と反ヘッジホッグ構造が周期的に配列した格子であり、トポロジカルに保護された磁気構造となっている。

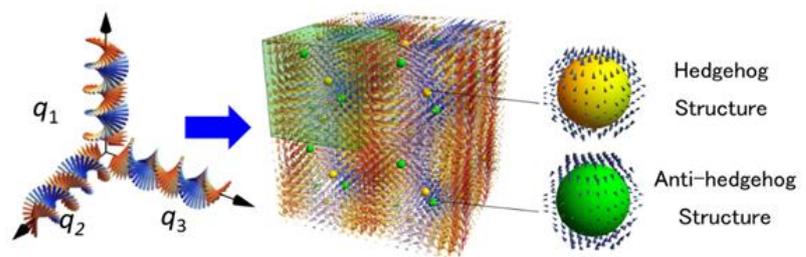


図 1. ヘッジホッグ格子と創発磁気モノポール

一般にトポロジカルなスピン配列は伝導電子系に対して創発磁場と呼ばれる仮想的な磁場効果を与えるが、ヘッジホッグ構造・反ヘッジホッグ構造は創発磁場の湧き出しと吸い込みに対応するモノポールおよび反モノポールとして振舞う[1]。

創発磁場に由来する創発磁気現象は大きな磁場依存性を示すが、これはヘッジホッグ構造が磁場に対して複雑に変位することに起因している。トポロジーの制約から、ヘッジホッグ構造は連続変形によってトポロジカルに自明な構造に転移することができない。そのため外部磁場の印加で強磁性秩序に転移する過程でモノポール・反モノポールの対消滅といったトポロジカル相転移を必要とする。言い換えると、対消滅のためにヘッジホッグの変位を伴った磁気格子の変形や崩壊が必ず生じる。多結晶試料を用いたこれまでの研究では、磁場印加によるヘッジホッグ格子の変形過程の詳細を明らかにすることはできなかった。

発表者は高圧フラックス法を用いることによって初めて MnGe の単結晶育成に成功した。さらに集束イオンビーム (FIB) 加工を用いたデバイス化、そしてその電気伝導測定によってヘッジホッグ格子の変形に伴う創発磁場分布の変化を捉えることに成功した。その結果、創発磁場に起因するホール抵抗 (トポロジカルホール抵抗) に複雑なピーク構造や結晶方位依存性が存在することが明らかになった。本発表ではトポロジカルな磁気構造であるヘッジホッグ構造のダイナミクスを議論し、創発磁気モノポール操作の端緒を開きたい。

[1] N. Kanazawa et al., Nat. Commun. (2016)

P-39

室温強磁性半導体(Ga,Fe)Sb ヘテロ構造における巨大磁気抵抗効果 Giant magnetoresistance in ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb heterostructures with high Curie temperature

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻田中大矢研究室
高瀬健吾、Le Duc Anh、瀧口耕介、Nguyen Thanh Tu、田中雅明

Ferromagnetic semiconductors (FMSs) which show both ferromagnetic and semiconducting characteristics are promising materials for future low-power devices. To realize practical spin devices, both p-type and n-type FMSs which have high Curie temperature (T_C) are required, but (In,Mn)As or (Ga,Mn)As, which have been vigorously studied, show only p-type with $T_C \approx 200$ K [1]. On the other hand, we have successfully grown Fe-doped FMSs; p-type (Ga,Fe)Sb with $T_C \approx 340$ K [2] and n-type (In,Fe)Sb with $T_C \approx 335$ K [3], which are promising for devices operating at room temperature. To make practical devices, we need to realize magnetoresistance effects with these Fe-doped FMSs.

In this work, we demonstrate the giant magnetoresistance (GMR) effect in spin valve structures using high- T_C (Ga,Fe)Sb. As shown in Fig. 1(a), the samples examined here consist of (Ga_{0.75}Fe_{0.25})Sb (40 nm, $T_C > 320$ K)/ InAs (thickness $t = 0, 3, 6, 9$ nm)/ (Ga_{0.8}Fe_{0.2})Sb (40 nm, $T_C > 320$ K) grown by low temperature molecular beam epitaxy (LT-MBE). In these structures, current is expected to flow mainly in InAs since the (Ga,Fe)Sb layers are insulating and have much higher resistance than the n⁺-type InAs layer especially at low temperature. Figure 1(b) shows the magnetoresistance of one of these spin-valve structures with $t = 3$ nm, measured at 3.7 K with a magnetic field \mathbf{H} applied perpendicular to the film plane. Clear GMR of $\sim 2\%$ with open minor loop is observed, whose peaks ($\approx \pm 0.1$ T) are consistent with the coercive forces of the magnetizations of the (Ga,Fe)Sb layers obtained with superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometry. We found that the GMR ratio increases (from 0.03 to 1.28%) with decreasing t (from 9 to 3 nm), which is caused by the enhancement of scattering at the InAs/(Ga,Fe)Sb interfaces. Interestingly, the MR at high magnetic field changes sign from positive to negative with increasing t , whose origin will be discussed in the meeting. This first demonstration of the spin-valve (GMR) effect in Fe-doped FMS heterostructures paves the way for device applications of these promising high- T_C FMSs.

Acknowledgements: This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (Nos. 17H04922 and 18H05345), CREST of JST (No. JPMICR1777), and the Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

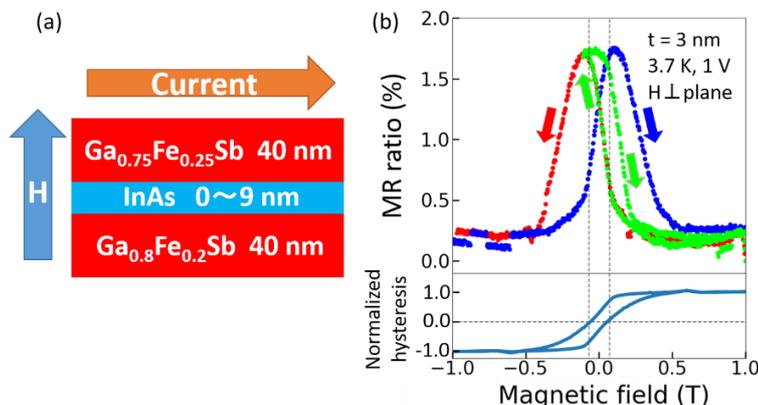


FIG. 1. (a) Sample structure. (b) Magnetoresistance of a (Ga_{0.75}Fe_{0.25})Sb (40 nm)/ InAs ($t = 3$ nm)/ (Ga_{0.8}Fe_{0.2})Sb (40 nm) structure measured at 3.4 K (upper panel) and the normalized hysteresis measured with SQUID in the same sample (lower panel). A magnetic field \mathbf{H} is applied perpendicular to the film plane. In (b), the red and blue curves are the major loop with magnetic-field-sweep directions of + to - and - to +, respectively. The green curve is the minor loop.

References: [1] L. Chen *et al*, Nano Lett. **11**, 2584 (2011). [2] N. T. Tu *et al*, Appl. Phys. Lett. **108**, (2016). [3] N. T. Tu *et al*, Appl. Phys. Express **11**, (2018).

P-40

鉄(II)およびオクタシアノニオブ(IV)酸イオンを構築素子とした二元金属錯体におけるサイト選択的スピנקロスオーバー現象

Iron(II)-octacyanonioabate(IV)-based bimetal assembly exhibiting site-selective two-step spin-crossover

理学系研究科 化学専攻 物性化学研究室

川畑慎太郎 大野拓郎 井元健太 シモンホーラジー 中林耕二 大越慎一

機能性分子磁性体が分子磁性分野で精力的に研究されている。これらは光、熱、圧力といった外部刺激によって磁性を変化させることが出来る点の特徴である。機能性の付与には、電荷移動相転移[1]やスピנקロスオーバー現象[2]を発現することが重要である。この観点から、鉄(II)イオンはスピנקロスオーバー現象によって常磁性の高スピン状態 (HS, $S = 2$)と反磁性の低スピン状態(LS, $S = 0$)間を交差できるため、有用な構築素子である。本研究では、サイト選択的2段階スピנקロスオーバー現象を示す鉄(II)-ニオブ(IV)二元金属錯体を新たに合成したので、その物性を報告する。

目的の化合物は、 $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}^{\text{II}}(\text{SO}_4)_2$ 、L-アスコルビン酸ナトリウム、3-アセトキシピリジンを溶かした水溶液に、 $\text{K}_4[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]$ を溶かした水溶液を30°Cで攪拌しながら混合させることによって得られた。赤外吸収スペクトルと元素分析の結果から、化合物の組成式は $\text{Fe}^{\text{II}}_2[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8](3\text{-OAcpy})_5(3\text{-OHpy})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (**FeNb**) (3-OAcpy = 3-アセトキシピリジン、3-OHpy = 3-ヒドロキシピリジン)と決定された。

また粉末X線回折(PXRD)パターンのリートベルト解析により、**FeNb**は三方晶の空間群 $R\bar{3}c$ に属し、鉄(II)イオンは非等価な3つのサイト、Fe1、Fe2、Fe3を占めていることが示唆された(図1)。磁化測定より得られた $\chi_M T$ vs. T プロットにおいて、(χ_M : モル磁化率、 T : 測定温度)、 $\chi_M T$ 値は320 K ($6.80 \text{ K cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)から20 K ($4.08 \text{ K cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)にかけて2段階で緩やかに減少し、約180 K ($5.66 \text{ K cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)に平坦な領域が見られた。この結果は鉄(II)イオンの2段階スピנקロスオーバー現象を示唆しており、スピン転移温度は280(5) Kと75(5) K(図2)と推定された。さらにPXRDパターンの温度依存測定により、高温側のスピン転移はFe3サイトの鉄(II)イオン、低温側のスピン転移はFe2サイトの鉄(II)イオンによるものであることが明らかとなった。

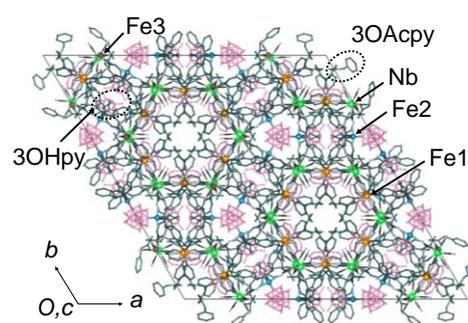


図1. **FeNb**のc軸方向からの結晶構造。

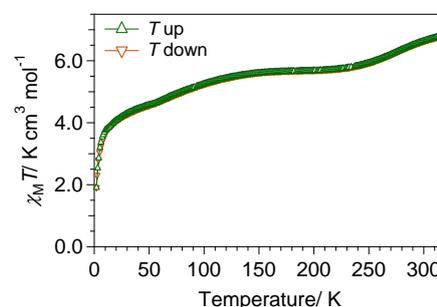


図2. **FeNb**の $\chi_M T$ vs. T プロット。

[1] N. Ozaki, H. Tokoro, Y. Hamada, A. Namai, T. Matsuda, S. Kaneko, S. Ohkoshi, *Adv. Funkt. Mater.* 2012, 22, 2089. [2] S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, H. Tokoro, *Nature Chem.* 2011, 3, 564.

Magnetic anisotropy switching in heavily-Fe-doped high-Curie-temperature ferromagnetic semiconductor $(\text{Ga}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})\text{Sb}$ with a critical thickness

Shobhit Goel,¹ Le Duc Anh,¹ Nguyen Thanh Tu,¹ Shinobu Ohya^{1,2} and Masaaki Tanaka^{1,2}

¹Department of Electrical Engineering and Information Systems, ²CSRN, The University of Tokyo

Magnetic anisotropy (MA) plays an important role in determining the magnetization direction of ferromagnetic materials in spintronics devices. For Mn-doped III-V-based ferromagnetic semiconductor (FMS) $(\text{Ga,Mn})\text{As}$, the thickness dependence of the uniaxial anisotropy fields has been well investigated [1]. However, due to the low Curie temperature ($T_C < 200\text{K}$), $(\text{Ga,Mn})\text{As}$ is not suitable for practical device applications. To overcome this problem, recently we have successfully grown Fe-doped FMS $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$, which shows a high $T_C (> 300\text{K})$ when the Fe concentration is higher than 23% [2]. Therefore, this new material is a good candidate for device applications operating at room temperature.

Recently, we investigated the MA of $(\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ ($x = 0.2$, thickness $d = 15\text{nm}$) and found that in-plane magnetic anisotropy (IMA) is dominant due to the large shape anisotropy [3]. In this work, to control the MA, we have investigated the thickness dependence of the MA of $(\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ ($x = 0.3$, $d = 20, 30, 40,$ and 55nm) grown by low-temperature molecular-beam epitaxy (LT-MBE) on AlSb using semi-insulating $\text{GaAs}(001)$ substrates. Figure 1(a) shows the schematic sample structure of $\text{Ga}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{Sb}$ ($d = 40\text{nm}$). All the samples showed $T_C > 320\text{K}$. We estimated the MA constants by measuring ferromagnetic resonance (FMR) and magnetization using a superconducting quantum interference device (SQUID) at room temperature. Fig. 1(b) shows the FMR spectra measured at 300 K for the samples with $d = 20\text{nm}$ and 55nm , respectively, when the magnetic field H is applied along the in-plane $[110]$ and the perpendicular $[001]$ directions. Figure 1(c) shows the resonance field as a function of the out-of-plane direction of H in the $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ films with various d . The same FMR measurements were performed applying H along various directions in the film plane. By fitting to the H -angle dependence of the resonance field combining with the value of $\mu_0 M_S$ measured by SQUID, we estimated the perpendicular uniaxial anisotropy constant ($K_{2\perp}$), the shape anisotropy constant (K_{sh}), the perpendicular cubic anisotropy constant ($K_{4\perp}$), in-plane uniaxial anisotropy constant ($K_{2\parallel}$), and the effective anisotropy constant ($K_{\text{eff}} = K_{2\perp} + K_{\text{sh}} + K_{4\perp} + K_{2\parallel}$) of all the $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ thin films. In this work, the negative sign of K_{eff} represents the IMA, while the positive sign corresponds to the perpendicular magnetic anisotropy (PMA). To analyze the thickness dependence of K_{eff} , we separated the K_{eff} into thickness dependence anisotropy K_V and thickness independent anisotropy K_S by using the following linear equation: $K_{\text{eff}}d = K_Vd + K_S$. Figure 1(d) summarizes the obtained $K_{\text{eff}}d$ as a function of d . On fitting by linear equation, we obtain K_S in negative sign which causes IMA whereas K_V is positive sign which causes PMA in our $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ films.

In Fig. 1(d), when d is changed from 20 nm to 55 nm, the sign change of $K_{\text{eff}}d$ from negative (IMA) to positive (PMA) occurs. When d is small ($d = 20, 30,$ and 40nm), the IMA originates from thickness independent contribution into anisotropy. In contrast, with increasing d ($d = 55\text{nm}$), PMA becomes dominant from the bulk contribution (or thickness dependence contribution), which may be due to the columnar-like growth occurring when d is larger than 30 nm. Interestingly, we did not observe cubic anisotropy in $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ and thus only two-fold symmetry along the $[\bar{1}10]$ axis exists. These results are different from those of $(\text{Ga,Mn})\text{As}$, which has four-fold symmetry due to its dominant cubic anisotropy along the $\langle 100 \rangle$ axes. The observation of FMR at room temperature and the control of magnetic anisotropy are important steps toward device applications of $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$.

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (No. 26249039, No. 17H04922, No. 16H02095, and 18H03860), CREST Program (JPMJCR1777) of JST, Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ), and the Murata Science Foundation.

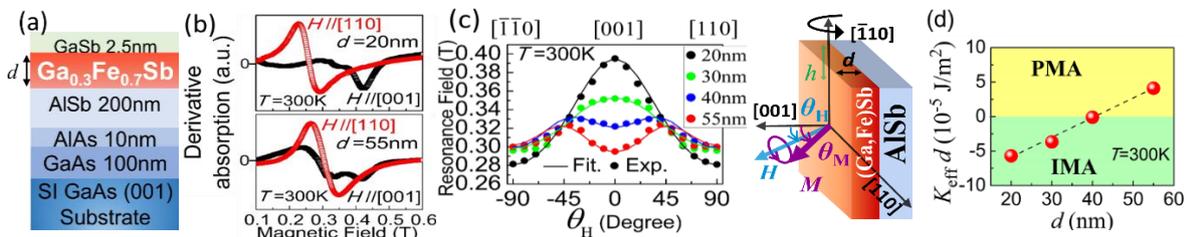


Fig.1 (a) Schematic sample structure of $(\text{Ga}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})\text{Sb}$. (b) FMR spectra observed for $\text{Ga}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Sb}$ with $d = 20\text{nm}$ and 55nm at 300 K when the magnetic field H was applied along the in-plane $[110]$ (red circles) and the perpendicular $[001]$ axes (black squares). (c) FMR field as a function of the H direction θ_H (where the inset shows definitions of θ_H and θ_M , which are the applied magnetic field angle and magnetization angle, respectively). (d) $K_{\text{eff}}d (=K_{2\perp}+K_{\text{sh}}+K_{4\perp}+K_{2\parallel})$ times d as a function of d of $(\text{Ga}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})\text{Sb}$.

[1] Seul-Ki Bac *et al.*, Appl. Phys. Express **8**, 033201 (2015). [2] N. T. Tu *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 144403 (2015). [3] S. Goel *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 014431 (2019).

P-42

シアノ架橋 Co(II)/Fe(II)-Nb(IV)錯体の磁気特性およびスピントロニクスオーバー現象

Magnetic and spin-crossover properties of cyanido-bridged Co(II)/Fe(II)-Nb(IV) trimetallic systems

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、シアノ金属酸イオンと遷移金属イオンを構築素子としたシアノ架橋ネットワーク金属錯体において、温度、光、圧力などの外場により磁気物性や光学特性を制御できることを報告している[1,2]。特に、Fe^{II}を構築素子とする系では、光誘起スピントロニクスオーバーによる磁気秩序のスイッチングを報告している[2]。本研究では、(Fe^{II}_{1-x}Co^{II}_x)₂[Nb^{IV}(CN)₈](4-ピリジンアルドキシム)₈·zH₂O (x=0 (1), 0.08 (2), 0.29 (3), 0.5 (4), 0.79 (5), 1 (6))を合成し、スピントロニクスオーバー挙動や磁気特性に関して検討を行った [3]。

【実験】目的化合物は、FeCl₂、CoCl₂、アスコルビン酸、4-ピリジンアルドキシムの混合水溶液と、K₄[Nb(CN)₈]水溶液を反応させることにより得た。物性評価は液体 He を冷媒として用いた超伝導量子干渉計(SQUID)、元素分析、粉末 X 線回折(XRD)、および赤外吸収スペクトル(IR)により行った。

【結果と考察】得られた化合物の組成は、元素分析より (Fe^{II}_{1-x}Co^{II}_x)₂[Nb^{IV}(CN)₈](4-ピリジンアルドキシム)₈·zH₂O (x=0, 0.08, 0.29, 0.5, 0.79, 1)と判明した(図 1)。粉末 X 線回折パターンの Rietveld 解析から、全ての化合物が正方晶、空間群 *I4₁/a* を有するシアノ架橋 3 次元ネットワーク錯体であった。Co 置換量の増加に伴い格子定数は減少し、これは、Fe^{II}(高スピン(HS))に比べて Co^{II}のイオン半径が小さいためと考えられる。磁化率の温度依存性測定の結果、300 K での磁化率温度積($\chi_M T$)の値は Fe^{II}(HS, *S*=2)、Co^{II}(HS, *S*=3/2)、Nb^{IV}(*S*=1/2)の合計による計算値と合っていたが、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 $\chi_M T$ 値が減少した。IR スペクトルの温度変化から、Fe^{II}(HS, *S*=2)から Fe^{II}(低スピン(LS), *S*=0)へのスピントロニクスオーバー現象の発現が示唆された。また、Co 置換量の増加に伴い、転移の緩やかになり、転移温度は減少した。転移が緩やかになったのは、Co 置換に伴い Fe サイト間の距離が長くなり協同効果が減少したこと、転移温度の低下は Co のイオン半径が Fe^{II}(HS)と Fe^{II}(LS)の平均に比べて大きく Fe^{II}(HS)が安定化したこと、によると考えられる。磁化温度曲線の測定から、x=0.50, 0.79, 1 の錯体では、Co^{II}(HS, *S*=3/2)と Nb^{IV}(*S*=1/2)の間に磁気相互作用により強磁性相転移が観測され(図 2)、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 を示した。

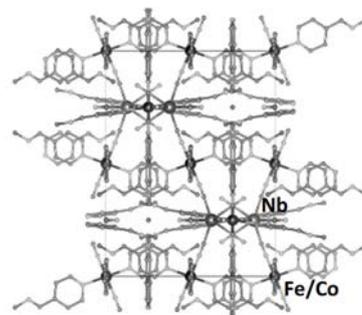


図 1. 3 の *b* 軸方向から見た結晶構造。

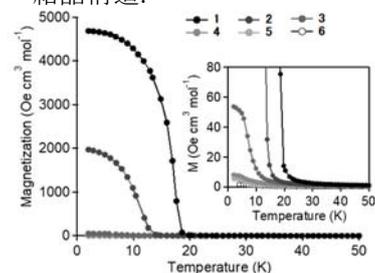


図 2. 1-6 の磁化温度曲線。

[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).

D-('

Spin wave detection by CPW with additional electrodes for external field modulation to the neuromorphic application

Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo,
Sarker Md. Shamim, Hiroyasu Yamahara, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata

Spin-wave can carry information in the form of wave, and has the possibility of joule-heating free data processing. The sub-10 nm wavelength of spin wave paves the way of GHz to THz computation with and shrinking the device size down to 10 nm and smaller. However, the detection and modulation of spin wave is challenging. Brillouin light spectroscopy is a method to detect the spin wave signal, which is good for basic characterization of spin wave [1]. For practical device application, however, we need to detect and transfer the signal to other subsystem. For this reason, we focused on coplanar wave guides (CPW) for detecting spin wave. Moreover, for implementing the spin wave in data processing, we want to control and modulate it by external means. In this report, we would like to report the spin wave excitation and detection by using CPW and vector network analyzer (VNA), and the modulation via magnetic fields using electric current flow.

As the magnonic media, PLD grown yttrium iron garnet (YIG) film deposited on gadolinium gallium garnet (GGG) is used. YIG is a ferrimagnetic insulator and well known for its lowest reported spin damping constant. The CPW for microwave excitation and detection are fabricated by EB lithography followed by sputtering. One of the complete devices is shown in Fig.1. VNA and ferromagnetic resonance (FMR) technique are used for exciting and detecting the spin wave. Fig.2(a) and (c) represent S_{11} and S_{12} signals with and without application of magnetic field. From these data we can determine the spin wave contribution of S_{11} and S_{12} which are shown in Fig.2(b) and (d). We successfully demonstrated the excitation and detection of spin waves in YIG. Our extended work will be see the impact of external field modulation by applying current through additional electrodes.

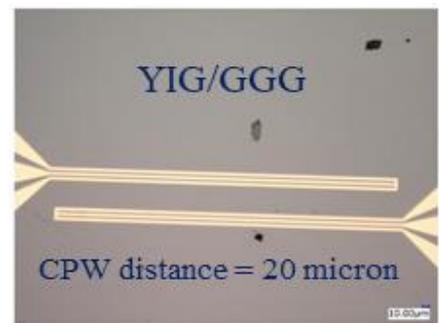


Fig.1 Microscopic image of CPW fabricated on YIG/GGG.

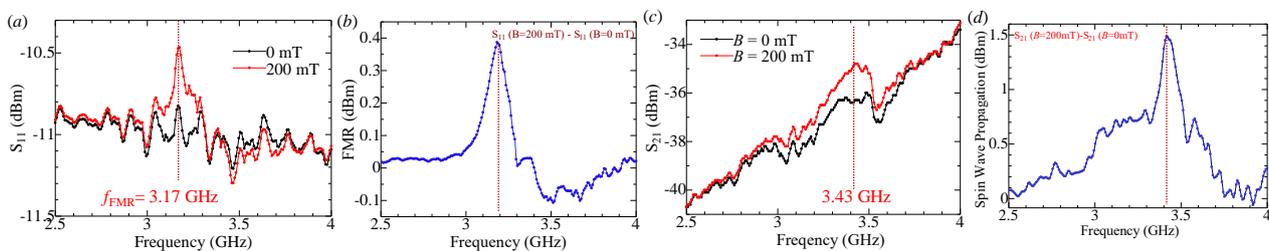


Fig.2 (a, c) S_{11} and S_{12} signal, and (b, d) their difference with and without application of magnetic field.

[1] A.V Chumak et al., Appl. Phys. Lett., vol. 95, no. 26, 2009

シアノ架橋型鉄-ニオブ集積型金属錯体における磁気光学効果 Magneto-optical effect on a cyanido-bridged Fe–Nb metal assembly

理学系研究科 化学専攻 物性化学研究室
田畑智弘 井元健太 中林耕二 大越慎一

物質中の磁場や磁化が光に影響を及ぼすことで光学活性が見られる現象を磁気光学効果と言い、特に磁場と光が平行な場合の透過光における光学活性(磁気円二色性、磁気旋光性)はファラデー効果として知られている。また、スピנקロスオーバー(SCO)錯体においては、外部刺激に伴う可逆な構造や物性の変化が知られており、光誘起スピン転移(LIESST)に基づく相転移に伴う長距離磁気秩序の形成が確認されている。当研究室においてはキラルな結晶構造を有し、光磁性を示すシアノ架橋型金属錯体 $[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{4-bromopyridine})_4]_2[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (**FeNb**)において磁気光学効果の一つである磁化誘起第二次高調波発生(MSHG)の光可逆スイッチングを観測している^[1]。本研究では**FeNb**のファラデー効果に注目し、可視領域における磁気円二色性の光応答性を検証した。

FeNbは、 $\text{Fe}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、4-ブロモピリジン塩酸塩、L(+)-アスコルビン酸とKOHの混合溶液に $\text{K}_4[\text{Nb}(\text{CN})_8] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の水溶液を滴下し、室温において反応させることによって得られた。室温における粉末X線回折のリートベルト解析から、**FeNb**は空間群 $I4_122$ に属しており、シアノ基によって架橋した Fe^{II} 及び Nb^{IV} が三次元ネットワークを形成していた(図1)。磁化率の温度依存性測定から $\text{Fe}^{\text{II}}_{\text{HS}}\text{-Nb}^{\text{IV}}$ (高温相)と $\text{Fe}^{\text{II}}_{\text{LS}}\text{-Nb}^{\text{IV}}$ (低温相)との温度誘起SCOに伴うヒステリシスループ($T_{1/2\downarrow} = 105\text{ K}$, $T_{1/2\uparrow} = 129\text{ K}$)が観測された(図2)。

液体ヘリウムを寒剤として4 Kまで**FeNb**を冷却し、低温相において404 nmで磁気円二色性の外部磁場依存性を計測した。更に、低温相の**FeNb**に対して緑色光(532 nm)照射後に同様の測定を行うとファラデー効果の増大が観測された(図3)。この結果から緑色光による光誘起スピン転移に伴って $\text{Fe}^{\text{II}}_{\text{LS}}\text{-Nb}^{\text{IV}}$ (低温相)から $\text{Fe}^{\text{II}}_{\text{HS}}\text{-Nb}^{\text{IV}}$ (光誘起相)へと電子状態が変化し、それに伴うシアノ基を介した Nb^{IV} ($S = 1/2$)と $\text{Fe}^{\text{II}}_{\text{HS}}$ ($S = 2$)の磁気秩序の形成が、光照射後のファラデー効果の増大に寄与したものと考えられる。

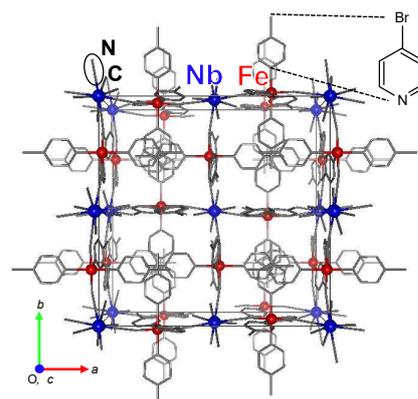


図1. **FeNb**の結晶構造。

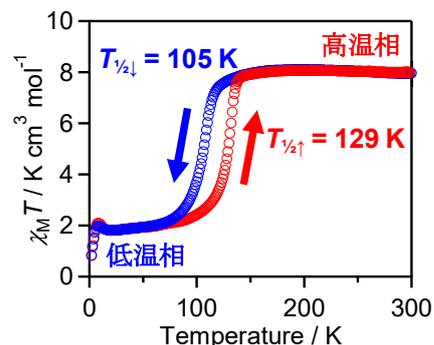


図2. 磁化率と温度の積 $\chi_M T$ の温度に対するプロット。

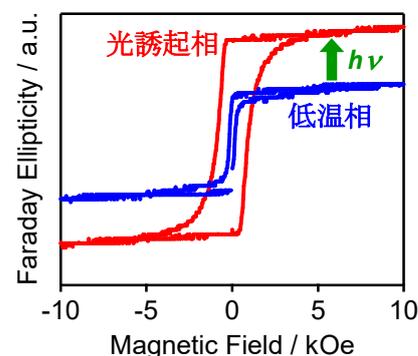


図3. 4 K, 404 nmにおける磁気円二色性の印加磁場に対するプロット。

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

P-45

Spin-orbit torque strength and efficiency in a perpendicularly-magnetized ferromagnetic semiconductor GaMnAs single thin film

Dept. of Electrical Engineering and Information Systems, Tanaka-Ohya lab

Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Toshiki Kanaki, Hiroki Yamasaki,

Shinobu Ohya and Masaaki Tanaka

Spin-orbit torque (SOT) magnetization switching, which is induced by a spin current generated by a charge current, is a promising phenomenon that can be used to improve the performance of magnetoresistive random access memory. In the conventional SOT systems, the magnetization reversal is based on the spin current injection from the adjacent paramagnetic layer with a large spin Hall angle, which results in a low switching efficiency limited by the interface. Recently, in order to increase the switching efficiency, SOT switching has been achieved in a single ferromagnetic layer, such as in a topological insulator using the surface state [1] and the ferromagnetic semiconductor GaMnAs using the field-like torque [2] or the damping-like torque [3].

Here, we quantitatively evaluated the SOT strength in a perpendicularly magnetized ferromagnetic semiconductor GaMnAs with the equivalent magnetic field (H_{equi}) [4] as shown in Fig. 1. The Hall resistance (R_H) is measured at 40 K with a current of ± 0.3 mA applied along the $[\bar{1}10]$ direction and a fixed external magnetic field (H_{ext}) of 500 Oe applied at an angle β from the $[\bar{1}10]$ direction in

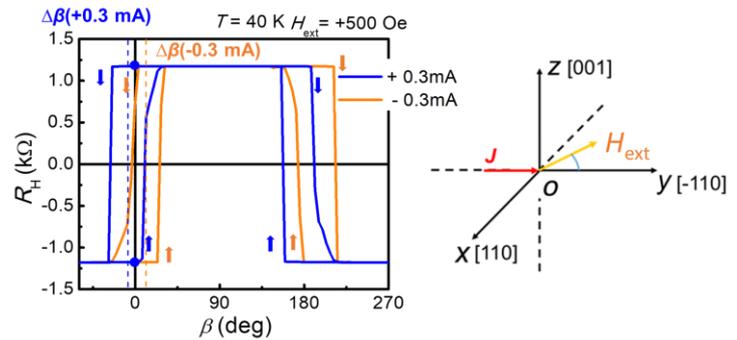


Fig. 1 Anomalous Hall effect measured with rotating H_y of 500 Oe in the y - z plane and applying J of ± 0.3 mA at 40 K.

the y - z plane. Since the magnetization switching is motivated by a combination of the SOT effect and the z component of H_{ext} , there appears an obvious opposite horizontal shift for the positive and negative current. Based on this horizontal shift, the magnitude of H_{equi} is calculated to be 84.6 Oe and the efficiency is estimated to be 99 [Oe/(10^6 A/cm 2)], which is almost *two orders of magnitude larger* than that in the Pt/Co bilayer system, indicating that very efficient magnetization switching is realized in GaMnAs.

Our work demonstrated the high efficiency of the SOT switching in a perpendicularly-magnetized GaMnAs quantitatively, which will facilitate the development of SOT devices for practical applications.

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (No. 16H02095, No. 18H03860), CREST program of Japan Science and Technology Agency (JPMJCR1777), and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

[1] Y. Fan *et al.* *Nature Nanotech.* **11**, 352 (2016).

[2] A. Chernyshov *et al.* *Nature Phys.* **5**, 656 (2009).

[3] M. Jiang *et al.* submitted; JSAP Fall Meeting, 20a-131-2, Nagoya, September 2019.

[4] P. Zhang *et al.* *Phys. Rev. B* **97**, 214403 (2018).

P-46

バルク GaAs における励起子の高密度光子ドレスト状態 High-density photon-dressed state of excitons in bulk 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 研究開発部門^C
室谷悠太^A、金昌秀^B、秋山英文^B、島野亮^{A,C}

半導体中の励起子 (exciton) は、伝導帯に励起された電子と価電子帯に残された正孔がクーロン力によって束縛された状態である。直接遷移型半導体は光子を吸収して励起子を直接作り出すことができるため、特に低温では光吸収スペクトルに鋭い吸収線が現れる。右図の黒線は 5 K に冷やした砒化ガリウム (GaAs) 試料の光吸収スペクトルであり、二種類の励起子が存在することが分かる。

このように光と強く結合した励起準位がある場合、それに共鳴した光を入射することで、励起状態と光子が混成した「光子ドレスト状態」を作ることができる。これは単純な二準位系では吸収ピークの分裂として観測され、励起子の場合も入射光が弱い限りにおいては同様の振舞いを示す [1]。しかし強励起条件下では、内部構造を持つ励起子が空間的に重なり始めることにより、励起子間の相互作用が無視できなくなる (これを多体効果と言う)。強励起下における光子ドレスト状態の振舞いは、一般の荷電粒子系における多体効果の理解にとっても重要である。

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 GaAs の三次元結晶を対象に光子ドレスト状態を調べた。具体的には、励起子吸収線に共鳴した光 (右図最上段) を試料に照射し、その間の過渡的な光吸収スペクトルを測定した (右図下段の色付き線)。励起強度を上げていくにつれ、共鳴した吸収線 (Heavy hole exciton) が分裂した後、高エネルギー側のピークだけが残存し、幅を広げていく様子が見て取れる。これは束縛された励起子という概念が適用できなくなるくらいの高密度領域に入り込んでおり、多体効果の影響を強く受けている。我々は微視的な理論に基づいたシミュレーションを行い、このような高密度領域における光子ドレスト状態が、超伝導体におけるクーパー対と類似した波動関数を持つことを明らかにした。このことは、従来は到達が困難であった極低温・高密度の量子凝縮相に光学的手法によってアプローチできる可能性を示唆している。

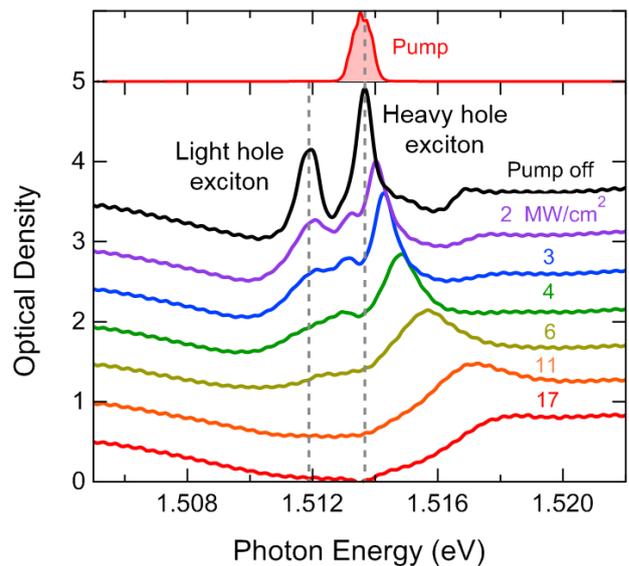


図. 色塗り線: ポンプ光のパワースペクトル。黒線: 光励起していない試料の吸収スペクトル (5 K)。色つき線: 光励起したときの過渡吸収スペクトル。上から下へ励起強度を増やしている。

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

極性サイクロイド型磁性体における自然旋光性 Natural optical activity in polar cycloidal helimagnet

¹工学系研究科 物理工学専攻、²理化学研究所 創発物性科学研究センター
¹荻野慎子、²金子良夫、^{1,2}十倉好紀、^{1,2}高橋陽太郎

入射直線偏光の偏光面が媒質の伝搬とともに回転する性質を旋光性という。旋光性には外場を加えないときに発現する自然旋光性と磁場印加により発現するファラデー効果（磁気旋光性）が存在する。自然旋光性は鏡映対称性の破れた、すなわちキラリティをもつ物質において現れることが一般的に知られており、左巻き、右巻きキラリティの判別にも用いられる。実は、いくつかの空間反転対称性のないアキラルな対称性でも自然旋光性が許容となる[1]。特に、結晶構造による対称性の破れではなく、スピン構造による対称性の破れを考えた場合、サイクロイド型磁性体（図 1(a)）はアキラルかつ自然旋光性が許容な点群 $mm2$ に属する。加えてサイクロイド型磁性体はスピン構造により空間反転対称性を破ることで強誘電性を示す。この強誘電分極の反転は自然旋光性の反転を伴うことから偏光の電氣的制御が可能である。さらにテラヘルツ領域ではサイクロイド型磁性体に特有の磁気共鳴であるエレクトロマグノンの共鳴があり[2]、自然旋光性の共鳴的増大が期待される。本研究では代表的なサイクロイド型磁性体である $TbMnO_3$ に着目した。アキラルな系にでは特定の結晶面のみにおいて自然旋光性が許容であり、 $TbMnO_3$ については(110)面が自然旋光性の許容な結晶面である。

$TbMnO_3$ の(110)面においてテラヘルツ偏光回転分光を行い、自然旋光性の観測を試みた。エレクトロマグノン共鳴（図 1(b)）に対応するエネルギー領域で、偏光回転角スペクトルに共鳴構造が現れることを観測した（図 1(c)）。

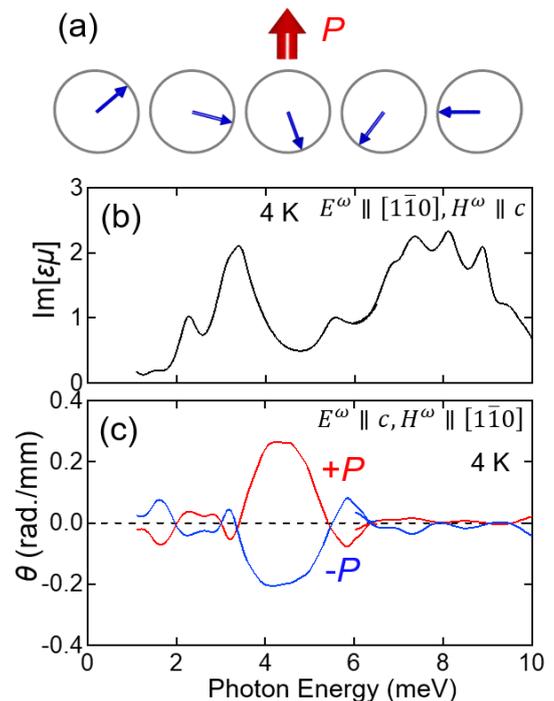


図 1. (a)サイクロイド型磁気構造、赤矢印は強誘電分極を表す。(b) $TbMnO_3$ の(110)面におけるエレクトロマグノン共鳴の $Im[\epsilon\mu]$ スペクトル。(c) $TbMnO_3$ の(110)面における 偏光回転角スペクトル。

[1] R. Gautler *et. al.*, Nat. Mater. **15**, 591 (2016).

[2] A. Pimenov *et. al.*, Nat. Phys. **2**, 97 (2006).

バルク GaAs における励起子間相互作用エネルギーと 励起子 s 波散乱長

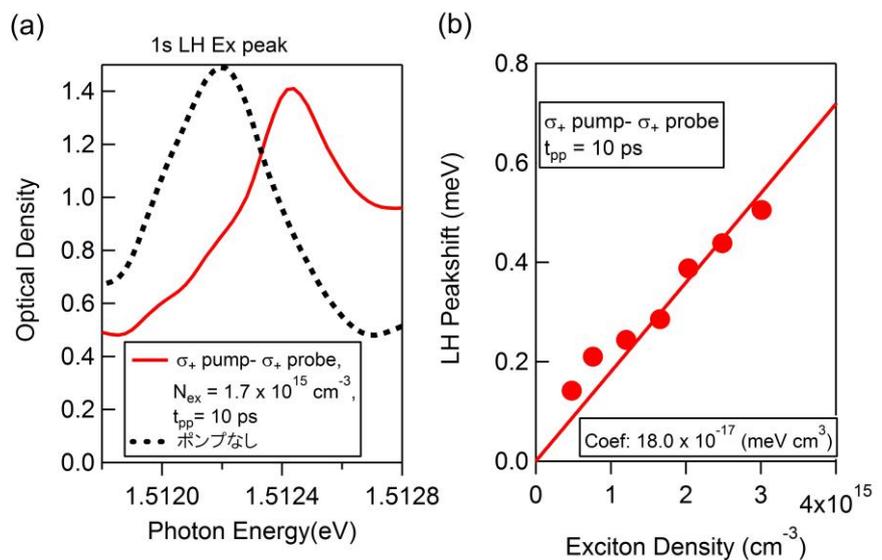
Exciton-exciton interaction energy and exciton s -wave scattering length in bulk GaAs

理学系研究科 物理学専攻^A、東大物性研^B、低温センター 研究開発部門^C

高山正行^A、金昌秀^B、秋山英文^B、島野亮^{A,C}

電子と正孔による水素原子様の束縛状態である励起子は、原子系との比較のもと長らく研究されてきた。特に励起子間相互作用の研究は非線形光学の観点からも重要であるとともに、一般の粒子間相互作用の機構に関するより進んだ理解への貢献が期待される。しかし、3次元系における励起子間相互作用エネルギーの定量的な評価は、特に実験からはこれまでなされてこなかった。そこで我々は典型的な直接遷移型半導体であるバルク GaAs を対象に、低温の励起子系における励起子間相互作用について、スピン分解してそのエネルギーの励起子密度依存性を定量評価し、実験からの相互作用の機構解明を目指した。

図(a)には格子温度 5 K で近赤外光ポンプ-プローブ分光を行い、軽い正孔(LH)-1s 励起子共鳴励起後 10 ps における LH-1s 励起子吸収線の様子を示した。ここでは、ポンプ光とプローブ光の偏光は共に右回り円偏光(σ_+)に揃えている。ポンプなしのときに比べ励起子吸収線は高エネルギー側にシフトしているが、このシフトはポンプ光でつくられた励起子とプローブ光でつくられる



励起子の間に働く相互作用によるものである。また図(b)に示すとおり、この励起子間相互作用によるエネルギーシフトは励起子密度に比例する振る舞いを示す。講演ではこの励起子間相互作用エネルギーシフトの励起光偏光依存性と、平均場近似に基づく計算[1]、および s 波散乱のモデルに基づいた計算[1,2,3]を比較し、励起子間相互作用のスピン依存性を詳しく議論する。また、これまで実験的に決定されていなかった励起子 s 波散乱長の値についても、そのスピン依存性と合わせて考察する。

[1] M. Takayama, Dissertation, The University of Tokyo (2018).

[2] C. Pethick, and H. Smith, *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases*, Cambridge University Press (2008).

[3] J. Shumway and D. M. Ceperley, *Phys. Rev. B* **63**, 165209 (2001).

マルチフェロイクスのエレクトロマグノン共鳴における コヒーレント分極変調 Coherent polarization modulation through the electromagnon resonance in multiferroics

工学系研究科 物理工学専攻 高橋研究室

井口照悟、金子良夫、増田亮二、肉倉洋恵、十倉好紀、高橋陽太郎

強誘電や強磁性などのフェロイクスの超高速制御はメモリの書き換えの高速化などへの応用の観点から注目されている。通常の dc 電磁場を用いる手法では、その速度はドメイン壁の運動に律速されてしまうため、その書き換え速度には限界がある。そこで光を用いた超高速なコヒーレントフェロイクス制御の研究が盛んに行われている[1]。中でも近年注目されているのはテラヘルツ光($\sim 10^{12}$ Hz, 4 meV)を用いた手法である。テラヘルツ光は電子のバンドギャップよりも十分小さなエネルギーであるため、電子遷移による熱を伴うことなく高効率でのフェロイクス制御が期待されている。さらにテラヘルツ帯にはフォノンやマグノン、超伝導ギャップなどの様々な素励起が存在しており、基礎物理の観点からもテラヘルツ帯で生じる応答の解明は喫緊の課題である。我々の着目している、複数のフェロイクスが共存するマルチフェロイクスと呼ばれる物質群では、テラヘルツ帯に生じる電場活性なマグノン、い

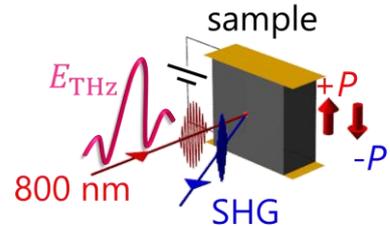


図1. テラヘルツポンプ-第二次高調波 (SHG)プローブ反射光学系の概略図。

わゆるエレクトロマグノン[2]という素励起を利用した多彩な磁性・強誘電性の制御が期待でき、精力的に研究が行われているが[3]、マクロに磁化や分極を制御した例は未だ報告されていない。

本研究では代表的なマルチフェロイクス $\text{Eu}_{0.55}\text{Y}_{0.45}\text{MnO}_3$ のエレクトロマグノン共鳴を高強度テラヘルツ光で直接励起することで、コヒーレント分極制御を目指した。ポンプ光としてテラヘルツ光、プローブ光として分極の2乗でスケールされる第2次高調波発生 (SHG)を用いることで分極変調を観測した(図1)。その結果、SHG強度がテラヘルツ光の入射したときに数倍に変調され、その変調

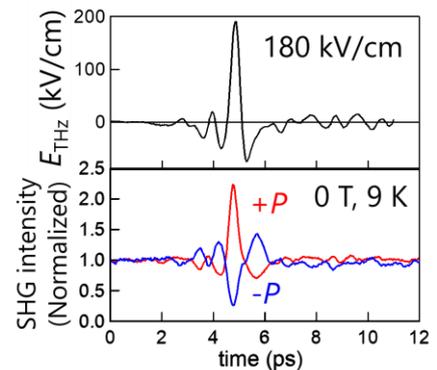


図2. テラヘルツ電場の時間波形(上図)と、分極を±P にそろえた場合の SHG 強度の時間波形(下図)。

は強誘電分極の符号によって反転することが明らかになった(図2)。本発表では最大 700 kV/cm の高強度テラヘルツ光を用いて観測した特異なふるまいについて議論する。

[1] E. Beaurepaire *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76**, 4250–4253 (1996).

[2] A. Pimenov *et al.*, Nat. Phys. **2**, 97 (2006).

[3] T. Kubacka *et al.*, Science **343**, 1333 (2014).

P-50

ペロブスカイト酸化物単結晶エピタキシャルヘテロ構造
 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ における高効率スピン流電流変換
 Efficient spin-to-charge current conversion in a perovskite-oxide
 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ epitaxial single-crystal heterostructure

工学系研究科・電気系工学専攻・田中大矢研究室

荒木大晴, レドゥック アイン, 金田真吾, 田中雅明, 大矢忍

ペロブスカイト型酸化物絶縁体 LaAlO_3 (LAO) と SrTiO_3 (STO) の界面には 2次元電子ガス (2DEG) が形成されることが知られている。この 2DEG は Ti の d 電子により形成されており、Rashba のスピン軌道相互作用が大きい系として注目されている。実際 LAO/STO へのスピンポンピングによってスピン流を注入し、逆 Edelstein 効果によるスピン流電流変換を観測したことが報告されている。大きなスピン流電流変換効率が観測されている一方で、低温でシグナルが観測された報告とされない報告がそれぞれあること、またスピン流の注入源として多結晶膜を用いていることにより界面での散乱があることが問題として残っている。[1-4]。

本研究では、LAO や STO と同じペロブスカイト構造をもつ酸化物で、室温で強磁性を示す $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LSMO) をスピン流注入源として、LSMO (30 unit cell)/LAO (2 unit cell) ヘテロ構造を分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて STO (001) 基板上に成長した (Fig. 1)。高品質な界面を作製し、300 K から 20 K の温度範囲において、強磁性共鳴を用いて LSMO から LAO/STO 界面の 2DEG にスピン流を注入し、逆 Edelstein 効果により起電力 (Electromotive force, EMF) の観測に成功した。参照試料として作製した LAO/STO で得られた 2DEG の抵抗値を用いて、スピン流-電流変換効率 (= 逆 Edelstein 長: $\lambda_{IEE} = j_e/j_s$, j_e : 電流密度 (A m^{-1}), j_s : スピン流密度 (A m^{-2})) を見積もると、20 K において $\lambda_{IEE} = 4 \text{ nm}$ 程度の値が得られ、これは Ref. [1] のゼロバイアス、7 K の値 (0.1–0.2 nm) と比較しても非常に大きな値である (Fig. 3)。MBE 成長により高品質な界面が得られたため、スピン流を効率的に 2DEG に注入できたこと等が理由として考えられる。

本研究は科学研究費、JST-CREST、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点の支援を受けた。

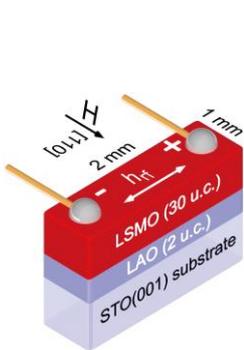


Fig. 1. スピンポンピング測定に用いたサンプル構造と測定のセットアップ

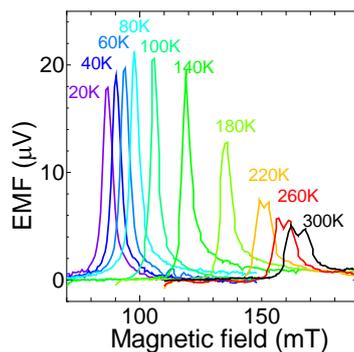


Fig. 2. EMF のそれぞれの温度での磁場依存性

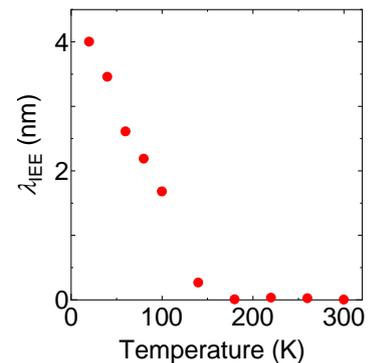


Fig. 3. λ_{IEE} の温度依存性

[1] E. Lense *et al.*, Nat. Mater., **15**, 1261 (2016). [2] Y. Wang *et al.*, Nano. Lett., **17**, 7659 (2017).
 [3] Q. Song *et al.*, Sci. Adv. **3**, e1602312 (2017).
 [4] M. P. Warusawithana *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2351 (2013).

界面酸化層の挿入による強磁性金属/重金属接合膜における スピン軌道トルクの増大

Enhancement of spin-orbit torque by inserting oxidation layer into ferromagnetic metal/heavy metal interface

東京大学工学系研究科物理工学専攻千葉研究室
長谷川顕登、日比野有岐、小山知弘、千葉大地

In-plane current induced magnetization switching in ferromagnetic metal (FM)/heavy metal (HM) heterostructures has attracted much interest as a new method for writing information in magnetic memory devices. This magnetization switching is driven by spin-orbit torque (SOT) [1,2], which consists of damping-like (DL) and field-like (FL) terms, exerted on the magnetization in FM layer. The origin of SOT has been attributed mainly to bulk spin Hall effect in the HM although the interfacial Rashba-Edelstein effect can also give rise to SOT. In this study, the effect of an interfacial oxidation on SOT has been investigated by inserting a thin CoO layer into Co/Pt interface, where Co and Pt are FM and HM, respectively.

The figures show the DL- and FL-SOT effective fields for the Co/Pt and Co/CoO/Pt samples as a function of the current density injected into the Pt layer. Although both effective fields are clearly larger in the Co/CoO/Pt sample, the enhancement of the FL-effective field, which is strongly affected by the Rashba-Edelstein effect, is more significant. In addition, we confirmed the reduction of spin-Hall spin current injected into the Co layer for the Co/CoO/Pt sample by comparing the spin Hall magnetoresistance for both samples. Therefore, the enhancement of SOT is most likely attributed to the appropriately modulated Rashba-Edelstein effect.

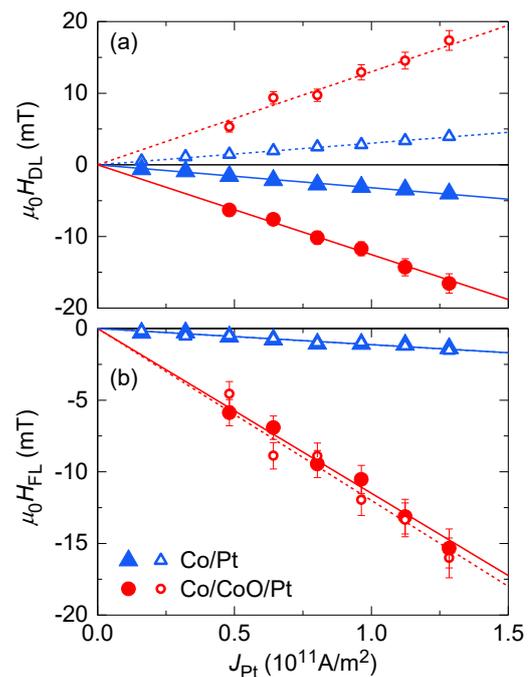


Figure. (a) The DL- and (b) FL-effective fields as a function of current density flowing in the Pt layer for the Co/Pt and Co/CoO/Pt samples.

[1] I. M. Miron *et al.*, *Nature* **476**, 189 (2011).

[2] L. Liu *et al.*, *Science* **336**, 555 (2012).

Ultra-low power bias-driven magnetization switching by quasi-Fermi level control at an interface of a $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ -based magnetic tunnel junction

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

L. D. Anh^{1,2}, T. Yamashita¹, H. Yamasaki¹, D. Araki¹, M. Seki^{1,3}, H. Tabata^{1,3}, M. Tanaka^{1,3} and S. Ohya^{1,2,3}

Controlling the magnetic anisotropy (MA) by a bias voltage is important for reducing the power consumption of magnetization switching in spin devices. In ferromagnetic (FM) materials, the MA is strongly correlated to the symmetry of the magnetization-direction dependence of the density of states (DOS) around the Fermi level [1]. This correlation thus suggests that we can achieve highly effective control of MA of the FM materials by applying a bias voltage and moving the Fermi level between band components with different orbital symmetries. Here in a $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LSMO)-based magnetic tunnel junction (MTJ), we demonstrate a magnetic-field-free 90°-magnetization switching solely by applying an extremely small electric field of 0.05 V/nm on the tunnel barrier. This electric field moves the Fermi level from the e_g band to the t_{2g} band at the interface between LSMO and the tunnel barrier, and induces a sharp change in the in-plane MA.

The studied MTJ consists of LSMO [18 unit cell (u.c.)] / SrTiO_3 (STO, 10 u.c.) / LSMO (40 u.c.) grown on an STO (001) substrate by molecular beam epitaxy [see Fig. 1(a)]. We probed the MA of the LSMO layers by measuring the θ_H -dependence of tunneling magnetoresistance (TMR), where θ_H is the in-plane angle of the magnetic field \mathbf{H} measured from [100]. The TMR ratio depends on the relative angle $\Delta\theta$ between the magnetization vectors of the top (\mathbf{M}_t) and bottom (\mathbf{M}_b) LSMO layers. When increasing the bias voltage V applied to the MTJ from 15 mV to 200 mV, which corresponds to a transition of the quasi Fermi level from the e_g band to the t_{2g} band [2], we found that the MA of the top LSMO switches from a two-fold symmetry to a four-fold symmetry [Fig. 1(b)]. Due to this MA switching, the easy axis of \mathbf{M}_t along [110] at $V = 200$ mV becomes a hard axis at $V = 15$ mV, while the $[\bar{1}10]$ axis is always an easy axis. Thus, the magnetization initially pointed toward [110] at $V = 200$ mV is rotated toward $[1\bar{1}0]$ when V is changed to 15 mV, and remains in that position ($[1\bar{1}0]$) even after V is returned to 200 mV. This bias-driven magnetization rotation of LSMO was detected by monitoring the change in tunneling resistance R at zero magnetic field when varying V in the following sequence: 200 mV \rightarrow 15 mV \rightarrow 200 mV [Fig. 1(c)] after initializing the \mathbf{M}_t and \mathbf{M}_b in the [110] direction by a strong \mathbf{H} . The R values before and after the bias sequence changed by ΔR_2 that corresponds to a rotation of \mathbf{M}_t by 87.7° without the need of any assisting magnetic field. The operation requires an infinitesimal current density of $\sim 10^{-2}$ A/cm², which is ~ 8 orders of magnitude smaller than that in the present magnetic random access memory [3].

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research, CREST program of Japan Science and Technology Agency, and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ).

[1] H. Saito *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 086604 (2005). [2] L. D. Anh *et al.*, Sci. Rep. **7**, 8715 (2017). [3] L. D. Anh *et al.*, submitted. (2018)

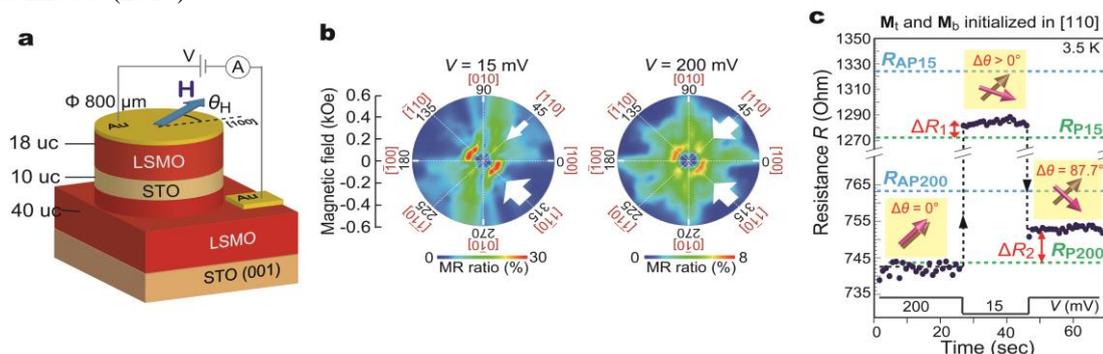


Fig. 1. (a) Device structure. (b) θ_H -dependence of TMR at $V = 15$ and 200 mV. (c) R (blue dots) measured at zero \mathbf{H} with a bias sequence of $V = 200$ mV \rightarrow 15 mV \rightarrow 200 mV after initializing the \mathbf{M}_t and \mathbf{M}_b along [110]. R_{P200} (R_{P15}) and R_{AP200} (R_{AP15}) express the R values at $\mathbf{H} = 0$ when \mathbf{M}_t and \mathbf{M}_b are initialized in the parallel and antiparallel configurations at $V = 200$ mV (15 mV), respectively.

P-53

単層 CrSe₂ のポリタイプ制御とその電子構造に関する研究 Electronic structure of *T*- and *H*-type CrSe₂ monolayer film

工学系研究科 物理工学専攻 石坂研究室

吉田訓, 中野匡規, 松岡秀樹, 真島祐貴, 王越, 大東祐汰, 坂野昌人,
岩佐義宏, 石坂香子

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC) は、遷移金属元素 M とカルコゲン X から成る MX_2 層がファン・デル・ワールス結合により積層した構造を持つ物質群である。TMDC が示す多彩な電子相や秩序状態は基礎物性から応用までを含む幅広い観点で注目を集め、現在に至るまで数十年に渡り盛んに研究されている。近年では、数原子層レベルの薄膜・薄片においてバルクとは異なるエキゾチックな物性が現れることが明らかになり、新展開を迎えている。代表的なものとして、 $4d, 5d$ 遷移金属から成る TMDC 薄膜において報告されているバレー物性(H -MoS₂)、Ising 超伝導(H -NbSe₂)や量子スピンホール効果(T -WS₂)などが挙げられる。これらの物性に関しては、主にスピン軌道相互作用が重要な役割を果たしている。一方、 $3d$ 遷移金属から成る TMDC 薄膜では、強い電子-電子相互作用、電子-格子相互作用、交換相互作用といった相関効果が重要になると考えられ、より多彩な物性が期待される。CrSe₂ は、バルクにおいて $1T$ 型構造のみをとり、異常原子価 Cr⁴⁺ に起因した価数不安定性と 3 重縮退した Cr $3d t_{2g}$ 軌道に電子が 2 つ占有することにより生じる軌道自由度を持つ。バルクでは、これらの自由度によって引き起こされると考えられる逐次的な構造相転移が報告されている[1]。また、この逐次相転移に伴って反強磁性秩序を発現し、磁性を有する TMDC としても稀有な例の一つである。しかし、異常原子価 Cr⁴⁺ より成ることから CrSe₂ は非常に不安定な系である。

我々は、分子線エピタキシー法(MBE)を用いることによって CrSe₂ 単層薄膜の作成を試みた。角度分解光電子分光(ARPES)によって観測されたバンド構造、第一原理計算による電子構造、および反射型高速電子線回折(RHEED)により得られる結晶構造に関する情報を相補的に比較することで、良質な単結晶薄膜が得られたことを確認した。本発表では、ARPES によって得られた CrSe₂ 単層薄膜の物性や成膜条件による結晶構造の変化について報告し、この系での相関効果について議論する。

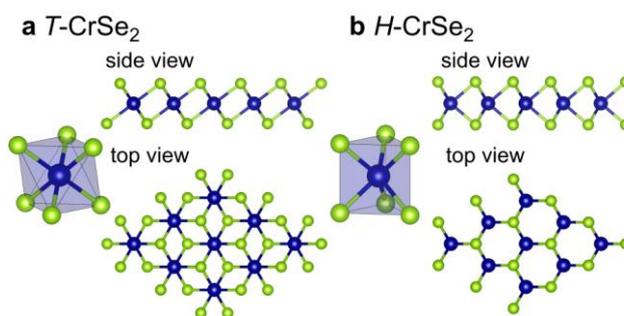


図 1. 単層 CrSe₂ の結晶構造. (a) T 型, (b) H 型.

[1] S. Kobayashi et al., *Phys. Rev. B* **89**, 054413 (2014).

P-54

ナノスケール構造における GaMnAs の電界制御異方性磁気抵抗 Electrical control of the anisotropic magnetoresistance in a nano-scale GaMnAs structure

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

H. Yamasaki¹, S. Ohya^{1,2,3}, and M. Tanaka^{1,3}.

Voltage-controlled magnetic anisotropy (VCMA) is an emerging research field, which aims to manipulate the magnetic anisotropy of magnets not by electric current, but electric field. The control of magnetism by electric field would enable low-power memory devices which consume ultimately no Joule heating in the writing operation. This is why VCMA has recently been attracting much interest in spintronics research topics. One of the promising materials for VCMA is ferromagnetic semiconductor because it has the compatibility with the semiconductor-based platform, and requires neither strains nor distortions for magnetization control. Among the all ferromagnetic semiconductors, GaMnAs is the best “prototype” ferromagnetic semiconductor whose unique electrical properties have been well studied.

In this presentation, we will show the electrical and magnetic characteristics of a GaMnAs-based VCMA device, in which the external electric field can be applied from the side surface of GaMnAs. To observe the behavior of a single-domain GaMnAs, we fabricated nano-scale cross-bar structures with 100-nm width and 500-nm length, as shown in Fig. 1. The anisotropic magnetoresistance (AMR) was measured under applying gate voltages. The observed resistance-magnetic field curves show AMR-like behavior; however, this is a little bit different from that in the standard GaMnAs Hall-bar. The resistance slope changes around zero field may be attributed to the reversal of the rotation direction of the single-domain GaMnAs. This rotation anomaly emerged only around [010] axis (Fig. 2), thus it might be attributed to the magnetic anisotropy changes in uniaxial [010] component.

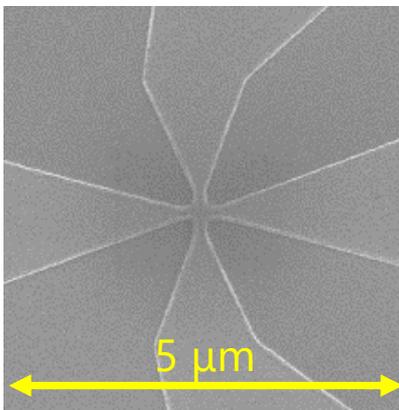


Fig 1. SEM image of the cross-bar structure with 100-nm width and 500-nm length.

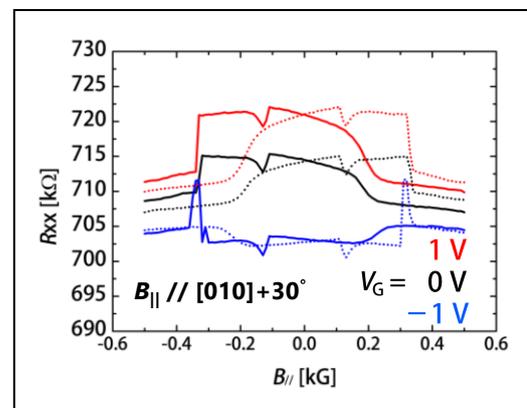


Fig 2. $R_{xx} - B_{||}$ curves under gate voltages V_G . $B_{||}$ is applied along $[010]+30^\circ$. The solid (←) and dotted (→) lines correspond to the sweeping directions.

カーボンナノチューブの熱および電気輸送特性 Thermal and electrical transport properties of carbon nanotubes

低温センター・研究開発部門

藤井 武則

熱電変換材料とは、ペルチェ効果およびゼーベック効果を用いて熱と電気を交互に変換する材料であり、現在実用化されている熱電変換素子は、p型とn型の熱電材料を直列につなぐことによって有効な起電力を得ている。そのためp型とn型の材料開発が必要であるが、それぞれの材料の熱電性能を最適化することは困難である。我々は電気二重層トランジスタの手法を用いて、p型とn型のキャリアドープを行い、熱電素子のp-n接合を作製している。半導体型単層カーボンナノチューブは大きな熱起電力を示すことが報告されており、熱電材料として注目されている。しかし、カーボンナノチューブは、非常に大きな熱伝導率を示すことが知られており、そのことが熱電材料としては問題である。我々は、カーボンナノチューブが様々な分子を吸着することに着目し、吸着分子によるラットリング（非調和振動）によって熱伝導率が下げられるのではないかと考えた。ここでは、酸素を吸着させることによって熱伝導率がどのように変化するかを調べた。カーボンナノチューブ膜は、熱電特性を決めるための熱伝導率測定が難しく、これまでは主に、レーザーフラッシュ法、3オメガ法、サーモリフレクタンス法などが多く用いられてきた。ここでは、写真1のようにカーボンナノチューブ膜をつるした状態での熱伝導率を定常法で測定することに試みた。サンプルは、市販の半導体型99.9%単層カーボンナノチューブ分散液(Nano-Integriss: IsoNanotubes-S)を用い、吸引ろ過によって厚さ約 $1\mu\text{m}$ の膜を作製した。図2に定常法によって測定した熱伝導率の温度依存性を示す。室温での熱伝導率は約 $370\text{ W/m}\cdot\text{K}$ であり、これまで報告されている $174\sim 220\text{ W/m}\cdot\text{K}$ より若干大きい[1]。予想に反し、酸素を吸着したカーボンナノチューブの熱伝導率は、吸着していないものよりも大きくなった。吸着した分子はカーボンナノチューブに比べ十分小さいため、ラットリングとして働くよりも、単純に熱を伝える媒体として働いていると考えられる。

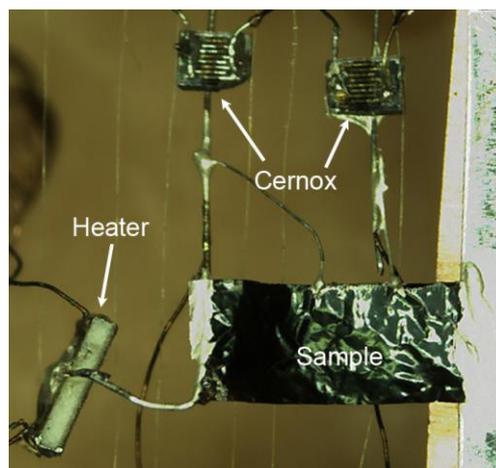


図1、定常法の測定プローブ

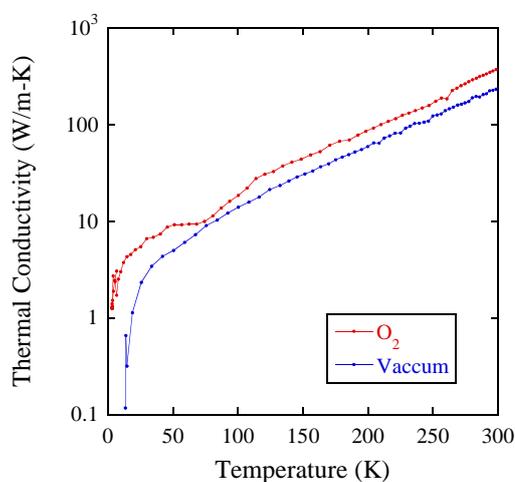


図2、酸素中・および真空中でアニールしたカーボンナノチューブの熱伝導率

[1]C.Cryogenic, and T.Teion, Phys. Rev. B **64** 1999 (2001) Appl. Phys. Lett. 108, 103101 (2016)

STM/S Studies of H-plasma Etched Graphene on SiC(0001)

^AGrad. Sch. of Sci., Univ. Tokyo, ^BKwansei Gakuin Univ. ^CNTT BRL, ^DCRC Univ. Tokyo
A. E. B. Amend^A, T. Matsui^A, H. Hibino^{B, C} and H. Fukuyama^{A, D}

The zigzag (zz) edges of graphene host localized electronic states. If they are located on opposite edges of a graphene nanoribbon (GNR), magnetic ordering of the edge states is expected, which may be used to create spin filters for purely graphene-based spintronic devices. Exposure to H-plasma at 600°C etches the surface of graphite and exfoliated graphene on SiO₂, causing hexagonal nanopits with monatomic height zz edges to be formed [1]. In between the nanopits zz GNRs can be obtained. Recently, we have successfully observed spin polarized zz edge states in GNRs on graphite by scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S) [2], which had long remained unclear experimentally. However, there are disagreements between the experimental results and existing theoretical calculations. This is possibly due to different substrates, whose influence is not usually considered in the theoretical treatments. In this study, the same H-plasma etching was applied to epitaxially grown mono- and bi-layer graphene on SiC(0001) as that for the graphite surface to understand the role of the substrate [3]. Beneath such epitaxial graphene exists a C-rich buffer layer, that is partially bound to SiC. At high temperatures atomic H passivates the substrate through intercalation, thus the buffer layer becomes an extra graphene layer of what is called quasi-free-standing graphene (QFSG).

After H-plasma treatment, STM/S was performed at a temperature of 78 K. STM images revealed nanopits in the surface layer with an average depth of 0.30 ± 0.06 nm, confirming that monatomic depth nanopits are created on graphene on SiC(0001) by H-plasma. One such hexagonal nanopit with edges aligned in zz-direction is shown in fig. (a). However, different from graphite, the nanopit size is more than twice as large and their shape is not always hexagonal.

Apart from nanopits, elevated areas with a height of 0.11 ± 0.04 nm were formed during the etching (fig. (b)). Differential tunneling current (dI/dV) spectra taken by STS were found to be different on elevated and non-elevated terraces (shown in (c)). On the lower terrace, it is asymmetric with the Dirac point around -500 meV, similar to the original graphene on SiC(0001), whereas on the elevated terrace it is V-shaped and centered close to the Fermi energy, suggesting a weakening of the substrate influence. Both the topographic and spectral features indicate that the elevated terraces consist of QFSG, that was formed by H atoms passivating the substrate in those areas during H-plasma etching. The anisotropic nanopits appear in both the elevated and non-elevated areas, therefore zz GNRs with two different substrate influences on the spin polarized zz edge state can be studied in the H-plasma treated graphene on SiC(0001).

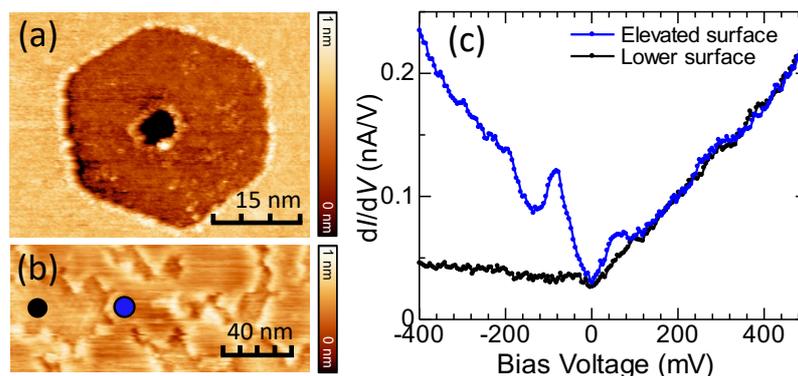


Fig.: STM/S measurements on H-plasma treated graphene on SiC(0001). (a) Hexagonal nanopit on an elevated terrace, (b) Elevated islands (blue dot) surrounded by the original surface (black dot), and (c) dI/dV spectra taken at the positions of the dots in (b).

- [1] A. Amend *et al.*, e-JSSNT **16**, 72 (2018); T. Matsui *et al.*, to appear.
[2] T. Matsui *et al.*, presented at ACSIN-26 & ICSPM26, Sendai, 2018.
[3] A. Amend *et al.*, arXiv:1812.06402v1.

強誘電半導体 SbSI のシフト電流における電極の影響 Impact of electrodes on shift current in ferroelectric semiconductor SbSI

工学系研究科 物理工学専攻 川崎・打田研究室¹、
理化学研究所 創発物性科学研究センター²、JST さきがけ³

畑田 大輝¹, 中村 優男^{2,3}, 金子 良夫², 小川 直毅^{2,3}, 十倉 好紀^{1,2}, 川崎雅司^{1,2}

強誘電体などの空間反転対称性の破れた物質は光起電力効果を示すことが知られている。

近年の理論的研究により、この現象の起源がシフト電流と呼ばれる量子力学的干渉により発生するトポロジカル光電流にあることが明らかになった。シフト電流はキャリアの移動度に依存しないという従来型の光起電力効果にはない際立った特徴を持つ [1]。しかし、この特徴はこれまでの実験的研究では電極界面のショットキー障壁の影響により十分に示すことができていなかった [2]。

そこで本研究では、可視光応答性を持つ強誘電体 SbSI を対象物質として、電極がシフト電流の取り出しに与える影響を調べた [3]。気相輸送法により作製した SbSI の単結晶試料に様々な電極物質を蒸着し、光電流特性を比較した。その結果、①正負双方の電極に同じ物質を蒸着した対称な電極構造では Pt のような仕事関数の大きな物質で大きな光電流が得られること (Fig. 1)、②正負で異なる物質を用いた非対称電極な構造の試料は光電流が最大となった Pt 電極の試料より光電流は大きくなりません、がわかった。以上の結果は、*p* 型の半導体である SbSI のシフト電流には多数キャリアの正孔が主に寄与していることを示唆している。さらに、最も光電流が大きかった Pt 電極試料に対して電流電圧特性の温度依存性を調べた。その結果、温度変化に伴い試料の抵抗が 4 桁近くも変化しているにもかかわらず、ゼロバイアス時の光電流は殆ど一定であるという結果が得られ (Fig. 2)、シフト電流の持つ移動度に依存しないという性質を示すことに成功した。

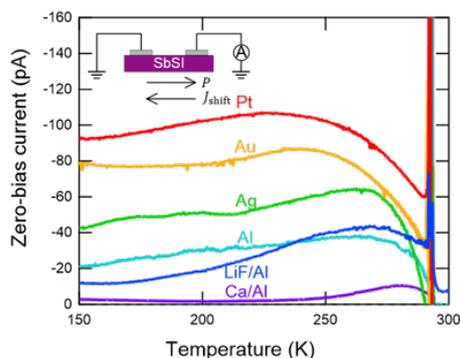


Fig. 1: Temperature dependence of zero-bias photocurrent for different electrode samples. The inset shows schematic of measurement setup

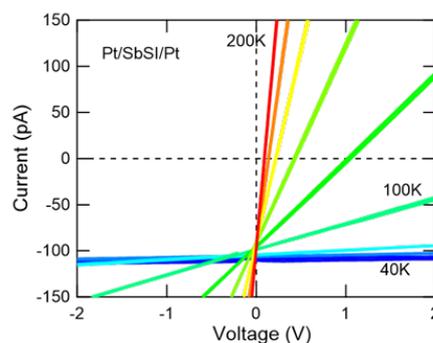


Fig. 2: Current-voltage characteristics of a Pt electrode sample measured at varying temperatures.

- [1] T. Morimoto *et al.* Phys. Rev. Lett **121**, 267401 (2018), [2] M. Nakamura *et al.* Nat. Commun. **8**, 281 (2017).
[3] M. Nakamura *et al.* Appl. Phys. Lett. **113**, 232901 (2018)

電荷密度波物質 TaSe₂ の超高速光励起ダイナミクス Ultrafast photo-excitation dynamics of charge-density-wave compound TaSe₂

理学系研究科 物理学専攻 島野研究室¹, 工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室²,
理研 GEMS³, 低温センター 研究開発部門⁴

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

遷移金属ダイカルコゲナイド(Transition Metal Dichalcogenides, TMDs)は遷移金属原子とカルコゲン原子からなり、主に層状構造をなす。TMDs の中には電荷密度波(CDW)相を示すものが存在する。CDW は鎖状あるいは層状構造を持つ低次元導体に多く見られ、結晶のひずみに追従して電子密度に周期的な変化が生じフェルミ面にギャップが開くことが特徴である。CDW 相を示す TMDs の中でも、複数の CDW 相を持つもの、あるいは CDW 相に加えて超伝導相をもつ物質が存在し関心を集めている。例えば、1T-TaSe₂ において、整合 CDW 状態にあるものを光励起することで平衡状態にない隠れた準安定な CDW 状態が出現することが報告されている[1]。このように、相制御による光誘起相転移や隠れた秩序相の発現の可能性といった観点から、多秩序系における光励起ダイナミクスの研究は大変興味深い。

本研究では、CDW 相・超伝導相を示す 3R-TaSe₂ 薄膜において、光励起による相制御を目的として、ポンプ-プローブ分光を行った。ポンプ光としてテラヘルツ光(光子エネルギー 2.9 meV) および近赤外光(光子エネルギー 1.55 eV) の異なるエネルギースケールを持った 2 種類の光源を用いて励起し、プローブ光として時間遅延をつけてテラヘルツ光を入射しテラヘルツ帯の光学伝導度を測定することで励起後の非平衡ダイナミクスを調べた。

図に示すのは CDW 相にある 4.3 K でテラヘルツ光(ピーク電場強度 34 kV/cm)および近赤外光(パルスエネルギー 21.9 μJ/cm²) を照射した際の、平衡状態からの差分光学伝導度実部の時間変化の様子である。平衡状態では金属的な光学応答を示すが、どちらの励起においても程度の差はあるが ~7 meV 以下の光学伝導度実部に減少が見られ、その後準安定状態に落ち着く様子が観測された。これは、光励起により平衡状態にはない新しい CDW ギャップが開いた可能性を示しており、異なるエネルギースケールの励起によって同様の結果を示したことは大変興味深い。ポスター発表では、非平衡ダイナミクスの詳細や温度依存性を示し、非平衡状態で出現するギャップ的な構造と基底状態の CDW 相の相関を考察する。

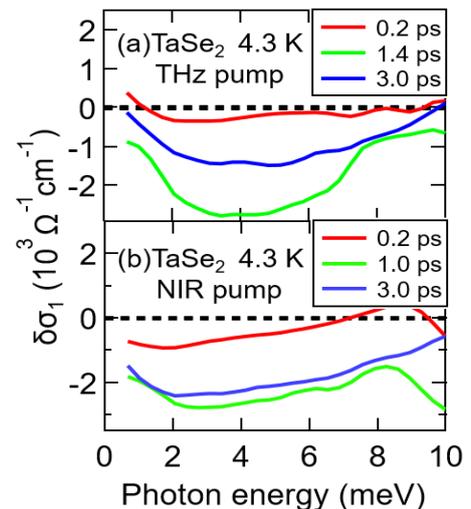


図. 4.3 K における(a)テラヘルツ光励起(b)近赤外光励起後の差分光学伝導度実部の時間変化

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

P-59

銅-オクタシアノモリブデン集積体の電気化学薄膜における強誘電性 Ferroelectricity of an electrochemical thin film composed of copper-octacyanomolybdate assembly

理学系研究科 化学専攻 大越研究室

池田侑典、中川幸祐、井元健太、中林耕二、所裕子、大越慎一

シアノ基が遷移金属イオン間を交互に架橋したシアノ架橋型金属集積体は、シアノ基を介して遷移金属イオン間に働く超交換相互作用やシアノ架橋構造の柔軟性から、新奇物性を兼ね備えた磁性材料の候補として注目されている。当研究室ではシアノ架橋型金属集積体の一種である $\text{Cu}^{\text{II}}_2[\text{Mo}^{\text{IV}}(\text{CN})_8] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (**CuMo**)の粉末試料において、光誘起磁化[1]と強誘電性[2]を観測、報告している。また、**CuMo**は溶液中の電解反応で電極表面に電気化学的に薄膜として合成することが可能である。本研究において、透明電極上に **CuMo**を薄膜として合成し、分極測定を行った結果、強誘電性が観測されたことを報告する。

CuMoの電気化学薄膜は $\text{Na}_3[\text{Mo}^{\text{V}}(\text{CN})_8] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ と $\text{Cu}^{\text{II}}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ が溶解した pH3の硝酸酸性水溶液に +500 mV(vs. Ag/AgCl)の条件で電圧を印加することで Mo^{V} を Mo^{IV} に還元し、作用極上に紫色の薄膜として合成した。組成分析の結果、組成式は $\text{Cu}_2[\text{Mo}(\text{CN})_8] \cdot 7.0\text{H}_2\text{O}$ であることがわかった。赤外分光測定の結果から、 Cu^{II} と Mo^{IV} の間をシアノ基が架橋結合していることが示唆された。粉末X線回折測定から、本集積体薄膜は基板面に対して強く配向した構造を取っていることがわかった(図1)。次に、液体窒素を寒剤として使用し、本集積体薄膜について電気分極測定を行った。その結果、225 Kにおいてヒステリシスループが観測された(図2)。同一温度で計測したリーク電流と比較した結果、このヒステリシスループが強誘電性に由来するものであると結論づけることができた。

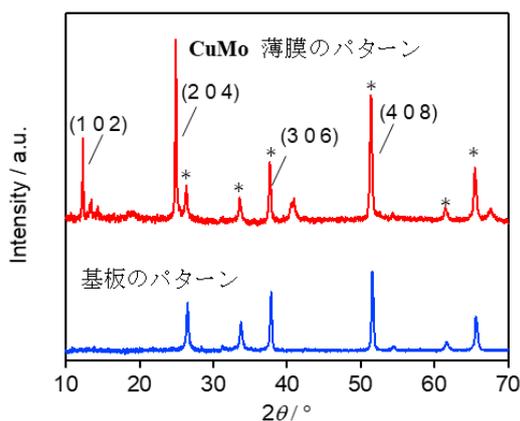


図 1. CuMo 薄膜の PXRD パターン

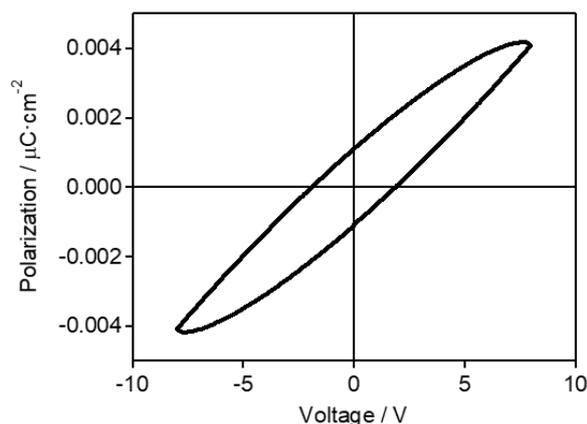


図 2. 225 K で観測された P-V 曲線

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

[2] K. Nakagawa, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Inorg. Chem. **47** 10810 (2008)

P-61

低温センター共同利用装置の紹介

Introduction of joint-use equipments in the Cryogenic Research Center

低温センター・共同利用部門

戸田 亮

低温センターでは、幅広い研究者が、必要なときに手軽に物性測定を行えるよう、低温物性測定装置を共同利用に供している [1]。利用にあたっては、事前に使用申請書を提出して許可を得る必要があるが、受付は随時行っており、急な要望にも対応可能である。SQUID 磁化測定装置(MPMS)と物性評価システム(PPMS) (ともに Quantum Design 社製) については年間を通じて使用可能な状態に維持しているため、許可を得た使用者は、1日単位で予約し、測定を行うことができる。装置の使用料金は5,000円/日である。試料を預かり、代理で測定を行う依頼測定も別料金にて受け付けているが、両装置は、専用の制御ソフトを通じて初心者であっても比較的簡単かつ安全に操作することができるようになっているので、自身で測定することをお勧めしている。事前相談、装置の使用方法に関する質問も随時受け付けているので、気軽にお問い合わせいただきたい。

昨年度より、産学連携利用として私企業による利用も可能となった。使用にあたっては連帯的に責任を負う本学教職員の紹介が必要となり使用料金も学内利用とは異なるが、許可を得れば、同様に1日単位で予約し測定を行うことができる。興味があれば気軽にお問い合わせいただきたい。



図1. MPMS



図2. PPMS

MPMS(図1)は高感度磁化測定装置で、超伝導体や磁性体の物性評価、磁気デバイスの特性評価、磁性不純物量の評価、薄膜や微弱磁気物質の特性評価などに利用されている。PPMS(図2)は複数の物性測定が可能な装置で、新物質の物性研究、試験デバイスの性能評価、構造材や断熱材の特性評価などに利用されている。両装置の仕様を表1にまとめた。両装置とも、室温以上から低温まで広範な温度域で測定可能である。ポスターでは、利用までの手続き、装置の使用方法、測定例などを紹介する。

共同利用装置	MPMS	PPMS
温度範囲 (K)	2 - 400	0.5 - 400
磁場範囲 (T)	0 - 5	0 - 9
測定内容	磁化 (DC・AC)	電気伝導・ホール効果 比熱 熱伝導 (2 K 以上) 熱起電力 (2 K 以上) 磁化 (2 K 以上)

表1. 共同利用装置の仕様

[1] 「東京大学低温センター学内共同利用研究装置使用内規」、「東京大学低温センター利用の手引き (共同利用部門編)」

第10回
低温センター研究交流会
概要集

Abstract book
The 10th 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