

第8回

低温センター研究交流会概要集

Abstract book

The 8th Research Forum of Cryogenic Research Center

■日時： 平成29年2月23日（木）

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8回 低温センター研究交流会 プログラム

- 日時： 平成 29 年 2 月 23 日 (木)
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 樽茶 清悟 (低温センター長)

セッション 1 座長：高橋 陽太郎(工学系研究科・量子相エレクトロニクス研究センター)

- 9:35-9:55 井元 健太 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)
O-01 FeNb シアノ架橋金属錯体における多段転移および光可逆スピントロニクスオーバー強磁性
Step-wise spin transition and photo-reversible spin-crossover magnetism in an Fe-Nb cyanido-bridged metal assembly
- 9:55-10:15 堀尾 真史 理学系研究科・物理学専攻・D3 (藤森研究室)
O-02 ARPES と XMCD で調べる $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ における強磁性と超伝導の共存
Coexistence of ferromagnetism and superconductivity in $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ studied by ARPES and XMCD
- 10:15-10:35 Nguyen Thanh Tu 工学系研究科・電気系工学専攻・Postdoc (田中・大矢研究室)
O-03 High-temperature ferromagnetism in both n-type and p-type Fe-doped ferromagnetic semiconductors
- 10:35-10:55 増田 英俊 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (石渡研究室)
O-04 多層ディラック電子系 EuMnBi_2 における磁気秩序が誘起する特異な量子伝導現象
Observation of quantized Hall plateaus in a bulk antiferromagnet EuMnBi_2 with magnetically confined 2D Dirac fermion
- 10:55-11:10 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)

- 11:10-11:30 打田 正輝 工学系研究科・物理工学専攻・助教 (川崎研究室)
O-05 ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子ホール効果
Quantum Hall effect in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2
- 11:30-11:50 濱崎 拓 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D1 (枝川・徳本研究室)
O-06 Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の評価と電気伝導
Characterization and electrical conductivity measurements of dislocations in Bismuth-Antimony topological insulators
- 11:50-12:10 井手上 敏也 工学系研究科・物理工学専攻・助教 (岩佐研究室)
O-07 反転対称性の破れた物質における非相反電荷輸送現象
Nonreciprocal electric transport in materials without inversion symmetry

12:10-12:30 泊 開人 理学系研究科・物理学専攻・M2（島野研究室）
 O-08 高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起非平衡状態における c 軸ジョセフソンプラズマの観測
 Photoexcited nonequilibrium dynamics of c-axis Josephson plasma in high-Tc superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

12:30-13:30 昼 食

13:30-15:30 **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40分までに撤去して下さい。

13:30-14:30 偶数番号

14:30-15:30 奇数番号

セッション3 座長：大越 慎一（理学系研究科・化学専攻）

15:40-16:00 盧 翌 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・農学特定研究員
 （食品生物構造学研究室）
 O-09 NMR による発酵乳の非破壊分析
 Nondestructive Analysis of Fermented Milk by NMR Spectroscopy

16:00-16:20 佐藤 拓朗 工学系研究科・物理工学専攻・D3（鹿野田研究室）
 O-10 幾何学的フラストレーション系有機伝導体における電子ガラス相
 Charge-glass state in an organic conductor with geometrical frustration

16:20-16:40 遠藤 由大 理学系研究科・物理学専攻・M2（長谷川研究室）
 O-11 SiC 結晶上2層グラフェンの輸送特性および Li インターカレートによる影響
 Transport property of bilayer graphene on SiC crystal and the influence of Li intercalation

16:40-17:00 馬場 翔二 工学系研究科・物理工学専攻・D3（樽茶研究室）
 O-12 InAs 二重ナノワイヤー接合におけるクーパー対分離実験
 Cooper-pair splitter realized in InAs double-nanowire junctions

17:00-17:10 休 憩

17:10-17:55 **特別講演** 座長：島野 亮（低温センター・研究開発部門）

岸尾 光二 工学系研究科・応用化学専攻・教授
 低温センターと超伝導工学専攻

17:55- 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 (13:20-15:20)

- P-01 宇佐美 潤 理学部・物理学科・B4 (福山研究室)
超流動フィルムフローのフロー速度と基板表面粗さの関係
The Role of Substrate Surface Roughness on Superfluid Film Flow Velocity
- P-02 長田 美咲 工学系研究科・建築学専攻・M2 (建築材料研究室)
発泡断熱材を中心とする建築材料の熱伝導率の測定と温度依存性・含水率依存性に関する研究
Measurement of thermal conductivity of mainly foaming insulation material and its temperature/water content dependency
- P-03 澤野 拓也 工学系研究科・物理学専攻・M1 (島野研究室)
黒リンの光ポンプテラヘルツプローブ分光
Optical pump Terahertz probe spectroscopy on black phosphorus
- P-04 中村 祥子 低温センター・研究開発部門・特任助教
シアネートエステル樹脂の低温物性
Low Temperature Properties of Cyanate Ester Resins
- P-05 Andre E. B. Amend 工学系研究科・物理学専攻・M2 (福山研究室)
STS Studies of Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching
- P-06 吉田 将郎 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (岩佐研究室)
Nonvolatile current switching of electronic structures in a two-dimensional material
- P-07 湯本 郷 工学系研究科・物理学専攻・D3 (島野研究室)
単層グラフェンにおける非等間隔ランダウ準位の超高速非線形テラヘルツ応答
Ultrafast nonlinear terahertz responses of non-equidistant Landau levels in monolayer graphene
- P-08 川崎 賢人 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (樽茶・山本研究室)
Hamiltonian estimation of a single-electron spin qubit in nuclear spin bath
- P-09 高山 正行 工学系研究科・物理学専攻・D1 (島野研究室)
バルク GaAs における低温高密度励起子状態での励起子間相互作用の研究
The exciton-exciton interaction in a low-temperature and high-density exciton state in bulk GaAs
- P-10 恩河 大 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (岩佐研究室)
単層 MoS₂ における励起子ホール効果
Excitonic Hall effect in monolayer MoS₂
- P-11 室谷 悠太 工学系研究科・物理学専攻・M2 (島野研究室)
THz 電場によるイオン化を用いた励起子モット転移ダイナミクスの観測
Study of exciton Mott transition using ionization by a THz electric field
- P-12 西早 辰一 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (川崎研究室)
(Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ 薄膜における電界効果を用いたキャリア制御
Carrier Control of (Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ thin films by field effect
- P-13 末次 祥大 工学系研究科・物理学専攻・M2 (高木・北川研究室)
アンチペロブスカイトにおける三次元ディラック電子の電磁応答
Electron magnetic response of three-dimensional Dirac electron in anti-perovskites

- P-14 中澤 佑介 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)
 ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における膜厚に依存した電子構造と量子輸送特性
 Thickness-dependent electronic structure and quantum transport of Dirac semimetal Cd_3As_2 thin films
- P-15 服部 裕也 工学系研究科・マテリアル工学専攻・M2 (枝川・徳本研究室)
 $\text{Pb}(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_4$ トポロジカル絶縁体の作製と電気伝導
 Fabrication of $\text{Pb}(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_4$ topological insulators and their electrical conductivity
- P-16 寺田 博 工学系研究科・電気系工学専攻・D3 (田中・大矢研究室)
 Spin dependent transport in GaMnAs-based tunnel junctions
- P-17 大内 祐貴 工学系研究科・物理工学専攻・D2 (川崎研究室)
 $\text{SrRuO}_3 / \text{SrIrO}_3$ ヘテロ接合によるスキルミオン形成と電界制御
 Skyrmion formation and electric-field control in $\text{SrRuO}_3 / \text{SrIrO}_3$ heterostructures
- P-18 佐藤 彰一 工学系研究科・電気系工学専攻・研究生 (田中・大矢研究室)
 Analysis of 3-terminal and 4-terminal spin signals in Si-based vertical and lateral devices
- P-19 丸山 敬裕 理学系研究科・化学専攻・M1 (長谷川研究室)
 パルスレーザー堆積法により作製した EuNbO_3 薄膜の物性評価
 Characterization of EuNbO_3 thin films fabricated by pulsed laser deposition
- P-20 大日方 絢 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (千葉研究室)
 Co 層上に積層された Pd に誘起された磁気モーメントの電界効果
 Electric field effect on induced magnetic moment in Pd deposited on Co layer
- P-21 李 為東 工学系研究科・マテリアル工学専攻・M2 (喜多研究室)
 CoFeB/酸化物界面へのフッ化物と窒化物導入による垂直磁気異方性の変化
 Effects of nitride and fluoride introduction on perpendicular anisotropy at CoFeB/Oxide interfaces
- P-22 日比野 有岐 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (千葉研究室)
 Pt/Co と Pd/Co 系におけるスピン軌道トルクの温度依存性
 Temperature dependent Spin-orbit torque in Pt/Co and Pd/Co system
- P-23 伴 芳祐 工学系研究科・電気系工学専攻・研究生 (田中・大矢研究室)
 IV 族強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ における不純物バンド伝導と磁性
 Impurity band conduction and magnetism in group-IV ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$
- P-24 芝田 悟朗 理学系研究科・物理学専攻・助教 (藤森研究室)
 角度依存 XMCD による $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の磁気異方性と電子分布異方性の観測
 Magnetic anisotropy and anisotropic electron distribution in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ thin films revealed by angle-dependent XMCD
- P-25 若林 勇希 工学系研究科・電気系工学専攻・D3 (田中・大矢研究室)
 Origin of the large magnetoresistance in $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ granular thin films
- P-26 阿部 紘一 農学系研究科・応用生命工学専攻・D2 (酵素学研究室)
 ソホロオリゴ糖結合タンパク質の X 線結晶構造解析
 Crystal structures of sophorooligosaccharide-binding protein

- P-27 清水 光 薬学系研究科・薬科学専攻・D1（蛋白構造生物学教室）
新規グアニンヌクレオチド交換因子 SmgGDS の X 線結晶構造解析
X-ray crystal structure analysis of novel guanine nucleotide exchange factor SmgGDS.
- P-28 佐藤 真与 農学系研究科・応用生命工学専攻・D1（酵素学研究室）
ビフィズス菌由来ヒト糖鎖代謝酵素 NahK の X 線結晶構造解析
X-ray crystal structural analysis of human oligosaccharide degrading enzyme NahK from Bifidobacteria
- P-29 隣 真一 工学系研究科・電気系工学専攻・専門職員（関野研究室）
低侵襲がん診断磁気機器の研究
Minimally invasive magnetic medical Device
- P-30 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
シアノ架橋型金属錯体におけるイオン伝導性
Ionic conductivity of cyano-bridged metal assemblies
- P-31 中田 耕平 工学系研究科・物理工学専攻・M2（鹿野田研究室）
擬2次元フラストレート系有機導体の金属・絶縁体転移近傍におけるスピン励起のNMR研究
NMR study of spin excitations near the metal-insulator transition of quasi-2D organic conductors
- P-32 大出 千恵 理学系研究科・化学専攻・M2（西原研究室）
特異な低温磁気特性を示す新規分子性磁性体の開発
Development of novel molecular-based magnets with unique properties at low temperature
- P-33 山原 弘靖 工学系研究科・電気系工学専攻・バイオエンジニアリング専攻・特任研究員（田畑研究室）
Co,Si 置換 $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ クラスターストラス薄膜における熱履歴記憶
Memory Effect of Thermal History on Co, Si-substituted $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Cluster Spin Glass Thin Films
- P-34 小峯 誠也 理学系研究科・化学専攻・D1（大越研究室）
第二高調波発生を示す 1 次元配位高分子
One-dimensional magnetic coordination polymers exhibiting second harmonic generation
- P-35 橋本 凌 工学系研究科・物理工学専攻・M2（鹿野田研究室）
 ^{13}C NMR による電荷フラストレート系 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ における動的不均一性の研究
 ^{13}C NMR study of dynamical heterogeneity in charge-frustrated system β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$
- P-36 荻野 拓 工学系研究科・応用化学専攻・特任講師（岸尾研究室）
層状構造を持つ新規酸フッ化物の合成と物性
Synthesis and physical properties of new layered oxyfluoride
- P-37 中川 裕治 工学系研究科・物理工学専攻・M2（岩佐研究室）
層状窒化物 HfNCI におけるイオンゲート法とトンネル分光法を用いた超伝導ギャップ測定
Superconducting gap measurement in HfNCI by ionic gating and tunneling spectroscopy
- P-38 松永 隆佑 理学系研究科・物理学専攻・助教（島野研究室）
超伝導体 NbN の非線形感受率における Higgs モードと電荷密度揺らぎの寄与
Contributions of Higgs mode and charge density fluctuation on third-order nonlinear susceptibility in superconductor NbN

- P-39 鈴木 悠司 工学系研究科・物理工学専攻・M2（鹿野田研究室）
有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ の熱電効果
Thermoelectric effects in the organic superconductor κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈
- P-40 勝見 恒太 理学系研究科・物理学専攻・M1（島野研究室）
高温超伝導体 Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} 単結晶におけるテラヘルツ波励起非平衡ダイナミクス
Terahertz-induced non-equilibrium dynamics in a single-crystal high-temperature superconductor Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}
- P-41 松岡 秀樹 工学系研究科・物理工学専攻・M1（岩佐研究室）
電解質ゲートを用いた電子ドーピング型銅酸化物 La_{2-x}Ce_xCuO₄ における電子相の探索
Exploring electronic phases in electron-doped cuprate La_{2-x}Ce_xCuO₄ by electrolyte gating
- P-42 輿石 佳佑 理学系研究科・物理学専攻・D1（藤森研究室）
Te アニールした低 Se ドープ 11 型鉄系超伝導体 FeTe_{1-x}Se_x の角度分解光電子分光
ARPES study of the electronic state in Te-annealed FeTe_{1-x}Se_x
- P-43 藤井 武則 低温センター・研究開発部門・助教
鉄系超伝導体 FeSe の圧力下における熱起電力およびネルンスト効果
Thermopower and Nernst effect of FeSe under hydrostatic pressure
- P-44 富田 圭祐 理学系研究科・物理学専攻・D1（島野研究室）
鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x の THz ポンププローブ分光
Terahertz pump-probe spectroscopy of iron-based superconductor FeSe_{1-x}Te_x
- P-45 舘野 瑞樹 工学系研究科・物理工学専攻・M2（樽茶・山本研究室）
コルビノ型ジョセフソン接合の電子輸送特性に関する実験的研究
Experimental study of electron transport of Corbino-geometry Josephson junction
- P-46 庭田 正人 理学系研究科・物理学専攻・M2（岡本研究室）
磁性体を吸着した Pb 超薄膜における平行磁場による超伝導の増強
Enhancement of superconductivity by the parallel magnetic field in ultrathin Pb films with magnetic impurities
- P-47 斎藤 優 工学系研究科・物理工学専攻・D2（岩佐研究室）
MoS₂ 電界誘起超伝導における巨大な臨界磁場と非相反伝導
Enhanced upper critical field and nonreciprocal charge transport in superconducting MoS₂
- P-48 吉田 研介 理学系研究科・物理学専攻・M1（村川研究室）
低温における音叉型水晶振動子の共鳴特性の温度依存性
Resonance Property of Quartz Tuning Fork at Low temperature
- P-49 秦 峰 工学系研究科・物理工学専攻・D1（岩佐研究室）
Chiral superconducting transport in WS₂ nanotube
- P-50 戸田 亮 低温センター・共同利用部門・技術専門職員
小型超低温連続冷凍システムの開発
Development of a Compact and Continuous Sub-mK Refrigerator

- P-51 志村 芽衣 低温センター・液化供給部門・技術職員
自加圧式窒素容器再検査の工程と現状の課題
Current tasks in the re-inspection process of self pressurizing type liquid nitrogen vessels
- P-52 加茂 由貴 低温センター・液化供給部門・技術職員
寒剤使用研究室 登録情報更新システムの紹介
Annual update system of registered information about cryogen using laboratories

口頭発表

O-01

FeNb シアノ架橋金属錯体における多段転移および光可逆スピ
ンクロスオーバー強磁性Step-wise spin transition and photo-reversible spin-crossover
magnetism in an Fe-Nb cyanido-bridged metal assembly

理学系研究科化学専攻大越研究室

井元健太、大越慎一

【緒言】当研究室では、シアノ基により金属イオンが架橋されたシアノ架橋金属錯体において、光による磁気特性制御など様々な物性を報告してきた[1,2]。特に、 Fe^{II} と $[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]$ からなる系では、光誘起 Fe^{II} スピ
ンクロスオーバーに基づく光磁性現象を報告している[2]。本研究では、 Fe^{II} と $[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]$ 、有機配位子の
4-ピコリンからなる化合物(1)において多段スピン転移および可逆的な光磁性を見出したので報告する[3]。

【実験】目的化合物(1)は、 $\text{K}_4[\text{Nb}(\text{CN})_8]$ 水溶液と FeCl_2 、アスコルビン酸、4-ピコリンの混合水溶液の反応に
より紫色粉末として得た。物性評価は元素分析、粉末X線回折(XRD)、紫外可視吸収スペクトル(UV-vis)およ
び液体Heを冷媒として用いた超伝導量子干渉計(SQUID)により行った。

【結果と考察】元素分析より1の組成は $\text{Fe}_2[\text{Nb}(\text{CN})_8](4\text{-メチルピリジン})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と判明した。結晶構造解
析から1は直方晶 $Fddd$ の空間群に属し、 Fe^{II} サイトには4-ピコリンのN原子4つとシアノ基のN原子2
つが配位していた(図1)。磁化率温度積($\chi_M T$)の温度依存性の測定では、300 Kでの $\chi_M T$ 値は Fe^{II} (高スピン、
 $S=2$)2つと Nb^{IV} ($S=1/2$)の合計から計算される値と一致したが、温度低下により $\chi_M T$ 値は115 Kと95 K
を中心とする段階的な減少を示した。吸収スペクトルにおける Fe^{II} のd-d遷移に帰属されるピークが冷
却により増大したことから、 Fe^{II} (高スピン、 $S=2$)から Fe^{II} (低スピン、 $S=0$)へのスピ
ンクロスオーバー現象の発現が示唆された。続いて、低温で常磁性の本化合物に532 nmの光を照射した結果、自発磁化が発現
し、磁気相転移温度14 K、保磁力2300 Oeの強磁性体となった。また、引き続き785 nmの光照射を行っ
た結果、磁化が減少し、磁気相転移温度12 K、保磁力1300 Oeの別の磁気状態に変化した(図2)。この磁
気状態の変化は、532-nm光照射により Fe^{II} が低スピン状態($S=0$)から高スピン状態($S=2$)に変化し、785-
nm光照射により低スピン状態($S=0$)に一部戻るという光可逆スピン転移が、 Fe^{II} (高スピン、 $S=2$)と Nb^{IV} ($S=1/2$)がシアノ基を介して磁気相互作用を有する環境下で起こったためと考えられる。

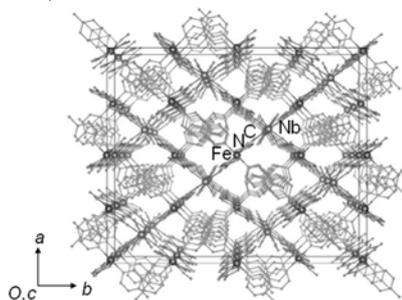


図1 1の結晶構造.

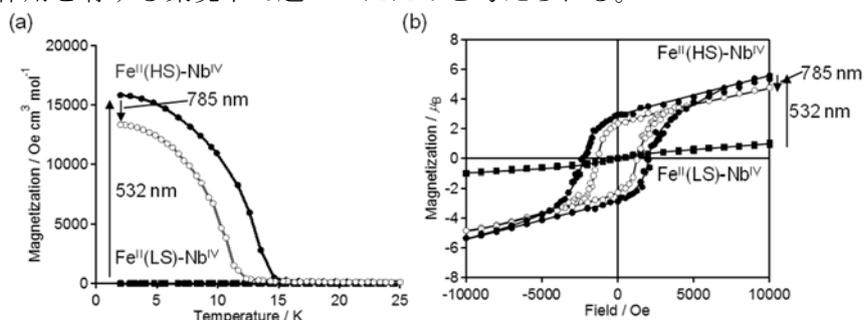


図2 1の光照射前後の(a)磁化温度曲線、(b)磁化磁場曲線.

[1] S. Ohkoshi, H. Tokoro, *Accounts Chem. Res.*, 45, 1749 (2012). [2] S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, H. Tokoro, *Nature Chemistry* 3, 564 (2011). [3] K. Imoto, S. Ohkoshi, *Chem. Lett.* 45, 359 (2016).

ARPES と XMCD で調べる $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ における 強磁性と超伝導の共存

Coexistence of ferromagnetism and superconductivity in $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ studied by ARPES and XMCD

理学系研究科 物理学専攻 藤森研究室¹, 東大工², KEK-PF³,
JAEA⁴, 東工大フロンティア研⁵

堀尾真史¹, 岡崎浩三¹, 竹田幸治⁴, 鈴木博人¹, 徐健¹, 奥石佳佑¹, 石上啓介¹,
芝田悟朗¹, 高橋文雄¹, 若林勇希², 坂本祥哉¹, 野中洋亮¹, 池田啓祐¹, 小林正起³,
堀場弘司³, 組頭広志³, 小野寛太³, 小出常晴³, 齋藤祐児⁴, 山上浩志⁴, 並木宏允⁵,
片桐隆雄⁵, 笹川崇男⁵, 藤森淳¹

鉄系超伝導体は銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度を有する物質群として注目されている。反強磁性金属にキャリアをドーピングするもしくは圧力を印加することによって超伝導が発現するため、反強磁性と超伝導の関連が長年議論されてきた。鉄系超伝導体 $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ ($\delta=0$) では $T_c=33\text{ K}$ の超伝導が発現する[1]が、酸素欠損 $\delta=0.25-0.5$ を導入すると、 T_c が 20 K 程度まで低下する一方で、図 1 に示すように残留磁化 $10^{-3}\ \mu_B/\text{f.u.}$ ほどの弱強磁性（キュリー温度 $T_C\sim 210\text{ K}$ ）が発現する[2]。鉄系超伝導体で強磁性が見られる例は非常に稀有であるため、強磁性の起源及び超伝導との関連に興味を持たれている。

本研究では $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ の強磁性の性質と起源を調べるため、X線磁気円二色性（XMCD）による元素選択的な磁気測定及び角度分解光電子分光（ARPES）測定を行った。図 2 に示した ARPES スペクトルでは常磁性状態の Fe $3d$ バンドのみでは説明できない複雑なバンド構造が観測された。XMCD で調べた Fe と V それぞれの磁氣的性質と合わせ、観測された電子構造と強磁性との関連を議論する。

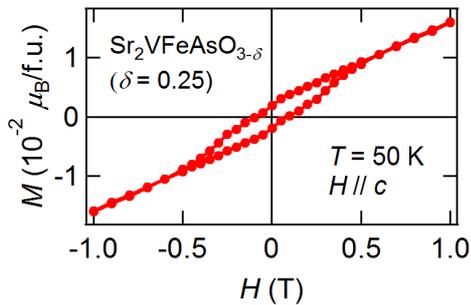


図 1. $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ ($\delta=0.25$) の M - H 曲線。

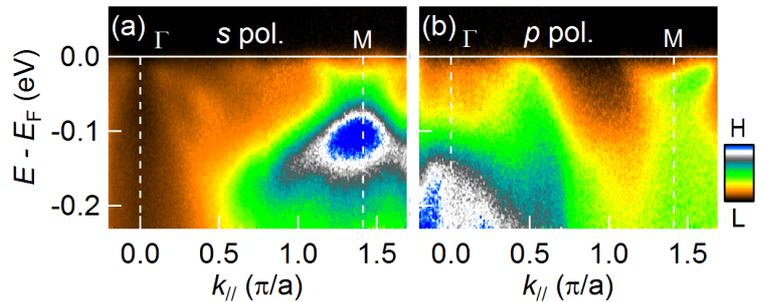


図 2. ARPES スペクトル。(a) s 偏光。(b) p 偏光。

[1] T. Katagiri and T. Sasagawa, Physica C **484**, 16 (2013).

[2] 片桐隆雄 他, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013).

High-temperature ferromagnetism in both *n*-type and *p*-type Fe-doped ferromagnetic semiconductors

○Nguyen Thanh Tu,¹ Pham Nam Hai,^{1,2,3} Le Duc Anh,^{1,4} and Masaaki Tanaka^{1,3}

¹Department of Electrical Engineering & Information Systems, The University of Tokyo.

²Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology

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

⁴Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo

Ferromagnetic semiconductors (FMSs), which have the properties and functionalities of both semiconductors and ferromagnets, provide fascinating opportunities for basic research in condensed matter physics and device applications. To realize practical semiconductor spintronics devices, both *n*-type and *p*-type FMSs with high Curie temperatures (T_C) are strongly required. However, the T_C values of III-V FMSs reported so far are 200 K in *p*-type (Ga,Mn)As, 100 K in *p*-type (In,Mn)As, and 80 K in *n*-type (In,Fe)As, which are still much lower than room temperature [1-3]. In this paper, we present the magnetic properties of both *p*-type FMS ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb with $x = 3.9 - 25\%$ and *n*-type FMS ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb with $x = 5 - 16\%$ grown by low-temperature molecular beam epitaxy (LT-MBE) [4]. Crystal structure analyses by X-ray diffraction, scanning transmission microscopy and transmission electron diffraction indicate that the ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb and ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb thin films maintain the zinc-blende crystal structure. We carried out the characterizations of the magnetic properties of the *p*-type ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb and *n*-type ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb thin films by various methods including magnetic circular dichroism (MCD) spectroscopy, anomalous Hall effect, and SQUID, and found that (Ga,Fe)Sb and (In,Fe)Sb are intrinsic FMSs without any second-phase precipitations. Figures 1(a) and 1(b) show the MCD- H characteristics of two representative samples ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb with $x = 25\%$ and ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb with $x = 16\%$ at various temperatures, respectively. Clear hysteresis curves are observed, demonstrating the presence of ferromagnetic order even at 300 K. T_C of ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb and ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb increases with increasing x as shown in Fig. 1(c). The highest T_C is found to be 340 K for sample ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb ($x = 25\%$), and 350 K for sample ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb ($x = 16\%$). Our results show that the combination of new *n*-type (In,Fe)Sb and *p*-type (Ga,Fe)Sb is promising for semiconductor spintronics devices operating at room-temperature.

This work is supported by Grants-in-Aid for Scientific Research including the Specially Promoted Research. Part of this work was carried out under the Cooperative Research Project Program of RIEC, Tohoku University, and Spintronics Research Network of Japan. N. T. T acknowledges the support from the JSPS Postdoctoral Fellowship Program (No. P15362).

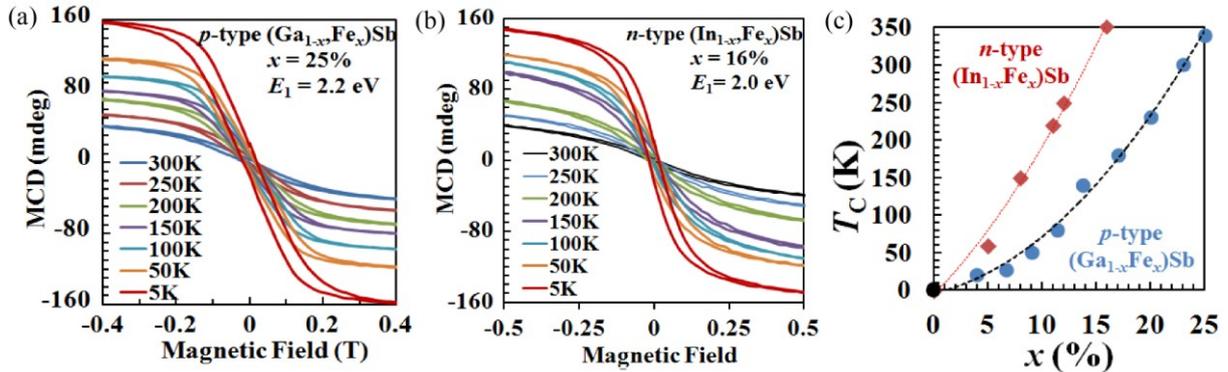


Fig. 1. (a) and (b) MCD- H characteristics of *p*-type ($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb with $x = 25\%$ and *n*-type ($\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x$)Sb with $x = 16\%$ at various temperatures, respectively. (c) Fe concentration x dependence of T_C .

References

- [1] L. Chen, X. Yang, F. Yang, J. Zhao, J. Misuraca, P. Xiong, and S. von Molnar, *Nano Lett.* **11**, 2584 (2011).
- [2] T. Schallenberg and H. Munekata, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 042507 (2006).
- [3] P. N. Hai, L. D. Anh, and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 252410 (2012).
- [4] N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 132402 (2014); *Phys. Rev. B* **92**, 144403 (2015); *Appl. Phys. Lett.* **108**, 192401 (2016).

多層ディラック電子系 EuMnBi_2 における 磁気秩序が誘起する特異な量子伝導現象

Observation of quantized Hall plateaus in a bulk antiferromagnet EuMnBi_2 with magnetically confined 2D Dirac fermion

工学系研究科 物理工学専攻 石渡研究室

増田英俊, 酒井英明, 石渡晋太郎

ディラック電子系は伝導電子が質量ゼロの相対論的粒子とみなせる物質であり、室温での半奇数量子ホール効果、巨大な磁気抵抗などの新奇な物性発現の舞台として近年注目を集めている。最近ではトポロジカル絶縁体表面、層状有機伝導体 $\alpha\text{-ET}_2\text{I}_3$ 、3次元ディラック電子系 Cd_3As_2 など多彩な物質が開拓され、精力的に研究が進められている。他方、磁性体が示す磁場中での特異な電気伝導は、長年にわたって物性物理学の主要な研究対象となっている。これらを組み合わせた、磁気秩序とディラック電子が共存する系ではさらに新奇な物性の発現が期待されるが、そのような物質は現在までほとんど開拓されていない。

我々は最近、新規ディラック電子系 EuMnBi_2 において、ディラック電子の量子伝導と磁気秩序との強い結合に起因した特異な磁気輸送現象を見いだした[1]。 EuMnBi_2 の結晶構造を図1に示す。この系は Bi^+ 正方格子の伝導層と、磁性イオンである Eu^{2+} 、 Mn^{2+} を含む絶縁層からなる層状化合物であり、伝導層の Bi 正方格子上に2次元なディラック電子が存在する。 Eu の磁気モーメントは 22 K 以下、ゼロ磁場で図1のように c 軸に平行な反強磁性(AFM)秩序を示し、さらに c 軸方向に磁場を印加すると Eu モーメントが ab 面内に倒れるスピフロップ(spín-flop)転移を示す(図2)。興味深いことに、スピフロップ転移に伴って層間抵抗率 ρ_{zz} が急激な増大を示す。これはスピフロップ相においてディラック電子が伝導面内に強く閉じ込められ、隣接する伝導層への飛び移りが抑制されることを示している。さらに強磁場ではランダウ量子化を反映した SdH 振動が観測されるが、その振幅は約 15 T で~50%にも達し、バルク結晶としては例外的に大きい。このことは2次元系に特有の現象である量子ホール効果が、ディラック電子の2次元的な閉じ込めによってバルク結晶においても実現するとして理解される。

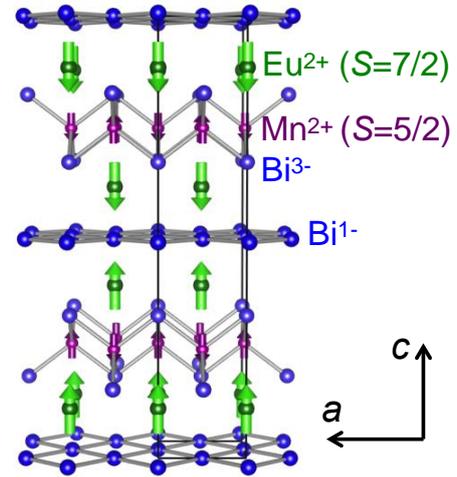


図1 EuMnBi_2 の結晶構造と磁気構造。

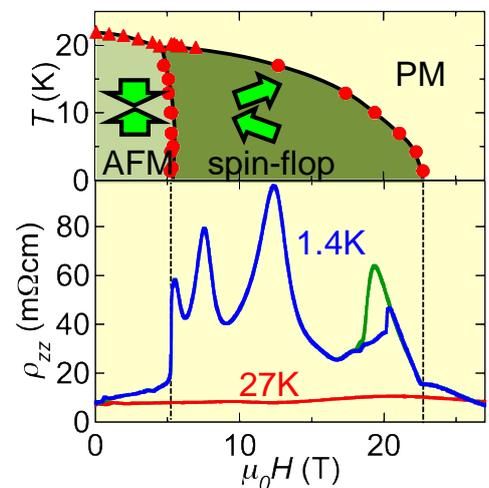


図2 (a)温度-磁場相図。(b)層間抵抗率 ρ_{zz} の磁場依存性。

[1] H. Masuda *et al.* Science Advances **2**, e1501117 (2016); 酒井, 増田, 石渡, 固体物理 **51**, 491 (2016).

O-05

ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子ホール効果 Quantum Hall effect in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2

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
 打田 正輝¹, 中澤 佑介¹, 西早 辰一¹, 秋葉 和人², M. Kriener³,
 小塚 裕介¹, 三宅 厚志², 田口 康二郎³, 徳永 将史²,
 永長 直人^{1,3}, 十倉 好紀^{1,3}, 川崎 雅司^{1,3}

Topological materials, which are characterized by non-trivial electronic band topology, have great potential for novel quantum transport phenomena. Among them, topological Dirac semimetal (TDS) has attracted attention as emergence of the Dirac fermion in three dimensions, where conduction and valence bands touch to form a three-dimensional Dirac dispersion at a pair of the Dirac points and a surface state appears connecting these points. The three-dimensional TDS state is intriguing also as a parent phase of exotic topological phases, which are realized by breaking a symmetry in TDS.

In this context, fabrication of high quality TDS thin films is of importance for discovering its potentialities. Unlike other topological materials, however, crystalline materials of TDS (Cd_3As_2 and Na_3Bi) are difficult to handle and it has been highly challenging to prepare their high quality films. Most transport phenomena including surface transport in TDS have been investigated using bulks so far.

Here we develop growth techniques to prepare high crystallinity and high mobility Cd_3As_2 thin films (Fig. (a)) and observe quantum Hall effect at high magnetic fields up to 55 T (Fig. (b)). By analyzing the quantum transport for different film thicknesses, electronic structure change depending on the confinement thickness is identified, also revealing the presence of a two-dimensional topological insulating phase. Our demonstrations of quantum Hall states in the Cd_3As_2 thin films pave the way for further investigations of unprecedented quantum transport phenomena in topological Dirac semimetal and its derived topological phases.

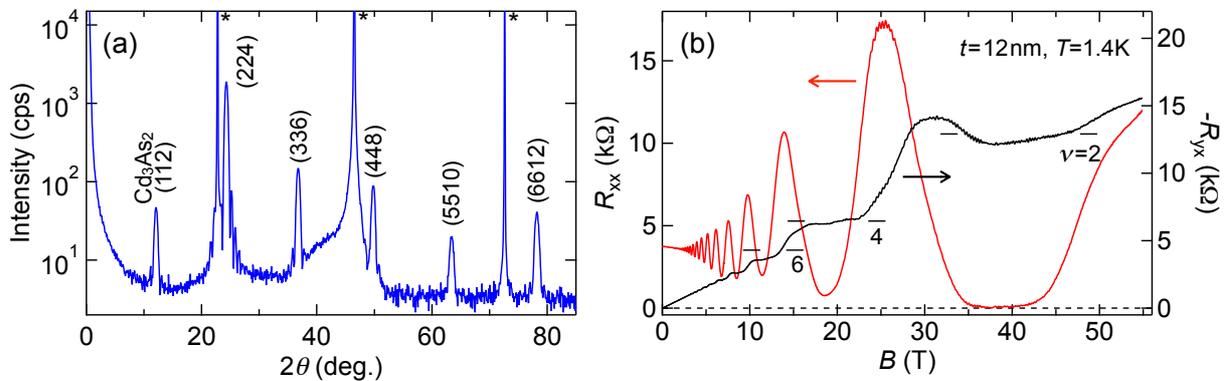


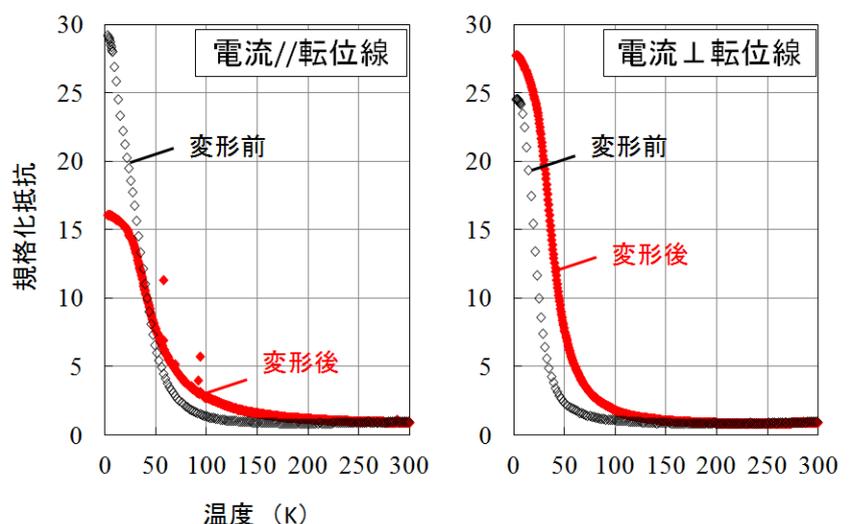
Fig. (a) X-ray diffraction pattern and (b) quantum Hall states observed in a high-quality Cd_3As_2 thin films.

Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の評価と電気伝導 Characterization and electrical conductivity measurements of dislocations in Bismuth-Antimony topological insulators

工学系研究科材料工学専攻 枝川・徳本研究室
濱崎拓、徳本有紀、枝川圭一

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

本研究では、実際のトポロジカル絶縁体結晶中に、トポロジカルに保護された一次元伝導状態の形成条件を満たす転位が導入されること、および導入された転位に沿って一次元伝導状態が形成されることの実証を目的としている。条件を満たす転位が導入され得るトポロジカル絶縁体として、ビスマスアンチモンを選択し、作製した結晶に塑性変形を施すことによって転位を導入した。導入された転位が条件を満たすか否かを、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて調べた。その結果、変形方位を工夫することで、条件を満たす転位が非常に高密度に導入されることが確認された。転位導入/非導入試料において転位線に平行/垂直方向に電流を流し抵抗を測定したところ、転位導入かつ転位線平行方向に電流を流したサンプルにおいて、他では見られない抵抗値の減少が観測された(図1)。



[1] Y. Ran *et al.*, *Nat. Phys.* **5** (2009) 298.

[2] O. A. Tretiakov *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 073108.

図1. 転位導入/非導入試料において転位線に平行/垂直方向に電流を流した時の電気抵抗（室温の値で規格化）

反転対称性の破れた物質における非相反電荷輸送現象 Nonreciprocal electric transport in materials without inversion symmetry

工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 岩佐研究室
井手上 敏也

空間反転対称性の破れた結晶では、電子バンドのスピンスplitや異方性を反映して、特徴的なスピントランスポートや光電流応答等、様々な興味深い物性が発現することが知られている。本発表では、そのような空間反転対称性の破れに起因する物性の一つである非相反電荷輸送現象[1-3]に関する、最近の研究成果に関する報告を行う。非相反電荷輸送は電流の向きによって電気抵抗値が異なるという現象で、電流に関する二色性（一方方向に電流を流しやすい性質：整流性）や電圧に関する二次の非線形応答と捉えることができる。本発表では、三次元層状極性半導体 BiTeBr において初めて極性結晶構造由来の非相反電荷輸送現象を観測した結果[4]や、二次元結晶 MoS_2 および WS_2 カイラルナノチューブのゲート誘起された超伝導状態において、非相反電荷応答を発見した結果[5, 6]を報告する。それぞれの物質で観測された非相反電荷輸送現象の特徴的な振る舞い（磁場・電流・方位依存性等）や微視的な起源に関して議論すると同時に、一般の対称性が破れた結晶における非相反電荷輸送現象や様々な量子相における非線形電流応答等、今後の展望についても述べる。

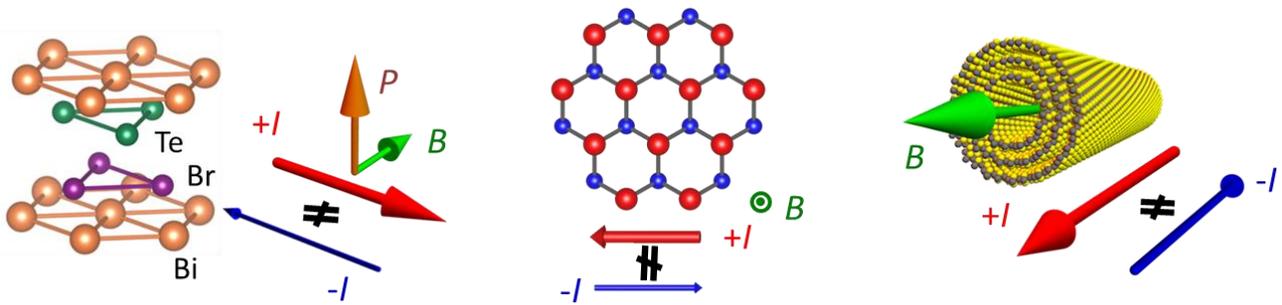


図1. 極性半導体 BiTeBr (左)、二次元結晶 MoS_2 (中) および WS_2 ナノチューブ (右) における非相反電荷輸送現象

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

[2] V. Krstić *et al.* J. Chem. Phys. **117**, 11315-11319 (2002).

[3] F. Pop *et al.*, Nat. Commun. **5**:3757 (2014).

[4] T. Ideue *et al.*, Nat. Phys. Accepted.

[5] R. Wakatsuki *et al.*, Submitted.

[6] F. Qin *et al.*, Nat. Commun. Accepted.

高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起非平衡状態における c 軸ジョセフソンプラズマの観測

Photoexcited nonequilibrium dynamics of c -axis Josephson plasma in high- T_c superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

理学系研究科 物理学専攻 島野研究室¹, JST さきがけ², 産総研³,
低温センター 研究開発部門⁴

泊開人¹, 濱田裕紀¹, 松永隆佑^{1,2}, Dongjoon Song³, 永崎洋³, 島野亮^{1,4}

銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ は、超伝導(S)を担う CuO_2 面が絶縁層(I)を挟んで c 軸方向に積み重なった異方性の高い構造をとり、SIS 型ジョセフソン結合アレイと見なすことができる。そのため T_c 以下の c 軸方向反射率スペクトルにおいて、 CuO_2 面間をコヒーレントに移動する超伝導キャリアによるジョセフソンプラズマ共鳴(JPR)が生じ、そのプラズマ端はテラヘルツ(THz)帯域に現れる[1]。JPR は面間のコヒーレンスの強さを直接反映する現象であるため、光誘起超伝導[2]などの研究において近年注目を集めている。本研究では、ポンププローブ分光法を用いて光励起(1.55 eV)後の過渡的な THz 帯反射率を測定することで、高密度光励起非平衡状態における JPR の振る舞いについて詳細に調べた。

図は単結晶 $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ ($T_c = 35.5$ K)における 5 K での THz 帯 c 軸方向反射率スペクトルであり、平衡状態(黒線)および光励起から 3 ps 後の過渡的なスペクトルを比較したものである。光励起のない平衡状態では JPR 由来のプラズマ端は 7 meV 近傍に観測されるが、励起強度を上げるにつれプラズマ端が低エネルギー側にシフトするとともに、新たなプラズマ端が高エネルギー側から発達し、2つのプラズマ端に分裂してゆく様子が観測された。 T^* 型銅酸化物[3]や磁場中 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$ [4]で見られる光学活性な横 JPR モードとの比較から、このプラズマエッジ分裂の起源の候補として、光励起による面間ジョセフソン結合の周期的な変調が示唆される。講演ではこの変調が生じる機構について詳細に議論する。

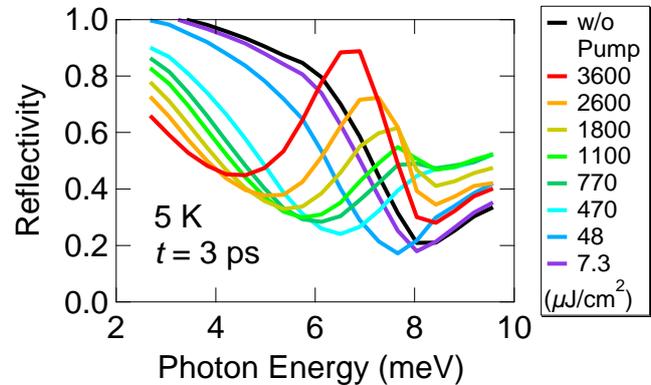


図. 5 K における光励起から 3 ps 後の過渡反射率スペクトルの励起強度依存性

[1] K. Tamasaku *et al.*, Phys. Rev. Lett. **69**, 1455 (1992).

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

[3] T. Kakeshita *et al.*, Phys Rev Lett. **86**, 4140 (2001).

[4] K. M. Kojima *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 247001 (2002).

NMR による発酵乳の非破壊分析 Nondestructive Analysis of Fermented Milk by NMR Spectroscopy

農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・食品生物構造学研究室
○盧翌、胡芳宇、平林佳、宮川拓也、田之倉優

Fermented milk products are usually made from milk fermentation by lactic acid bacteria, and the health benefits of fermented milk products have been proved to be improving digestion [1], normal function of the immune system [2] and so on. Meanwhile, the studies regarding chemical compositions of fermented milk were also carried out. In these studies, the organic acids, acetaldehyde and other compounds in fermented milk were extracted and separated, then analyzed by some conventional techniques such as LC-MS and GC-MS. However, these conventional methodologies were all compound-targeted, and they require appropriate extraction and purification method and chemical derivatization of each component. Qualitative and quantitative modifications of the original mixture would be caused by even a simple treatment.

NMR spectroscopy is highly quantitative and reproducible, and its sensitivity does not depend on the types of metabolites. As a non-targeted method, NMR measurements do not require separation and chemical modification; therefore, comprehensive information regarding the chemical components of mixtures can be rapidly and directly provided. Here, we assigned the signals of fermented milk by combining 1D and 2D NMR spectroscopy without changing the chemical compositions. Furthermore, quantitative difference spectra between quantitative ^1H NMR spectra and diffusion ordered spectroscopy (DOSY) spectra were applied to quantitatively analyze the fermented metabolites whose signals overlapped with broad signals from milk fat. In the present study, this quantitative method was carried out for *in situ* quantitative monitoring of organic compounds in three kinds of fermented milk during fermentation. As a result, 10 types of compounds were observed in Bulgarian yogurt, and *N*-acetyl-D-glucosamine-1-phosphate is detected for the first time. The chemical changes in concentrations of α/β -lactose, α/β -galactose, lactic acid, citrate, ethanol, lecithin, and creatine were monitored in real time, which revealed the differences among the three kinds of fermented milk products. Moreover, pH changes were also revealed by the chemical shift of citric acid during fermentation processes of the three kinds of fermented milk. These results would be applied to study microbial metabolism, and help control the fermentation processes and storage of various fermented milk to improve the quality of fermented milk products, which may indeed influence human health.

[1] D. Guyonnet, A. Woodcock, B. Stefani, C. Trevisan, and C. Hall, *J. Dig. Dis.* **10** 61-70 (2009)

[2] F. Nagao, M. Nakayama, T. Muto, and K. Okumura, *Biosci. Biotechnol. Biochem.* **64** 2706-8 (2000)

O-10

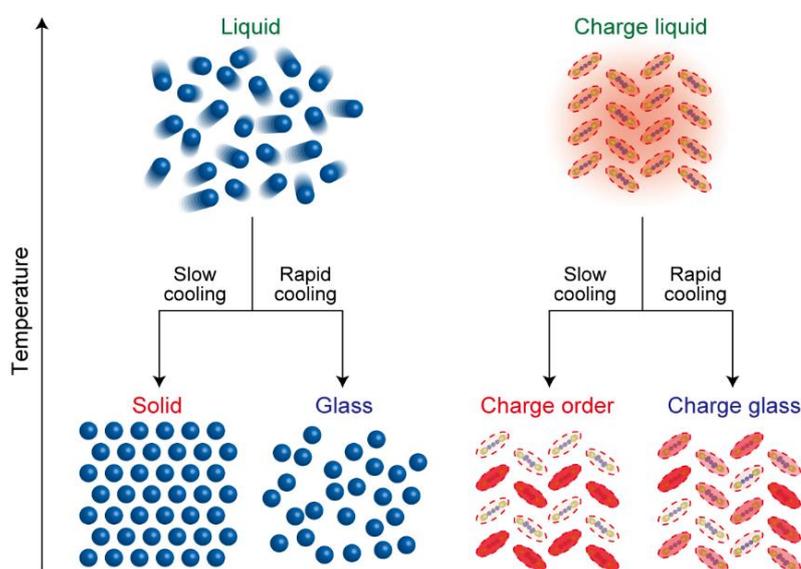
幾何学的フラストレーション系有機伝導体における電子ガラス相

Charge-glass state in an organic conductor with geometrical frustration

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室

佐藤 拓朗, 宮川和也, 鹿野田一司

我々の身の回りには、液体・気体・固体(結晶)の3態だけではなく、“ガラス”と呼ばれる4つ目の状態も存在している。ガラスは一見液体のような無秩序相であるが、固体のように硬いという、いわば液体と結晶の中間状態に対応し、例えば液体を十分速く冷却し結晶化を妨げることで生成可能であることが知られている。一方、電子という量子的多体系に目を向けてみると、電子の液体および結晶状態は度々観測されるが、電子のガラス状態が実現した例は過去報告されていなかった。そこで我々は、三角格子を持つ有機伝導体 θ -(BEDT-TTF) $_2$ X を対象にし、古典的な構造ガラスとの類似性に注目しながら電子ガラス相発現の実証を試みた。この物質群は電子間クーロン斥力により電荷秩序相、すなわち電子結晶相への不安定性を持つ一方で、三角格子に起因する幾何学的フラストレーションが電子結晶化を妨げるという相反する性質を併せ持つ。このように電子結晶化が起こりにくい状況下で冷却速度を制御することで、電子自由度のガラス相形成が期待される。我々は、この系の時間・空間軸における揺らぎの情報を検出し、(i)非平衡性、(ii)遅い揺らぎ、(iii)短距離秩序構造というガラス一般の特性が電子自由度で見出されたことから、本系において電子ガラス相の存在が証明されたと結論づけた[1,2,3]。さらにフラストレーションの強さが異なる物質のガラス的挙動を比較し、強いフラストレーションが電子ガラス形成のしやすさと密接に関係していることを突き止めた[4]。一連の結果は、有機伝導体 θ -(BEDT-TTF) $_2$ X が、強相関電子系のみならず、ガラスの科学というより広い視点からも重要な研究対象であることを示している。講演では、電子ガラスと構造ガラスの対応関係に注目しながら、電子ガラス相が示す興味深い物性を具体的に紹介する。



図：構造ガラスと電子ガラスの概念図

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

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

[3] T.Sato, K.Miyagawa, and K. Kanoda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 123702 (2016)

[4] T.Sato, F.Kagawa, K.Miyagawa, K.Kanoda, et al, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 083602 (2014)

SiC 結晶上 2 層グラフェンの輸送特性および Li インターカレートによる影響

Transport property of bilayer graphene on SiC crystal and the influence of Li intercalation

東大理¹, 東北大院理², 東北大 WPI³, 東北大金研⁴

遠藤由大¹, 一ノ倉聖¹, 鈴木克郷², 菅原克明³, 秋山了太¹, 高山あかり¹, 野村健太郎⁴,
高橋隆^{2,3}, 長谷川修司¹

2 層グラフェンは AB stacking 構造[図 1(a)]と、AA stacking 構造[図 1(b)]と呼ばれる積層構造をとり[1]、これらのフェルミ面付近のバンド分散の形状はそれぞれ放物線的と線形的であることが知られている[2]。AA stacking 2 層グラフェンは、その構造が不安定であることから大面積に作製することは困難とされてきたが、近年、SiC(0001)結晶表面上に作製されたグラフェンに図 1(b)に示すように Li 原子をインターカレートすることで AA stacking 構造となることが、角度分解光電子分光測定により報告された [3]。本研究では、輸送特性の観点から 2 層グラフェンの積層構造に関する知見を得るため、Li インターカレートおよび脱離を 2 層グラフェンに施すことで、その輸送特性に生じる変化を調べた。

SiC(0001)結晶表面上に熱脱離法により作製した 2 層グラフェン(S_1)に Li 原子を室温でインターカレート(S_2)し、さらに 900°C で加熱することでその Li 原子を脱離(S_3)させ、それぞれの試料の電気伝導測定を行った[図 1(c)]。 S_2 の電気伝導度は S_1 と比較して増加しており、これは Li 原子がグラフェンに電子ドープを生じたためと考えられる。一方、 S_3 においては S_1 より低い電気伝導度が観測されたことから Li 原子の脱離により散乱体が増加したことが示唆される。さらに、 S_1 と S_3 の電気伝導度の磁場依存性を低温領域(1-15K)で測定し、弱局在効果に特徴的な振る舞いを観測した。図 1(d)は pristine 2 層グラフェンの電気伝導度の磁場依存性であり、グラフェンの弱局在効果による電気伝導度の磁場依存性を記述する関数[4]からフィッティングを行い[図 1(d)実線]、得られたフィッティングパラメータから輸送特性の詳細な解析を行った。講演では、グラフェンの輸送特性と積層構造の関係を詳細に議論する。

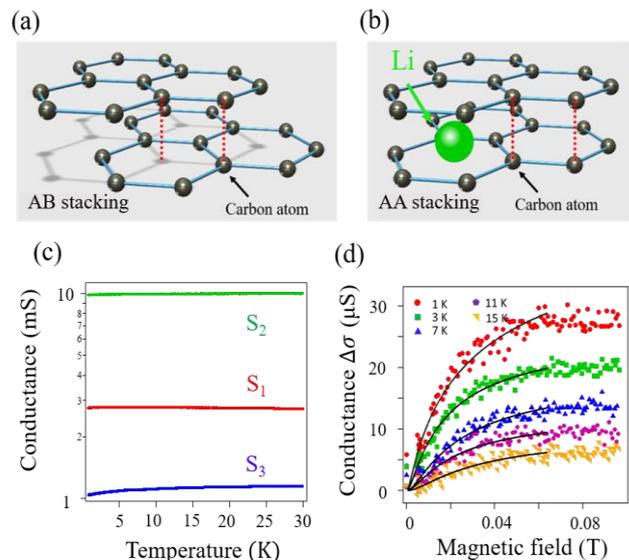


図 1. (a) AB stacking 2 層グラフェンおよび (b) AA stacking Li インターカレート 2 層グラフェンの模式図。 (c) S_1 - S_3 の電気伝導度の温度依存性。 (d) pristine 2 層グラフェンの電気伝導度の磁場依存性。

[1] A. L. Rakhmanov *et al.*, PRB **109**, 206801 (2012)
 [2] J. H. Ho *et al.*, PRB **74**, 085406 (2006)
 [3] N. M. Caffrey *et al.* PRB **93**, 195421 (2016)
 [4] D. W. Horsell *et al.*, Phil. Trans. R. Soc. A **366**, 245-250 (2008)

O-12

InAs 二重ナノワイヤー接合におけるクーパ対分離実験 Cooper-pair splitter realized in InAs double-nanowire junctions

工学系研究科物理工学専攻 樽茶・山本研究室

馬場翔二, Christian Juenger, 松尾貞茂, 鎌田大, K. Li, H. Q. Xu,
Christian Schoenenberger, 樽茶清悟

超伝導体と常伝導体・半導体の界面における特徴的な物理現象は長らく注目を集めてきた。特に超伝導体内のクーパ対という、量子もつれを有する2電子の電子状態の存在に由来するアンドレーエフ反射は、このような系に見られる様々な物理現象の根源である。その中でも、超伝導体への入射電子と反射される正孔が異なる経路を辿る過程、即ち交差アンドレーエフ反射は「クーパ対(2電子)の分離」と捉えることも可能である。分離したクーパ対がもつれ相関を維持していれば、将来的な固体中集積回路での量子計算技術の確立に向けて不可欠な非局所もつれ電子対源が得られたことになる。

従来クーパ対分離実験は、超伝導微細電極に2つの量子ドットを介し2つの常伝導電極を接合した試料において盛んに行われてきた。量子ドットをゲート制御しながら流れる電流を同時測定し、観測される正の相関がクーパ対分離の証拠となる。従来は単一のInAs ナノワイヤー [1]やカーボンナノチューブ [2]に量子ドットを作製し、全電流のうち数%~80%程度の効率でのクーパ対分離が確認されてきた。しかしながら、分離効率を決定づける因子 [3]や、界面での交差アンドレーエフ反射の微視的な機構については依然として議論の余地が残されている。

本研究では、InAs 二重ナノワイヤー接合を有する試料(図1)を作製し、クーパ対分離実験を行った[4]。従来の単一ナノワイヤーの試料とは異なる形状から、対分離の効率や機構についての新たな知見が得られると期待できる。隣り合った2本のInAs ナノワイヤー(直径~80nm)に共通の超伝導Al電極を接合し、反対側にはそれぞれ独立に常伝導Ti/Au電極を接合した。超伝導-常伝導電極間の距離は250nm程度であり、この部分に量子ドットが形成する。測定は ^3He - ^4He 希釈冷凍機(最低~50mK程度)で行われた。

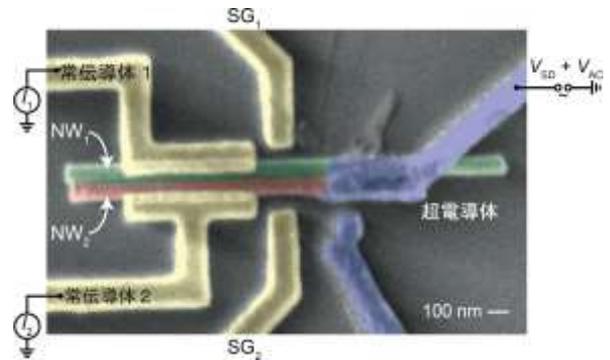


図1 試料のSEM写真

ナノワイヤー上に形成された並列二重量子ドットをサイドゲート電極で独立に制御しながら微分伝導度を同時測定したところ、転移磁場以下でのみ正の相関が観測され、クーパ対分離が確認された。

さらに、クーパ対分離を示すゲート電圧領域において特徴的な微分伝導度の振る舞いが観測された。今回は、この結果から得られたクーパ対分離の微視的な機構についての解釈を発表する。

[1]L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygård, and C. Schönenberger, Nature **461**, 960 (2009).

[2]J. Schindele, A. Baumgartner, and C. Schönenberger, Phys. Rev. Lett. **109**, 157002 (2012).

[3]P. Recher, E. Sukhorukov, and D. Loss, Phys. Rev. B **63**, 165314 (2001).

[4]S.Baba et.al. in preparation (2016)

ポスター発表

P-01

超流動フィルムフローのフロー速度と基板表面粗さの関係

The Role of Substrate Surface Roughness on Superfluid Film Flow Velocity

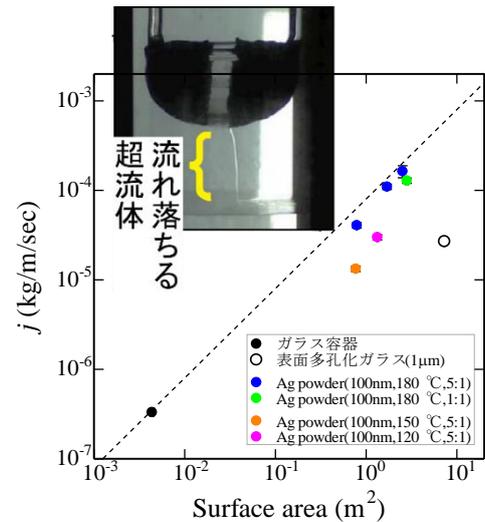
理学部(理学系研究科)・物理学科(物理学専攻)・福山研究室^A、低温センター^B

宇佐美 潤^A、加藤 伸行^A、松井 朋裕^A、福山 寛^{A,B}

液体 ^4He を減圧して冷却すると、固化しないまま $T=2.17\text{ K}$ で相転移を起こし、通常の液体とは異なる粘性のない超流動状態になる。そのため容器に入れた超流動 ^4He は、壁面に吸着した膜厚 30 nm 程度の薄膜を伝って流出してしまう。このフィルムフロー現象は超流動のデモ実験や、希釈冷凍機の 1 K ポットへの熱流入の原因としてよく知られている。このとき容器から流れ出る速さは、通常、容器底から滴が間欠的にこぼれ落ちる程度であるが、容器表面を固体空気で汚すと、それが $10\sim 20$ 倍も増加することが知られている[1]。その原因として、壁表面が粗くなったことで容器の実効的な周長が増加した可能性が考えられる。しかし、我々の知る限り、フロー速度を決めるマイクロな要因は明らかにはなっていない。また、固体空気による汚染も制御性はよくない。そこで、その原因を探ることと、より効果的なデモ実験を目指して、容器表面の粗さや構造の違いによるフィルムフローの変化を調べている。

ガラス容器の表面をやすり研磨、酸処理、金微粒子などで粗くしただけでは、フィルムフロー速度に大きな変化は見られなかった。そこで、粒径 100 nm の銀微粒子を銀ペーストに混ぜてガラス容器表面に塗布・焼結して多孔膜を作成したところ、超流動 ^4He がひとすじの流れとなるほど流量が増加した。表面をおよそ $1\text{ }\mu\text{m}$ の細孔径で多孔化処理したガラス容器でも同様の結果が得られた。単位時間あたりに流出する超流動質量流を容器の見かけの周長 L で除した flow rate:

$j(\text{kg/m/sec})$ を、さまざまな容器で比較したところ、図のように j は表面積におよそ比例するように見える。ここで、表面積は $T=77\text{ K}$ での N_2 の等温吸着圧力測定から求めた。これは、第一義的には、多孔化によって L が実効的に増大するためと理解できる。しかし、それ以外の要因もありそうで、比例係数は 1 桁以上のばらつきを示す。これが、細孔径が小さいほど量子渦のピン止め力が強いなどの細孔径依存性を意味するのか、細孔形状(morphology)の違いが実効的な L を大きく変えるのかは、今後、表面多孔化ガラスで細孔径を変えた実験を行うことで確認したい。



図：焼結条件を変えて銀微粒子を塗布した容器 (●●●●●)、表面多孔化ガラス容器 (○)、何も処理しないガラス容器 (●: [2]) の超流動 flow rate と表面積の関係。判例中の比は銀微粒子と銀ペーストの重量比。挿入写真：超流動フィルムフロー演示実験

[1] J. G. Daunt and R. S. Smith, Rev. Mod. Phys. **26**, 172 (1954).

[2] J. G. Daunt and K. Mendelssohn, Proc. Roy Soc. (London) A **170**, 439 (1939).

発泡断熱材を中心とする建築材料の熱伝導率の測定と

温度依存性・含水率依存性に関する研究

Measurement of thermal conductivity of mainly foaming insulation material and its temperature /water content dependency

東京大学大学院 工学研究科 建築学専攻 建築材料研究室

長田美咲・北垣亮馬

近年外断熱工法などで用いられる押し出し法ポリスチレンフォーム(XPS)が経年により含水し、断熱性能の低下が懸念されている。建築材料の熱物性は建築物の省エネ性能に大きく関わるため、特に想定される使用環境に応じた熱伝導率のデータを精緻に蓄積することが望まれているが、幅広い使用環境と物性を有する様々な建築材料の熱伝導率を安定的に測定できる装置はほとんどなく、有用なデータが整理されていない状況である。本研究ではPPMSを用いて含水したXPS、ALC、石膏の熱伝導率を測定するための手法を独自に考案し、その結果得られた熱伝導率の温度依存性/含水率依存性を報告する。

Table サンプル物性

Material ID	ρ [g/cm ³]	Volume(mm ³)	含水率(vol%)	
1	XPS(ϕ 0%)	0.036	53.21	0
2	XPS(ϕ 2.6%)	0.036	52.87	2.64
3	XPS(ϕ 4.2%)	0.036	72.26	4.23
4	XPS(ϕ 5%)	0.036	53.25	5
5	XPS(ϕ 9.6%)	0.036	47.54	9.65
6	XPS(ϕ 13%)	0.036	55.15	13.81
5	Plaster Board (ϕ 0%)	0.69	104.2	0
7	Plaster Board (ϕ 1.36%)	0.69	134.39	1.36
8	ALC(ϕ 0%)	0.48	110.3	0
9	ALC(ϕ 1.7%)	0.48	138.25	1.73

測定では樹脂管による密閉カバーを用い、サンプル内の水分

が漏れないように調湿した。測定結果を Figure 1 Figure 2

に示す。各サンプルの熱伝導率は含水率依存性および温度依存性を持ち、ALC ではその傾向が特に顕著であった。

また体積含水率 4.2%以上の XPS は氷点下で熱伝導率が急激に上昇し、融点に近づくとともに低下していく。一方 PB や ALC には凍結の影響は見られない。これは低含水率の場合微小な空隙のみを液水が満たしているため、氷点降下が起こっているものと考えられる。以上より本手法により建築材料の熱伝導率の取得が可能であることを示した。

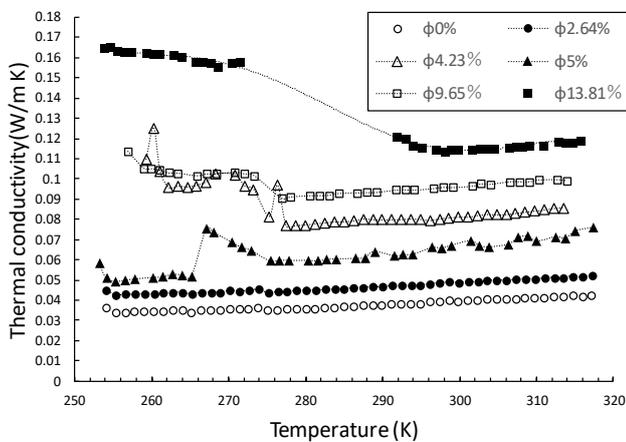


Figure 1 XPS の熱伝導率測定結果

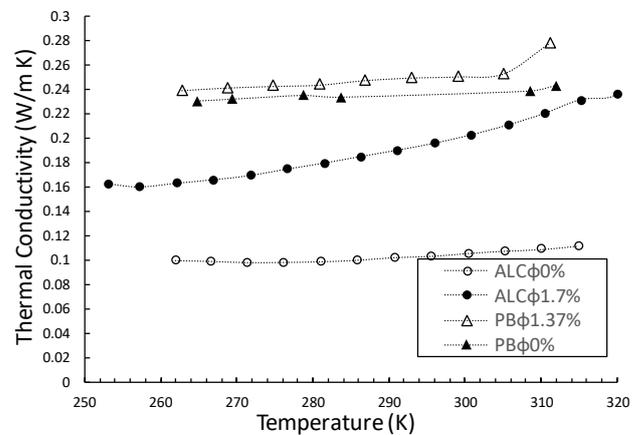


Figure 2 ALC, PB の熱伝導率測定結果

黒リンの光ポンプテラヘルツプローブ分光 Optical pump Terahertz probe spectroscopy on black phosphorus

理学系研究科物理学専攻・島野研究室¹、低温センター・研究開発部門²
澤野拓也¹、松永隆佑¹、島野亮^{1,2}

層状物質であるグラファイトの単位層であるグラフェンの剥離が成功し、グラフェンの特異な物性が調べられるようになった。これに続き、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) などのグラフェン以外の層状物質にも注目が集まっている。層状物質は高効率なトランジスタなどのデバイス応用に適していると考えられているものの、グラフェンは高いキャリア移動度を持つもののバンドギャップのない半金属であり半導体デバイスとしては用いにくく、TMDC はバンドギャップを持つ半導体であるもののキャリア移動度が低い、というようにどちらにも欠点がある。近年注目を集めている黒リンはグラフェンと TMDC の中間的性質を持つ層状半導体であり、デバイスへの応用が期待されている。また、黒リンは層数によってバンドギャップの大きさが変化する性質や強い異方性を持ち、広帯域の光検出器への応用なども期待されている。

半導体の物性として興味を持たれていることの一つに電子正孔系がある。半導体にバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射すると、半導体中に負電荷を持つ電子と正電荷を持つ正孔が生成される。低密度では粒子間に働くクーロン相互作用により電子と正孔の束縛状態である励起子を作り、高密度ではクーロン引力が遮蔽され励起子が乖離した電子正孔プラズマとなるなど、図 1 のように電子正孔系は多様な相を持つ。しかし、低温における量子凝縮相は未だ実現されていない。黒リンはその異方性や電子と正孔の有効質量が近いことなどから量子凝縮相の実現に向けても良い性質を持つ[1]。そのため、黒リンのキャリアの低温における振る舞いを知ることは非常に重要である。

低温における黒リンに光励起されたキャリアの性質を調べるため、我々はプローブ光としてテラヘルツ光を用いた。テラヘルツ光は数 meV 程度のエネルギーを持ち、半導体中のキャリアの性質を調べることに適している。また、このエネルギー領域には黒リンの励起子内部遷移が存在し[2]、励起子の存在にも感度のある測定が可能である。バンドギャップよりも大きいエネルギーの光を用いる非共鳴励起により生成したキャリアを測定したところ、励起子による信号は確認できず、自由キャリアとなっていることが示唆された。

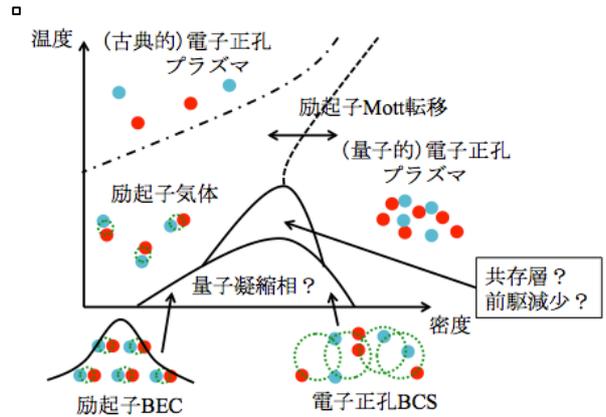


図 1. 電子正孔系の概念的相図

[1]K.Mizoo, T.J.Inagaki, Y.Ueshima and M.Aihara, J. Phys. Soc. Jpn., 74, 1745 (2005)

[2]A.Morita, Appl. Phys. A 39, 227 (1986)

P-04

シアネートエステル樹脂の低温物性

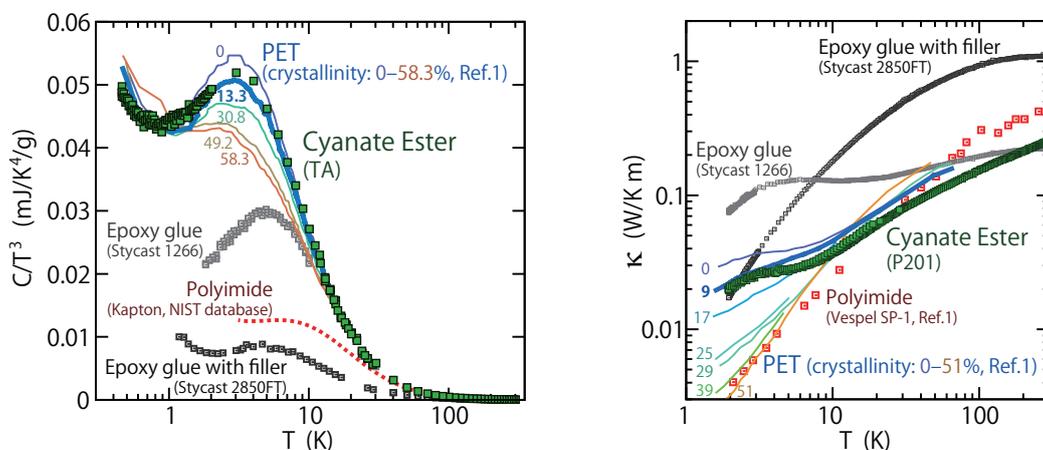
Low Temperature Properties of Cyanate Ester Resins

中村 祥子^A、藤井 武則^A、松川 将治^B、片桐 誠之^B、福山 寛^{A,C}

^A 低温センター・研究開発部門、^B 三菱ガス化学(株)、^C 理学系研究科・物理学専攻

プラスチックは金属に比べて重量あたりの強度が高く、電気・熱絶縁性が良好で加工性にも優れる。特に、流動性のある状態から硬化させて用いる熱硬化性樹脂は、接着や真空シールに用いるだけでなく、型に入れて自由な形状に硬化させられるので、試作や一点物の多い研究開発の現場で重宝される。しかし、大抵のプラスチックは冷却すると脆化して壊れやすくなるので極低温で使用できる種類は多くなく、実際に使用されるのは、エポキシ (EP) 接着剤の Stycast 等、過去に低温の物性値が測定されている特定の商品群に限られる。一方で EP には硬化前の有害性が指摘されており、低温用接着剤や構造材の新しい選択肢が求められている。そこで我々はシアネートエステル樹脂 (CE) に着目し、その諸物性を測定した。

CE は、複数のシアネート基 ($-O-C\equiv N$) を有するモノマーが 3 量化し、剛直なトリアジン環 $\begin{matrix} N \\ \diagup \quad \diagdown \\ C \\ \diagdown \quad \diagup \\ N \end{matrix}$ を生成しながら重合した熱硬化性樹脂である。保存性が良く刺激性も無いモノマーを加熱溶解・脱揮し、炉で $250^{\circ}C$ 程度まで段階的に加熱すると硬化物が得られる。硬化物の性質は EP に似ているが、より高いガラス転移温度や低脱ガス、低吸水、熱サイクルへの強靱性等の優位性がある。これまでは電子基板や航空宇宙、核融合炉等の極限環境での繊維強化樹脂 (FRP) としての利用が中心で、樹脂単体の低温物性はほとんど測定されていない。そこで、極低温での利用を念頭に、構造の異なる CE を 3 種 (TA, P201, NCN) とその混合物について、室温での吸水率と、室温から極低温に至る比熱、熱伝導度、77 K までの 4He ガス透過率を測定した。比熱と熱伝導率の測定結果 (図) に相転移を示唆する異常は無く、非晶質特有の過剰比熱と熱伝導率プラトーが観測された。樹脂の中では比熱は大きめ、熱伝導率は小さめで、どの CE の結果も同程度なので、芳香環とトリアジン環の基本骨格に由来すると考えられる。結晶化度 $\approx 10\%$ の PET の文献値 [1] にほぼ一致するのは興味深い。吸水率は室温の水中でも 0.6% と極めて低い。室温の 4He ガス透過率は少し高いが、 $T < 130 K$ の低温では拡散は僅少で、熱サイクル後も変化しなかった。硬化温度は少々高いが、半田の融点を超える高温への耐性や低脱ガス性、低吸水性を活かした活用が期待される。



図：シアネートエステルを含む種々の樹脂の (比熱)/(温度の 3 乗) (左) と熱伝導率 (右)。

[1] Woodcraft *et al.*, *Cryogenics* **50**, 66 (2010); Collocott, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **20**, 2995 (1987).

STS Studies of Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching

^ADept. of Phys. Univ. Tokyo, ^BCRC Univ. Tokyo
A. E. B. Amend^A, H. Sato^A, T. Matsui^A and Hiroshi Fukuyama^{A, B}

Graphene, a one-atom-thick hexagonal carbon lattice, is attracting much attention due to its peculiar physical properties and potential uses for future electronic devices. Because of the hexagonal symmetry, graphene has a linear dispersion relation crossing at the Dirac point. The hexagonal geometry is also responsible for the two graphene sublattices, as well as the two types of edges, i.e. armchair and zig-zag (ZZ) edges. Only the ZZ type breaks the sublattice symmetry at the edge, which creates a sharp increase of the local density of states (LDOS) near the Dirac point [1]. This causes charges to accumulate at ZZ edges, which may lead to notable features such as a spin polarization at ZZ graphene nano-ribbons. In addition, due to the high sublattice imbalance, the LDOS at ZZ edges should also show gap-like suppressions on both sides of the peak energy [2].

While such a LDOS structure at the sublattice imbalance created by a single vacancy decays as a power of distance (d) [3], that of the ZZ edge decays exponentially away from the edge [4]. The existence of the ZZ edge state was first observed by scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S) as a peak in the local dI/dV spectra around naturally existing step edges on graphite [4,5]. The exponential decay with a decay length (ξ) of 1.2 ± 0.2 nm has also been observed [4]. However, no gaps next to the ZZ edge-state were reported before.

Recently, we found that many monoatomic-depth hexagonal nanopits with edges, which are aligned to the ZZ-direction on graphite surfaces, can be created by anisotropic hydrogen-plasma etching [6]. Here we report clear LDOS gap structures on both sides of the edge-state peak observed in STM/S measurements at $T = 4.7$ and 78 K on edges around the hexagonal nanopits. As shown in Fig. 1, dI/dV spectra taken at a long distance ($d = +8.0$ nm) from the edge and on the lower terrace ($d = -1.5$ nm) are V-shaped, as expected on bulk graphite. However, nearby the edge ($d = +0.5, +1.0$ and $+1.5$ nm) the spectra have a peak around $V = 60$ mV as well as two gaps near -15 mV and $+100$ mV. This structure of one peak and two gaps disappears with increasing d as is shown in Fig. 2. The peak's decay is exponential with $\xi = 1.3 \pm 0.3$ nm. Since such a structure can be produced by a high sublattice imbalance [2], this LDOS feature indicates that the edges created by this method are more ZZ rich compared to naturally existing edges on graphite.

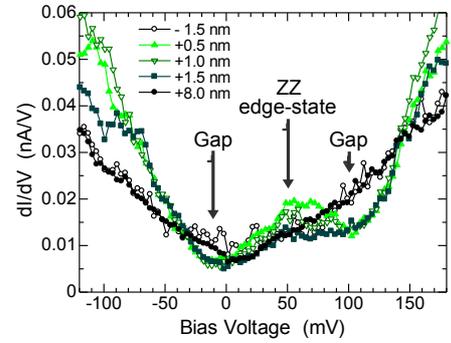


Fig. 1. Tunnel spectra taken at different distances from a ZZ-direction edge on a graphite ($U_g = 0.2$ V, $I_t = 0.06$ nA, $V_{\text{mod}} = 3.3$ mV, $T = 78$ K), the arrows indicate peak and gap energies.

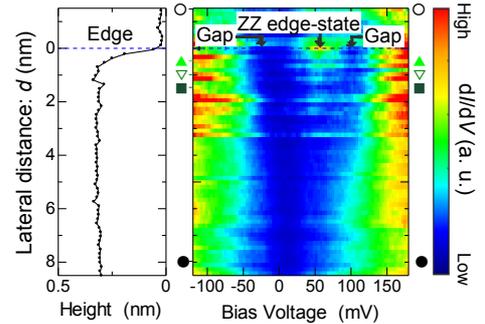


Fig. 2. Line profile and colormap of dI/dV spectra plotted as a function of distance from the ZZ-direction edge. In the colormap, the arrows indicate the peak and gap energies, the horizontal lines show locations of the data shown in Fig. 1.

- [1] M. Fujita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **65**, 1920 (1996)
 [2] A. Cresti *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 196601 (2013)
 [3] M. M. Ugeda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 096804 (2010)
 [4] Y. Niimi *et al.*, Appl. Surf. Sci. **241**, 43 (2005); Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 085421 (2006)
 [5] Y. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **71**, 193406 (2005)
 [6] H. Sato *et al.*, 2015 Annual (6th) CRC Res. Forum; H. Sato *et al.*, 2016 Annual (7th) CRC Res. Forum

Nonvolatile current switching of electronic structures in a two-dimensional material

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐・中野研究室
吉田将郎 御供田崇 鈴木龍二 中野匡規 岩佐義宏

現在、二次元物質（two-dimensional material）と呼ばれる層状物質超薄膜群は、物性探索の舞台としてますます重要になっている。一般的な研究指針は、超薄膜化によるバンド構造の変化を利用することである。グラフェンや MoS_2 の周辺物質においては、超薄膜の特殊なバンド構造に基づく半導体物性の開拓が進められている。最近では NbSe_2 などの金属物質においても、バンド構造の変化が電子相転移に与える影響を調べる取り組みが始まっている。

一方で電子相関の強い二次元物質においては、バンド物理では予測不能な全く新しい薄膜化効果、多体現象が期待できる。そこで私は 1T-TaS_2 に注目している。 1T-TaS_2 は強い電子格子相互作用を有し一次の電荷密度波相転移を示す層状物質で、そのバルク物性は 1970 年代から詳細に研究されてきた。我々はグラフェン剥離法を用いて膜厚数十ナノメートルの 1T-TaS_2 薄膜を作製、微細な電極を設置してデバイスにした。すると、相転移のキネティクスが急激に遅くなって、過冷却状態が低温で実現しやすくなることを初めて見出した[1]。つまり薄膜化によって熱力学的に準安定な状態が実現しやすくなることが明らかになった。

そして 1T-TaS_2 薄膜に摂動を加えることで、バルク状態で未踏の準安定状態が実現できることもわかってきた。まず 1T-TaS_2 薄膜における光誘起相転移が報告され [2]、さらに我々は 1T-TaS_2 薄膜面内方向に 10 kV/cm 程度のパルス的な強電場を印加することで熱的には決して到達できない準安定状態が実現することを発見した[3]。

また詳細な電気伝導特性を測定した結果、高温相の過冷却状態は通常金属、熱力学安定な低温相はギャップの開いた絶縁体、そしてパルス電場を印加して作り出される準安定状態は半金属と見なせることが分かった[4]。なお低温で過冷却状態の試料に薄膜面内方向に適切な大きさの電場を印加すれば、ジュール熱によって熱力学安定な低温相への移行できる。つまり電場一つで金属、絶縁体、半金属の間をスイッチできることが明らかになった。まさに電子相関が生み出す非線形現象である。



図 1. 二次元結晶デバイス. (a) 1T-TaS_2 の結晶構造. (b) 1T-TaS_2 超薄膜デバイス. スケールバーは $1\ \mu\text{m}$ を表す.

[1] M. Yoshida et al. Sci. Rep. **4** 7302 (2014).

[2] L. Stojcheska et al. Science **344**, 177 (2014).

[3] M. Yoshida et al. Sci. Adv. **1** e1500606 (2015).

[4] M. Yoshida et al. submitted.

P-07

単層グラフェンにおける非等間隔ランダウ準位の
超高速非線形テラヘルツ応答

Ultrafast nonlinear terahertz responses of
non-equidistant Landau levels in monolayer graphene

理学系研究科物理学専攻・島野研究室¹ 低温センター・研究開発部門²

湯本郷¹, 松永隆佑¹, 島野亮^{1,2}

炭素原子が蜂の巣状に二次元配列した単層グラフェンにおける電子系では、低エネルギー領域でそのエネルギーが結晶運動量に比例するという線形なエネルギー分散を示し、相対論的粒子である質量ゼロ・ディラック粒子とみなすことができる。単層グラフェンに垂直に (a)

磁場を印加すると、通常の二次元電子系における等間隔のランダウ準位とは異なり、相対論的性質を反映した非等間隔なランダウ準位が形成される。一般に、二次元電子系におけるランダウ準位間の双極子モーメントは $\sim el_B$ (l_B :磁気長) 程度の巨大な値を持つため大きな非線形光学効果が期待されるが、通常の二次元電子系では等間隔ランダウ準位の調和性により非線形効果は生じない。一方、単層グラフェンにおける非等間隔なランダウ準位では、ランダウ準位間エネルギーに相当するテラヘルツ (THz) 帯や中赤外領域における大きな非線形光学効果が予測されている[1]。

そこで我々は SiC 基板上の単層エピタキシャルグラフェンに対し、磁場下での THz ポンプ-THz プロブ分光法を用いて非等間隔ランダウ準位における非線形 THz 応答を調べた。光学遷移選択則より右 (左) 回り円偏光 σ_+ (σ_-) に対するランダウ準位間遷移 LL_n-LL_{n+1} は $n \geq 0$ ($n < 0$) で許容となる (図 1(a))。 σ_+ 、 σ_- に対する差分伝導率スペクトルを測定すると、高強度 THz ポンプによって σ_+ で吸収飽和、 σ_- で誘導吸収が生じることが観測された(図 1(b))。 σ_- に対する誘導吸収は、 LL_5 に位置するフェルミエネルギーよりはるか下の占有準位が、非共鳴 THz 励起により非占有となったことを意味し、THz ポンプによる電子分布の劇的な変化を観測した。さらに、密度行列を用いた数値シミュレーションとの比較を行い、観測された非線形 THz 応答の微視的な理解を得た。講演ではその詳細について報告する。

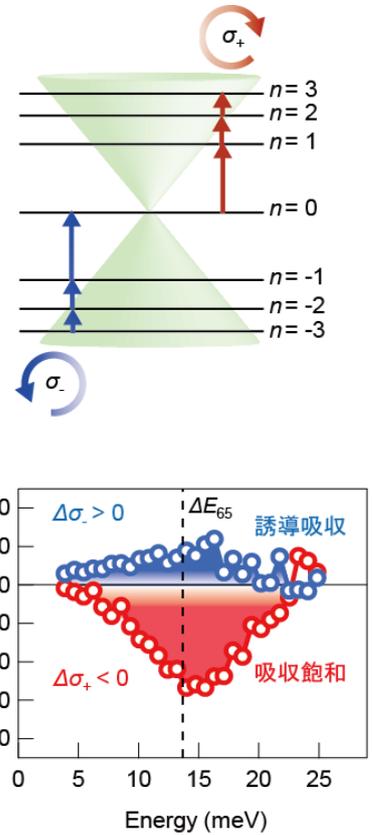


図 1 : (a) ランダウ準位と σ_+ 、 σ_- に対応する光学遷移。 (b) $B=3$ T における差分伝導率スペクトル。赤点は $Re(\Delta\sigma_+)$ 、青点は $Re(\Delta\sigma_-)$ を示す。縦点線は LL_5-LL_6 間遷移エネルギー (~ 14 meV) を示している。

[1] X. Yao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 255503 (2012).

Hamiltonian estimation of a single-electron spin qubit in nuclear spin bath

工学系研究科物理工学専攻 樽茶・山本研究室

川崎 賢人

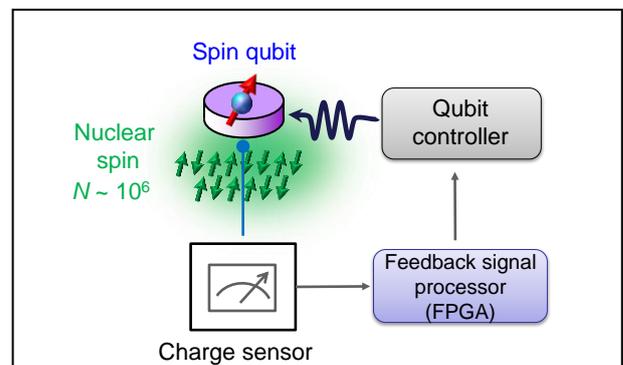
量子ドットと呼ばれるナノデバイスに閉じ込められた電子スピンは、磁石のような性質を持ち、高周波電圧を印可することによってスピンの方向を操作することができる。この系は量子ビットとして量子計算素子への応用が期待され、近年、非常に注目を浴びている。しかしドット系の電子スピンと相互作用した基板中の 10^6 個もの Ga 原子、As 原子が引き起こすデコヒーレンスが問題となっている。この相互作用は Overhauser 場と呼ばれる有効磁場として扱うことができ、この Overhauser 場が揺らぐことでデコヒーレンスを引き起こしていると捉えることができる。このため、Overhauser 場の揺らぎを検出し、適切なフィードバック制御を行うことでコヒーレンス時間の向上できることが期待されている。

本研究では、コヒーレンス向上に向けて、Overhauser 場の検出手法の検討及び観測を行った。この結果から短い測定時間において Overhauser 場の揺らぎの大きさが、長時間平均における振る舞いと異なる非エルゴード的な振る舞いをする事が分かった。

さらに加えて、Overhauser 場の揺らぎを補正するようなフィードバック系の構築を行った。Post-selection 法を用いた解析によって、従来のコヒーレンス時間 20 ns に比べて 25 倍程度の 500ns 程度までコヒーレンス時間の向上が期待できることを示した。更に実際の測定において feedback 系を用いたコヒーレンス向上の実証を行った。この結果からコヒーレンス時間が 100 ns 程度まで向上することに成功した。

Spin coherence of confined electrons in GaAs quantum dots is hindered by the magnetic fluctuation of the nuclear bath. This is because an electron spin is coupled with an ensemble of thermally fluctuating nuclear spins ($\sim 10^6$) through the hyperfine interaction. In a semiclassical description, this effect is treated as fluctuations of the effective magnetic field known as

the Overhauser field. These Overhauser field fluctuations can be kept track of in millisecond time resolution. Since the field typically fluctuates rather slowly, with correlation time ranging from milliseconds to seconds, adaptive control can be a powerful tool to enhance the qubit coherence time and the qubit control fidelity. We track the nuclear spin dynamics by Ramsey interference, and investigate the non-ergodic behavior of the Overhauser field. We observed the transition between the ergodic regime and non-ergodic regime in qubit dephasing. In addition this, we construct the feedback system by using FPGA and, the response time is less than 10 ms. Our feedback system is succeed in demonstrating the enhancement of the qubit coherence time.



バルク GaAs における低温高密度励起子状態での 励起子間相互作用の研究

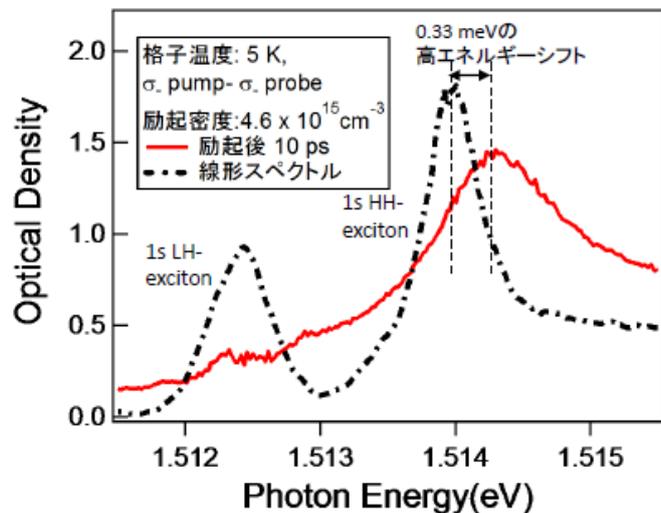
The exciton-exciton interaction in a low-temperature and high-density exciton state in a bulk GaAs

東大理^A, 東大物性研^B, プリンストン大^C, 東大低温セ^D

高山正行^A, 室谷悠太^A, 金昌秀^B, 秋山英文^B, Loren N. Pfeiffer^C,
Ken W. West^C, 島野亮^{A, D}

励起子は近似的にボース粒子とみなすことができ、特に励起子間に斥力相互作用が働く場合、低温・希薄領域においてボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が発現すると古くから期待されてきた。近年、励起子ポラリトン系では、この斥力相互作用を反映した凝縮状態基底エネルギーのシフトが観測され[1]、冷却原子系の BEC における平均場エネルギーシフトとの類似性が議論されている。また励起子間相互作用は、主に量子井戸系を舞台に実験

[2]・理論[3]の両面で定量的に議論され、発光・吸収スペクトルにおける励起子エネルギーのシフトとして観測されてきた。一方、本来3次元系で発現する BEC の観点からは、バルク半導体における励起子間相互作用の定量的評価が重要である。そこで我々はバルクの直接遷移型半導体 GaAs を用いて、低温・高密度励起子状態での励起子間相互作用を詳しく調べるため、近赤外光ポンプ-プローブ分光を行った。円偏光励起により、初期状態としてスピン偏極した低温の軽い正孔 (LH) 1s 励起子を高密度に生成すると、図に示したように重い正孔 (HH) 1s 励起子の吸収ピークが高エネルギーシフトする様子が観測された。講演ではこの励起子エネルギーシフトから、3次元励起子系における励起子間相互作用のメカニズムに関して詳細に議論する。



[1] S. Utsunomiya *et al.*, Nature Physics, **4**, 700-705 (2008).

[2] T. Amand *et al.*, Phys. Lett. A, **193**, 105 (1994).など

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

単層 MoS₂ における励起子ホール効果

Excitonic Hall effect in monolayer MoS₂

東大院工^A, 阪大産研^B, マックスプランク固体研^C, 理研 CEMS^D

恩河大^A, 張奕勁^{A, B, C}, 井手上敏也^A, 岩佐義宏^{A, D}

遷移金属カルコゲナイド (TMDs) は二次元物質の一種で、良好なトランジスタ特性と可視光範囲のバンドギャップゆえ半導体材料として近年広く研究されてきた。特にその単層を取り出すことでバンド構造が直接遷移型となることが知られている。この系における光応答においては、励起子が重要な役割を果たす。励起子は半導体中の電子と正孔がクーロン力で結合した準粒子であり、半導体光物性の研究において主要な対象となってきた。単層 TMDs においても近年、その多様な励起子状態に関する研究が進んでいる。しかしながらこういった励起子を情報・エネルギー担体として空間的に輸送しようとする研究は乏しい。

またこの物質において、そのエネルギー的に縮退した非等価なフェルミポケット (バレー) を新しい自由度として扱うことによる“バレートロニクス”が注目を集めている。そのバレー自由度は円偏光と排他的にカップリングするため、そのバレー自由度と励起子状態が結合したバレー励起子が注目されてきた [1]。今回そのバレー励起子の空間輸送、特にバレー曲率由来の自発的ホール効果の観測を目的として研究を行った(図 1)。

本研究では、TMDs の一種である MoS₂ を用い、その低温での励起子の輸送現象について PL マッピング測定を用いて研究した。その発光マッピングを偏光分解することにより、バレー励起子に関して μm オーダーの空間輸送を観測することに成功した。これはバレー情報が励起子を用いて直接輸送可能であることを示している。

またバレー励起子はその内在するバレー曲率によってゼロ磁場下でホール効果が起きることが予想される。今回、その偏光分解発光マッピングを用いてバレー励起子の横輸送を確認することで、励起子のホール効果を明瞭に観測した。このような電子正孔対である励起子のホール効果には観測例が無く、今回の研究が励起子ホール効果を初めての観測した例である。以上の結果はバレー励起子を用いたバレートロニクス、複合粒子におけるホール効果研究の第一歩となる研究結果である。

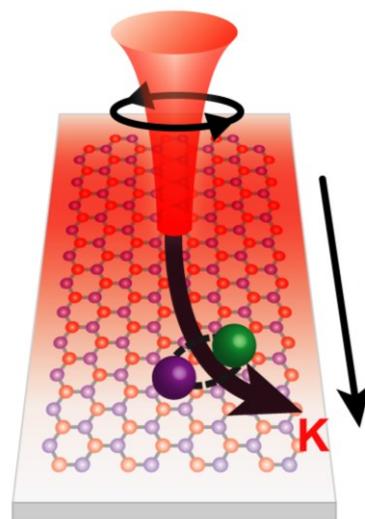


図 1: 励起子ホール効果の概念図

[1] K. F. Mak et.al., Nat. Photon. **10**, 216 (2016).

THz 電場によるイオン化を用いた 励起子モット転移ダイナミクスの観測

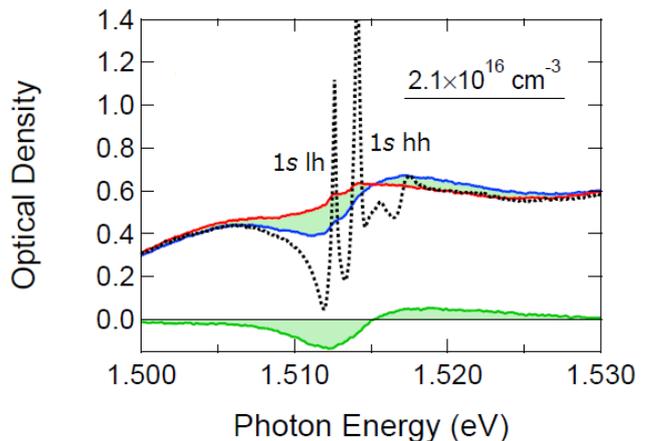
Study of exciton Mott transition using ionization by a THz electric field

東大理^A、東大物性研^B、プリンストン大^C、東大低温セ^D

室谷悠太^A、高山正行^A、金昌秀^B、秋山英文^B、L. N. Pfeiffer^C、K. W. West^C、島野亮^{A,D}

半導体を光励起すると電子と正孔が対生成される。この系の低温における振る舞いにはクーロン力による対相関が大きく関与すると考えられている。例えば、低密度・低温で形成される水素原子様の束縛状態である励起子はその最たるものである。高密度ではクーロン力が遮蔽されて励起子は解離してしまう(励起子モット転移)が、それでも低温では対相関が成長し、極低温における電子正孔クーパー対の凝縮(電子正孔 BCS 状態)につながっていくと考えられている。近年行われたテラヘルツ (THz) 分光法による研究では、低温かつ高密度の電子正孔系では確に対相関が無視できず、電子正孔 BCS 状態の前兆とも捉えられるような状態が形成されることが明らかになった[1]。しかし今のところそうした状態について、実験的には限られた知見しか得られていない。

そこで我々は従来の知見を補完する新たな手法を考案した。具体的には、まず対の基底状態である励起子を共鳴的に光励起することによって低温・高密度な電子正孔系を生成し、THz 電磁波を熱パルスとして照射することで温度を制御し、その後測定した過渡吸収スペクトルを低温と高温とで比較する。この方法により、低温における対相関の大きさのみならず、電子正孔系の化学ポテンシャルの振る舞いをも抽出できることが期待できる[2]。右図は GaAs を対象に実測された吸収スペクトルの例である。重い正孔励起子 (1s hh) を高密度に励起した後 20 ps における吸収スペクトルが青線であるが、同じ条件で光励起した後、12.5 ps で THz パルスを照射してから測ると赤線のようなになる。これらの差分を緑色の線として示したが、その振幅が対相関の大きさを表し、ゼロ交差点が化学ポテンシャルを反映したものと解釈できる。講演ではこうした特徴の励起密度・遅延時間依存性から励起子モット転移のダイナミクスについて議論する。



点線: 光励起なしでの吸収スペクトル。重い正孔 (hh) と軽い正孔 (lh) 由来の励起子 (1s) が見られる。青線: 光励起後 20 ps における吸収スペクトル。赤線: 光励起後、THz 波を照射してから測定した吸収スペクトル。緑色の領域及び線: 青線から赤線を差し引いたもの。

[1] F. Sekiguchi and R. Shimano, Phys. Rev. Lett. **118**, 067401 (2017).

[2] R. Zimmermann and H. Stolz, Phys. Stat. Sol. **131**, 151 (1985).

P-12

(Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ 薄膜における電界効果を用いたキャリア制御 Carrier Control of (Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ thin films by field effect

工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室

西早 辰一, 打田正輝, 中澤佑介, Markus Kriener,
小塚裕介, 田口康二郎, 川崎雅司

ディラック半金属に属する Cd₃As₂ では、バルクバンド同士が交差したディラック分散が形成され、グラフェンの 3 次元的な拡張に相当した特異な電子構造を持つ[1]。このため、Cd₃As₂ においては 3 次元ディラック電子系に特有な量子輸送現象や表面状態の発現が期待されている。その一方、実験的には、格子欠陥に起因した電子ドーピングが生じやすい性質上、フェルミレベルがディラック点近傍に位置した低キャリア濃度試料の作製が困難であるという問題点が報告されている[2]。従って、Cd₃As₂ におけるキャリア濃度の制御はディラック半金属相の輸送特性を解明する上で重要な課題となっている。本研究では、Zn を用いた化学置換及びトランジスタ構造での電界効果を用いて、キャリア濃度を系統的に制御することを試みた。

パルスレーザー堆積(PLD)法で作製した Cd₃As₂ 薄膜に対する Zn ドーピングでは、先行研究と比較してより効果的なキャリア濃度の低減が可能となり(図 1)、さらに SrTiO₃ 基板を用いたバックゲート構造での電界効果によって、キャリアタイプの反転を伴った両極性動作に成功した(図 2)。加えて、高移動度な(Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ 薄膜では磁場 9 T 以下で明瞭な量子ホール効果も観測できている。本研究では、特に電界効果によってフェルミレベルを連続的に制御できたことで、量子ホール状態の占有数やフェルミ速度等の輸送特性が線形なバンド分散に沿って系統的に変化する様子を Cd₃As₂ において初めて明らかにしている。

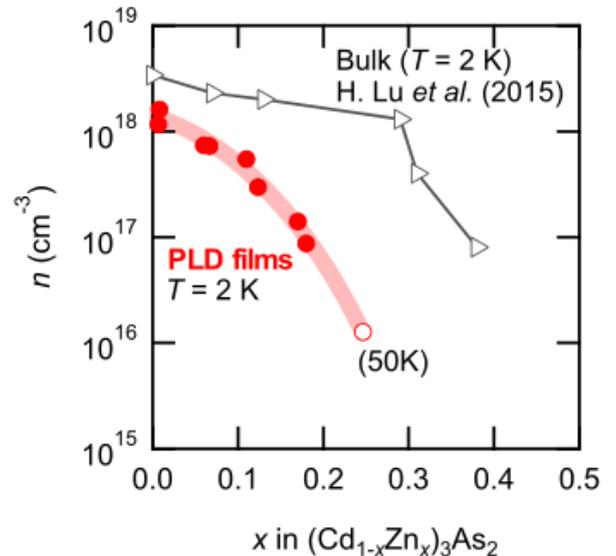


図 1. Zn ドーピングによるキャリア濃度の変化

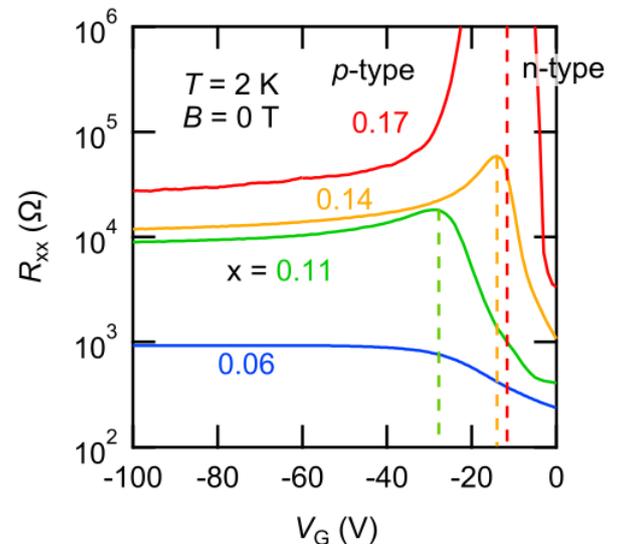


図 2. 各ドーピング量での抵抗のゲート電圧依存性

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

[2] T. Liang *et al.*, Nat. Mater. **14**, 280 (2015)

P-13

アンチペロブスカイトにおける三次元ディラック電子の電磁応答 Electromagnetic response of three-dimensional Dirac electron in anti-perovskites

東大理^A, マックス・プランク研^B

末次 祥大^A, 北川 健太郎^A, 葉山 慶平^A, A. W. Rost^B,
J. Bruin^B, J. Nuss^B, C. Muhle^B, 高木 英典^{A,B}

アンチペロブスカイト A_3EO ($A=Ca, Sr, Ba; E=Sn, Pb$) は三次元ディラック電子以外のフェルミ面を持たないバンド計算により予測されている[1]。線形分散をバルクに持つ三次元ディラック電子系は巨大反磁性や通常の金属とは異なるスピン格子緩和率[2]などの従来とは異なる物性探索の舞台として注目を集めている。また、非常に軽い有効質量のために全てのキャリアが最低のランダウ準位に入る量子極限への到達が比較的容易であり、量子極限下のディラック電子系では線形磁気抵抗効果やカイラル異常に起因した負の縦磁気抵抗効果[3]などの従来とは異なる輸送現象が期待されている。

現在我々は Sr_3PbO の磁気輸送測定において、非常に軽い有効質量などのディラック電子存在の証拠や、巨大な線形磁気抵抗効果(図 1)などのディラック電子系に特徴的な輸送現象を明らかにしつつある。また、 Sr_3PbO の NMR 測定ではディラック電子の存在の微視的な証拠となるコリンハ則から外れた T^3 に比例するスピン格子緩和率(図 2)やナイトシフトのキャリア数依存性なども明らかにしつつある。発表では、磁気輸送測定や NMR 測定における、ディラック電子の存在を示す結果や、線形磁気抵抗効果などの量子極限下の輸送現象、巨大反磁性の可能性について議論する予定である。

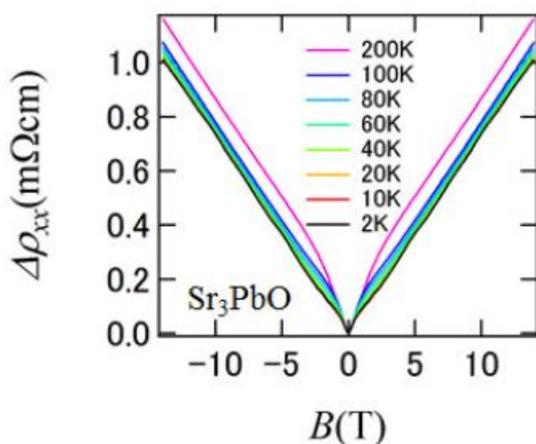


図 1: 巨大線形磁気抵抗効果

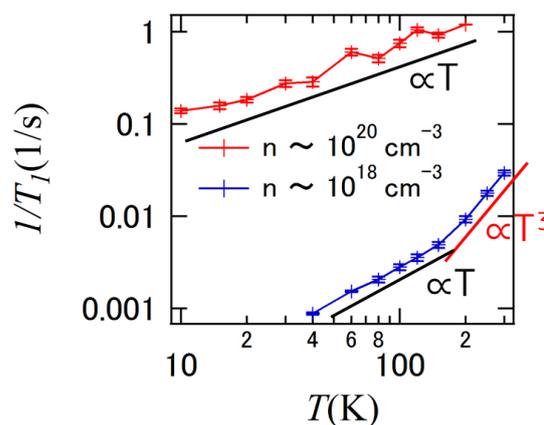


図 2: スピン格子緩和率

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

[2] K. Miyagawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 063703 (2010)

[3] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Physics Letters B **130**, 389 (1983)

ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における膜厚に依存した電子構造と量子輸送特性

Thickness-dependent electronic structure and quantum transport of Dirac semimetal Cd_3As_2 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

中澤佑介¹, 打田正輝¹, 西早辰一¹, 秋葉和人², M. Kriener³, 小塚裕介¹, 三宅厚志²,

田口康二郎³, 徳永将史², 永長直人^{1,3}, 十倉好紀^{1,3}, 川崎雅司^{1,3}

Cd_3As_2 は結晶構造がもつ対称性に由来して、 k 空間内の対称な二点に安定なディラック点を有するディラック半金属である[1]。三次元ディラック半金属は特異な表面状態であるフェルミアークを持つことに加え、トポロジカル量子相転移の母物質としても期待されている[2]。本研究では、様々な厚さの Cd_3As_2 高品質薄膜を作製し、その量子輸送特性の評価を行うことによって Cd_3As_2 の膜厚に依存した電子構造の解明を進めた。

パルスレーザー堆積法を用いて堆積した薄膜をさらに加熱処理することにより、図 1 に示すような非常に高い結晶性をもつ薄膜が得られた。図 2 は、55 T までのパルス強磁場測定を行った結果である。膜厚 12 nm(a)と 23 nm(b)の場合を比較すると、ホールプラトートの抵抗値から求められる縮退度が強磁場下において異なることが確認された。これは膜厚に応じた量子閉じ込め効果によって Cd_3As_2 薄膜におけるバンド構造が変化していることに由来すると考えられる。

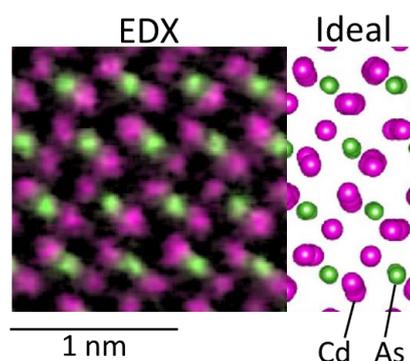


図 1 : Cd_3As_2 薄膜のエネルギー分散型 X 線分光法像。

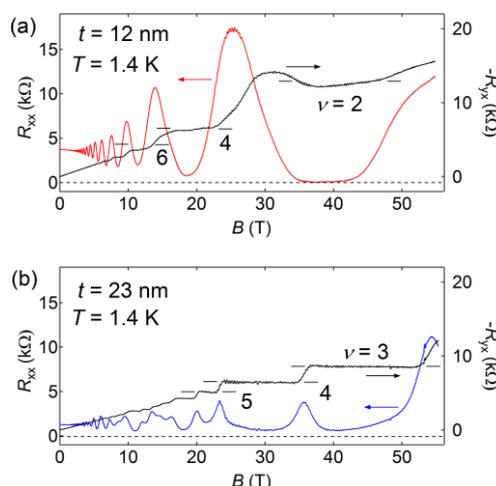


図 2 : 膜厚の異なる Cd_3As_2 薄膜の強磁場輸送測定の結果。

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

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

Pb(Bi, Sb)₂Te₄ トポロジカル絶縁体の作製と電気伝導Fabrication of Pb(Bi,Sb)₂Te₄ topological insulators
and their electrical conductivity

東京大学工学系研究科材料工学専攻枝川研究室
服部裕也, 上山僚介, 徳本有紀, 枝川圭一

トポロジカル絶縁体 (Topological Insulator, TI) は 2005 年に理論的提唱がなされ、2007 年に実験的に存在が確認された比較的新しい物質群であり、特異な量子物性を持つことから物性物理分野を中心に注目を集めている。TI 表面においては質量 0 のディラック粒子による、スピン偏極した特殊な電気伝導が生じると予想されている。高移動度をもつ表面二次元電子の存在や、スピホール効果を利用したスピン流の生成は実験的にも確認されている。これらの性質から TI は、これまでのデバイスと全く動作原理が異なる量子現象デバイスや、スピントロニクスデバイスに応用されることが期待されている。

しかし TI の多くの系ではバルク絶縁性が確保されていないため、特殊な伝導の観測は一般的に難しい。つまり特殊な表面伝導が、通常バルク伝導によってマスクされてしまっており、TI 固有の特異な物性が発現しない。これまでバルク絶縁体化に成功した TI は全 30 種中 3~4 種程度であり、このためバルク絶縁性の確保は TI 分野で重要なテーマとなっている。一方、近年 TI の一種である Pb(Bi,Sb)₂Te₄ において Bi/Sb 比を変化させることで、電気特性を n 型と p 型の間で制御できることが Souma らによって報告された[1]。しかしこれまでのところ、バルク絶縁性の良い結晶は作製されていない。本研究では Pb(Bi,Sb)₂Te₄ の Bi/Sb 比を変化させることで、バルク絶縁性を向上させることを目的とする。

ブリッジマン法によって結晶作製を行い (仕込み Sb 濃度 $x = \text{Sb}/(\text{Sb} + \text{Bi}) = 0.6 \sim 0.8$)、電子線マイクロアナライザ (EPMA) による組成分析を行った。バッチ中部の組成が所望の Pb(Bi,Sb)₂Te₄ に相当していたため、この領域を切り出し粉末 XRD 測定を行ったところ、目的化合物の回折ピークのみで指数付け可能であった。次に均質部における抵抗率の温度依存性を測定した (図)。装置は東京大学低温センターの物理特性測定装置 (PPMS) を用いた。また縦軸の値は 300K での抵抗率に規格化している。Sb 濃度 $x = 0.79 \sim x = 0.8$ の試料は温度減少にともない抵抗率が上昇する絶縁体的なふるまいを示した。しかし $x = 0.8$ の一部サンプル(C)では金属的な温度依存性を示した。講演では試料の不均一性が、絶縁性に与える影響を議論する。

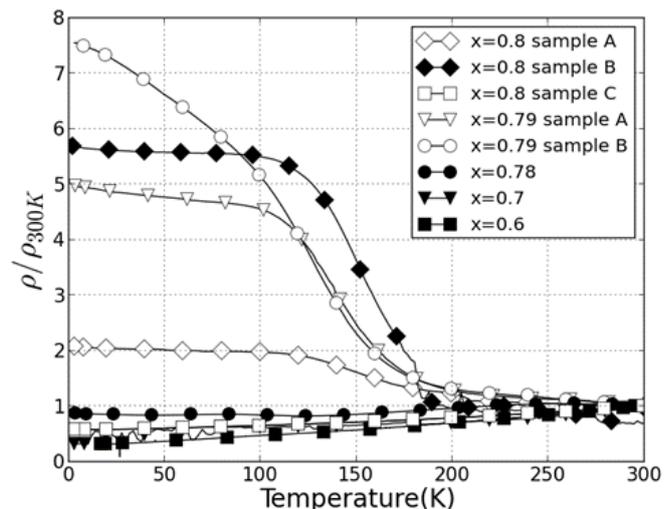


図 : Pb(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₄ の抵抗率の温度依存性

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

Spin dependent transport in GaMnAs-based tunnel junctions

工学系研究科電気系工学専攻¹, スピントロニクス学術連携研究教育センター²
寺田 博¹, 大矢 忍^{1,2}, 田中 雅明^{1,2}

Spin-dependent transport has been studied in tunneling magnetoresistance (TMR) and tunneling anisotropic magnetoresistance (TAMR) effects. These magnetoresistance (MR) characteristics are associated with the density of states (DOS) of the (ferromagnetic) electrodes of tunnel junctions. The spin dependent DOS in a ferromagnetic electrode depends on its magnetization direction, which results in the TMR and TAMR effects [1,2]. In the previous study, the band structure of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs is discussed by TAMR measurements [3]. In Ref. [3], the in-plane magnetic-field direction ϕ dependence of TAMR is strongly dependent on the bias voltage V applied to the tunnel junctions composed of GaMnAs/ AlAs/ p⁺GaAs. This result can be understood by considering that the valence band (VB) and the impurity band (IB) in GaMnAs have different symmetries of the in-plane magnetization-direction dependence of the DOS; the VB has a four-fold symmetry, and IB has a two-fold symmetry. Meanwhile, previous studies of the magneto-optical spectroscopy on GaMnAs has indicated that the VB has a small spin splitting [4,5]. Thus, it is expected that we can observe the difference between the VB of GaMnAs and that of GaAs by comparing ϕ dependence of MR as a function of applied bias voltage V in tunnel junctions with one and two ferromagnetic GaMnAs electrodes. In this study, we systematically measured TMR and TAMR as a function of magnetic-field strength, ϕ , and V in tunnel junctions with one or two GaMnAs ferromagnetic electrodes.

Fig. 1(a) shows the schematic illustration of the cylindrical mesa diode with two GaMnAs layers composed of Ga_{0.95}Mn_{0.05}As (10 nm)/ GaAs (11 nm)/ Ga_{0.95}Mn_{0.05}As (3 nm)/ GaAs: Be on a p⁺GaAs (001) substrate. We measured the MR varying ϕ at $V = -100$ mV, -5 mV, and 140 mV at 3.8 K (Fig. 1(b)-(d)). For the measurements of the ϕ dependence of the MR, we applied a strong magnetic field H of 1 T in the opposite direction of ϕ to align the magnetization directions at first, and then decreased H to zero before the measurements. After that, we started to measure MR with increasing H from zero in the ϕ direction. The measurements were performed at every 10° step of ϕ . When $V = -5$ mV, clear spin-valve characteristics were obtained as shown in Fig. 1(c), where the uniaxial magnetic anisotropy along $[1\bar{1}10]$ is dominant. The MR characteristics are well explained by the relative magnetization direction between two GaMnAs layers. Meanwhile, by increasing the magnitude of V , additional TAMR characteristics appear. When $V = -100$ mV, positive MR with a biaxial anisotropy along $\langle 110 \rangle$ was observed (see Fig. 1(b)), and when $V = 140$ mV, negative MR with a biaxial anisotropy along $\langle 110 \rangle$ was observed (see Fig. 1(d)). These characteristics are reproduced by considering the H and ϕ dependence of the DOS of GaMnAs, and the TMR and TAMR effects. The TAMR characteristic was different from that observed in the tunnel junction with one GaMnAs electrode, which may be caused by the difference between the VB of GaMnAs and that of GaAs. A more detailed discussion will be presented in the meeting.

This work was partially supported by Grants-in-Aid for Scientific Research, Project for Developing Innovation Systems of MEXT, and Spintronics Research Network of Japan. Part of this work was carried out under the Cooperative Research Project Program of RIEC, Tohoku University.

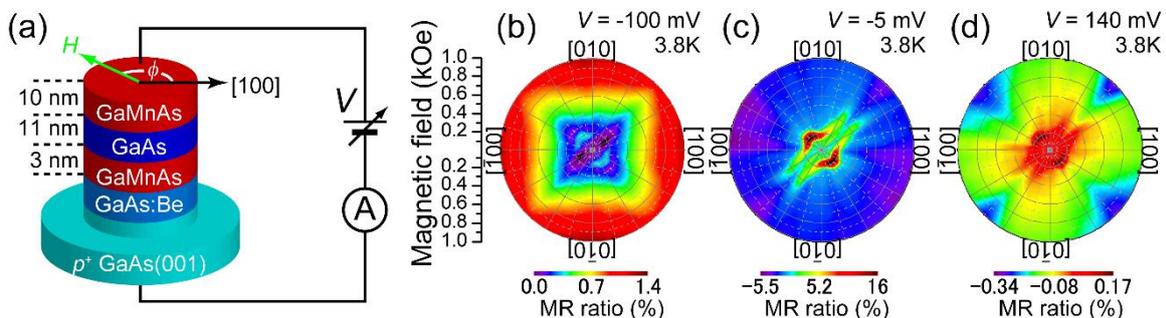


Figure 1(a) Schematic illustration of the tunnel junction with two GaMnAs electrodes. (b) (c) (d) Color contour plots of the MR with the various in-plane magnetic-field directions at $V = -100$ mV (b), -5 mV (c), and 140 mV (d).

[1] Li Gao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 226602 (2007). [2] H. Saito *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 086604 (2005). [3] I. Muneta *et al.*, JSAP Autumn Meeting 2014. [4] K. Ando *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 067204 (2008). [5] H. Terada *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 222406 (2015).

SrRuO₃ / SrIrO₃ ヘテロ接合によるスキルミオン形成と電界制御 Skyrmion formation and electric-field control in SrRuO₃ / SrIrO₃ heterostructures

東京大学大学院工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室

大内祐貴, 松野丈夫, 小川直毅, 小塚裕介, 打田正輝, 十倉好紀, 川崎雅司

磁気スキルミオンは磁性体中の電子スピンの形成するナノスケールの渦状スピン配列である。スピンの向きに関するトポロジーに由来して特徴的な可制御性や安定性を有するため、スピントロニクスにおける新たな情報担体として、駆動や生成・消滅の制御に関する研究が進められている[1]。スキルミオンが現れる系として、多くの関心を集めてきたカイラルな結晶構造をもつ磁性体の他に、界面の反転対称性の破れに起因した Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有するヘテロ構造も考えられる[2]。最近、強いスピン軌道相互作用を有する SrIrO₃ と強磁性体 SrRuO₃ からなる酸化物ヘテロ構造において、スキルミオン形成が報告された[3]。本研究では、このヘテロ構造への電界効果により磁気輸送特性やスキルミオン密度の変調を試みた。

パルスレーザー堆積法により SrRuO₃(SRO) / SrIrO₃(SIO) / SrTiO₃(Sub) ヘテロ構造を作製し (Fig. 1(a))、磁気輸送特性を評価した。SrRuO₃ 層の薄い領域では強磁性に由来する異常ホール効果(AHE)に加え、磁化が反転する付近でスキルミオン形成に由来するトポロジカルホール効果(THE)が観測された (Fig. 1(b))。基板を絶縁層とするバックゲート構造により電界を印加すると、AHE の変調とともに、THE の変調を金属的な電気伝導性を有する系で初めて観測した (Fig. 1(c))。これは、スキルミオン密度が電界変調されたことを示しており、電界効果というスピントロニクス応用上重要な手法が、界面に誘起されるスキルミオンの制御に適用可能であることを示している。

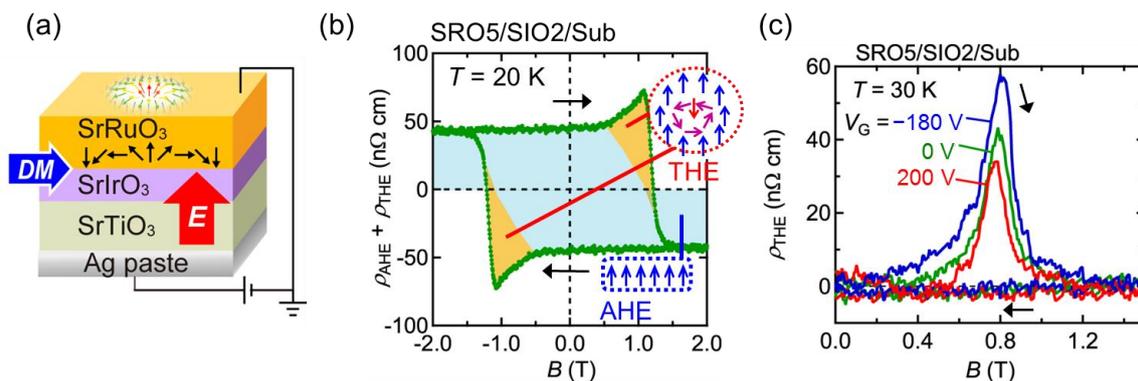


図 1. (a) SrRuO₃/SrIrO₃ ヘテロ構造におけるスキルミオン形成とバックゲート型電界効果トランジスタ構造の概略図。(b) SrRuO₃ 5 層 / SrIrO₃ 2 層における AHE 及び THE。(c) THE の電界制御。

[1] W. Koshibae *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 053001 (2015).

[2] N. Nagaosa and Y. Tokura, Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013).

[3] J. Matsuno and M. Kawasaki *et al.*, Science Advances **2**, e1600304 (2016).

Analysis of 3-terminal and 4-terminal spin signals in Si-based vertical and lateral devices

S. Sato¹, R. Nakane^{1,2}, T. Hada¹, and M. Tanaka^{1,3}

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

²Institute for Innovation in International Engineering Education, The University of Tokyo

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

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

Recently, we have studied 3-terminal (3T) Hanle signals using a bulk Si substrate with Al/Mg/Fe/Mg/MgO/n⁺-Si junctions (vertical device) and demonstrated that suppressing a magnetically-dead layer between Fe and MgO leads to the reduction of the broader 3T Hanle signal (B-3TH), which is not related with spin injection, and enhancement of the narrower 3T Hanle signal (N-3TH), which indicates spin injection into Si^[1]. The striking point is that the simple 3T measurements with proper analyses allow us to accurately estimate the junction resistance, spin polarization P_i , and spin lifetime τ_s , since electrons vertically pass through the junction. On the other hand, studying spin-related phenomena with the four-terminal (4T) nonlocal method is also important, because both τ_s and spin diffusion length λ_S can be estimated from the 4T Hanle signal (4TH) that is the strong evidence of the spin current transport.^[2] Previous analytical studies pointed out that N-3TH measured in a lateral device with a thin channel is different from that measured in a vertical device, ending up inaccurate P_i and τ_s estimation^[3,4]; however, precise analytic function and experimental demonstration are missing. In this study, we introduce analytic functions, and analyze N-3TH and 4TH signals measured in 4T devices and N-3TH signals obtained in our previous study, leading to the accurate estimation of P_i and τ_s .

We fabricated a 4T device with Al (10 nm)/Mg (1 nm)/Fe (3 nm)/Mg (1.0 nm)/MgO (0.8 nm)/n⁺-Si tunnel junctions on a (001)-oriented silicon-on-insulator (SOI) substrate, in which the doping concentration of phosphorus and the thickness d_{SOI} of the Si channel layer are $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ and 50 nm, respectively, the width of injection and detection electrodes are $w_i = 1 \mu\text{m}$ and $w_d = 5 \mu\text{m}$, respectively, and the channel length is $L_{ch} = 2 \mu\text{m}$. Figure 1 shows our measurement setup and the vertical view of the 4T device structure. We observed a clear nonlocal spin valve signal (Fig. 2(a)), a 4TH signal (Fig. 2(b)), and an N-3TH signal with a B-3TH (Fig. 2(c)) at 4 K. Considering that the amplitudes of B-3TH (dashed curve in Fig. 2(c)) were almost the same in the 4T and vertical devices (not shown), the N-3TH signal in the 4T device became about 20 times larger than that in the vertical device. This is caused by the enhancement of spin accumulation by the channel confinement. Taking this confinement into consideration, we constructed the following fitting functions for N-3TH and 4TH signals in the 4T device:

$$\Delta V^{3TH(SOI)}(H) = J\rho\lambda_S P^I P^D \frac{\lambda_S}{t_{SOI}} \text{Re} \left[\frac{1}{(1+i\gamma H\tau)^{3/2}} \left\{ \sqrt{1+i\gamma H\tau} - \frac{\lambda_S}{l^I} (1 - \exp(-\alpha l^I)) \right\} \right]$$

$$\Delta V^{4TH(SOI)}(H) = J\rho\lambda_S P^I P^D \frac{1}{2} \frac{\lambda_S}{t_{SOI}} \text{Re} \left[\frac{1}{(1+i\gamma H\tau_S)^{3/2}} \exp(-\alpha L_{ch}) \frac{\lambda_S}{l^D} (1 - \exp(-\alpha l^D)) (1 - \exp(-\alpha l^I)) \right]$$

where P_i and P_d are the spin polarization of injector/detector, respectively, $\rho_{Si} = 1 \text{ m}\Omega\text{cm}$, and $J = I/180 \text{ A}/\mu\text{m}^2$ is the current density in the injector junction. The fitting curves are plotted as black curves in Fig 2(b) and (c), in which $P^I = 5.3\%$ (assuming $P^I = P^D$), $\tau_s = 1.4 \text{ ns}$, and $\lambda_S = 1.0 \mu\text{m}$ for the 4TH signal, and $\tau_s = 1.6 \text{ ns}$ and $P^I = 4.2\%$ for the N-3TH signal. The comparable values of P_i and τ_s in both the 4TH and N-3TH signals indicate that the channel confinement should be taken into account for analyzing spin signals in lateral spintronic devices with a thin channel thickness.

This work was partially supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (including (B)) and Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ). References [1] S. Sato et al., JSAP Autumn meeting, 2016. [2] F. J. Jedema et al., Nature **410**, 2001. [3] A. Fert and H. Jaffr s, PRB **64**, 2001. [4] Y. Saito et al., JAP **117**, 2015.

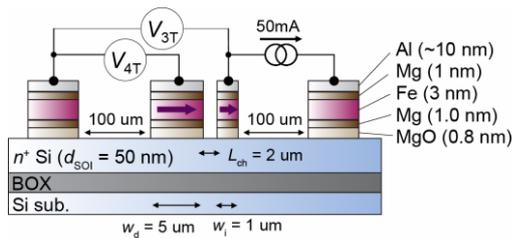


Fig. 1 Device structure and measurement setup for 4T method. 3T and 4T signals are measured simultaneously.

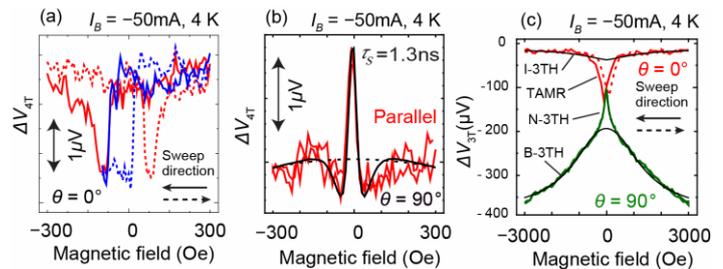


Fig. 2 (a) 4T spin valve signals. (b) 4T Hanle signal (red curves) and fitting (black curve). (c) 3T Hanle signals with B-3TH (green curve) and I-3TH (red curve) with B-3TH fitting (black solid curve).

Characterization of EuNbO_3 thin films fabricated by pulsed laser deposition

理学系研究科 化学専攻 固体化学研究室

○丸山敬裕, 近松彰, 小野塚智也, 山田佳補, 長谷川哲也

【序論】 $\text{Eu}^{2+}(4f^7)$ を含む酸化物は、その局在したスピンにより多彩な物性を示すことで知られている。例えば、 EuO はキュリー温度 (T_C) が ~ 70 Kである強磁性半導体であり、 T_C 付近で巨大磁気光学効果を示す[1]。また、 EuTiO_3 は薄膜において強磁性と強誘電性が同時に発現し、マルチフェロイクス物質として注目されている[2]。これらの物性は、局在スピンの電子軌道やフォノンと相互作用することに由来する。一方、 EuNbO_3 はバルク焼結体の合成例はあるが[3]、単結晶やエピタキシャル薄膜が得られていないため、物性に関する詳しい報告はない。そこで本研究では、パルスレーザー堆積法を用いて EuNbO_3 単結晶薄膜を作製し、その物性を調べたので報告する。

【実験手法】薄膜はパルスレーザー堆積法により $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上に作製した。ターゲットはバルク焼結体 EuNbO_4 を用い、 1×10^{-8} Torrの真空中で製膜を行った。基板温度は 200°C から 900°C まで変化させた。薄膜の結晶構造はX線回折法(XRD)を用いて評価し、磁気特性と輸送特性を調べた。

【結果と考察】図1 基板温度 400°C で製膜した薄膜の面直方向のXRDパターンである。 EuNbO_3 由来のピークのみ観測され、不純物によるピークは観測されていない。基板温度 500°C 、 600°C の薄膜においても同様のピークを観測した。二次元検出器によるXRD観測では、ピークがスポット状であったことから、 EuNbO_3 の単結晶薄膜が得られたことが示唆された。

図2(a)に 1000 Oeを印加して測定した磁化の温度依存性($M-T$)を示す。 400°C で製膜した薄膜は約 6 Kで強磁性に転移した。図2(b)に同じ薄膜の 2 Kにおける磁化の面内磁場依存性($M-H$)を示す。 Eu 一原子当たりの飽和磁化は $6.3 \mu_B$ であった。この値は $\text{Eu}^{2+}(4f^7)$ が示す $7 \mu_B$ に近いことから、 EuNbO_3 薄膜中の Eu の大部分が2価であることを示している。

講演では磁気輸送特性についても議論する。

【謝辞】本研究はJSPS 科研費15H05424の助成とJST、CRESTの支援を受けて実施された。

[1] Mauger *et al.*, Phys. Rep. **141**, 51 (1986).

[2] J. H. Lee *et al.*, Nature **466**, 954 (2010).

[3] K. Ishikawa *et al.*, J. Electrochem. Soc. **128**, 1374 (1981).

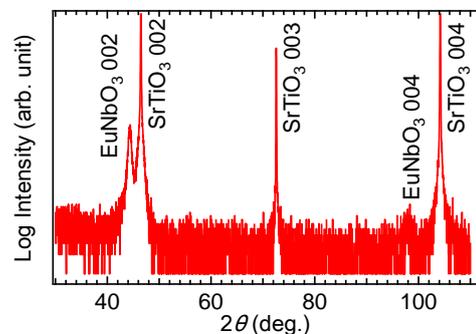


Fig. 1: XRD patterns of the EuNbO_3 thin film fabricated at 400°C .

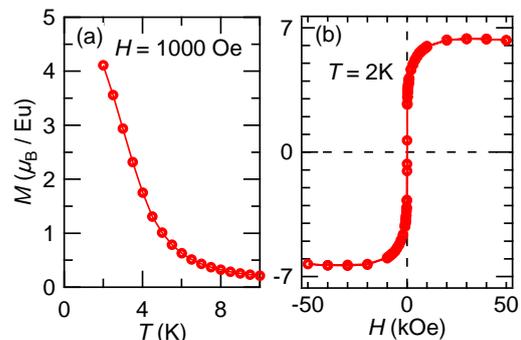


Fig. 2: (a) $M-T$ and (b) $M-H$ curves of the EuNbO_3 thin film fabricated at 400°C .

Co 層上に積層された Pd に誘起された磁気モーメントの電界効果

Electric field effect on induced magnetic moment in Pd deposited on Co layer

1.工学系研究科物理工学専攻千葉研究室、2.電力中央研究所

大日方 紘¹、日比野有岐¹、早川大智¹、小山知弘¹、三輪一元²、小野新平²、千葉大地¹

強磁性金属/絶縁膜/ゲート電極から構成されるキャパシタンス構造の素子にゲート電圧を印加することで強磁性金属表面の電子濃度が変調され、それにより強磁性薄膜のキュリー点などの磁気特性を制御することができる[1,2]。一方で、本来は非磁性金属である Pd を Co と隣接して積層させると、その界面付近に磁気モーメントが誘起される効果(強磁性近接効果)があることが知られているが、それを電界で制御しようという試みも盛んである。本研究では、このような状態の Pd の磁気電界効果について調べた。

用いた試料構造は MgO/Pd(1.7 nm)/Co(t_{Co})/Pt(4.1)/Ta/Si 基板である。なお、この構造の Pd 膜厚依存性を測定することで、Pd 表面まで磁気モーメントが誘起されていることが確認されている。この試料のゲート電圧印加下における磁気モーメントの測定を行うためにイオン液体を用い、電気二重層キャパシタンス構造を作った。図はゲート電圧印加下での磁気モーメントの温度依存性を表しており、正(負)のゲート電圧(Pd の電子濃度が増加(減少))で系全体の磁気モーメントも増加(減少)することがわかった[3]。さらに上記の構造を上

下反転させた構造(Pt/Co/Pd/MgO/HfO₂/Pt/Ta/GaAs 基板)を用いて、ゲート電圧下での Co の XAS および XMCD スペクトルの観測を行ったが、それぞれのスペクトルにおいてゲート電圧に対する系統的な変化は観測されなかった。これらから、磁性の変化は Co ではなく Pd 中の磁気モーメントがゲート電圧によって制御されたためであると結論付けた。

本研究は、科研費基盤研究(S)の支援を受けて行われた。また、本研究の一部は東京大学低温センター、SPring-8 の施設にて行われた。

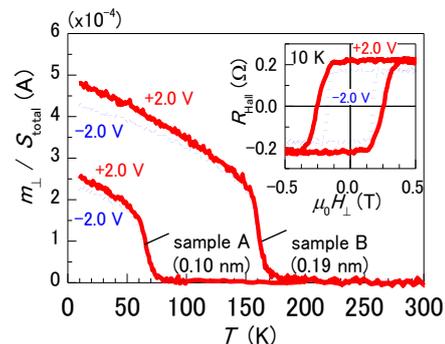


図 1：ゲート電圧印加下における系全体の磁気モーメント。

[1] D. Chiba *et al.*, *Nature Mater.* **10**, 853 (2011). [2] K. Shimamura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 122402 (2012). [3] A. Obinata *et al.*, *Sci. Rep.* **5**, 14303(2015).

CoFeB/酸化物界面へのフッ化物と窒化物導入による垂直磁気異方性の変化

Effects of nitride and fluoride introduction on perpendicular anisotropy at CoFeB/Oxides interfaces

工学系研究科 マテリアル工学専攻 喜多研究室

李 為東

1. Introduction: Magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy (PMA) is one of the key technologies to realize high performance magnetoresistive random access memory. CoFeB/oxide structure is verified to show interface anisotropy energy (K_{int}) which induce the magnetic anisotropy of ultrathin CoFeB film to be perpendicular [1]. CoFeB/oxide PMA stacks with high K_{int} have already been achieved by MgO deposition on CoFeB[1,2], but exploring the materials to induce higher K_{int} is still an issue. The formation of Fe-O bonds is considered to bring K_{int} of this stack due to the degeneracy lifting of Fe3d orbitals and the hybridization of Fe3d and O2p orbitals [3]. Hence K_{int} manipulation is reasonably expected if we replace oxygen with anions with different electronegativity. In this study we introduce fluoride and nitride to the CoFeB/oxide interface, to investigate the possibility of K_{int} enhancement.

2. Experimental: After thermal oxidation of Si substrate, Ta (2.9nm)/wedged $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{B}_{0.2}$ (0-2nm)/dielectric layer were sequentially deposited by sputtering. Three kinds of dielectric layers were investigated: (i) AlF_3 (0-0.6nm)/ Al_2O_3 (4nm); (ii) AlN (0-0.5nm) / Al_2O_3 (4nm); (iii) MgF_2 (0-0.5nm)/ MgO (1.5nm)/ Al_2O_3 (4nm). Those stacks were annealed at 250°C or 300°C in N_2 for 10 minutes. Magneto-optical Kerr effect (MOKE) measurements showed the saturation magnetic field H_s at the different positions on each wedged structure. Saturation magnetization per area $M_s t_{\text{eff}}$ (M_s is saturation magnetization per volume and t_{eff} is effective thickness of ferromagnetic layer) at each point was determined by using superconducting quantum interference device (SQUID).

3. Results and Discussions: From the typical results of SQUID shown in Fig.1, d_{dead} (the position that t_{eff} becomes zero) was estimated as the x-axis intercept of the linear fit. With the result of MOKE, $K_{\text{eff}} t_{\text{eff}} \approx 1/2 \mu_0 H_s M_s t_{\text{eff}}$ of each position d could be determined. Here, μ_0 is permeability of vacuum, K_{eff} represent effective magnetic anisotropy energy density of ferromagnetic layer. K_{int} was estimated as the value of $K_{\text{eff}} t_{\text{eff}}$ at $d=d_{\text{dead}}$ by considering the relationship: $K_{\text{eff}} t_{\text{eff}} = -1/2 \mu_0 M_s^2 t_{\text{eff}} + K_{\text{int}}$ as shown in Fig.2. The K_{int} obtained for each stack were shown in Fig.3. The insertion of both 0.5-nm-thick MgF_2 for the MgO stack and 0.5-nm-thick AlF_3 for the Al_2O_3 stack brings around 50% increase of K_{int} in our experimental conditions, while the insertion of AlN at CoFeB/ Al_2O_3 decreases the K_{int} . Thus we can surmise that higher electronegativity anion introduction at the CoFeB/oxide interfaces is beneficial for the enhancement of K_{int} , even though the maximum value of K_{int} achieved in this study was not so high as the reported value for MgO/CoFeB[1]. The physical origin of this observation is not yet fully understood, but we speculate that the transfer of more electrons from ferromagnetic to dielectric by the introduction of higher electronegativity anion would enhance the K_{int} of CoFeB/oxide stacks.

[References][1] S. Ikeda, et al., Nature materials 9.9, 721-724 (2010). [2]D. C. Worledge, et al. Appl. Phys. Lett. 98, 022501 (2011). [3] H. X. Yang, et al., Physical Review B 84.5, 054401 (2011).

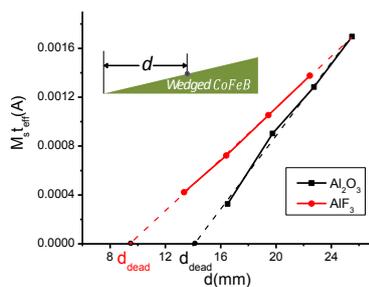


Fig.1 d_{dead} estimation by $M_s t_{\text{eff}}$ - d relationship measured by SQUID

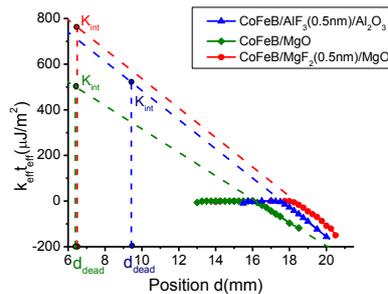


Fig.2 K_{int} values of typical stacks were estimated as the value of $K_{\text{eff}} t_{\text{eff}}$ at d_{dead} .

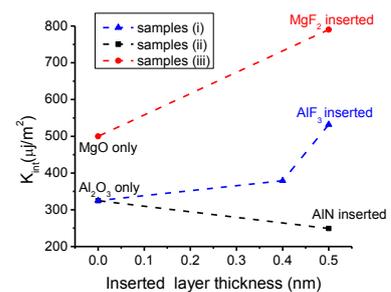


Fig.3 Comparison of k_{int} of samples (i), (ii), and (iii) with different inserted layer thickness.

Pt/Co と Pd/Co 系におけるスピン軌道トルクの温度依存性

Temperature dependent Spin-orbit torque in Pt/Co and Pd/Co system

工学系研究科 物理工学専攻 千葉研究室

○日比野有岐 小山知弘 千葉大地

Switching of magnetization direction using the spin-orbit torque (SOT) is intensively studied in the research field of spintronics [1,2]. The SOT effect can be observed in the system of ferromagnetic material/heavy metal (FM/HM) heterostructure. Although the Spin Hall effect in the HM layer is considered to be crucial for the SOT [2], it is also suggested that the interfacial effect at the FM/HM interface such as Rashba effect contributes to the torque [1].

Investigation of temperature dependence of the SOT is expected to be helpful to understand the detailed mechanism. In this work, we investigate temperature dependence of the SOT in perpendicularly magnetized Pt/Co and Pd/Co systems.

The multilayers of Pt/Co and Pd/Co were deposited on the thermally oxidized Si substrate using rf sputtering. The SOT was investigated using the harmonic Hall voltage measurement [3]. The measurement was performed in PPMS to control the sample temperature T . The figure shows T dependence of the SOT efficiency of 2 component (damping-like and field-like: ξ_{DL} and ξ_{FL}) per applied electric field through the channel of the Hall bar structure. In both systems, monotonous increase of ξ_{DL} and ξ_{FL} with increasing T is observed. The T dependence of the SOT originates from the temperature dependence of the Spin Hall effect in Pt (Pd) or the proximity induced magnetism in Pt (Pd) at the interface formed with the Co [4]. From the simple spin drift diffusion model, we estimated that the spin Hall angle of the Pt suppressed up to $\sim 25\%$ by lowering T . In addition, we observed that in the Pd/Co system, the sign of the effective field changes with decreasing T in both longitudinal and transverse components. This might indicate the existence of the strong interfacial effect such as Rashba effect at the Pd/Co interface.

This work was supported by JSPS KAKENHI. A part of the work was performed using facilities of the Cryogenic Research Center, the University of Tokyo.

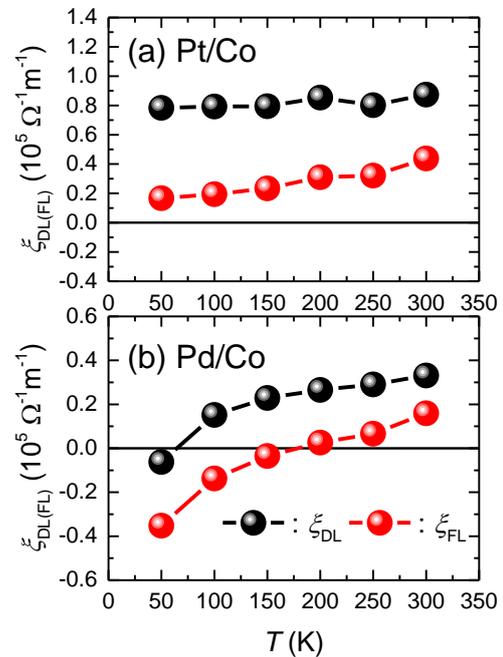


Figure: Temperature dependence of the SOT efficiency per unit applied electric field of Pt/Co (a) and Pd/Co (b) system. Black (Red) data shows the damping-like (field-like) torque component.

[1] I. M. Miron *et.al*, Nature **476**, 189 (2011). [2] L. Liu *et.al*, Science **336**, 555 (2012).

[3] J. Kim *et.al*, Phys. Rev. B **89**, 174424 (2014). [4] W. Zhang *et.al*, Phys. Rev. B **91**, 115316 (2015).

IV 族強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ における不純物バンド伝導と磁性 Impurity band conduction and magnetism in group-IV ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$

工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢・中根研究室
伴 芳祐, 若林 勇希, 中根 了昌, 田中 雅明

半導体にスピンの自由度を付与したデバイスの実現を目指すため、強磁性半導体(FMS)はスピン偏極電流を半導体に生成するスピン注入源としての利用の期待等から III-V 族ベースの GaMnAs 等を中心として盛んに研究が行われて来た。一方で IV 族ベース FMS は、現在の半導体集積回路産業を支える Si ベースの技術との統合が期待されるが、その作製は困難であり研究例は少なかった。我々のグループにより開発された IV 族強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ [1] 薄膜は Si や Ge 上に低温分子線エピタキシー法により結晶成長することが可能であり Si ベースの技術との統合が期待できる。 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ は単結晶で単一の磁性相からなる FMS であることが薄膜の評価から示されている[1]。近年、軟 X 線 ARPES[2]により $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ ($x = 6.5\%$) / Ge (001) 基板のバンド分散が測定され light-hole、heavy-hole、split-off バンドが明瞭に観測された。フェルミエネルギー(E_F)はバンドギャップ中の価電子帯の頂上から 0.35 eV 上に位置していることが示され、正孔は Fe 不純物順位を伝導することが示唆される。他の先行研究[3]では、空間的な Fe 濃度のゆらぎが大きい場合にキュリー温度がより高くなる事が示されている。これによれば $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の強磁性の発現についてナノスケールの空間的な Fe 濃度揺らぎが重要な役割をしていると考えられるが、Fe 濃度揺らぎとバンド構造がどのように関係しているかについては、まだよく分かっていない。 E_F がバンドギャップ中に位置するため、強磁性の起源は Fe 不純物順位における二重交換相互作用と推定されるが、これについて伝導特性を直接観測しての検証はまだ行われていなかった。

これらの点を明らかにするために、本研究では $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ ($x = 1.0 - 14.0\%$) にアクセプターとしてボロン(B)をドーピングし正孔濃度を変化させ、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の伝導特性や磁性との関係について詳細に調べた。具体的には、抵抗率、正孔濃度、移動度の温度依存性、伝導率と異常 Hall 伝導率の関係、正孔濃度とキュリー温度の関係から、不均一な Fe 濃度が伝導特性や磁性へ与える寄与を明らかにし、それと B ドーピングがバンド描像に与える関係を議論する。ここで B をドーピングしていない $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ は絶縁的な抵抗率の温度依存性を示し、これを Efros-Shklovskii バリアブルレンジホッピングのモデルにより解析することで、ホッピングサイトのサイズに対応する局在長を得ることで Fe 不純物バンドをホッピング伝導する描像が説明可能である。ホッピングサイトは先行研究で報告されているナノスケールの Fe 濃度揺らぎに起因した Fe リッチ領域に対応すると考えられる。これにより Fe 濃度揺らぎと正孔伝導やバンド描像の関係を説明する。得られた実験結果に整合する、この Fe 不純物バンド中を正孔がホッピング伝導する描像より、正孔を介したキャリア誘起強磁性の観点から $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の強磁性の起源について議論する。

[1] Y. Shuto, M. Tanaka, and S. Sugahara, Appl. Phys. Lett. **90**, 132512 (2007).

[2] S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori, Phys. Rev. B **95**, 075203 (2017).

[3] Y. K. Wakabayashi, S. Ohya, Y. Ban, and M. Tanaka, J. Appl. Phys. **116**, 173906 (2014).

角度依存 XMCD による $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の磁気異方性と電子分布異方性の観測

Magnetic anisotropy and anisotropic electron distribution in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ thin films revealed by angle-dependent XMCD

理学系研究科物理学専攻・藤森研究室^A, 高エネ研 PF^B, 産総研^C, (株)フジヒラ^D

芝田悟朗^A, 北村未歩^B, 簗原誠人^B, 吉松公平^{A,B}, 門野利治^A, 石上啓介^A, 原野貴幸^A, 高橋文雄^A, 坂本祥哉^A, 野中洋亮^A, 池田啓祐^A, 池震棟^A, 古瀬充穂^C, 淵野修一郎^C, 岡野眞^C, 藤平潤一^D, 内田公^D, 渡邊和訓^D, 藤平秀幸^D, 藤平誠一^D, 組頭広志^B, 小出常晴^B, 藤森淳^A

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO)は、巨大磁気抵抗やハーフメタル等の特異な物性で知られ、スピントロニクス材料の候補物質として期待されている物質である。特に薄膜では、LSMO よりも格子定数の小さい(大きい)基板に成長させると薄膜に圧縮性(伸張性)の応力が加わるため、これによる金属-絶縁体転移[1]や磁気異方性の変化[2]を示すことが知られている。本研究では、基板応力がミクロな電子状態に及ぼす影響を調べるため、圧縮性基板 LaAlO_3 (LAO) および伸張性基板 SrTiO_3 (STO)上に成長させた強磁性 LSMO 薄膜($x=0.3$)の磁化測定と、放射光による角度依存 X 線磁気円二色性 (XMCD) 実験を行った。XMCD は、左右両円偏光の X 線を強磁性体試料に照射し、その吸収度の差を見る手法である。XMCD スペクトルの面積から、元素毎のスピン/軌道磁気モーメントを定量的に求めることが可能である。さらに、XMCD の磁場方向依存性から、磁性を担う原子の電子分布の異方性(すなわち軌道の形状)も推測できると理論的に指摘されている[3]。このような磁場角度依存 XMCD の実験は、最近開発されたベクトル超伝導マグネット XMCD 装置[4]を用いて初めて行えるようになったものである。

STO および LAO 基板上 LSMO 薄膜の磁化測定の結果を図 1 に示す。測定には低温センターの MPMS 装置を使用した。成長した薄膜は確かに STO (LAO) 基板の場合に面内(面直)磁化容易となり、先行研究[2]の結果を支持するものとなった。図 2 は、磁場方向を調整し、磁化と入射 X 線が垂直になるような配置 (Transverse XMCD, TXMCD)[5]で測定した LSMO 薄膜の Mn $2p$ - $3d$ 吸収端 XMCD スペクトルである。

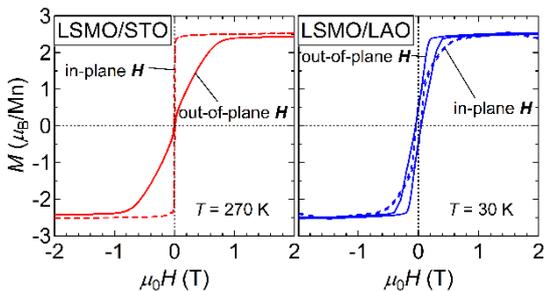


図 1. STO および LAO 基板上 LSMO 薄膜の磁化曲線。

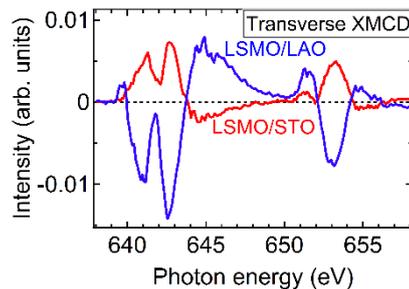


図 2. Mn $2p$ - $3d$ 吸収端 Transverse XMCD スペクトル。

このスペクトルが両試料間でちょうど反転していることは、基板応力によって面内方向に伸びる軌道 (x^2-y^2 軌道) と面直方向に伸びる軌道 ($3z^2-r^2$ 軌道) の占有度が逆になっていることを意味する。

[1] Y. Konishi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 3790 (1999). [2] F. Tsui *et al.*, Appl. Phys. Lett. **76**, 2421 (2000).

[3] H. A. Dürr and G. van der Laan, Phys. Rev. B **54**, R760 (1996).

[4] M. Furuse *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 4100704 (2013).

Origin of the large magnetoresistance in $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ granular thin films

工学系研究科 電気系工学専攻 田中大矢研究室,¹ 東大理,² JAEA,³

若林勇希,¹ 秋山了太,² 竹田幸治,³ 堀尾眞史,² 芝田悟朗,² 坂本祥哉,² 伴芳祐,¹ 斎藤祐児,³
山上浩志,³ 藤森淳,² 田中雅明,¹ 大矢忍¹

$\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ (GeMn) granular thin films are a promising material for spintronics applications due to the large positive magnetoresistance (MR) up to 280% [1]. Previous studies on GeMn suggested that this large MR is related to nanospinodal decomposition into ferromagnetic (FM) metallic Mn-rich nanoparticles and a paramagnetic (PM) Mn-poor matrix; however, its microscopic origin of the MR has not been clarified yet. In this study, we clarify the origin of the MR by using a new method to investigate the magnetic properties of the nanoparticles and the matrix separately using X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) [2].

The $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ (average Mn content $x=0.14$ and 0.09) granular films were grown on p (or n)-Ge(111) substrates by low-temperature molecular-beam epitaxy (LT-MBE). Figure 1 shows the XMCD spectrum of $\text{Ge}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}$ at 6 K with a magnetic field $\mu_0H = 7$ T applied perpendicular to the film surface. By analyzing the XMCD- H curves measured at various energies and temperatures, we have decomposed the spectrum into the FM and PM components (Fig. 1). The FM component shows a broad single negative peak at the Mn- L_3 edge. This is a typical feature that can be seen for the delocalized $3d$ electrons of the FM Mn atoms in metallic materials. This confirms that the FM component originates from the Mn-rich nanoparticles, each of which is locally metallic. Meanwhile, the PM component has a negative peak a and positive peaks b and c at the Mn- L_3 edge. This is the characteristic feature of the Mn^{2+} states in the Mn-poor matrix [3]. The measured MR at 6 K reached 200% at $\mu_0H = 7$ T applied perpendicular to the film plane of the $\text{Ge}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}$ film (Fig. 2). We found that the MR ratio is proportional to the product of the FM and PM components of the XMCD intensity. This means that spin-polarized holes in the nanoparticles penetrate into the matrix and that these holes undergo spin-disorder magnetic scattering by paramagnetic Mn atoms in the matrix, which induces the large MR [4].

This work was partly supported by Giants-in-Aid for Scientific Research including Specially Promoted Research, Project for Developing Innovation Systems of MEXT, the Cooperative Research Project Program of RIEC, Tohoku University, and Spintronics Research Network of Japan.

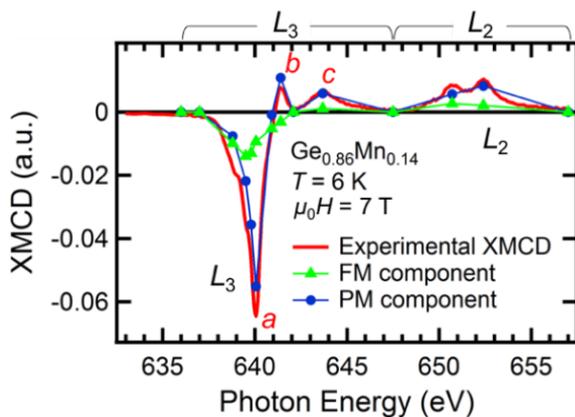


Fig. 1 XMCD spectrum of $\text{Ge}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}$ and those of the derived FM and PM components at 6 K with $\mu_0H = 7$ T.

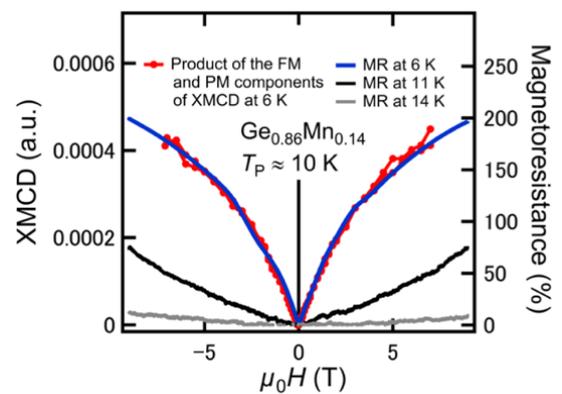


Fig. 2 MR at 6 K for $\text{Ge}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}$ and the H dependence of the product of the FM and PM components of XMCD.

- [1] A. P. Li *et al.*, Phys. Rev. B **72**, 195205 (2005).
 [2] Y. K. Wakabayashi *et al.*, Sci. Rep. **6**, 23295 (2016).
 [3] Y. Takeda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 247202 (2008).
 [4] Y. K. Wakabayashi *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 075203 (2017).

P-26

ソホロオリゴ糖結合タンパク質の X 線結晶構造解析 Crystal structures of sophorooligosaccharide-binding protein

農学生命科学研究科 応用生命工学専攻 酵素学研究室
阿部 紘一

細菌は様々な栄養源を取り込むために、各栄養源に対して特異的な輸送システムを有する。その中でも ATP-binding cassette transporter (ABC トランスポーター)を介した取り込み系は最もメジャーである。ABC トランスポーターは ATP の加水分解によって生じるエネルギーを利用して物質を輸送するタンパク質であり、二つの膜貫通タンパク質と二つの ATP 結合タンパク質、および溶質結合タンパク質から構成される。溶質結合タンパク質は取り込みの第一段階で働き、リガンドを特異的に結合し、膜貫通タンパク質と相互作用することで輸送を仲介する[1]。

近年、我々はグラム陽性菌 *Listeria innocua* において、ソホロオリゴ糖（グルコースが β -1,2-結合したオリゴ糖）に特異的に結合する溶質結合タンパク質の同定・機能解析を行い、ソホロオリゴ糖結合タンパク質(SOBP)と名付けた。ソホロオリゴ糖は自然界で非常に希少であるため、その輸送・代謝に関わるタンパク質の研究例は少ない。

今回、我々は X 線結晶構造解析により SOBP のリガンドフリー状態の構造およびソホロオリゴ糖が結合した複合体構造を決定することに成功した。SOBP の全体構造は概ね他の溶質結合タンパク質と似ていたが、結合ポケットの構造は大きく異なっており、ソホロオリゴ糖の結合に適した形をしていた。SOBP とソホロオリゴ糖の間には親水性基や水を介した多数の水素結合が形成されており、これまでに得られている結合の熱力学データと良く一致していた。本研究により SOBP がソホロオリゴ糖を特異的に結合する構造基盤が明らかになった。

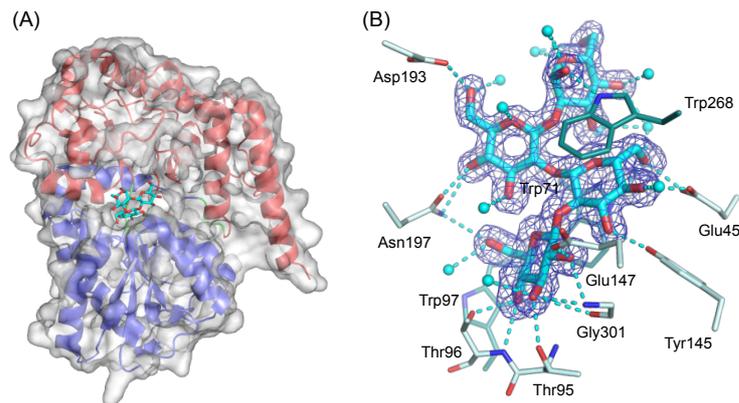


図 SOBP とソホロテトラオース(四糖)との複合体構造
(A) 全体構造 (B) 結合サイト

[1] Berntsson *et al.* FEBS Letters **584** (2010) 2606–2617

P-27

新規グアニンヌクレオチド交換因子 SmgGDS の X 線結晶構造解析

X-ray crystal structure analysis of novel guanine nucleotide exchange factor SmgGDS

薬学系研究科・薬科学専攻・蛋白構造生物学教室
清水光・藤間祥子・紺谷圏二・堅田利明・清水敏之

低分子量 G 蛋白質は GTP 結合型の活性型と GDP 結合型の不活性型とを行き来することで細胞増殖や骨格形成を制御しており、生命活動に必須のシグナル分子である。低分子量 G 蛋白質の活性制御は guanine nucleotide exchange factors (GEF) と GTPase activate proteins (GAPs) によってなされている。SmgGDS は低分子量 G 蛋白質である RhoA や RhoC に対する GEF として知られており、既存の GEF にみられる活性ドメイン (DH ドメイン, DHR2 ドメイン)を持たないことから、新規の GEF 機構を持つとされている分子である。SmgGDS は armadillo repeat motifs (ARMs)からなる蛋白質で異なる生理学的役割を持つとされる二つのアイソフォーム (SmgGDS-607, SmgGDS-558)で構成される。興味深いことに SmgGDS は C 末端に poly basic region (PBR)を持つ RhoA, Rac1, Rap1A, K-Ras4B, Di-Ras といった様々な低分子量 G 蛋白質と結合でき、RhoA ファミリー以外の低分子量 G 蛋白質ファミリーに対しても結合能を有する。SmgGDS は GEF としての役割のほかに分子シャペロン、輸送、局在制御因子として報告されている。

今回我々はヒト SmgGDS-558 の結晶構造を 2.1 Å の高分解能で世界に先駆けて決定した。液体窒素を用いて結晶を凍結し、X 線回折実験中は窒素気流によって結晶の温度を 100 K に維持し結晶の X 線損傷を最小限に抑えた。SmgGDS-558 は 12 の ARMs から成る螺旋型の構造をしていた。結晶構造と X 線小角散乱による低分子量 G 蛋白質との複合体溶液構造との比較から、SmgGDS は凹面に低分子量 G 蛋白質を結合していることが示唆された。複合体界面と予想された SmgGDS-558, -607 のアミノ酸残基をアラニンにした変異体を複数作成し、蛍光標識 GDP を用いた RhoA に対する GEF 活性測定とゲル濾過による複合体化試験を実施すると野生型に比して GEF 活性と結合能が低下する変異体を見出した。また、SmgGDS-558 は脂質修飾された RhoA を、SmgGDS-607 は脂質修飾を受けていない RhoA をより強く認識し GEF 活性を発揮すること明らかにした。構造情報と生化学実験の結果を通じて我々は SmgGDS による低分子量 G 蛋白質の認識には 2 つの結合領域が関わり、SmgGDS はアイソフォームに応じて低分子量 G 蛋白質の脂質修飾状態を認識した異なる結合フォームをとることを明らかにした。この研究は SmgGDS の機能と構造とを結びつける初めての報告である。

P-28

ビフィズス菌由来ヒト糖鎖代謝酵素 NahK の X 線結晶構造解析 X-ray crystal structural analysis of human oligosaccharide degrading enzyme NahK from Bifidobacteria

農学生命科学研究科・応用生命工学専攻・酵素学研究室

佐藤真与・荒川孝俊・伏信進矢

近年、人の健康と腸内細菌との関係は高い社会的関心を集め、中でもビフィズス菌は主要な善玉菌として広く親しまれ、免疫力向上、炎症抑制などの効果が知られている。ビフィズス菌の腸内での効率的な増殖・定着方法の確立を目指し、代謝機構や増殖因子の解明が進んでいる。ビフィズス菌は、小腸下部から大腸にかけての易消化性糖質がほとんど届かない貧栄養環境中に生息することから、エネルギー源として、宿主や他の細菌が利用しにくい難消化性の糖質である、ヒトミルクオリゴ糖（母乳に含まれるラクトース以外の様々な希少なオリゴ糖）や、ヒトの消化管粘膜のムチン糖タンパク質の糖鎖なども利用していると考えられる。本研究ではこれらの糖鎖から代謝されてきた 2 糖である、ガラクト-*N*-ビオース (Galacto-*N*-biose; Gal β 1-3GalNAc; GNB) とラクト-*N*-ビオース (Lacto-*N*-biose; Gal β 1-3GlcNAc; LNB) の代謝経路である GNB/LNB 経路で働く酵素、*N*-アセチルヘキソサミン 1-キナーゼ (NahK) を対象とした。NahK は、主に *N*-アセチルグルコサミン (GlcNAc) や *N*-アセチルガラクトサミン (GalNAc) の 1 位 α -ヒドロキシ基の ATP によるリン酸化を触媒する他、基質特異性が広く様々な糖 1-リン酸を生成できる。本研究では NahK を活用したオリゴ糖合成を目指し、構造解析と機能改変を行った。

【NahK の X 線結晶構造解析】

当該タンパクの発現、精製、結晶化を行った。結晶を専用のループで拾得した際に液体窒素による瞬間凍結を行い、X 線によるデータ測定も低温の N₂ ストリーム中で行うことにより、結晶の損傷を最小限にとどめ、高い分解能のデータを得た。基質フリー、ATP、ADP 複合体 (open 構造)、GlcNAc、GalNAc 複合体 (closed 構造) の 5 種の立体構造を決定し、基質結合に伴う大きな open-close 構造変化の様子を明らかにした。また変異体の詳細な活性測定などにより、触媒反応に関する詳細を明らかにした。[1]

【NahK の機能改変】

NahK により生成する糖 1-リン酸のうち、 α -マンノース 1-リン酸 (α -Man1-P) は、 β -マンノシド特異的反転型ホスホリラーゼの逆反応により各種 β -マンノオリゴ糖を合成する際の基質となる。しかし NahK のマンノース (Man) に対する活性は本来の基質 GlcNAc の約 1/13 と実用化には不十分であったため、基質特異性を GlcNAc から Man へシフトさせるような機能改変を目指した。60 種以上の変異体を作製し検討した結果、触媒効率が野生型の 10 倍以上上昇した 2 種の変異体が得られた。これらの改変酵素は Man からのワンステップで効率的な α -Man1-P の合成を可能にするものであり、マンノオリゴ糖合成に際する実用化が見込まれる。

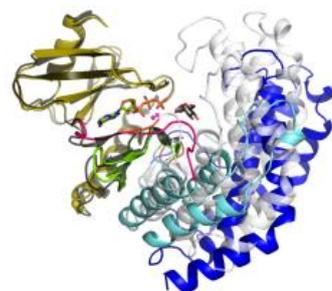


図 1. NahK の全体構造

[1]M.Sato et al., Biochim. Biophys. Acta **1854** 333 (2015)

低侵襲がん診断磁気機器の研究 Study of the Minimally Invasive Magnetic Medical Devices

大学院工学系研究科、電気系工学専攻、関野研究室
隣 真一，桑波田晃弘，日下部守昭，関野正樹

がん手術における患者と医師の負担の軽減を目的として、患部を同定するマーカー探知関連機器や術中診断のための迅速診断装置の実用化研究を進めている。マーカーには既存のラジオアイソトープマーカーと比較し取り扱いが容易である磁性流体の使用を想定しているが、術後の患者の負担を低減するためには磁性流体の患者への注入方法と磁気マーカー探知性能の向上が不可欠である。また取り出した患部を術中に診断し、その結果に応じて引き続いて行われる手術に反映させる術式において、現状の染色診断より確度が高い迅速診断装置の実用化が求められており、これを実用化するための磁気加速免疫反応器や磁性抗体の開発も進めている。

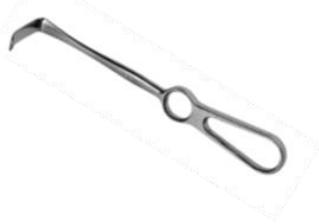
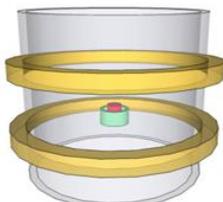
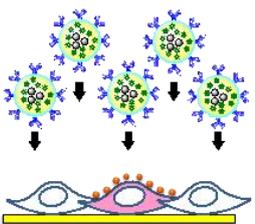
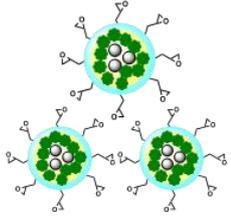
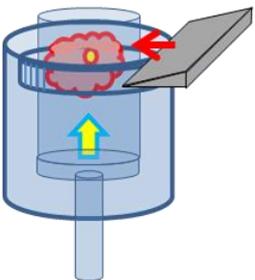
同定	磁気マーカー探知 	非磁性手術器具 	患部磁気量定量器 
診断	磁気加速免疫反応器 	磁性抗体 	患部非破壊検査 

図. プロジェクトから製品化を目指す医療機器

マーカーの注入方法の向上に関しては、磁気マーカー探知機を用いた臨床研究に先立ち、動物実験によるプロトコルの改善を進めている。今回多数の動物患部サンプルについて、微量な磁気マーカー量がどの程度含まれるかどうか SQUID 装置を用いて測定でき、マーカー注入から手術までの引き置き時間について有意な結果[1]を得ることができた。また実際の患部サンプルに含まれる磁気は比較的低濃度であり、サンプルの磁化特性における非磁性成分の解析から、探知指向性についての知見を得た。

(この研究は AMED の援助にて行われた。)

[1]M. Ahmed, et al., Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine **12** 1045–1052 (2016)

シアノ架橋型金属錯体におけるイオン伝導性 Ionic conductivity of cyano-bridged metal assemblies

理学系研究科化学専攻大越研究室

中川幸祐、大越慎一

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

対象とした4試料は、粉末X線回折パターンとリートベルト解析の結果から、金属イオンがシアノ基で架橋されたジャングルジム状の3次元立方晶構造を持つことが示唆された。金属のネットワークは、電荷バランスのため一部欠損が生じており、この空隙に水分子が存在して、金属イオンに配位している。これらの配位した水分子は、結晶中の空隙に存在する水分子と3次元水素結合ネットワークを形成していた。低温センターより供給される液体ヘリウムを用いてこれらの試料の磁気特性の測定を行ったところ、いずれの試料も相転移を示し強磁性体であることが示唆された。さらに、室温においてこれらの試料の複素インピーダンス測定およびCole-Coleプロット解析を行った結果、湿度100%での伝導率は $2 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ ($M = \text{Mn}$)、 $1 \times 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ ($M = \text{Co}$)、 $2 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ ($M = \text{Ni}$)、 $3 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ ($M = \text{Cu}$) と見積もられた。湿度を低下させるとこれらの伝導率は低下し、水分子がイオン伝導性に寄与していることが示唆された。配位水および結晶水からなる3次元水素結合ネットワークを通じて、バケツリレーのようにプロトンが伝導したことにより、イオン伝導性を示したと考えられる。

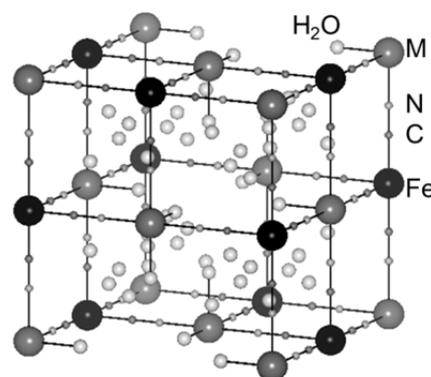


図1. $M[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot z\text{H}_2\text{O}$ の構造

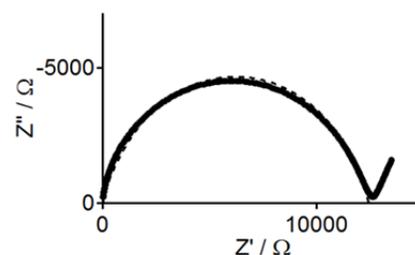


図2. $\text{Ni}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot z\text{H}_2\text{O}$ における複素インピーダンス測定結果

- [1] S. Ohkoshi, H. Tokoro, T. Matsuda, H. Takahashi, H. Irie, K. Hashimoto, *Angew. Chem. Int. Ed.* 46, 3238 (2007). [2] S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, K. Hashimoto, *Nature Materials* 3, 857 (2004). [3] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.* 132, 6621 (2010). [4] K. Imoto, K. Nakagawa, H. Miyahara, S. Ohkoshi, *Cryst. Growth Des.* 13, 4673 (2013).

擬 2 次元フラストレート系有機導体の 金属・絶縁体転移近傍におけるスピン励起の NMR 研究 NMR study of spin excitations near the metal-insulator transition of quasi-2D organic conductors

工学系研究科物理工学専攻鹿野田研究室, 兵県大物質理^A
中田耕平, 宮川和也, 角屋智史^A, 山田順一^A, 鹿野田一司

液体の水が低温にて固体の氷へ相転移するように、物質を冷却していくと構成要素が乱雑に動き回る無秩序相から構成要素が規則正しく整列した秩序相への相転移が生じる。物質の磁性の担い手である電子のスピンでも一般的には同様のことが言える。電子相関の強い物質の中には電子が結晶の各格子点に局在した絶縁体 (Mott 絶縁体) を形成するものがあり、そこではある温度を境にして常磁性相 (無秩序相) から強磁性・反強磁性相 (秩序相) への相転移が生じるものと考えられる。ところが、2次元三角格子にて隣り合うスピン同士が反平行になるような相互作用の働く Mott 絶縁体ができると、すべてのスピン同士の相互作用エネルギーを最安定化させるようなスピンの配列が存在しない (図1)。このような系は幾何学的なフラストレーションが存在すると表現される。フラストレーションはスピンの秩序化を妨げる作用を及ぼし、特にフラストレーションが強い系では絶対零度においてもスピンが量子力学的な効果によって秩序化しない、いわばスピンの「液体」状態が生じることがある。このような新奇なスピン状態は量子スピン液体と呼ばれ、擬2次元三角格子系有機導体 κ -(ET)₂Cu₂(CN)₃などのフラストレート系でその存在が示唆されている[1]。

本研究では量子スピン液体の新たな候補物質の探索を目標に、擬2次元三角格子系有機導体 β -(BDA-TTP)₂I₃ (図2) の圧力下での磁性を ¹H NMR 測定によって調査した。この物質は常圧では Mott 絶縁体でありながら十分低温においても磁化率に磁気転移の兆候が表れないという奇妙な振舞いが先行研究により報告されていた[2]。圧力の印加によって電子相関を制御することで金属-絶縁体転移を起こすことが知られており、本発表では圧力下での ¹H NMR 測定の結果から量子スピン液体の可能性について議論を行う。

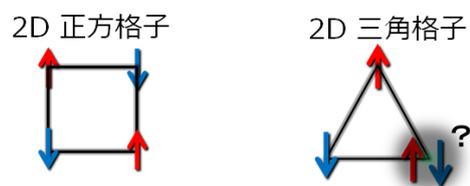


図1 三角格子のフラストレーション

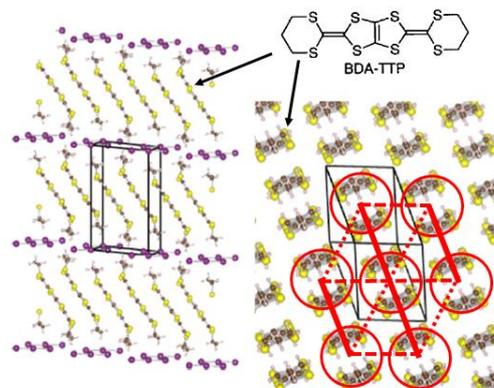


図2 β -(BDA-TTP)₂I₃ の構造 [3]

[1] Y. Shimizu, et al. Phys. Rev. Lett. **91**, 107001 (2003)

[2] J. Yamada, et al. Chem. Commun. 2006, 1331-1333 (2006)

[3] H. Aizawa, et al. Phys. Rev. B, **92**, 155108 (2015)

特異な低温磁気特性を示す新規分子性磁性体の開発

Development of novel molecular-based magnets with unique properties at low temperature

東京大学理学系研究科化学専攻西原研究室、
大出千恵、草本哲郎、西原寛

機能性分子であるジチオレン錯体は、結晶中での分子配列に依存して多彩な電氣的・磁氣的性質を示すことで知られる。当研究では新規物性の開拓を目的として、「硫黄の σ -hole 結合」という、高い方向性を備えた電子不足部位である「 σ -hole」とアニオンや非共有電子対などの間に働く静電的な引力によって、分子配列を制御することを試みた。「硫黄の σ -hole 結合」は多点で相互作用が可能である、などの特長を持つにも関わらず、実際に結晶構造の制御に利用されている例は極めて少ない[1]。本研究では Et-4XT カチオン ($X = \text{Br}, \text{I}$) と、金属ジチオレン錯体 $M(\text{mnt})_2$ アニオン ($M = \text{Pt}, \text{Ni}$) の塩を合成し、結晶中で硫黄の σ -hole 結合を介した新しい分子配列の構築と新奇物性の開拓を目指した。

新規化合物 $(\text{Et-4BrT})_2[\text{Pt}(\text{mnt})_2]_3$ において、単結晶 X 線構造解析の結果から硫黄の σ -hole 結合を介した超分子構造が予想された通りに構築されたことが明らかとなった。またこの塩は 150 K 付近で構造相転移を示すが、構造相転移前後で、超分子構造形成 (図 1 の赤点線) に寄与するアニオンの移動が抑制されること、転移に伴い磁性と伝導性が変化することを明らかにした。

また、化合物 $(\text{Et-4IT})[\text{Ni}(\text{mnt})_2]_2$ において、単結晶 X 線構造解析の結果から、結晶中に硫黄の σ -hole 相互作用が観測され、アニオンが結晶学的に独立な二層を構築する特徴的な分子配列の構築が明らかとなった。磁化率測定および磁気トルク測定の結果から、25 mK まで長距離時期秩序が示されないことが明らかとなり、この化合物がスピン液体として振る舞う可能性が示唆された。謝辞 磁気トルク測定において筑波大学大学院および材料・物質科学研究機構の宇治進也教授、寺嶋太一教授、杉浦栞理様に大変お世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

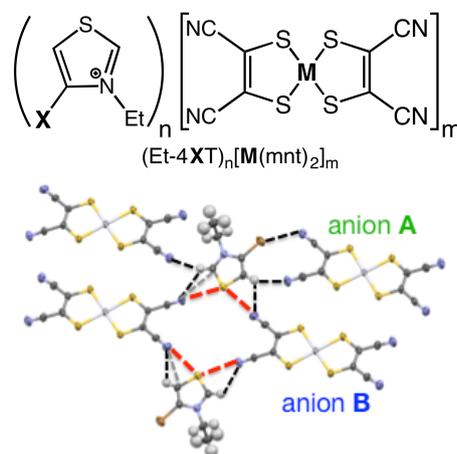


図 1. $(\text{Et-4BrT})_2[\text{Pt}(\text{mnt})_2]_3$ の結晶構造

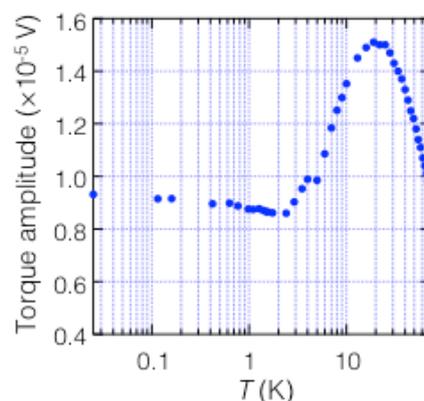


図 2. $(\text{Et-4IT})[\text{Ni}(\text{mnt})_2]_2$ の磁気トルク振幅の温度依存性

[1] (a) T. Kusamoto, H. M. Yamamoto, N. Tajima, Y. Oshima, S. Yamashita, R. Kato, *Inorg. Chem.* **2013**, *52*, 4759–4761. (b) Kusamoto, T.; Yamamoto,.; Kato, R. *Cryst. Growth. Des.* **2013**, *13*, 4533–4541.

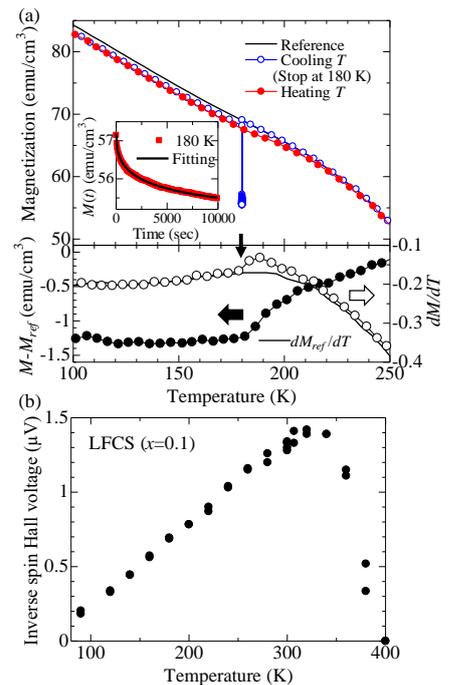
Co,Si 置換 Lu₃Fe₅O₁₂ クラスタースピントラース薄膜における熱履歴記憶
 Memory Effect of Thermal History on Co, Si-substituted
 Lu₃Fe₅O₁₂ Cluster Spin Glass Thin Films

工学系研究科 バイオエンジニアリング/電気系工学専攻 田畑研究室
 山原 弘靖、三橋 啓多、関 宗俊、田畑 仁

スピントラースはスピンの“ランダムネス”と“フラストレーション”の磁気相関により、低温でスピントラース凍結状態をとる物質である。スピントラース凍結状態ではメモリ効果やエージング現象と呼ばれるスピントラースに特徴的な磁気記憶を示し、応用上、興味深い性質として注目されている[1]。本研究ではスピントラース/電圧変換材料としての応用が期待されている希土類鉄ガーネットを対象とし、異方性の強い Co²⁺及び非磁性元素 Si⁴⁺を導入することでクラスタースピントラース相を実現した LuFe_{5-2x}Co_xSi_xO₁₂(LFCS)薄膜における熱履歴記憶現象（メモリ効果）及び逆スピントラース効果による電圧の温度依存性について報告する。

試料はパルスレーザー堆積法（PLD 法）によって LFCS（x = 0 ~ 0.5）単結晶薄膜を Y₃Al₅O₁₂(111)基板の上に堆積し、磁気特性を低温センター共同設備の超伝導量子干渉計(SQUID)によって調べた。LFCS（x = 0.5）はスピントラース凍結温度（T_g）を 190–220 K に有するクラスタースピントラース磁性を示すことを確認している。

メモリ効果は Sun らに報告されている方法で評価した[1]。磁場中冷却（FC, H = 100 Oe）過程において T_{stop} = 180 K で磁気緩和を行い（図 1(a)挿入図）、その後、昇温過程の磁化変化をメモリ磁化（M_{mem}）とする。M_{mem} は T_{stop} において特異な磁化変化を示し、磁気緩和を伴わないリファレンスとの差分（M_{mem} - M_{ref}）や温度微分（dM_{mem}/dT）において顕著に表れる（図 1(a)）。これは磁気緩和を T_{stop} = 180, 150, 120 K で連続的に加えた場合でも同様に見られ、スピントラース特有の熱履歴を記憶するメモリ効果を示している。逆スピントラース電圧の計測は 10 nm 厚の Pt 薄膜を堆積した後、電子スピントラース共鳴装置（日本電子）を用いて計測した。元素置換量 x の増加に従いダンピング定数が大きく増加するため、LFCS(x = 0.1) の試料（T_g ~ 180–200 K）に対して温度依存性を評価した（図 1(b)）。温度の低下に従い強磁性共鳴のピーク線幅(ΔH)の増加と共に電圧値の減少が見られるが、スピントラース相を含むスピントラース凍結温度(T_g)以下の 90 K まで電圧検出を確認した。



(a) T_{stop} = 180 K に磁気緩和を伴う、LuFe₄Co_{0.5}Si_{0.5}O₁₂ 薄膜の磁化とメモリ効果。(b) LuFe_{4.8}Co_{0.1}Si_{0.1}O₁₂ 薄膜の逆スピントラース電圧の温度依存性。

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

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

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

第二高調波発生を示す 1 次元配位高分子 One-dimensional magnetic coordination polymers exhibiting second harmonic generation

理学系研究科化学専攻大越研究室

小峯誠也、Szymon Chorazy、井元健太、中林耕二、大越慎一

反転対称性を持たない分子磁性体は磁気特性と光学物性の相関現象が観測されることが期待できるため魅力的な研究対象である。当研究室では、ヘキサシアノ金属酸イオンやオクタシアノ金属酸イオンからなるシアノ架橋型錯体において磁化誘起第二高調波発生 (MSHG) などの相関現象を報告している。^[1] 本研究では、ペンタシアノニトロシルモリブデン(I)酸イオン $[\text{Mo}^{\text{I}}(\text{CN})_5(\text{NO})]^{3-}$ を構築素子として用いた第二高調波発生を示す一次元の配位高分子 $[\text{Ln}^{\text{III}}(\text{dmf})_6][\text{Mo}^{\text{I}}(\text{CN})_5(\text{NO})]$ ($\text{Ln} = \text{Gd}$ (**1**), Eu (**2**), $\text{dmf} = N,N$ -ジメチルホルムアミド) の合成に成功したので報告する。

化合物 **1** と **2** は、 dmf 中で $[\text{Mo}^{\text{I}}(\text{CN})_5(\text{NO})]^{3-}$ と Ln^{3+} を混合することによって単結晶として得られた。単結晶構造解析の結果より、**1** と **2** はほぼ同じ結晶構造で反転対称性を持たない空間群 $Pna2_1$ に属していることが明らかになった。 Ln^{III} 周りは 2 つのシアノ基による N 原子と 6 つの dmf による O 原子が配位した 8 配位のスクエアアンチプリズムの配位構造をとっており、 Ln^{III} と Mo^{I} がシアノ基によって架橋されて 1 次元の鎖状構造を形成していた (図 1)。**1** に波長 1064 nm のフェムト秒パルスレーザーを照射すると、波長 532 nm の第二高調波を出射することが観測された。**1** の非線形感受率は標準物質として用いられるリン酸二水素カリウムの約 0.1 倍であった。**1** の磁化率と温度の積は、300 K で $8.2 \text{ cm}^3 \text{ K mol}^{-1}$ であり、温度が下がるにつれて値が小さくなり、10.8 K で極小値をとっていた。 Gd^{III} のスピン ($S = 7/2$) を古典的なスピン、 Mo^{I} のスピン ($S = 1/2$) を量子化されたスピンと考えた一次元鎖モデル^[2]を用いて磁化率のシミュレーションを行ったところ、 Gd^{III} のスピンと Mo^{I} のスピンの間には反強磁性的な相互作用が働いていることが示唆された。また、**2** の磁気測定の結果より、 Eu^{III} に由来する磁化の大きさは温度が下がるにつれて小さくなっており、2 K ではほぼ Mo^{I} に由来する成分のみになることが明らかになった。^[3]

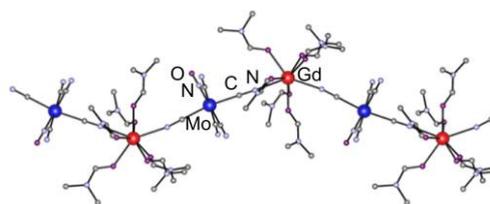


図 1. **1** の結晶構造。

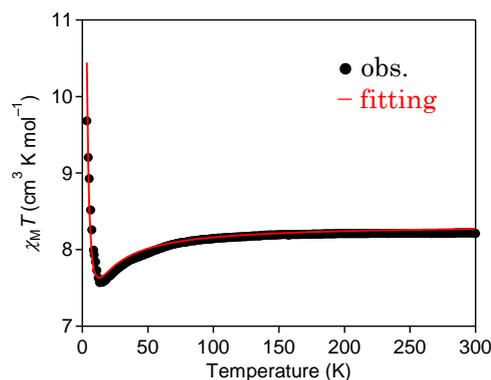


図 2. 外部磁場 5000 Oe における **1** の磁化率と温度の積の温度依存性。

[1] Y. Tsunobuchi, W. Kosaka, T. Nuida and S. Ohkoshi, *CrystEngComm* **11** 2051 (2009). [2] J. Seiden, *J. Phys., Lett.* **44** 947 (1983). [3] M. Komine, S. Chorazy, K. Imoto, K. Nakabayashi, and S. Ohkoshi, *CrystEngComm* **19** 18 (2017). (Highlighted at Back Cover picture)

^{13}C NMR による電荷フラストレート系
 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ における
 動的不均一性の研究

^{13}C NMR study of dynamical heterogeneity
 in charge-frustrated system β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$

橋本凌^A、井上暁登^A、宮川和也^A、磯野貴之^B、上田顕^C、森初果^C、鹿野田一司^A

^A 東大工、^B 物材機構、^C 東大物性研

我々が普段目にする物質の内部では無数の電子がひしめきあっており、その電子集団の振る舞いに応じて、物質は多種多様な物性を持つ。特に、伝導電子間の相互作用が強い“強相関電子系”物質は、通常の金属や絶縁体では見られない新奇な物性を示すことから、近年の物性研究において大きな注目を集めている。強相関電子系では、伝導電子間のクーロン斥力相互作用が強く働くため、伝導が妨げられて電荷が局在し、系が金属から絶縁体へ相転移することがある。このようにして現れる絶縁体の代表例が、“モット絶縁体”と“電荷秩序絶縁体”である。これらの絶縁体相では、スピンや電荷が基本的に何らかの秩序をもって配列するが、結晶の持つ幾何学的性質などによっては、複数の秩序状態が拮抗して最安定状態が定まらなくなる“フラストレーション”の効果が働くこともある。フラストレーションのある系(フラストレート系)では、スピンや電荷の秩序化が妨げられて不均一な状態のまま凍結する、“スピングラス”や“電荷ガラス”といった状態が現れることがある。これらは我々が日常で目にするガラス物質(構造ガラス)と似た性質を持つことから、フラストレート系の研究は、ガラス転移現象という物理の未解決問題を解明する鍵にもなりうると考えられている。

表題物質 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ は、有機分子から成る強相関電子系で、常圧室温では金属、冷却すると低温で電荷秩序絶縁体となるような物質である [1]。しかし、金属-絶縁体転移の境界付近で電子状態に不均一が生じることが様々な実験から明らかになっており [2, 3, 4]、この物質の三角格子性による電荷配列のフラストレーションの寄与が指摘されている [5]。さらにこの物質では、モット絶縁体相と電荷秩序相も拮抗していると考えられており [6]、フラストレート系研究の格好の舞台となっている。

我々はこの電子状態の不均一を、原子核をプローブとしたミクロな視点から明らかにするために、表題物質の ^{13}C NMR 測定を行った。その結果、構造ガラスのもつ性質である“Dynamical heterogeneity”のような、遅い揺らぎを伴う動的に不均一な電子状態が金属相で生じていることや(図1)、スピンや電荷の自由度が起源と考えられる遅い揺らぎが温度-圧力相図上で複数現れることを明らかにした。

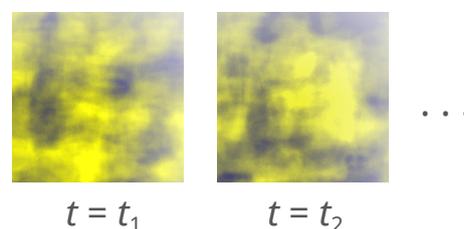


図1. Dynamical heterogeneity の概念図。色分けした複数の状態が空間的に不均一に分布し、その分布が時間的に変化する。

[1] S. Kimura *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **128**, 1456 (2006).

[2] M. Tanaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 024714 (2008).

[3] R. Okazaki, Phys. Rev. Lett. **111**, 217801 (2013).

[4] A. Inoue, 日本物理学会第 69 回年次大会 (2014).

[5] T. Mori, Phys. Rev. B **93**, 245104 (2016).

[6] H. Mori, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051003 (2006).

層状構造を持つ新規酸フッ化物の合成と物性 Synthesis and physical properties of new layered oxyfluoride

工学系研究科 応用化学専攻 岸尾研究室

北村拓也、荻野拓、岸尾光二

【緒言】層状複合アニオン化合物とは、異なる複数のアニオンを持つ層が積層した化合物で、近年鉄系超伝導体 $REFeAsO$ ($RE = La \sim Tb$)^[1]をはじめ、超伝導や優れた熱電特性、巨大磁気抵抗効果など様々な電気的・磁氣的性質を示す物質が報告されている。本研究では、層状化合物として酸ハロゲン化物 $Ba_3RE_2O_5X_2$ (RE : 希土類元素, X : ハロゲン元素)及び酸フッ化物 $Sr_2MO_3F_2$, Sr_2MO_3F (M : 遷移金属元素)に着目して研究を行った。

【実験】 $Sr_2RuO_3F_2$ は、通常の固相反応法で作成した Sr_2RuO_4 をフッ化剤 Polyvinylidene Fluoride (PVDF)もしくは MF_2 ($M = Cu, Zn$)と $250 \sim 350^\circ C$ の低温で反応させることで合成した。また、高压合成法により $Sr_2VO_{4-x}F_x$ を合成した。粉末X線回折法 (XRD)により構成相の同定および格子定数の決定を、SQUID 磁束計による磁化測定、四端子法による抵抗率測定を行った。

【結果と考察】固相反応法により合成した Sr_2RuO_4 とフッ化剤 PVDF、 MF_2 ($M = Cu, Zn$)を混合し、 $250 \sim 350^\circ C$, 24 ~ 36 h の条件でトポタクティック反応を試みたところ、ほぼ単相の $Sr_2RuO_3F_2$ が得られた。Rietveld 解析の結果から、フッ素層が2面導入されることで c 軸長が大きく変化すること及び対称性が $I4/mmm$ で維持されることが分かった。また各フッ化剤によるフッ化反応で a 軸長、 c 軸長に差が見られ、化合物中のF量が異なる可能性がある。磁化率測定の結果から $Sr_2RuO_3F_2$ は反強磁性的な転移を示し、各フッ化剤でその転移温度が異なっていた。さらに、磁場中冷却 (FC)とゼロ磁場冷却 (ZFC)でヒステリシスを持つ挙動を示した。印加磁場の増加に伴いヒステリシスが消失したことも考慮に入れると、 $Sr_2RuO_3F_2$ はスピングラス的な相互作用を持つと考えられる。これはRuの平均価数が $4-\delta$ であることを示唆し、FやOの欠損あるいはO/Fの不定比性が推測される。また、PVDFでフッ化した試料は半導体的な挙動を示し、母物質 Sr_2RuO_4 が1.5 K以下で超伝導を示すのとは対照的な結果である。さらに、磁化率測定及び抵抗率測定の結果と各試料の格子定数との間に相関があることも示唆された。講演では、高压合成法による $Sr_2VO_{4-x}F_x$ の合成及び物性の評価についても述べる。

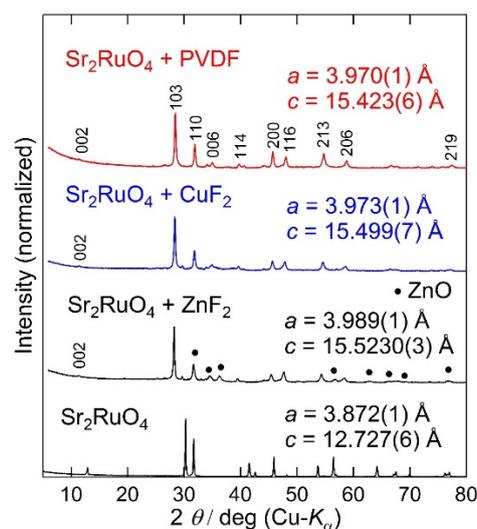


Fig. 6 $Sr_2RuO_3F_2$ の粉末XRDパターン

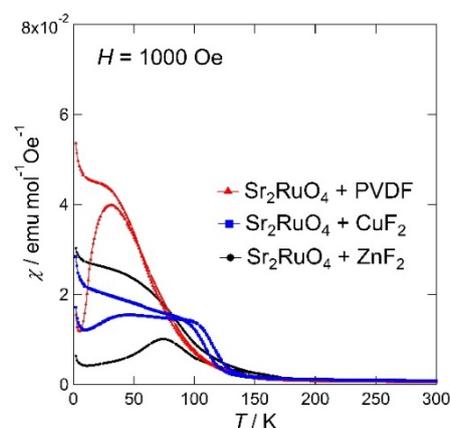


Fig. 7 $Sr_2RuO_3F_2$ の磁化率の温度依存性

[1] Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **130** (2008) 3296.

層状窒化物 HfNCI における イオンゲート法とトンネル分光法を用いた超伝導ギャップ測定 Superconducting gap measurement in HfNCI by ionic gating and tunneling spectroscopy

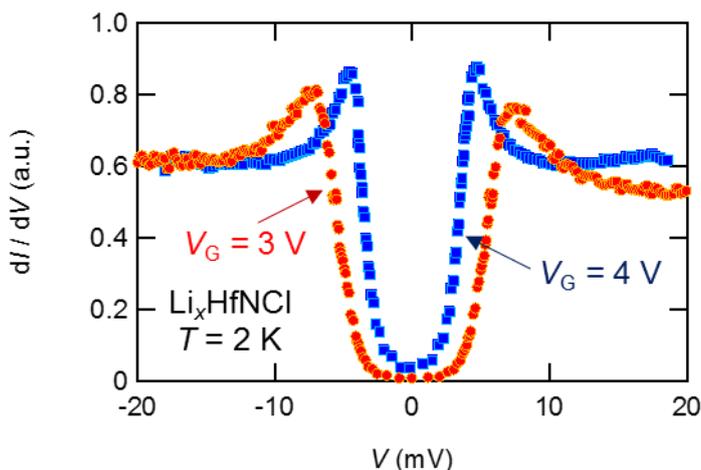
工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室

中川 裕治, 齋藤 優, 石武, 犬丸啓, 山中昭司, 岩佐義宏

層状窒化物 ZrNCI, HfNCI は、インターカレーションによる電子ドーピングで超伝導体となることが知られている[1]。母物質は単純なバンド絶縁体であるにも関わらず、超伝導状態においては非従来型の性質を示すことが比熱や同位体効果の測定から確認されている。しかしながら、これまでの測定のほとんどは微小な結晶をペレット状に押し固めた多結晶で行われていた。超伝導機構を明らかにするには、結晶の小ささや大気中での不安定さを克服し、単結晶において種々の測定を行うことが必要である。

我々はこれまで、電気二重層トランジスタに用いられているイオンゲート法を応用することで、層状窒化物の単結晶におけるインターカレーションと in-situ での電気伝導性の測定を行ってきた。ZrNCI におけるドーピング量に依存した超伝導異方性や、HfNCI のドーピング減少に伴う転移温度の上昇が明らかになっている。

本発表では、同様の手法で Li をインターカレートした HfNCI 単結晶において、その場での電気伝導測定と同時に行ったトンネル分光測定の結果を報告する。ドーピング量に依存した超伝導ギャップの値や、広い温度領域における測定結果から、層状窒化物における超伝導物性について考察する。



図：各ゲート電圧（ドーピング量）における Li_xHfNCI のトンネルスペクトル

[1] S. Yamanaka *et al.*, *Nature* **392**, 580 (1998)

**超伝導体 NbN の非線形感受率における
Higgs モードと電荷密度揺らぎの寄与**
**Contributions of Higgs mode and charge density fluctuation on
third-order nonlinear susceptibility in superconductor NbN**

理学系研究科物理学専攻 島野研究室¹、JST さきがけ²、低温センター研究開発部門³
松永隆佑^{1,2}、島野亮^{1,3}

対称性が自発的に破れた超伝導状態には、秩序パラメーターの振幅の振動に相当する集団励起モード、いわゆる Higgs モードが存在する。Higgs モードは線形応答では電磁場と相互作用しないためこれまで検出が難しかったが、我々は近年開発してきた高強度テラヘルツ(THz)パルス技術を駆使した非線形分光により、*s* 波超伝導体 NbN における Higgs モードの観測に成功し、その性質を明らかにしてきた[1,2]。ギャップ周波数以下の強い THz 電場を超伝導体に入射するとその 3 倍の周波数を持つ第三高調波(THG)が発生し、さらに入射周波数の 2 倍が超伝導ギャップと一致したとき THG 強度が最大になる。この結果は非線形感受率に現れる Higgs モードと電磁場の共鳴効果として解釈することができる[2]。一方、この THG の定性的な振る舞いはラマン分光で観測される電荷密度揺らぎによってもほぼ同様に説明される[3]。平均場近似の範囲ではむしろ電荷密度揺らぎの寄与の方が大きいと考えられるが、現実の系では電子-格子相互作用の遅延効果や不純物散乱のように平均場近似では取り扱われない機構があり、Higgs モードの寄与が急激に増強するため[4]、この 2 つの素励起の寄与を実験的に明確に区別する必要がある。

我々は単結晶(100)NbN 薄膜試料を用いて、入射電場の偏光方向を結晶軸に対して回転させながら非線形 THz 透過測定を行い、THG を観測した。THG 強度は三次非線形感受率の絶対値の 2 乗に比例する。電荷密度揺らぎに由来する非線形感受率はバンド分散に大きく依存するため、fcc 構造を持つ NbN において入射電場の偏光が[100]から[110]に変わると THG 強度は大きく増強することが予測される。しかし実験では入射 THz 波の偏光の変化に対し、THG 強度はほぼ一定であった。これは *s* 波秩序パラメーターの等方性を反映して Higgs モードが大きく寄与していることを意味している。さらに入射電場と垂直な偏光方向における THG が全く観測されないことから、Higgs モードの寄与が支配的であるという結論を得た。この結果は、電子-格子相互作用が強く働く超伝導体の非線形感受率においては、フォノンの遅延効果等によって平均場近似が破綻しており、集団励起が大きく寄与していることを意味している。これは同時に、古くから超伝導体のラマン散乱測定において対破壊ピークと解釈されてきたスペクトルについても実際には Higgs モードが大きく寄与している可能性を示唆している。

本発表は辻直人（理研・JST さきがけ）、青木秀夫（東大理・産総研）、寺井弘高、牧瀬圭正（情報通信研究機構）各氏との共同研究に基づくものである。

[1] R. Matsunaga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 057002 (2013).

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

[3] T. Cea, C. Castellani, and L. Benfatto, Phys. Rev. B **93**, 180507 (2016).

[4] N. Tsuji, Y. Murakami, and H. Aoki, Phys. Rev. B **94**, 224519 (2016).

有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ の熱電効果 Thermoelectric effects in the organic superconductor κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室, 低温センター^A, 埼玉大理^B
鈴木悠司, 藤井武則^A, 宮川和也, 谷口弘三^B, 鹿野田一司

固体の中では多数の電子が相互作用しながら存在している。電子間の相互作用が弱い（電子相関が弱い）系における電気伝導は、電子の椅子取りゲームに例えることができる。すなわち、椅子がすべて埋まってしまうと電子は動けなくなって電気を流さない絶縁体になり、空席ができると電子が動けるようになって金属になる。一方で、電子間の相互作用が強い（電子相関が強い）場合は、空席ができている状態においても電子どうしが反発することによって絶縁体となってしまう場合がある。このような強い電子相関によって実現する絶縁体をモット絶縁体といい、モット絶縁体の電子数を増減（キャリアをドープ）したり、電子相関を弱めたりすることで絶縁体から金属への転移（モット転移）を引き起こすことができる。モット転移の近傍では、高温超伝導をはじめとする多彩な電子状態が顔を出す。

有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ は、モット絶縁体にキャリアとして正孔をドープした物質と考えられる。加えて、この物質のスピンの自由度は低温まで磁気秩序を示さない量子スピン液体と同様の振舞いを示すことが示唆され[1], ドープされたスピン液体物質の有力な候補と考えられている。この物質は常圧下では強い電子相関によって特異な金属状態にあるが、圧力の印加により電子相関を弱めることができ、0.5 GPa 程度以上の圧力下で通常の金属状態へと変化する[2,3].

本研究では、圧力により電子相関を制御したときの常伝導および超伝導の性質を、ゼーベック効果およびネルンスト効果という二種類の熱電効果の測定により調べた。ゼーベック効果からは、低圧域において強い電子相関により κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ のフェルミ面の形状が大きく変更を受けている可能性が示唆された。また、0.2-0.4 GPa 付近において、超伝導転移温度より高温からネルンストシグナルが増大する振舞いが顕著に見られる（図 1）ことから、超伝導ゆらぎが発達していると考えられる。

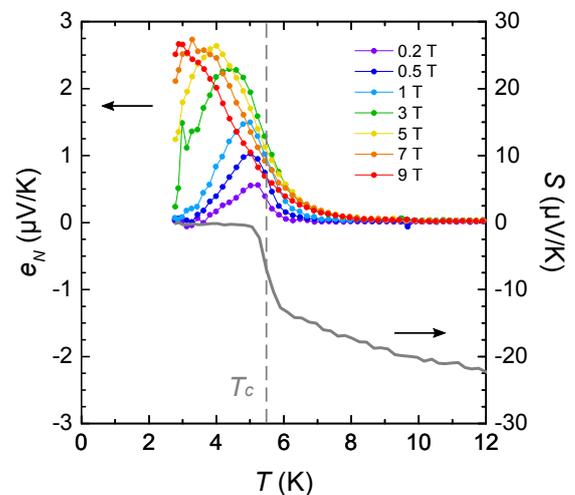


図 1. κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈ の 0.2 GPa の圧力下におけるネルンストシグナル e_N およびゼーベック係数 S . 波線はゼーベック係数から決めた超伝導転移温度 T_c を表す。

[1] H. Oike *et al.*, submitted

[2] H. Taniguchi *et al.*, JPSJ **76**, 113709 (2007).

[3] H. Oike *et al.*, PRL **114**, 067002 (2015).

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 単結晶におけるテラヘルツ波励起 非平衡ダイナミクス

東大理^A, JST さきがけ^B, ブルックヘブン国立研^C, パリ・ディドロ大^D, 東大低温セ^E
 勝見 恒太^A, 濱田 裕紀^A, 松永 隆佑^{A,B}, R. D. Zhong^C, J. Schneeloch^C, G. D. Gu^C,
 Y. Gallais^D, 島野 亮^{A,E}

Terahertz-induced non-equilibrium dynamics in a single-crystal high-temperature superconductor
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$

^ADept. of Phys., Univ. of Tokyo, ^BJST-PRESTO, ^CBrookhaven National Lab.,
^DUniv. of Paris Diderot, ^ECryogenic Research Center, Univ. of Tokyo

K. Katsumi^A, Y. I. Hamada^A, R. Matsunaga^{A,B}, R. D. Zhong^C, J. Schneeloch^C, G. D. Gu^C,
 Y. Gallais^D and R. Shimano^{A,E}

最近我々は、 s 波超伝導体に対して高強度テラヘルツ波を照射することで、オーダーパラメーターの振幅が入射電場の時間波形の 2 乗に追従して振動する非線形応答を観測した[1]。これは非線形領域における超伝導の集団励起モード（ヒッグスモード）と電磁場の結合によるものと考えられ、この集団励起が銅酸化物に代表される d 波超伝導においてどのように現れるかは大変興味深い。理論的には超伝導ギャップの異方性を反映した複数のヒッグスモードの存在が予測されているが[2]、未だ実験的には確認されていない。

そこで我々は、銅酸化物高温超伝導体である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 単結晶試料におけるヒッグスモードの観測を目指し、高強度テラヘルツパルス（中心周波数 0.6 THz、尖頭値 400 kV/cm）照射により誘起される超伝導の非平衡ダイナミクスを近赤外プローブパルス（波長 800 nm）の反射率変化を通して測定した。ドーピング濃度 x の異なる 5 種類の試料について調べたところ、 s 波超伝導体と同様に、転移温度以下で急増し、入射電場波形の 2 乗に追従するコヒーレントな振動を観測した。さらにパルス通過後も残存するインコヒーレント励起も現れ、ドーピング濃度ごとに異なる温度依存性を示した。反射率変化のダイナミクスをプローブ偏光の対称性に基づいて成分分解すると、全対称な A_{1g} 成分と B_{1g} 成分に分解でき、2 成分の比はドーピング濃度に強く依存することがわかった。講演ではこれらの非平衡ダイナミクスの起源について考察する。

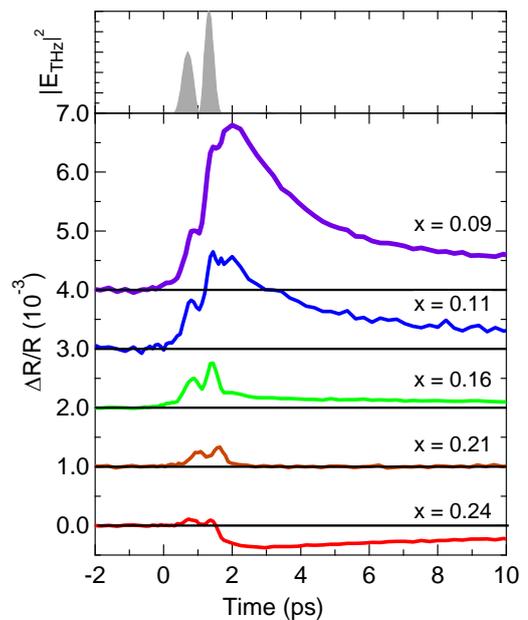


図1：各ドーピング濃度の試料の 10 K におけるテラヘルツ波励起後の反射率変化のダイナミクス

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

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

P-41

電解質ゲートを用いた電子ドーピング型銅酸化物 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ における電子相の探索

Exploring electronic phases in electron-doped cuprate $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ by electrolyte gating

東京大学大学院工学系研究科^A, 理研 CEMS^B

松岡秀樹^A, 中野匡規^A, 打田正輝^A, 川崎雅司^{A, B}, 岩佐義宏^{A, B}

銅酸化物高温超伝導体は、突出して高い超伝導転移温度を持つことに加えて強い電子相関に起因した多彩な電子状態を示すため、物性研究の魅力的な対象であり続けてきた。具体的には、転移温度よりも高温でエネルギーギャップが部分的に開く擬ギャップ相や電荷が実空間上で周期的に配列した電荷秩序相などの様々な電子相の発現が報告されており、それらと超伝導相との関係が高温超伝導の発現に本質的な関わりを持っていると考えられている。このような電子状態はドーピングされたキャリア数に強く依存し、銅酸化物高温超伝導体の物性を統一的に理解するためには、電子状態のキャリア数依存性の詳細な探索、即ち電子相図の構築が必要である。

本研究では、 n 型銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (結晶構造：図1) に対して電解質ゲートを用いた。電解質ゲートとは FET 構造において電解質を絶縁層として用いる手法であり、通常の FET と比べて多量のキャリアを制御し様々な物質の物性変調を行うことが可能である (デバイス構造：図2)。本研究においては、この電解質ゲートを用いた電子ドーピングを行うことで n 型銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ において絶縁体を出発点とした超伝導絶縁体転移制御を実現した。さらに、電解質ゲートの利点の一つである準連続的なキャリア制御を利用して、超伝導絶縁体転移制御を行う過程で電子状態のキャリア数依存性を詳細に測定し、電子相図の構築を行った。ポスター発表では、構築した電子相図を元に n 型銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の電子状態、特に超伝導転移温度以上の温度領域における輸送特性の振る舞いと電子相の関連性を議論する。

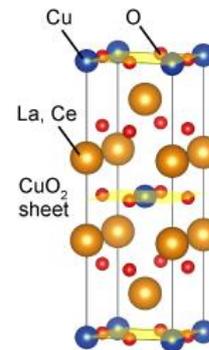


図1： n 型銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の結晶構造

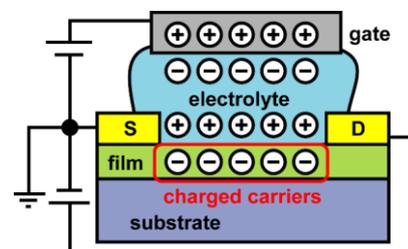


図2：電解質ゲートのデバイス構造

Te アニールした低 Se ドープ 11 型鉄系超伝導体 $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ の 角度分解光電子分光

ARPES study of the electronic state of Te-annealed $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$

1 東大理、2 弘前大理工、3 高エネ研 PF

奥石佳佑¹、大塚匠²、堀尾眞史¹、中田勝¹、萩原健太¹、C. Lin¹、Y. Wan¹、
組頭広志³、小野寛太³、渡辺孝夫²、藤森淳¹

鉄系超伝導体は母物質に元素置換でキャリアをドーピングあるいは化学圧力を印加することで超伝導を発現する。11 型鉄系超伝導体は Se などと Fe の四面体で構成される層が積層した構造で、鉄系超伝導体の中でも最も簡単な結晶構造をとるため、超伝導の発現機構を明らかにするために広く研究されている。11 型の結晶構造を持つ FeTe の Te を Se で置換した $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ は O_2 アニールで過剰鉄を除去することで超伝導を発現することが知られている。先行研究[1]では、 $x=0.4$ ではホールと電子両方のキャリアが存在する結果が確認されており、超伝導発現にホールと電子両キャリアが寄与しているのではないかと考えられている。一方、最近 Te アニールした低ドーピング試料において、低温でもホール抵抗が正の傾きで直線的な変化を示し、ホールキャリアが支配的であるという結果が報告された[2]。今回我々は、Te アニールされた低 Se ドープ試料 $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ の電子状態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。超伝導転移温度 T_c の決定と試料の一様性を確認するために行った磁化測定の結果 [図 1 (a)]から $T_c \sim 11.0$ K であることが分かる。図 1 (b)、(c)に T_c 直上での ARPES の結果を示した。 $E-k$ プロットでは Γ 点周りで 3 つのホールの分散と、M 点周りに少なくとも 1 つの電子的な分散が確認でき非超伝導試料の先行研究[3]と似た結果となった。一方で先行研究と異なり、 Γ 点まわりのホール面が小さく、M 点周りの電子面が大きいことが分かった。

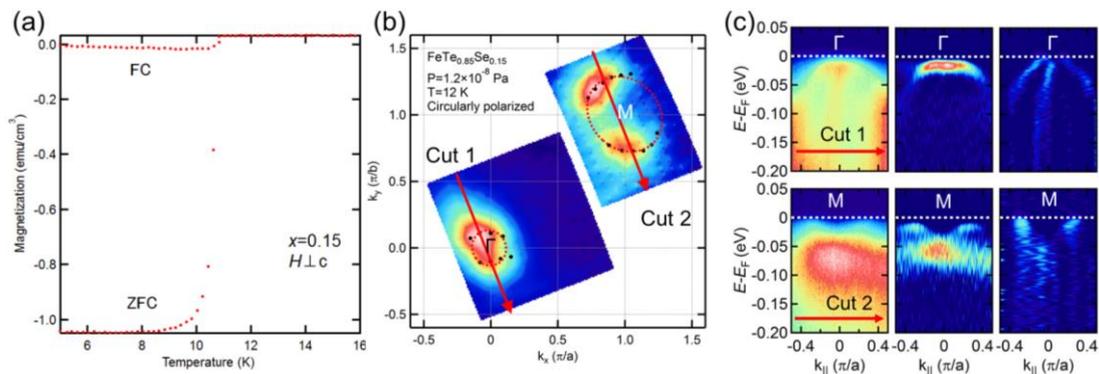


図 1. $\text{FeTe}_{0.85}\text{Se}_{0.15}$ の磁化と ARPES の結果。(a) 磁化の温度変化。(b) フェルミ面のマッピング。黒点が k_F 、赤破線がフェルミ面の概略図。(c) $E-k$ プロット。(b)中の赤矢に沿った 2 カットの生スペクトル(左)とそのエネルギー方向(中央)、運動量方向(右)の二回微分。

[1] Y. Sun *et al*, Phys. Rev. B **89** 144512 (2014)

[2] 大塚匠 他, 日本物理学会 2016 年秋季大会 15pJA-12 (2016)

[3] E. Ikei *et al*, Phys. Rev. B **89** 140506(R) (2014)

鉄系超伝導体 FeSe の圧力下における 熱起電力およびネルンスト効果

Thermopower and Nernst effect of FeSe under hydrostatic pressure.

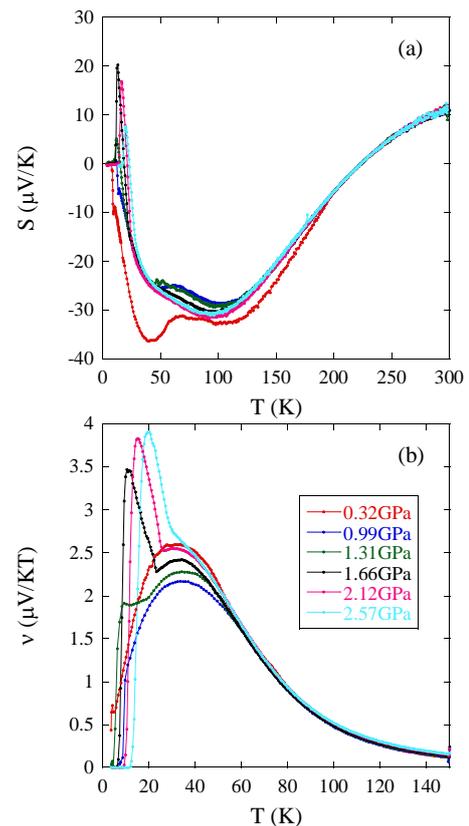
低温センター・研究開発部門

藤井 武則

鉄系超伝導体 FeSe は約 90 K で正方晶から直方晶へ構造相転移を起こし、更に約 9 K で超伝導状態に転移する。FeSe は他の鉄系超伝導体とは異なり、構造相転移に伴う反強磁性転移を示さないため、超伝導と反強磁性との関係を明らかにする上で重要な物質であると考えられる。これまでに、FeSe の超伝導転移温度が高圧下で顕著に増大することは知られていたが、それ以外の秩序相についてはよくわかっていなかった。近年、純良単結晶を用いた圧力下における様々な物性が測定され、約 1GPa 以上の圧力領域で磁性相の存在が報告されている[1,2]。この磁性相は、反強磁性転移によるものであると考えられているが、その詳細はいまだ明らかになっていない。

ここでは、磁性相と超伝導の関係を明らかにするために、熱起電力とネルンスト効果の圧力依存性を測定した。ピストンシリンダークランプセルを用いて 3GPa までの静水圧を加え、温度差は Cernox を用いて測定した。

図に、(a)熱起電力と(b)ネルンスト係数の圧力依存性を示す。熱起電力は構造相転移によりマイナス方向に増大し、約 1GPa 以上の磁性相では正に大きく増大する。このことは磁性相ではフェルミ面の再構築によりホールが励起されることを示唆する。また、通常の金属ではネルンスト係数は非常に小さいが、FeSe においては常伝導状態において、ディラックコーン的なキャリアーによる巨大なネルンスト効果が見られる。残念ながら超伝導 Vortex によるネルンスト効果はこの巨大な常伝導ネルンスト効果によって観測することが出来なかったが、1GPa 以上で磁性相によるネルンスト効果の異常がはっきり観測された。研究会当日は、抵抗率、ホール効果の圧力依存性も含め FeSe の電子状態と熱起電力・ネルンスト効果の関係を議論したい。



鉄系超伝導体 FeSe における (a)熱起電力
(b)ネルンスト係数の圧力依存性。

[1] M. Bendele et al., Phys. Rev. B 85, 064517(2012).

[2] T. Terashima et al., J. Phys. Soc. Jpn. 84, 063701 (2015).

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の THz ポンププローブ分光 Terahertz pump-probe spectroscopy of iron-based superconductor $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$

理学系研究科物理学専攻・島野研究室¹, JST さきがけ²,
総合文化研究科広域科学専攻・前田研究室³, 低温センター・研究開発部門⁴
富田 圭祐¹, 松永 隆佑^{1,2}, 川合 将敬³, 浅見 大亮³, 鍋島 冬樹³,
前田 京剛⁴, 島野 亮^{1,4}

フェルミオン系の対凝縮現象である BCS 超伝導・超流動状態は、フェルミオン間の引力相互作用を強めていくと、やがてボース系の量子凝縮現象である BEC 状態へと連続的に接続する。この現象を BCS-BEC クロスオーバーと呼ぶ。弱結合領域ではフェルミオンはクーパー対の形成と同時に対凝縮を起こすが、中間のクロスオーバー領域では対形成が転移温度よりも高温から始まると考えられている。このような現象は、これまで冷却原子系において多くの研究がなされてきたが、固体系ではクロスオーバー領域に位置する物質の例がなくその性質は未解明であった。近年発見された鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ は超伝導ギャップとフェルミエネルギーが同程度であり、このクロスオーバー領域に位置する特異な超伝導体である可能性が高いことから大きな注目を集めている。

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 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜[1]に対してテラヘルツ(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った。THz 波ポンプとしては電場ピーク値の 7 kV/cm、中心周波数 0.7 THz のモノサイクルパルスを用いた。図 1 は超伝導転移温度 20 K の $x=0.2$ の試料に対する、4.5 K での THz 波ポンプ前の平衡状態と THz 波ポンプ後 3 ps での光学伝導度の虚部を示している。周波数の逆数に比例する光学伝導虚部のスペクトル重みは超流動密度に対応しており、これが THz 波ポンプ照射後に減少していることから THz 波ポンプはクーパー対を破壊し超伝導を抑制する働きをしていることがわかる。我々はこのようなポンプ-プローブ信号が転移温度よりも高温で現れることを見出した。講演ではこの信号の詳細な温度依存性について報告し、転移温度以上でのクーパー対形成について考察を行う。

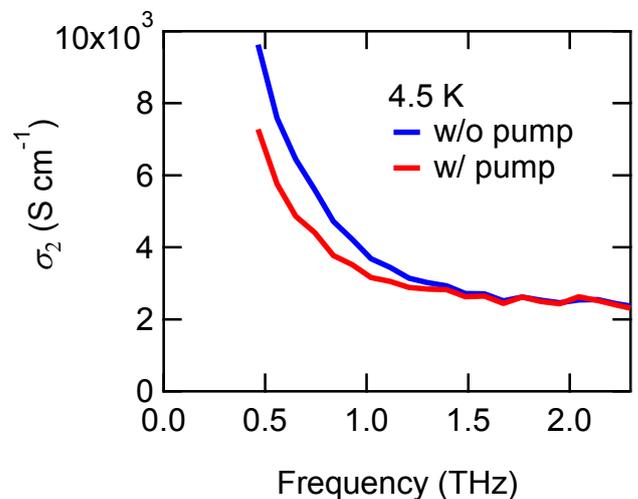


図 1. 平衡状態(青)および THz ポンプから 3 ps 後の光学伝導度スペクトルの虚部

[1] Y. Imai, Y. Sawada, F. Nabeshima, and A. Maeda, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 112, 1937 (2015).

P-45

コルビノ型ジョセフソン接合の電子輸送特性に関する実験的研究 Experimental study of electron transport of Corbino-geometry Josephson junction

工学系研究科・物理工学専攻・樽茶・山本研究室

M. Tateno¹, S. Matsuo¹, S. Baba¹, K. Ueda¹, M. Kamata^{1,3},

Joon Sue Lee², Borzoyeh Shojaei², Chris Palmstrom², S. Tarucha^{1,3}

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

² University of California

³ Center for Emergent Materials Science, RIKEN, Saitama, Japan

近年、マヨラナ・フェルミオンが注目されており、マヨラナ・フェルミオンの存在の兆候は様々な系で報告されている[1,2,3]。一方で、マヨラナ・フェルミオンには非可換統計性という顕著な性質があり、超伝導体とトポロジカル絶縁体で構成されたコルビノ型ジョセフソン接合においてマヨラナ・フェルミオンの非可換性が観測できるという理論的な提案がある[4]。コルビノ型ジョセフソン接合とは図1のように、中心部から外縁部に電流が流れる円盤状のジョセフソン接合であり、接合が超伝導体で囲まれることから、接合内の磁束が量子化されるという特徴をもつ。しかし、コルビノ型ジョセフソン接合に関する実験的な研究は一例しかなく[5]、その電子輸送特性についての研究が必要である。そこで、私たちはアルミニウムとインジウムヒ素を用いてコルビノ型ジョセフソン接合を作製し、ヘリウム3冷凍機を用いて0.3 Kほどの温度で電子輸送特性の実験を行った。図2のように、コルビノ型ジョセフソン接合に面直磁場を印加したところ、単位磁束量子の出入りに相当する領域で超伝導電流が0でない値を取ることが観測された。かつ、この振る舞いはゲート電圧や温度には依存しなかった。これに加えて、臨界電流の磁場依存性には微細構造も観測された。この微細構造はパール・ボルクスに起因するものだと考えている。

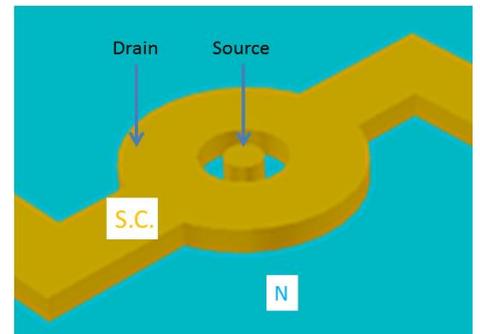


図1. デバイスの模式図

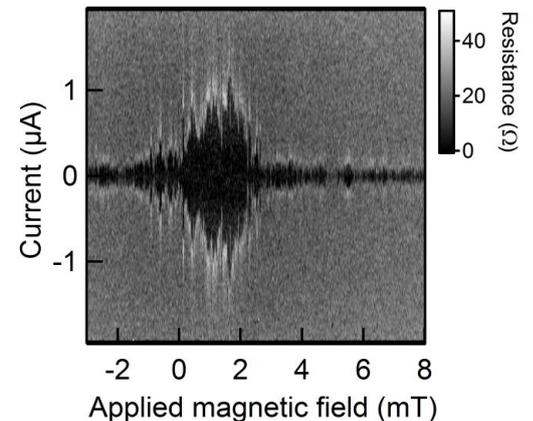


図2. 臨界電流の磁場依存性

[1] J. Wiedenmann, *et. al. Nat. Comm.*, **7**, 10303 (2016)

[2] V. Mourik, *et. al., Science*, **336**,1003(2012)

[3] S. Nadj-Perge, *et. al., Science*, **346**, 6209 (2014)

[4] S. Park, *et. al., Phys. Rev. Lett.*, **115**, 246403(2015)

[5] R. H. Hadfield, *et al, Phys. Rev. B* **67**, 144513 (2003)

磁性体を吸着した Pb 超薄膜における平行磁場による超伝導の増強

Enhancement of superconductivity by the parallel magnetic field in ultrathin Pb films with magnetic impurities

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 岡本研究室
庭田正人、枘富龍一、岡本徹

超伝導が磁場によって壊れることは、超伝導の発見者である H. K. Onnes その人によって見出されている。では、磁場によって超伝導が引き起こされることはあるだろうか。これまでに報告されているものは、外部磁場が物質中の内部磁場を打ち消すことにより出現する超伝導などの数例のみである。

磁性不純物を含む超伝導体では、超伝導転移温度 T_{c0} が近藤温度 T_K より十分高い状況において、磁性体の局在スピンと伝導電子との交換相互作用による磁氣的散乱が超伝導を壊す。磁場の直接効果が小さい場合には、磁場で磁氣的散乱を抑制することによる T_c の上昇および磁場誘起超伝導が可能であることが予想されている[1,2]。我々は、平行磁場に対して超伝導が非常に壊れにくいことが分かっている Pb 超薄膜[3]の上に Cr, Mn, Ce, O₂ などの磁性体を吸着させ、電子状態を明らかにするとともに、平行磁場の印加による T_c の上昇および磁場誘起超伝導の実現を目的として研究を行った。

Ce を吸着させた場合と、中間層として Au を挟んで Mn を吸着させた場合において、平行磁場による T_c の上昇を観測した。図 1 は、Ce/Pb に対して温度一定の条件下で平行磁場を印加することによって、常伝導から超伝導へ転移していく様子を示している。一方、Mn/Pb や Cr/Pb では T_c の上昇はほとんど見られず、近藤一重項状態が形成されていると考えられるが、Au を挟むことにより T_K が減少し、Mn のスピン自由度が復活することで T_c の上昇が観測されたと考えられる。また、O₂ を物理吸着させた系においては、小さいながらも磁氣的散乱による T_c の減少が明確に観測され、O₂ が Pb に磁氣的な影響を及ぼすことが明らかになった。

当日は、平行磁場効果がより強く現れる系に対する実験結果や、磁場誘起絶縁体 - 超伝導転移などについても報告したい。

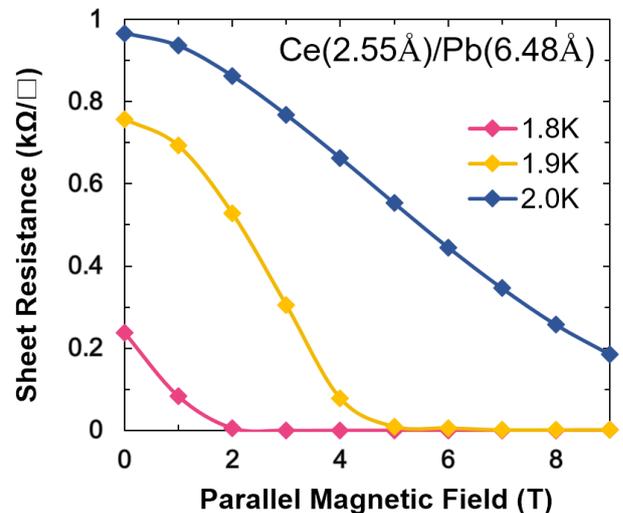


図 1 . Ce/Pb の平行磁場の印加による常伝導から超伝導への転移

[1] M. Yu. Kharitonov and M. V. Feigelman, JETP Lett., **82**, 421 (2005).

[2] T-C. Wei *et al.* Europhys. Lett. **75**, 943 (2006).

[3] T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto, Phys. Rev. Lett. **111**, 057005 (2013).

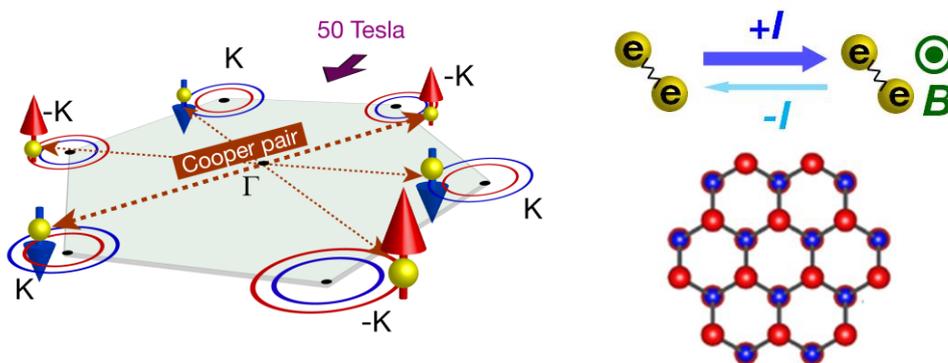
P-47

MoS₂ 電界誘起超伝導における巨大な臨界磁場と非相反伝導 Enhanced upper critical field and nonreciprocal charge transport in superconducting MoS₂

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻岩佐研究室¹、永長研究室²、
理研 CEMS⁴、物性研徳永研究室³、
齋藤 優¹、若月良平²、星野慎太郎³、板橋勇輝¹、井手上敏也¹、小濱芳允⁴、
徳永将司⁴、江澤雅彦²、永長直人^{2,3}、岩佐義宏^{1,3}

反転対称性の破れた系では、マルチフェロイクスやシフト電流、非線形光学応答など固体物理の様々な分野で興味深い現象が観測されている。特にその中でも電流を流す向きによって電気抵抗値が変わる非相反伝導現象は反転対称性の破れた物質に普遍的な輸送現象と考えられており、これまでカーボンナノチューブや強磁性/金属界面など様々な構造で観測されている。一方、反転対称性の破れた超伝導体ではカイラルチューブにおける超伝導では未だ観測例がなかった。近年発見された電界誘起超伝導体は結晶性が極めて高い 2 次元超伝導体[1]で界面での強電場によって界面で対称性が破れており、このような現象を調べるのに格好の舞台である。特に 2 次元物質の代表である MoS₂ はその単層構造において面内の対称性も破れている。

本研究では、MoS₂ 電気二重層トランジスタ構造及びパルス強磁場を用いて、対称性の破れと特殊なスピン軌道相互作用に起因する spin-valley locking による増強された臨界磁場[2]を観測した。さらに抵抗の倍周波ロックイン AC 測定を行うことで非相反超伝導電流を検出することを試みた[3]。超伝導状態では磁場に関する反対称成分すなわち非相反成分が明瞭に観測された。



[1] [Y. Saito](#), T. Nojima and Y. Iwasa *Nature Reviews Materials* **2**, 16094 (2016).

[2] [Y Saito](#) *et al. Nature Phys* **12**, 144 (2016).

[3] R. Wakatsuki* and [Y. Saito](#)* *et al.* submitted.

低温における音叉型水晶振動子の共鳴特性の温度依存性 Resonance Property of Quartz Tuning Fork at Low Temperature

理学系研究科 物理学専攻¹, 低温センター 村川研究室²
吉田 研介¹, 村川 智^{1, 2}

超流動ヘリウム 3(³He)はトポロジカル物質であり, 対称性やバルク物性が詳細に調べ上げられていることから, その表面物性についての研究も盛んである. 特に超流動 ³He -B 相と呼ばれる相においては, その表面にアンドレーエフ束縛状態が存在し, その励起はマヨラナフェルミオンという準粒子と見なすことができると考えられている. 理論的には, 表面鏡面度の高い自由表面において, そのエネルギー分散関係がマヨラナコーンと呼ばれる線形分散になると予測されているが, 未だそれを直接支持する実験結果は得られていない.

他方, 超流動 ³He -B 相の自由表面では量子アンドレーエフ反射が生じることが報告されており[1], その反射率の角度依存性を測定することによって, 入射する ³He 準粒子ビームのエネルギーと運動量の面内方向成分との分散関係を計算することができる[2]. 本研究ではこの手法を用いて, 期待されるマヨラナコーンの直接観測を行う.

反射率を測定するためには, ヒーターによって励起された ³He 準粒子の密度を, 通常反射成分と量子アンドレーエフ反射成分とに分けて測定する必要がある. 本研究では準粒子密度を粘性から見積もり, 音叉型水晶振動子(QTF)を用いてこれを測定する. 液体 ³He の粘性変化に伴い, QTF の共鳴周波数や振幅, Q 値も変化するが, この関係性を理論・測定両面から精密に解き明かすことは, 反射率を測定し分散関係を明らかにするという, 本研究の主題へと直結する.

本発表では, その予備実験として, 窒素温度までの QTF の共鳴特性を報告する. 図 1 は真空中での窒素温度から室温まで温度変化させた場合の共鳴曲線の変化を示し, 右のものほど温度が高い. 図に挿入されている数字は, 共鳴の鋭さを表す Q 値を示す. 共鳴曲線は, それぞれ良く Lorentzian Fitting することができた. この測定結果から, 系の温度上昇に伴い, 共鳴周波数は大きくなり, Q 値は小さくなることを確認できる. これは QTF の弾性の温度変化を反映している. また, 室温空気の粘性の圧力依存性も測定した.

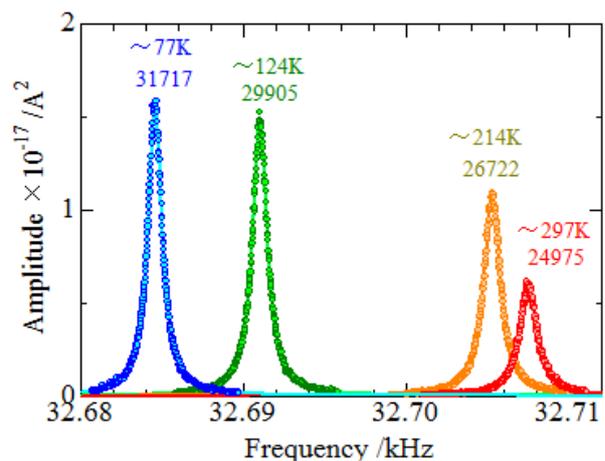


図 1. QTF の昇温に伴う共鳴曲線の変化
図中の数字は Q 値

[1] T. Okuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 2857 (1998).

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

Chiral Superconducting Transport in WS₂ Nanotube

¹ *The University of Tokyo*

² *Lawrence Berkeley National Laboratory*

³ *Holon Institute of Technology*

⁴ *Weizmann Institute of Science*

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

Feng Qin¹, Wu Shi^{1,2}, Toshiya Ideue¹, Masaro Yoshida¹, Alla Zak³, Reshef Tenne⁴,
Tomoka Kikitsu⁵, Daishi Inoue⁵, Daisuke Hashizume⁵, Yoshihiro Iwasa^{1,5}

Transition metal dichalcogenides (TMD) nanotube is a new platform for searching novel superconducting transport. Here we report the exotic nonreciprocity in superconducting transport due to the nanotube chirality, in which the forward and backward supercurrent flows are not equivalent because of inversion symmetry breaking, as shown in the Fig. 1. Such superconductivity is realized via ionic liquid gating in individual nanotube of tungsten disulfide (WS₂)[1]. The nonreciprocal signal is measured through the second harmonic component in AC resistance, which is significantly enhanced in the superconducting state. When applying magnetic field parallel to the axis of nanotube, the nonreciprocal signal shows unprecedented quantum oscillation in conjunction with Little-Parks effect[2] originating from the interference of supercurrent along the circumference of the nanotube. This work implies that nanomaterials with peculiar lattice structure and broken inversion symmetry offer a new route to manipulate superconductivity.

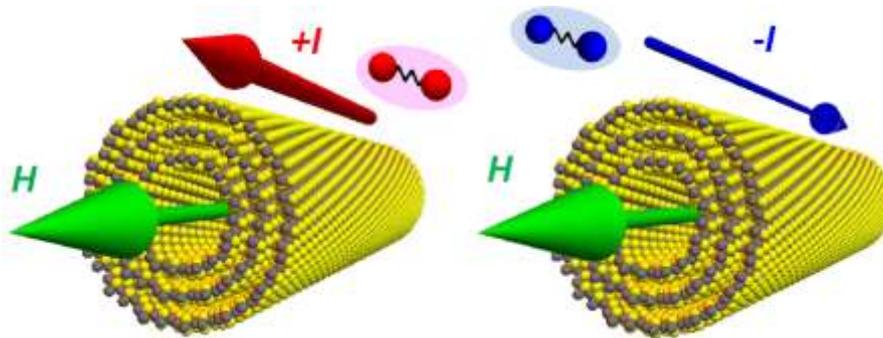


Fig. 1: Schematic figure of nonreciprocal superconducting transport in WS₂ chiral nanotube.

[1] R. Tenne, *Nature* **360**, 444-460 (2006)

[2] W. A. Little and R. D. Parks, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 9-12 (1962)

小型超低温連続冷凍システムの開発 Development of a Compact and Continuous Sub-mK Refrigerator

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

熱揺らぎが低減され、物質固有の性質が顕在化する低温環境は、高感度計測や新奇な物理現象の探索と解明に有用である。自動運転可能な希釈冷凍機が普及した今日では、幅広い分野で 10–20 mK 程度までの極低温を利用した研究が進んでいる。一方、その希釈冷凍機に銅核スピンを磁気作業物質とする断熱消磁冷凍を組み合わせて 1 mK 以下の超低温を得ることのできる核断熱消磁冷凍技術も完成しているが [1]、その利用は一部の専門分野に限られている。その理由として、導入や運用のコストが高いこと、設置に必要な天井高が一般的建物の天井高（約 4 m）を上回ることなどがあげられる。これらの障壁を解消するため、我々は、既存の希釈冷凍機にそのまま搭載可能なサイズで、1 mK 弱までの任意の温度を連続発生可能な「小型超低温連続冷凍システム」の開発を進めている。

本システムでは、磁気作業物質として銅より弱磁場でも同等の冷却力を発揮できる増強核磁性体 PrNi₅ を用い、これを高透磁率材で囲んで外部への漏洩磁場を抑制する。銅核スピンを作業物質とする場合に比べ最低到達温度は少し高いが、1 mK を切ることは十分可能である。また、2 つの消磁ユニットを直列接続してエントロピーポンピングすることで、連続冷却を実現し磁気作業物質を小型化する。具体的には、核ステージ-A の熱接続先を前後の超伝導熱スイッチ(HSW-1, -2)で切り替え、試料と直接熱接触する核ステージ-B（試料温度）から希釈冷凍機（~ 15 mK）へと熱を運ぶ（図 1）。B は A と接続されている時はこれに熱を渡し、それ以外の場合は外部からの熱を吸収する。これを周期的に行えば試料温度を一定に保てる。シミュレーションの結果、実用的な冷却力を得るうえで最も重要な点は、各構成要素間の良好な熱接触であることがわかった（図 2）。製作が容易で熱伝導度も高い熱圧着式に着目し、HSW を形成する亜鉛と銀の薄板間の接触熱抵抗を電気抵抗測定から評価した。熱処理条件を最適化することで、15 nΩ·cm² の低接合抵抗が実現できている。PrNi₅ と銀線間の熱接触は Cdハンダによる実績があるが [1]、毒性が高く取り扱いにくいため、より安全な Znハンダでの代替を試行している。



図 1. 連続冷凍システム

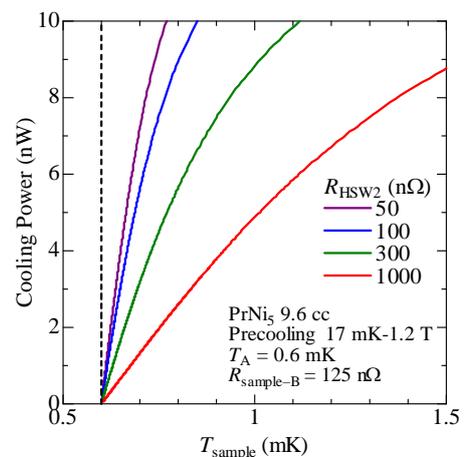


図 2. 熱抵抗と冷却能力

[1] F. Pobell: *Matter and Methods at Low Temperatures* (Springer-Verlag, Berlin, 2007) 3rd ed..

自加圧式窒素容器再検査の工程と現状の課題

Current tasks in the re-inspection process of self pressurizing type liquid nitrogen vessels

低温センター 液化供給部門

○志村芽衣、阿部美玲、加茂由貴、寺岡総一郎

低温センター液化供給部門では、高圧ガス保安法に定められた液体窒素用超低温容器（通称、自加圧式容器）の容器再検査及び付属品再検査（容器等再検査）サービスを行っている[1]。本発表では、容器再検査の工程と頻発する容器の不具合や事故事例、現状の課題、及びその改善策について報告する。また、容器再検査の工程を利用者に知っていただくことで、日常での容器の使用方法等へのさらなる注意をお願いするのも目的の一つである。容器再検査の工程は、大きく分けて以下の7項目となっており、本発表ではこれらの詳細を説明する。

- ①再検査容器の残ガス処理、②外観検査（図1）、③圧力計検査、④安全弁検査（図2）
⑤バルブの気密試験（図3、4）、⑥断熱性能試験、⑦刻印打刻



図1 外観検査（左）容器の凹み、（右）腐食



図2 安全弁検査



バルブスピンドル周辺からの漏れ(気泡)

図3 バルブの気密試験



パッキンの摩耗により、内部に細かいテフロンのはがれカスが溜まっている（ガス漏れの原因）

図4 解体したバルブ部品の一部

自加圧式窒素容器を事故なく安全に、かつ劣化させずに使用するためには、日頃から適切な方法で容器を使用することが大変重要である。今後は、現状の課題に取り組み、より円滑に業務を遂行できるように努めたい。

[1]低温センターweb site内 <http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/gyomu/cryo/ln2/saikensa.html>

利用の手引き(容器等再検査編)(オンライン) <http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/parts/tebiki-ln2yoki.pdf>

寒剤使用研究室 登録情報更新システムの紹介

Annual update system of registered information about cryogen using laboratories

東京大学 低温センター 液化供給部門^A、東京大学 低温センター 共同利用部門^B

○加茂 由貴^A、志村 芽衣^A、寺岡 総一郎^A、戸田 亮^B、阿部 美玲^A

東京大学低温センター（以下、センター）は寒剤（液体ヘリウム・液体窒素）を本郷地区キャンパス内の寒剤使用研究室へ供給している。センターでは寒剤使用研究室を「ユーザー」と呼び、液体ヘリウムユーザーと液体窒素ユーザーをそれぞれ独立したシステムで管理している。ユーザーごとに責任者と担当者が選任されており、寒剤供給に関する諸連絡（供給休止日程や配達遅延、他）などを各ユーザーと液化供給部門が相互に問い合わせする際の連絡先にもなっている。

従来、登録情報に変更が生じた場合は、ユーザーからの申請に基づいて登録情報を変更していた。しかし、担当者交代時の引継ぎが不十分でセンターに登録情報の変更が申請されなかったなどで情報が古いままのユーザーが多数あり、至急の連絡が取れないケースが何度も生じていた。そこで、各ユーザーが最新の登録情報を確認できるウェブシステムを構築し、年度初めにこのシステムによる登録情報確認や登録情報変更申請を全ユーザーに依頼するようなシステムを、平成26年度から試行した。

ウェブシステムには、新規ユーザー登録時に発行したユーザーIDとパスワードでログインする。登録情報の年度更新画面へは年度末から年度初めの一定期間のみアクセスでき、時期はセンターから責任者および担当者宛にメールで連絡する。ウェブブラウザ画面上にて現在の登録情報一覧を表示し、変更になった部分を入力フォーム内で編集する。ユーザーが登録した後、センターで内容を確認し、元データを更新する。更新内容により、液体ヘリウムの場合は実験室フロー図の追加送付依頼、液体窒素の場合は新しい容器登録証シール（バーコードを印字したもの）および集配場所シールの送付などを行う。液体ヘリウムユーザー用には「ヘリウムデータ報告システム」にこの機能を追加した。また、液体窒素ユーザー用には「液体窒素供給管理システム」という名称の新たなウェブシステムを立ち上げた。

登録情報更新システムは平成28年度に正式運用を開始した。毎年登録情報を更新することでユーザーと迅速かつスムーズに連絡を取ることができるようになり、トラブルが起きた際も速やかに対応できるようになった。今後も円滑な寒剤供給を維持するため、ユーザーの皆様には年度更新手続きへのご協力をお願いいたします。

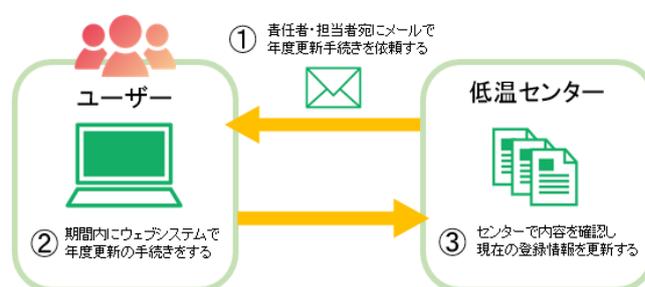


図1. 年度更新の流れ

図2. 年度更新の入力画面

研究室登録情報 (2025年度)

登録内容を更新してください。

更新する

※変更がない場合は強制は必要です。但し、強制更新で強制更新が可能です。

現在の登録内容

研究室情報

部屋	環境	研究室
----	----	-----

使用責任者情報

氏名	担当	メールアドレス
----	----	---------

寄附連絡担当者情報

氏名	担当	メールアドレス
----	----	---------

寄附情報

寄附番号	登録状況	寄附	製品名	集配場所	種類	購入番号	購入日時	再検査日時
00000001	使用中	10	ヘリウム	00000001	00000001	00000001	2025/01/01	2025/01/01

※ 登録内容の更新は、必ずしも必要ではありません。

戻る

保存

図2. 年度更新の入力画面

特別講演

低温センターと超伝導工学専攻

工学系研究科・応用化学専攻

岸尾 光二

東京大学低温センターは、センター運営委員会初代委員長平田森三教授およびセンター長久保亮五教授により 1967 年に設立され、本年は 50 周年を迎えることになる。設立経緯は両先生による執筆記事^(1,2)に詳しいが、お二人をはじめ当時の学内外関係者のご尽力とご苦勞が偲ばれる。この間、ヘリウム液化機の能力は初代の 25 L/h から 3 度の更新を経て 8 倍の 200 L/h にまで達している。図 1 にある供給量の推移をみると、液化器の更新は機械の老朽化によるものだけではなく、ヘリウムユーザー数と供給量の急激な伸びによる必然的な要求であった。私は 2004~2005 年度のセンター長を拝命したが、2007 年の液化器更新に備えて準備作業に関わらせて頂いた。

1986~1987 年にいわゆる“フィーバー”が起こった。Bednorz と Müller により指摘された LaBaCuO における超伝導の可能性が工学系の田中グループらにより本物であることが 1986 年内に確認され、年明けすぐに臨界温度 90K 級の YBaCuO が発見されると、液体窒素冷却による超伝導応用への期待と夢が一気に広がった。世界中で急速に研究の立ち上がりがあったが、東大では工学系研究科内に“超伝導工学”と称する横型専攻が 1990 年に誕生することとなった。学部学科は持たない独立専攻であるが実際には、物理工学

(2004 年までの累積数 13 名)、応用化学 (同 15 名)、電気工学 (6 名)、マテリアル工学(7 名)の教員が研究と教育に携わった。ここで、図 1 の He 供給量を見ると 1987 以降にステップアップがあるとともに、1975 年以来更新されていなかった液化器が 1993 年に更新されたおかげで、その後年を追うごとに需要と供給はぐんぐん伸びている。その理由については、利用者の部局、人数などを調査する必要があるが、高温超伝導のせいだけではなく、低温を利用した科学がどんどん発展してきた結果を反映していると考えている。

スペースの関係で本要旨では講演タイトルに関わる部分のみ記したが、講演当日は、私の専門である高温超伝導物質開発を中心に研究内容を紹介したいと思う。

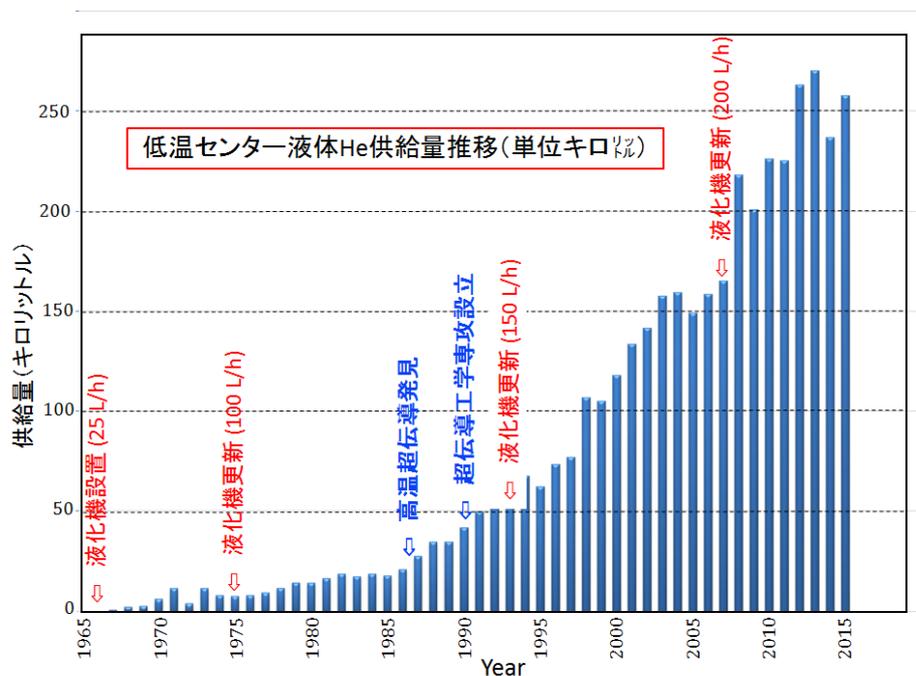


図 1 低温センターの液体 He 供給量の年次推移 (センター液化供給部門データ提供)

[1] 平田森三 “低温センターだより” 第 1 号 p1 (1966 年 4 月) [2] 久保亮五 *ibid.* p2

第8回
低温センター研究交流会
概要集

Abstract book
The 8th 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