

第6回

# 低温センター研究交流会概要集

Abstract book

The 6th Research Meeting of Cryogenic Research Center

■日時： 平成27年3月4日（水）

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2階）

東京大学低温センター

Cryogenic Research Center

## 第6回 低温センター研究交流会 プログラム

- 日時： 平成 27 年 3 月 4 日 (水)  
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- 9:40 はじめに 福山 寛 (低温センター長)

## セッション 1

座長：永田 宏次 (農学生命科学研究科)

- 9:40-10:00 人羅 勇気 農学生命科学研究科・水圏生物科学専攻・D3 (水圏天然物化学研究室)  
O-01 NMR を用いた海洋天然物の構造解析  
Structure elucidation of marine natural products by NMR spectroscopy
- 10:00-10:20 諏訪内 悠介 薬学系研究科・薬学専攻・D2 (蛋白構造生物学教室)  
O-02 3-メルカプトピルビン酸硫黄転移酵素(3MST)の結晶学的研究  
Crystallographic study of 3-mercaptopyruvate sulfurtransferase (3MST)
- 10:20-10:40 宮園 健一 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・特任助教 (食品生物構造学研究室)  
O-03 DNA グリコシラーゼ活性により作用を示す制限酵素の発見  
Sequence-specific DNA glycosylase found in a restriction-modification system

10:40-11:00 休憩

## セッション 2

座長：長谷川 修司 (理学系研究科)

- 11:00-11:20 尾崎 仁亮 理学系研究科・化学専攻・D3 (大越研究室)  
O-04 コバルト-タングステンオクタシアノ錯体の湿度応答性  
Humidity responsivity of an octacyano cobalt-tungsten bimetal complex
- 11:20-11:40 井上 暁登 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (鹿野田研究室)  
O-05 有機電荷秩序系 $\beta$ -(meso-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>における異常金属相の圧力下  
<sup>13</sup>C-NMR  
<sup>13</sup>C-NMR study on an anomalous metallic phase of an organic charge ordering system  $\beta$ -(meso-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> under pressure
- 11:40-12:00 若林 勇希 工学系研究科・電気系工学専攻・D1 (田中・大矢研究室)  
O-06 Room-temperature local ferromagnetism and domain growth in the ferromagnetic semiconductor Ge<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>
- 12:00-12:20 足立 真輝 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田畑研究室)  
O-07 生体模倣リエントラントスピングラス Co<sup>2+</sup>添加ガーネット薄膜における光制御スピ  
ン流  
Synaptic Signal Mimicked by Spin-Current in Reentrant Spin-Glass Garnet Ferrite Thin Films

12:20-13:20

## 昼食

13:20-15:20 **ポスターセッション**

於：小柴ホール・ホワイエ

13:20-14:20 偶数番号

14:20-15:20 奇数番号

※ポスターは9時から貼れます。懇談会終了時に撤去下さい。

## セッション3

座長：岡本 徹（理学系研究科）

- 15:30-15:50 松原 雄也 工学系研究科・物理工学専攻・D3（川崎研究室）  
O-08 高移動度 SrTiO<sub>3</sub> 二次元電子系における量子化ホール伝導の観測  
Observation of quantized Hall conductance in high mobility two dimensional electron system of SrTiO<sub>3</sub>
- 15:50-16:10 安田 憲司 工学系研究科・物理工学専攻・M1（十倉研究室）  
O-09 磁性/非磁性トポロジカル絶縁体二層膜における量子輸送現象  
Quantum transport in semi-magnetic bilayers of topological insulator
- 16:10-16:30 中村 友謙 理学系研究科・物理学専攻・M2（長谷川研究室）  
O-10 低温における Bi 超薄膜の走査トンネルポテンショメトリ測定  
Scanning Tunneling Potentiometry measurement of ultrathin Bi at low temperature
- 16:30-16:50 白井 優美 理学系研究科・物理学専攻・M1（高木研究室）  
O-11 逆ペロブスカイト Sr<sub>3</sub>PbO における三次元ディラック電子  
3D Dirac electrons in anti-perovskite Sr<sub>3</sub>PbO

16:50-17:05

## 休憩

- 17:05-17:50 **特別講演** 座長：島野 亮（低温センター・研究開発部門）  
福山 寛 理学系研究科物理学専攻・教授（低温センター長）  
研究対象としてのヘリウムの量子物性  
Research Interests of Helium as a Condensed Matter

17:50- 閉会の挨拶 島野 亮（低温センター・研究開発部門）

18:00-20:00 **利用者懇談会**

於 小柴ホール・ホワイエ

※参加費：2,000 円（講演会に参加した学生は無料）

来賓：Prof. Douglas D. Osheroff (Stanford Univ.)

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 村田 智城 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)  
ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 超格子薄膜におけるフラストレート磁性の制御  
Tuning Magnetic Property of Geometrically Frustrated Systems by Fabricating Spinel-type ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Superlattices
- P-02 鎌田 雅博 理学系研究科・物理学専攻・D1 (福山研究室)  
2次元ヘリウム3の量子スピン液体相の比熱  
Specific Heat of the Gapless Spin Liquid Phase in 2D Solid <sup>3</sup>He
- P-03 山原 弘靖 工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・学術支援職員 (田畑研究室)  
スピネル型フェライト(Fe,Ti)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜のキャリア制御と磁性  
Carrier control and magnetic properties of spinel ferrite (Fe,Ti)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> thin films
- P-04 宮本 靖人 理学系研究科・化学専攻・D1 (大越研究室)  
光誘起構造相転移を示す集積型 Co-W オクタシアノ錯体  
Cyanido-bridged Co-W bimetal assembly showing photo-induced structural phase transition
- P-05 町屋 秀憲 工学系研究科・総合研究機構・B4 (加藤研究室)  
Ultralow mode-volume photonic crystal nanobeam cavities for high-efficiency coupling to individual carbon nanotube emitters
- P-06 中村 祥子 低温センター・研究開発部門・特任助教  
熱分解黒鉛シート PGS の物性評価  
Characterization of PGS: Pyrolytic Graphite Sheet
- P-07 湯本 郷 理学系研究科・物理学専攻・D1 (島野研究室)  
単層グラフェンにおける非線形テラヘルツファラデー回転  
Nonlinear terahertz Faraday rotation in monolayer graphene
- P-08 大日方 絢 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (千葉研究室)  
Pd/Co/Pt 構造における磁性の電界制御  
Electric field control of magnetism in Pd/Co/Pt structure
- P-09 岡 大地 理学系研究科・化学専攻・D2 (固体化学研究室)  
ペロブスカイト型酸窒化物 SrNbO<sub>3-x</sub>N<sub>x</sub> の巨大正磁気抵抗  
Giant positive magnetoresistance in perovskite oxynitride SrNbO<sub>3-x</sub>N<sub>x</sub>
- P-10 Szymon Chorazy 理学系研究科・化学専攻・assistant professor (大越研究室)  
ナノサイズシアノ架橋型クラスター{M<sub>9</sub>[M'(CN)<sub>8</sub>]<sub>6</sub>} (M = Co, Fe; M' = Re, W)におけるスピン状態変化  
Spin-State Switching in Nanosized Cyanido-Bridged {M<sub>9</sub>[M'(CN)<sub>8</sub>]<sub>6</sub>} (M = Co, Fe; M' = Re, W) Clusters
- P-11 金木 俊樹 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢研究室)  
GaMnAs を用いた縦型スピン MOSFET の作製、及びそのスピン依存伝導特性の評価
- P-12 北垣 育大 理学系研究科・物理学専攻・M2 (岡本研究室)  
GaAs 劈開表面上に形成した Fe 超薄膜  
Fe ultrathin films on a cleaved GaAs surface

- P-13 打田 正輝 工学系研究科・物理工学専攻・助教（川崎研究室）  
ノンシンモルフィック導電体  $\text{IrO}_2$  におけるキャリアタイプの磁場スイッチング  
Field-Direction Switching of A Type of Charge Carriers in Non-symmorphic  $\text{IrO}_2$
- P-14 奈須 義総 理学系研究科・化学専攻・D1（大越研究室）  
ガンマ型五酸化三チタンとデルタ型五酸化三チタンの相転移に関する研究  
Phase transitions of  $\gamma\text{-Ti}_3\text{O}_5$  and  $\delta\text{-Ti}_3\text{O}_5$
- P-15 Nguyen Thanh Tu 工学系研究科・電気系工学専攻・D3（田中・大矢研究室）  
Magneto-optical and magneto-transport characteristics of heavily Fe-doped FMS (Ga,Fe)Sb
- P-16 吉清 まりえ 理学系研究科・化学専攻・D2（大越研究室）  
高周波電磁波吸収特性を示すインジウム置換型イプシロン酸化鉄  
High-frequency electromagnetic wave absorption properties of indium-substituted epsilon iron oxide
- P-17 大久保 哲 工学系研究科・電気系工学専攻・M2（関野研究室）  
リンパ節の探索に用いる永久磁石型磁気プローブの開発及びリンパ節内の磁性ナノ粒子量の測定  
Development of magnetic probes with a permanent magnet for sentinel lymph node detection and quantification of magnetic nano particles in sentinel lymph nodes.
- P-18 篠田 清道 薬学系研究科・薬科学専攻・M2（有機合成化学教室）  
アルツハイマー病の機構解明を指向したアミロイド $\beta$ 三量体の化学合成  
Chemical Synthesis of Amyloid  $\beta$  Trimer toward Mechanism Investigation of Alzheimer Disease
- P-19 加納 花穂 薬学系研究科・薬科学専攻・M1（生命物理化学教室）  
タンパク質三量体による G タンパク質共役型内向き整流性カリウムチャンネル活性制御機構の構造生物学的解明  
Structural elucidation of the regulation mechanism of G protein-gated inwardly rectifying potassium channel by G protein
- P-20 伊藤 諒 工学系研究科・物理工学専攻・M2（樽茶研究室）  
表面弾性波を用いた量子もつれ電子対の分離  
Entangled electron-pair splitting using surface acoustic wave
- P-21 海老原 周 理学系研究科・物理学専攻・B4（島野研究室）  
テラヘルツ強電場によるバルク GaAs 中励起子のイオン化機構の研究  
Intense terahertz-field induced exciton ionization in GaAs
- P-22 飯塚 貴彦 工学系研究科・物理工学専攻・M2（岩佐研究室）  
カーボンナノチューブにおける熱電特性の電界制御  
Electric field control of thermoelectric properties in carbon nanotubes
- P-23 花塚 真大 理学系研究科・物理学専攻・D2（長谷川研究室）  
ビスマス超薄膜の磁気輸送測定  
Magnetotransport Measurements of Ultrathin Bi films on Si(111)
- P-24 白地 貴一 工学系研究科・物理工学専攻・M2（岩佐研究室・低温センター）  
鉄系超伝導体における熱輸送特性の異方性  
Anisotropy in the thermoelectric properties of  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$

- P-25 劉 東 工学系研究科・物理工学専攻・D3（鹿野田研究室）  
Transport and NMR studies of the Dirac electrons in  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>
- P-26 濱田 裕紀 理学系研究科・物理学専攻・D1（島野研究室）  
YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 薄膜におけるテラヘルツ非線形応答  
Terahertz nonlinear response in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> films
- P-27 中林 耕二 理学系研究科・化学専攻・助教（大越研究室）  
層状シアノ架橋型金属集積体におけるメタ磁性的挙動  
Layered cyanido-bridged metal assembly exhibiting a metamagnetic behavior
- P-28 石井 友章 工学系研究科・電気系工学専攻・M2（田中・大矢研究室）  
時間分解光誘起反射率変化測定による GaMnAs のフェルミ準位付近のバンド構造評価  
Band structure of GaMnAs near the Fermi level studied by time-resolved light-induced reflectivity
- P-29 井元 健太 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）  
大きな磁気異方性を有する Co-Nb オクタシアノ金属錯体  
Large magnetic anisotropy in Co-Nb cyano-bridged assembly
- P-30 富田 圭祐 理学系研究科・物理学専攻・M1（島野研究室）  
s 波超伝導体におけるヒッグスモードの減衰機構  
Damping mechanism of Higgs mode in s-wave superconductor
- P-31 日比野 有岐 工学系研究科・物理工学専攻・M1（千葉研究室）  
Pd/Co/Pt 構造における磁気異方性の電界制御  
Electric field control of magnetism in Pd/Co/Pt structure
- P-32 松永 隆佑 理学系研究科・物理学専攻・助教（島野研究室）  
s 波超伝導体 NbN におけるヒッグスモードとテラヘルツ波の非線形共鳴  
Nonlinear resonance of Higgs mode and terahertz wave in s-wave superconductor NbN
- P-33 中村 隼也 工学系研究科・物理工学専攻・M2（樽茶研究室・低温センター）  
ハーフホイスラートポロジカル半金属 RTBi(R=Lu,Y;T=Pt,Pd) の作製と電気物性  
Crystal growth and transport properties of half-Heusler topological semimetal RTBi(R=Lu,Y;T=Pt,Pd)
- P-34 久保 高幸 理学系研究科・物理学専攻・M2（長谷川研究室）  
MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 薄膜における磁性/トポロジカル絶縁体界面の輸送特性  
Transport property of magnetic insulator/topological insulator interface in MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin film
- P-35 村川 智 低温センター・研究開発部門・准教授  
超流動ヘリウム 3B 相表面のマヨラナコーンの直接観測  
Direct observation of Majorana cone at surface of superfluid helium three B phase
- P-36 大内 祐貴 工学系研究科・物理工学専攻・M2（川崎研究室）  
強磁性半導体 EuO 薄膜におけるトポロジカルホール効果の観測  
Observation of Topological Hall Effect in Ferromagnetic Semiconductor EuO Thin Films
- P-37 佐藤 秀樹 理学系研究科・物理学専攻・M1（福山研究室）  
水素プラズマによって異方性エッチングされたグラファイト表面の STM/S 観測  
STM/S Studies of Graphite Surfaces Anisotropically Etched by Hydrogen Plasma

- P-38 伴 芳祐 工学系研究科・電気系工学専攻・D3 (田中・大矢研究室)  
IV 族強磁性半導体  $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge:B}/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  接合系における磁気抵抗効果  
Magnetoresistance of the Group-IV Ferromagnetic Semiconductor  $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge:B}/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  Junctions
- P-39 生井 飛鳥 理学系研究科・化学専攻・助教 (大越研究室)  
ロジウム置換型イプシロン酸化鉄の合成とその巨大磁気異方性および高周波ゼロ磁場強磁性共鳴  
The synthesis of rhodium substituted epsilon-iron oxide and its large magnetic anisotropy and high-frequency zero-field ferromagnetic resonance
- P-40 寺田 博 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢研究室)  
GaMnAs 薄膜における真性反射磁気円二色性スペクトル  
Intrinsic spectra of reflection magnetic circular dichroism of GaMnAs thin films
- P-41 中山 和貴 理学系研究科・物理学専攻・D2 (福山研究室)  
原子・分子修飾したグラフェンの低温電気伝導特性  
Low temperature transport properties of graphene modified by atoms/molecules
- P-42 Joseph Falson 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (川崎研究室)  
MgZnO/ZnO 二次元電子系における最近の発展  
Recent Advancements in the MgZnO/ZnO two-dimensional electron system
- P-43 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)  
オクタシアノニオブ金属錯体における高プロトン伝導性  
High proton conductivity on octacyanoniobate-based metal assembly
- P-44 長瀬 まさえ 工学系研究科・電気系工学専攻・学術支援専門職員 (関野研究室)  
磁気計測に及ぼす低周波環境磁気ノイズの検討
- P-45 畠山 修一 工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・原子力国際専攻・D3 (高橋研究室)  
錫吸収体を搭載した超伝導転移端センサの開発  
Development of TES microcalorimeters with Sn absorber
- P-46 Le Duc Anh 工学系研究科・電気系工学専攻・D2 (田中・大矢研究室)  
Enhancement of ferromagnetism by manipulating the wavefunctions in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells
- P-47 戸田 亮 低温センター・共同利用部門・技術職員  
超小型サブミリケルビン連続冷凍システムの開発  
Development of a Compact and Continuous Sub-mK Refrigerator
- P-48 寺岡 総一郎 低温センター・液化供給部門・技術職員  
平成 26 年度技術職員研修開催報告  
Training for technical staff "cryogenics for beginners" in FY2014
- P-49 阿部 美玲 低温センター・液化供給部門・技術専門職員  
本郷キャンパスでの寒剤供給業務紹介  
Introduction about liquid nitrogen supply and liquid helium supply in Hongo campus

研究交流会プログラム委員

岩佐 義宏	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
樽茶 清悟	工学系研究科・物理工学専攻
大矢 忍	工学系研究科・電気系工学専攻
長谷川 修司	理学系研究科・物理学専攻
岡本 徹	理学系研究科・物理学専攻
永田 宏次	農学生命科学研究科・応用生命化学専攻
島野 亮	低温センター・研究開発部門



## 口頭発表

## O-01 NMR を用いた海洋天然物の構造解析

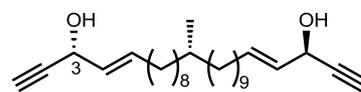
### Structure elucidation of marine natural products by NMR spectroscopy

農学生命科学研究科・水圏生物科学専攻・水圏天然物化学研究室

人羅 勇気、高田 健太郎、松永 茂樹

カイメン、ホヤ、サンゴなどの海洋無脊椎動物は、細胞毒性や抗菌活性など様々な生物活性を示す化合物（海洋天然物）を含有している。近年、海洋天然物を起源とした複数のがん化学治療薬が上市されるなど、海洋天然物は創薬資源あるいは研究用ツールとして重要視されている。このような背景から、当研究室では、日本近海で採取された無脊椎動物を対象に、新規生物活性物質の探索をおこなっている。

海産無脊椎動物の抽出エキスイブラリをがん細胞に対する毒性試験を指標にスクリーニングし、宮古曾根にて採取された *Petrosia* 属カイメンの抽出液より顕著な生物活性を見出した。活性成分を精製し、新規細胞毒性化合物である miyakosynes A - F を単離した。NMR データの解析により、三重結合、水酸基、二重結合からなる両末端構造、長鎖脂肪鎖および脂肪鎖中のメチル基の存在が明らかとなった。分岐メチルの位置は、FAB-MS/MS によって決定し、両端の不斉炭素の絶対配置は、改良 Mosher 法により R と決定した [1]。メチル分岐点の絶対配置を NMR データから導くことができなかったため、工学部の藤田教授らが開発した X 線結晶スポンジ法、および大類教授らが開発した遠隔位不斉認識試薬（大類 - 赤坂試薬）を用いたキラル分析による絶対配置の解析を試みた。X 線結晶スポンジ法による miyakosyne A の X 線構造解析がおこなわれ、14 位不斉炭素の絶対配置は S であることが示唆された。しかし、詳細なデータ解析の結果、分岐点の絶対配置の決定は困難である、との結論が導かれた [2]。この解析と並行して大類 - 赤坂試薬を用いたキラル分析を実施した。大類 - 赤坂法では、メチル基がアルコールの  $\alpha$  炭素から 9 番目の炭素間に存在する場合に  $^1\text{H}$  NMR スペクトルにより立体異性を識別可能である。そのため、miyakosyne A より分岐メチルが末端から 9 番目に存在するジオールを調製し、大類 - 赤坂試薬により誘導体化した後、合成標品と共に  $^1\text{H}$  NMR スペクトルを測定した。その結果、14 位の絶対配置は R であると結論した [3]。その後、森東大名譽教授らにより、miyakosyne A の 8 種類の立体異性体が合成された。天然由来ミヤコシン A とともに赤坂・大類試薬による誘導体の HPLC 分析がおこなわれ、その実験結果はわれわれの結論を本質的に支持した [4]。



(上) *Petrosia* 属カイメンの写真

(下) Miyakosyne A の化学構造

[1] Y. Hitora, K. Takada, and S. Matsunaga, *Tetrahedron* **67** 4530 (2011).

[2] Y. Inokuma, S. Yoshioka, J. Ariyoshi, T. Arai, Y. Hitora, K. Takada, S. Matsunaga, K. Rissanen, and M. Fujita *Nature*, **495**, 461 (2013). Corrigendum, *Nature*, **501**, 262 (2013).

[3] Y. Hitora, K. Takada, S. Matsunaga *Tetrahedron*, **69**, 11070 (2013).

[4] K. Mori, K. Akasaka, and S. Matsunaga *Tetrahedron*, **70**, 392 (2014).

## O-02 3-メルカプトピルビン酸硫黄転移酵素(3MST)の 結晶学的研究 Crystallographic study of 3-mercaptopyruvate sulfurtransferase (3MST)

薬学系研究科・蛋白構造生物学教室<sup>1</sup>、薬品代謝化学教室<sup>2</sup>、  
東京大学 創薬オープンイノベーションセンター<sup>3</sup>

諏訪内悠介<sup>1</sup>、藤間祥子<sup>1</sup>、島本一史<sup>2</sup>、篠倉潔<sup>2</sup>、長野哲雄<sup>2, 3</sup>、花岡健二郎<sup>2</sup>、清水敏之<sup>1</sup>

3-メルカプトピルビン酸硫黄転移酵素(3MST)は3-メルカプトピルビン酸の硫黄を他のチオールに転移させる酵素である。3MSTは、シグナル分子として働き、また細胞や器官の保護作用のある硫化水素の産生経路の一つに関わる[1, 2]。3MST 選択的阻害剤の報告はこれまでなく、その開発は3MSTの生理機能解析に重要である。

本研究では、3MST 選択的新規阻害剤の開発を目的として、放射光施設 SPring-8 および PF の高輝度放射光を利用し、3MST の新規骨格阻害剤と 3MST との複合体および阻害剤非結合型の結晶構造解析を行い、その阻害様式を明らかにした。なお、結晶の放射線損傷を低減させるため、結晶を液体窒素を用いて急速に冷却し、100 K に保ちながら X 線回折実験した。

東京大学創薬オープンイノベーションセンターでの化合物スクリーニングにより発見された 3MST に選択性のある阻害剤 2 種類について、阻害剤-蛋白質複合体の X 線結晶構造解析を行った。位相決定はヒト 3MST の構造を利用した分子置換法により、阻害剤結合型は分解能 1.2-1.7 Å で、非結合型は 1.0 Å で構造決定した(図 1)。

2 種類の阻害剤はほぼ同様の結合様式で 3MST に結合していた。一方の芳香環は活性残基 Cys248 に転移された硫黄と相互作用し、他方の芳香環は活性部位付近の Arg197 側鎖とスタッキングしていた(図 2)。それに伴い阻害剤非結合型で見られた Arg197 側鎖と Pro71 主鎖との水素結合は阻害剤結合型では見られなかった。

本研究により、3MST に選択性のある阻害剤の阻害様式が明らかになった。今回明確になった結合様式を参考にして化合物の構造展開をすることで、さらに阻害効果の高い 3MST 選択的阻害剤の開発につながると期待される。

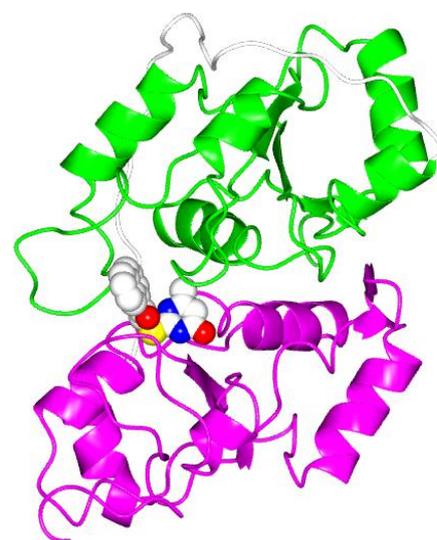


図 1. 3MST - 阻害剤複合体の構造

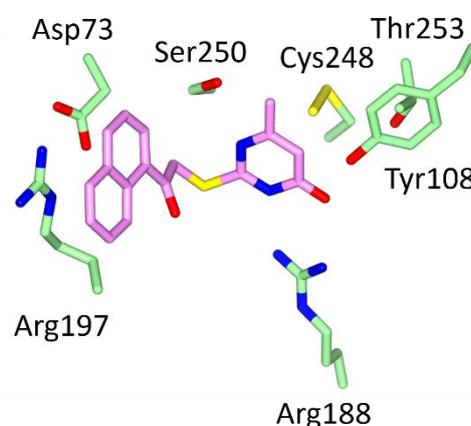


図 2. 阻害剤の活性部位への結合様式

[1] H. Kimura, Neurochem. Int. **63**, 492 (2013)

[2] A. L. King, and D. J. Lefer, Exp. Physiol. **96**, 840 (2011)

# O-03 DNA グリコシラーゼ活性により作用を示す制限酵素の発見

## Sequence-specific DNA glycosylase found in a restriction-modification system

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  
宮園 健一、田之倉 優

制限酵素とは、配列特異的に二本鎖 DNA を切断する活性を持つ酵素群である。細菌細胞内において、制限酵素は同じ配列を認識する DNA メチル化酵素と共存しており、DNA メチル化酵素によって保護されていないウイルス等の外来 DNA を特異的に分解することにより、自己の DNA を保護する役割を担っている。制限酵素が持つ配列依存的な DNA 切断活性は、DNA の塩基配列を操作する遺伝子組換え実験で多用されており、近年の生物学の発展において制限酵素が果たした役割は極めて大きい。多くの制限酵素は、 $Mg^{2+}$ イオン依存的に DNA 鎖中のホスホジエステル結合を加水分解する反応を触媒する酵素であり、その酵素活性から制限酵素は「制限エンドヌクレアーゼ」とも呼ばれていた。本研究では、制限酵素の一つである超好熱古細菌 *Pyrococcus abyssi* 由来 R.PabI が、エンドヌクレアーゼ活性ではなく、DNA 鎖中の *N*-グリコシド結合を切断する DNA グリコシラーゼ活性によって作用する酵素であることを明らかにした。エンドヌクレアーゼではない活性を持つ制限酵素の存在はこれまでに全く知られておらず、本研究により明らかになった「制限 DNA グリコシラーゼ」の存在は、細菌がもつ配列特異的な DNA 分解機構について、これまでの常識を覆すものである。

R.PabI は、他の制限酵素とは異なる特徴的な立体構造 (half pipe 構造) を有しており、その half pipe 領域を用いて 5'-GTAC-3'配列を認識し、配列特異的な DNA の切断を行う[1]。今回我々は、R.PabI-二本鎖 DNA 複合体の立体構造を X 線結晶構造解析法により決定することにより、R.PabI が DNA グリコシラーゼ活性を用いて DNA に損傷を与えることを発見し、R.PabI による DNA 切断機構の全様を明らかにした[2]。R.PabI は、二本鎖 DNA を 90° 近く折り曲げ、DNA 二重鎖から排出されたアデニンの *N*-グリコシド結合を加水分解する。加水分解された後に生じた脱塩基部位を含む DNA 鎖は非常に不安定であるため、熱分解や他の酵素の作用によって容易に切断される (図 1)。R.PabI のように配列特異的に DNA グリコシラーゼ活性を示す酵素はこれまでに知られておらず、今後も同種の酵素が発見されることが期待される。

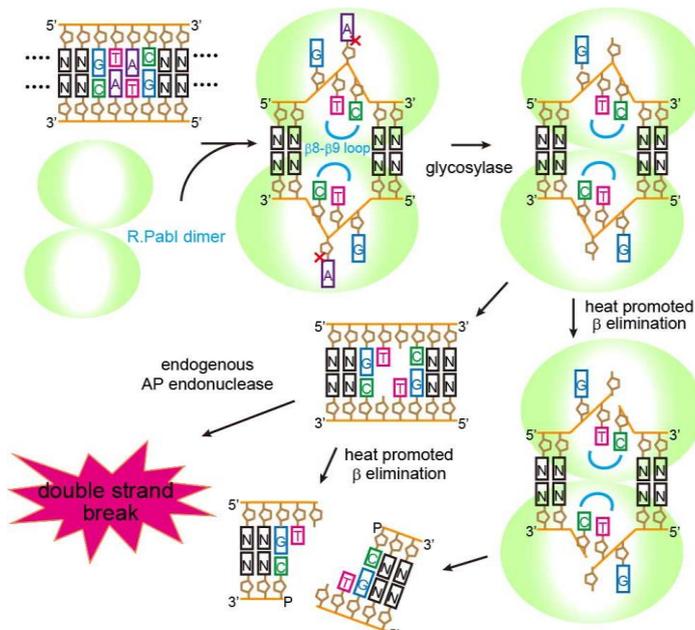


図 1. 制限 DNA グリコシラーゼ R.PabI による DNA 切断機構

[1] Nucleic Acid Res. 35:1908-1918 (2007)

[2] Nat Commun. 5:3178 (2014)

## O-04 コバルト-オクタシアノタングステン錯体の湿度応答性 Humidity responsivity of an octacyano cobalt-tungsten bimetal assembly

理学系研究科化学専攻大越研究室  
尾崎仁亮、所裕子、宮本靖人、大越慎一

シアノ架橋型金属錯体は、複数の金属イオンがシアノ基により架橋された構造を有する金属錯体であり、金属イオンや、組み合わせる有機配位子の選択により、その化学的・物理的性質を設計することができるため、機能性の金属錯体を合成するための、有用な構築素子となっている。中でも、 $\text{Co}^{\text{II}}$  と  $[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]^{3-}$  からなるコバルト-オクタシアノタングステン錯体は、Co と W の間での電荷移動型スピン転移に基づく相転移現象を示す<sup>[1]</sup>。本研究では、コバルト-オクタシアノタングステン錯体  $\text{Co}_3[\text{W}(\text{CN})_8]_2(4\text{-メチルピリジン})_2(\text{ピリミジン})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  を合成し、その湿度応答性について検討した。

本錯体は、 $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、ピリミジン、4-メチルピリジンを水溶液中で混合することにより、赤色の粉末として得られた。XRD パターンと Rietveld 解析により、本錯体は三斜晶系 *P*-1 の空間群に属し、その格子定数は  $a = 7.610(1) \text{ \AA}$ 、 $b = 14.980(2) \text{ \AA}$ 、 $c = 20.897(8) \text{ \AA}$ 、 $\alpha = 90.90(8)^\circ$ 、 $\beta = 98.34(2)^\circ$ 、および  $\gamma = 90.55(2)^\circ$  であることがわかった。Co および W イオンはシアノ基によって架橋され、三次元の構造体を形成していた。また、構造中の空隙には、水分子が結晶水として含まれており、水素結合ネットワークを形成していた。IR スペクトルおよび XRD パターンの湿度応答性を調べると、これらの水分子の一部は、湿度の減少により脱離することがわかった。続いて、液体ヘリウムを冷媒として用い、湿度 100% RH で処理したサンプルの、磁化率×温度( $\chi_M T$ )の温度依存性( $\chi_M T$ - $T$  プロット)を調べることににより、高温相( $\text{Co}^{\text{II}}_{\text{high spin}}\text{-W}^{\text{V}}$ )と低温相( $\text{Co}^{\text{III}}_{\text{low spin}}\text{-W}^{\text{IV}}$ )の間での相転移現象を観測した。この時、相転移温度は 147 K (高温相→低温相:  $T_{1/2\downarrow}$ ) および 242 K (低温相→高温相:  $T_{1/2\uparrow}$ )、温度ヒステリシス ( $\Delta T \equiv (T_{1/2\downarrow} + T_{1/2\uparrow})/2$ ) は 95 K であった。さらに 5% RH で処理したサンプルについても  $\chi_M T$ - $T$  プロットを測定すると、 $T_{1/2\downarrow} = 191 \text{ K}$ 、 $T_{1/2\uparrow} = 245 \text{ K}$ 、 $\Delta T = 54 \text{ K}$  となり、相転移温度の上昇および温度ヒステリシスの縮小が見られた。この湿度応答性は、低湿度条件下では、水素結合ネットワークが分断され、転移サイト間に作用する弾性相互作用を媒介する経路が減少することで、協同効果が減少するためと考えられる<sup>[2]</sup>。

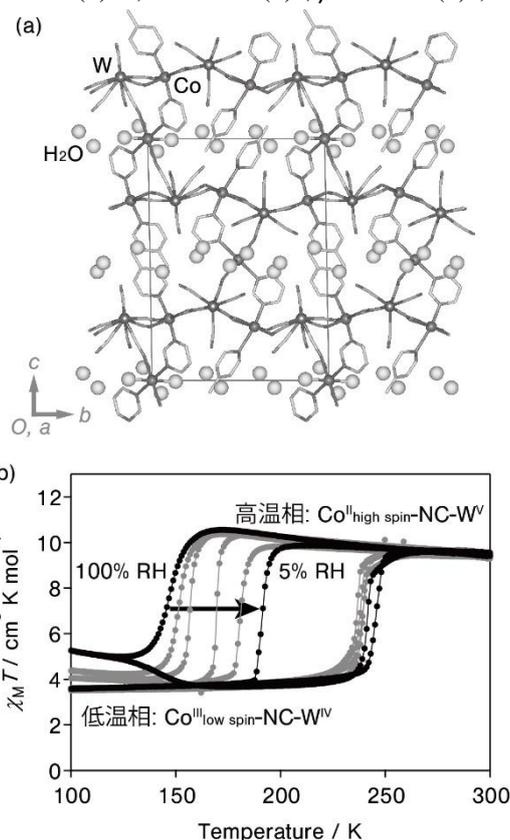


図 1. (a) 本錯体の結晶構造。  
(b)  $\chi_M T$ - $T$  プロット。

[1] N. Ozaki, H. Tokoro, Y. Hamada, A. Namai, T. Matsuda, S. Kaneko, and S. Ohkoshi, *Adv. Funct. Mater.* **22**, 2089 (2012). [2] N. Ozaki, H. Tokoro, Y. Miyamoto, and S. Ohkoshi, *New J. Chem.* **38**, 1950 (2014).

# O-05 有機電荷秩序系 $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> における異常金属相の圧力下 <sup>13</sup>C-NMR

## <sup>13</sup>C-NMR study on an anomalous metallic phase of an organic charge ordering system $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> under pressure

工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室、物材機構<sup>A</sup>、東大物性研<sup>B</sup>  
井上 暁登、橋本 凌、宮川 和也、鹿野田 一司、磯野 貴之<sup>A</sup>、上田 顕<sup>B</sup>、森 初果<sup>B</sup>

金属か絶縁体かは物質を特徴づける性質の一つである。強相関電子系と呼ばれる物質群では、伝導電子間に働くクーロン相互作用が強いことに起因し、電子が局在して絶縁体となる。サイト1つに対し、電子が1つある系で、電子間に強いクーロン相互作用が働くと、系は金属から絶縁体へと変化する(モット絶縁体)。このとき金属と絶縁体の相境界近傍では、非BCS超伝導や超巨大磁気抵抗など、興味深い現象が現れる。一方、強相関電子系の中でも、サイト二つにつき、電子の数が一つの系(1/4 フィリング系)は金属になるはずであるが、長距離的なクーロン相互作用が強い場合に、電荷密度が周期的に疎密を作って局在した電荷秩序絶縁体となる(図1)。モット絶縁体のように、金属と電荷秩序絶縁体の境界では、長距離クーロン相互作用に起因した、新しい物理が現れる可能性があるため、研究を行っている。

具体的には、有機電荷秩序系  $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> を対象とした <sup>13</sup>C-NMR 測定を行っている。本物質は、常圧では 75 K において金属-絶縁体転移を起こし、転移温度以下では電荷秩序が形成される。本物質に圧力を印加すると、バンド幅が広がることにより、実効的にクーロン相互作用が小さくなり、電荷秩序状態が融解して金属となる[1]。そのため、本物質は金属と電荷秩序の境界における電子状態の解明に適していると考えられる。

常圧における <sup>13</sup>C-NMR 測定より、金属相において電子が非常に遅く揺らぎ、温度を下げると共に不均一の度合いが大きくなることを明らかにした。これは、電子が自由に動き回る金属の描像では説明が難しく、金属と電荷秩序絶縁体の境界での新奇な物理につながる可能性のある現象と考えられる。更に、圧力下 <sup>13</sup>C-NMR により、電荷秩序転移温度は低下するが、金属相における遅い揺らぎ及び不均一の度合いには、大きな変化が現れないことを明らかにした(図2)。

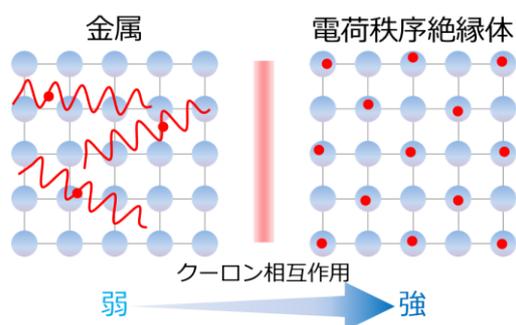


図1. 金属相と電荷秩序相の模式図。  
クーロン相互作用が大きいと電子は周期的に配列し、電荷秩序絶縁体となる。

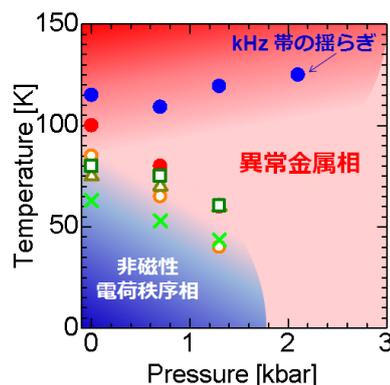


図2. <sup>13</sup>C-NMR による圧力-温度相図。  
青の点は電子系の揺らぎが、kHz 程度の周波数になる温度である。

[1] N. Morinaka, et al., Phys. Rev. B, 80, 092508 (2009).

## O-06 Room-temperature local ferromagnetism and domain growth in the ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$

Yuki K. Wakabayashi,<sup>1</sup> Shoya Sakamoto,<sup>2</sup> Keisuke Ishigami,<sup>2</sup> Yukio Takahashi,<sup>2</sup> Yukiharu Takeda,<sup>3</sup> Yuji Saitoh,<sup>3</sup> Hiroshi Yamagami,<sup>3</sup> Atsushi Fujimori,<sup>2</sup> Masaaki Tanaka,<sup>1</sup> and Shinobu Ohya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo

<sup>2</sup>Department of Physics, The University of Tokyo <sup>3</sup>Synchrotron Radiation Research Unit, JAEA

Group-IV-based ferromagnetic semiconductor (FMS)  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  is expected to become efficient spin injectors and detectors in group-IV-based semiconductor devices, because it can be epitaxially grown on Si and Ge substrates and the conductivity can be controlled by boron (B) doping independently of the Fe concentration  $x$  [1]. Furthermore,  $T_C$  can be increased up to 210 K by annealing [2]; however, detailed microscopic understanding of the ferromagnetism is lacking. In this study, we investigate the local magnetic behavior of GeFe using X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) at various magnetic fields and temperatures.

We have carried out XMCD measurements of the  $\text{Ge}_{0.935}\text{Fe}_{0.065}$  films grown at 160°C ( $T_C = 20$  K) and 240°C ( $T_C = 100$  K) by low-temperature molecular beam epitaxy (LT-MBE) [3]. Figure 1 (a) shows the X-ray absorption spectroscopy (XAS) spectrum [ $\mu^+$ ,  $\mu^-$ , and  $(\mu^+ + \mu^-)/2$ ] at the Fe  $L_2$  (~721 eV) and  $L_3$  (~708 eV) absorption edges in the  $\text{Ge}_{0.935}\text{Fe}_{0.065}$  film grown at 240°C measured at 5.6 K with a magnetic field  $\mu_0 H$  of 5 T applied perpendicular to the film surface. The main peak at around 708 eV is assigned to  $\text{Fe}^{2+}$  states in GeFe, which means that almost all the doped-Fe atoms are in the 2+ state. Figure 1 (b) shows the XMCD ( $= \mu^+ - \mu^-$ ) spectra at the Fe  $L_2$  and  $L_3$  absorption edges in the same sample measured at 5.6 K with  $\mu_0 H = 0.1, 1, 3,$  and 5 T. Figure 2 shows the effective magnetic-field  $H_{\text{eff}}$  dependence of the XMCD intensity at 707.66 eV, which corresponds to the negative peak of XMCD in Fig. 1 (b), in the  $\text{Ge}_{0.935}\text{Fe}_{0.065}$  film grown at 240°C at various temperatures. Here, the total magnetization  $M$  [= spin magnetic moment ( $m_{\text{spin}}$ ) + orbital magnetic moment ( $m_{\text{orb}}$ )] obtained by using the XMCD sum rules is also plotted by filled red symbols, and  $\mu_0 H_{\text{eff}}$  is obtained by subtracting the demagnetization from  $\mu_0 H$ . The fitted curves using the linear- $H_{\text{eff}}$  plus Langevin functions, corresponding to the paramagnetic and superparamagnetic components, respectively, are also shown in these figures (dashed black curves). As shown in a blow-up near zero magnetic field in the inset, one can see a clear hysteresis below  $T_C$  ( $= 100$  K). In Fig. 2, the theoretical curves (dashed black curves) are well fitted to the experimental data above  $T_C$ . This means that local ferromagnetic domains, which exist at room temperature, expand with decreasing temperature, followed by the ferromagnetic transition of the entire system at  $T_C$  [4].

**Acknowledgement** This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research including Specially Promoted Research and Project for Developing Innovation Systems of MEXT.

**References** [1] Y. Ban, Y. Wakabayashi *et al.*, AIP Advances **4**, 097108 (2014). [2] Y. K. Wakabayashi *et al.*, Phys. Rev. B, **90**, 205209 (2014). [3] Y. K. Wakabayashi *et al.*, J. Appl. Phys. **116**, 173906 (2014). [4] Y. K. Wakabayashi *et al.*, arXiv:1502.00118 (2015).

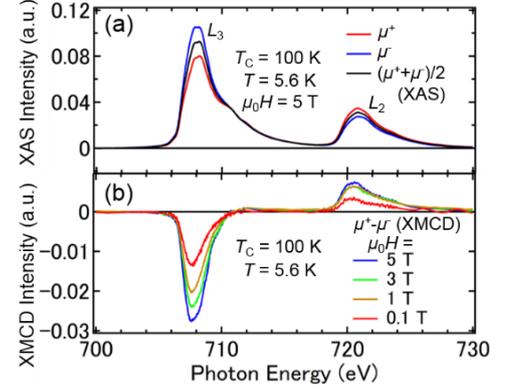


Fig. 1(a)(b) : XAS (a) and XMCD (b) spectra of the  $\text{Ge}_{0.935}\text{Fe}_{0.065}$  film grown at 240°C.

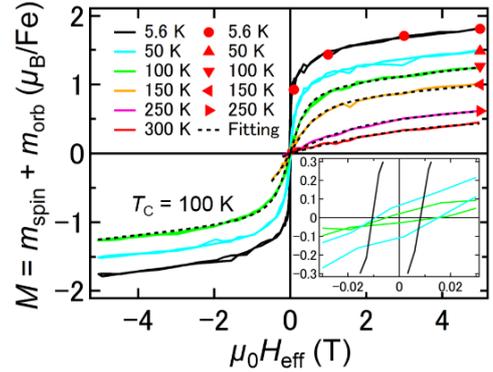


Fig. 2. : Effective magnetic-field  $H_{\text{eff}}$  dependence of the XMCD intensity at 707.66 eV for the  $\text{Ge}_{0.935}\text{Fe}_{0.065}$  film grown at 240°C measured at various temperatures. The total magnetization  $M$  ( $= m_{\text{spin}} + m_{\text{orb}}$ ) obtained by the XMCD sum rules is also plotted by filled red symbols.

## O-07

# 生体模倣リエントラントスピングラス Co<sup>2+</sup>添加ガーネット薄膜における光制御スピン流

東京大学工学系研究科電気系工学専攻田畑研究室

足立 真輝、関 宗俊、山原 弘康、那須 秀和、田畑 仁

本研究室では、“ゆらぎ”の効果を用いることで、秩序系にはない統計力学的な特性を利用し、新奇なデバイスの作製を目指している。本報告では、クラスターガラスと呼ばれるスピンの“ゆらぎ”系を利用することによって、脳神経のシナプスを模倣した動作をするスピン波デバイスに関して報告する。クラスターガラスは、脳神経回路と類似していることが1982年にJ. J. Hopfieldによって指摘されて以降[1]、クラスターガラスを基にした脳型コンピュータを作る試みが行われてきたものの、実際に作製に成功したものは現在までに報告がない。それは、スピングラスからスピンの情報を取り出し、電気的な情報に変換することが困難だったからにほかならない。そこで、スピンプンピングを利用して、クラスターガラスのスピン情報を電気信号として取り出すことを試みた。

クラスターガラスは、スピンプラストレートを起こす格子系である三角格子またはカゴメ格子を持つ磁性材料に対し、ランダムに不純物を置換することで作製できる。スピン波デバイスの中心的材料である希土類鉄ガーネットの一種、Lu<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>に不純物としてCoとSiを共添加したLu<sub>3</sub>Fe<sub>4.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Si<sub>0.1</sub>O<sub>12</sub>(LFCS)をパルスレーザー堆積法でY<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(001)基板上に60 nm程度堆積させた。低温磁化測定は、東京大学低温センターのMPMS-5Sを用いて行った。その結果、ゼロ磁場冷却と磁場中冷却における磁化は印加磁場 $H = 100$  Oeにおいて、ガラス転移温度 $T_g = 248$  Kを境に分岐し、 $T_g$ の磁場依存性はde Almeida and Thouless線[2]に従った。 $M-T$ スケーリング則に対する臨界指数 $\beta$ は0.501で、リエントラントクラスターガラスの平均場模型的挙動を示している。[2] 熱残留磁化及び等温残留磁化は、ベキ乗則に従い、クラスターガラス状態の $T = 80$  Kの方が遅い緩和挙動を示した。光を照射すると、 $\text{Co}^{2+} + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Co}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ というIntervalence Charge Transfer[3]を誘発し、磁気異方性が変化する。ガラス状態の遅い緩和に伴い、光履歴に対してスピンが中途半端な状態で固まる“学習効果”の存在を確認した。

この結果をもとに、Pt(10 nm)/LFCS(60 nm)/接合を作製し、Xe光源の白色光を29 mW/mm<sup>2</sup>の強度で10分間照射On/Offを繰り返したところ、図1に示すように、照射サイクルを繰り返すごとに徐々にスピンプンピング電圧は上昇している。これは、シナプスにおける長期増強の効果と良く似ており[4]、スピン系において初めてシナプス模倣素子を作製したと言える。

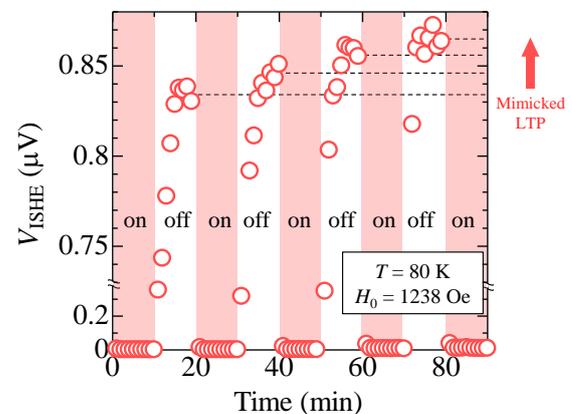


図1. 光履歴によるスピン起電力の長期増強

[1] J. J. Hopfield, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **79**, 2554 (1982)

[2] R. Palai, *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 104413 (2009)

[3] K. Ohmori, *et al.*, IEEE Trans. Magn. **30**, 775 (1994)

[4] T. V. P. Bliss, *et al.*, Nature **361**, 31 (1993)

## 高移動度 SrTiO<sub>3</sub> 二次元電子系における 量子化ホール伝導の観測

### Observation of quantized Hall conductance in high mobility two dimensional electron system of SrTiO<sub>3</sub>

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室

松原 雄也, 高橋 圭, 小塚 裕介, Mohammad Bahramy, Denis Maryenko,  
Joseph Falson, 塚崎 敦, 川崎 雅司, 十倉 好紀

【背景】チタン酸ストロンチウム：SrTiO<sub>3</sub>はセラミックコンデンサに利用されているありふれた材料であるが、電子ドーピングによって高移動度金属伝導や超伝導などの物性を示す。近年、SrTiO<sub>3</sub> 二次元電子の伝導特性が注目を集めている。LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> ヘテロ接合界面や SrTiO<sub>3</sub>/n-SrTiO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> デルタドーピング構造などの二次元構造では、電子は二次元平面に閉じ込められる。この SrTiO<sub>3</sub> 二次元電子は、二次元超伝導や強磁性を示し[1]、電子、軌道、格子が相互作用しあう新しい二次元電子系として注目されている。しかし報告されている SrTiO<sub>3</sub> 二次元電子の移動度はバルク単結晶のものより低い。これは SrTiO<sub>3</sub> 薄膜の物性がエピタキシャル応力や組成ズレなどの影響を受けやすいためと考えられる。本研究では有機金属分子線エピタキシー(MO-MBE) [2]を用いて SrTiO<sub>3</sub> 薄膜の結晶品質を改善し、二次元電子の高移動度化による量子伝導の観測を目的とした。

【実験と結果】Ti 原料として Ti 含有有機金属のチタンテトライソプロポキシド Ti(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>、Sr と La 原料にはそれぞれの金属単体、酸化ガスにはオゾンを用いた。半導体レーザ加熱機構により 1200 °C に加熱した SrTiO<sub>3</sub>(100)基板上に SrTiO<sub>3</sub>(100 nm)/La:SrTiO<sub>3</sub>(10 nm)/SrTiO<sub>3</sub>(100 nm)デルタドーピング構造を作製した。MO-MBE 成長による高純度化と組成の自己制御、および高温加熱による高品質化によって、このデルタドーピング薄膜の最高移動度は 24,000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> まで向上し、バルク単結晶の最高移動度(22,000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)を凌駕した。極低温での Hall 抵抗

$R_{xy}$  にプラトー構造が観測され、対応する磁場に縦磁気抵抗  $R_{xx}$  が極小値を示す Shubnikov-de Haas 振動が観測された(図 1)。それぞれのプラトー部の Hall 抵抗は量子抵抗  $h\nu e^2$  ( $\nu$ : Landau 準位)の  $\nu = 4, 6$  に相当している。これらの結果は、極めてクリーンな半導体のみに観測される整数量子ホール効果を二次元電子系 SrTiO<sub>3</sub> で初めて観測したことを示している。観測された Landau 準位は偶数準位であることから、SrTiO<sub>3</sub> 二次元電子系の伝導バンドが二重縮退を持つことを示唆している。発表では縮退の起源についても議論する。

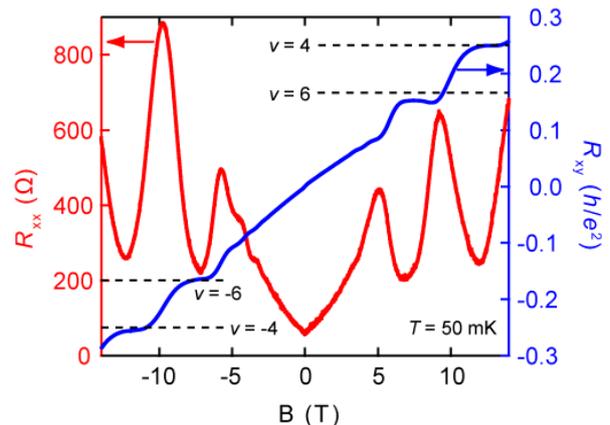


図 1. 極低温の縦磁気抵抗(左軸)および Hall 抵抗(右軸)。デルタドーピング SrTiO<sub>3</sub> の移動度とキャリア濃度はそれぞれ、18,000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> と  $1.2 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>。

[1] A. Ohtomo, H. Y. Hwang, Nature **427**, 423 (2004); A. Brinkman *et al.*, Nat. Mater. **6**, 493 (2007); Y. Kozuka *et al.*, Nature **462**, 487 (2009). [2] J. Son *et al.*, Nature Mater. **9**, 482 (2009).

# O-09 磁性/非磁性トポロジカル絶縁体二層膜における量子輸送現象

## Quantum transport in semi-magnetic bilayers of topological insulator

工学系研究科 物理工学専攻 十倉研究室

安田 憲司、吉見 龍太郎、Joseph G. Checkelsky、塚崎 敦、高橋 圭  
小塚 裕介、Joseph Falson、永長 直人、川崎 雅司、十倉 好紀

トポロジカル絶縁体は、物質の内部は絶縁体的であるが、表面に金属的な伝導を有する物質であり、表面ディラック状態に由来した多彩な物性の舞台として近年注目を集めている。中でも、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  薄膜は、組成によるフェルミ準位の精密な制御が可能であることから、盛んに研究がされている。近年、磁性元素 Cr をドーブした磁性トポロジカル絶縁体  $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$  において、自発磁化により零磁場で量子異常ホール効果が観測された[1,2]。一方、非磁性トポロジカル絶縁体では表面の二次元性のため、磁場下において量子ホール効果が観測されている[3]。これら 2 つの現象は、いずれも系の時間反転対称性の破れを起源としており、統一的に議論できることが期待される。本研究では、量子ホール効果・量子異常ホール効果の関係性の理解を目指し、非磁性/磁性トポロジカル絶縁体二層膜  $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3/\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$  の輸送特性を調べた。

図に、二層膜におけるホール伝導度のゲート電圧依存性を示す。零磁場においては、異常ホール効果により有限の  $\sigma_{xy}$  が生じる。一方、高磁場下において、占有率  $\nu = +1$ ,  $\nu = 0$  に対応する量子ホールプラトーが明瞭に観測できる。これらのプラトーは、薄膜の上下の表面電子状態を考慮することで理解することができる。加えて、二層膜においては、磁性トポロジカル絶縁体や非磁性トポロジカル絶縁体単層膜の系に比べ、高温で量子ホール効果が観測できることが明らかになった。以上の結果は、現象論的には磁化と磁場が協力的に作用することで量子ホール効果が発現することを意味しており、トポロジーの観点から量子ホール効果と量子異常ホール効果が統一的に理解できることを示唆している。

本研究の一部は、日本学術振興会の最先端研究開発支援プログラムにより助成を受けて行われた。

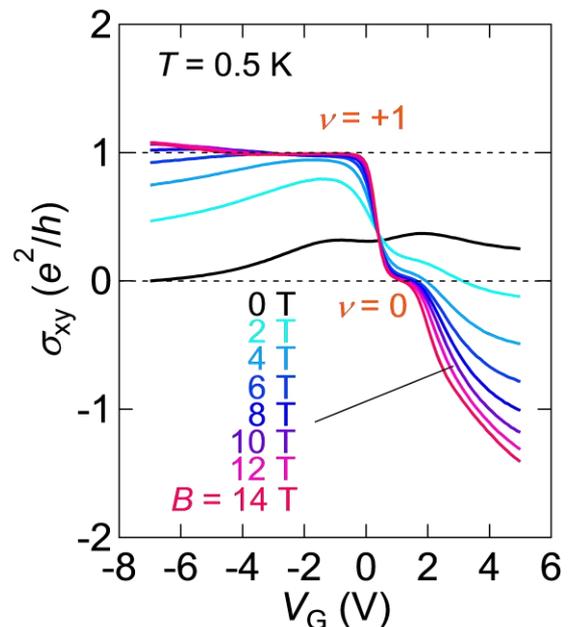


図1. トポロジカル絶縁体二層膜におけるホール伝導度のゲート電圧依存性

[1] C.-Z. Chang *et al.*, Science **340**, 167 (2013).

[2] J. G. Checkelsky *et al.*, Nat. Phys. **10**, 731 (2014).

[3] R. Yoshimi *et al.*, Nat. Commun. to appear.

## O-10 低温における Bi 超薄膜の走査トンネルポテンシオメトリ測定 Scanning Tunneling Potentiometry measurement of ultrathin Bi at low temperature

東大理<sup>A</sup>, 東工大理<sup>B</sup>  
中村友謙<sup>A</sup>, 保原麗<sup>A</sup>, 長谷川修司<sup>A</sup>, 平原徹<sup>B</sup>

走査トンネルポテンシオメトリ(STP)は、走査トンネル顕微鏡(STM)を応用した、試料表面の構造と電位分布の同時測定を可能にする実験手法である[1]。高い空間分解能(原理的には原子レベル)で電気伝導特性を測定できるため、ミクロな構造と電気伝導特性との対応関係を明らかにする上で有用な手法である。これまで我々は通常の STM 探針ホルダーに電流導入用のプローブを組み込んだ新型の探針ホルダーを開発し、超高真空下で動作する STP 装置を立ち上げた。そして、それを用いて Si(111)基板上にエピタキシャル成長させた Bi 超薄膜(~9BL)において STM/STP 同時測定を室温で行い、電流を流したことによるマクロな電位分布を測定することに成功した。さらに Bi のエッジ特有の電子状態に起因すると思われる、ステップエッジでのポテンシャル異常を STP で測定することに成功した [2]。

本研究では上記の研究を発展させ、低温(5K)において Bi 超薄膜(~9BL)の STM/STP 同時測定を行った。その結果、室温で測定した場合と同様、電流を流したときにはマクロな電位分布が観測された。一方、電流を流さない場合でもポテンシャルの局所的な変化が観測された。図 1(a)がそのときに測定されたトポグラフィ像、(b)がポテンシャル像である。(b)では、(a)のテラスに対応する場所でステップエッジと平行な波面を持つポテンシャルの振動構造が見られる。講演では詳細な STM/STP 測定と解析の結果を報告し、ポテンシャル像で見られる振動構造の起源について議論する。

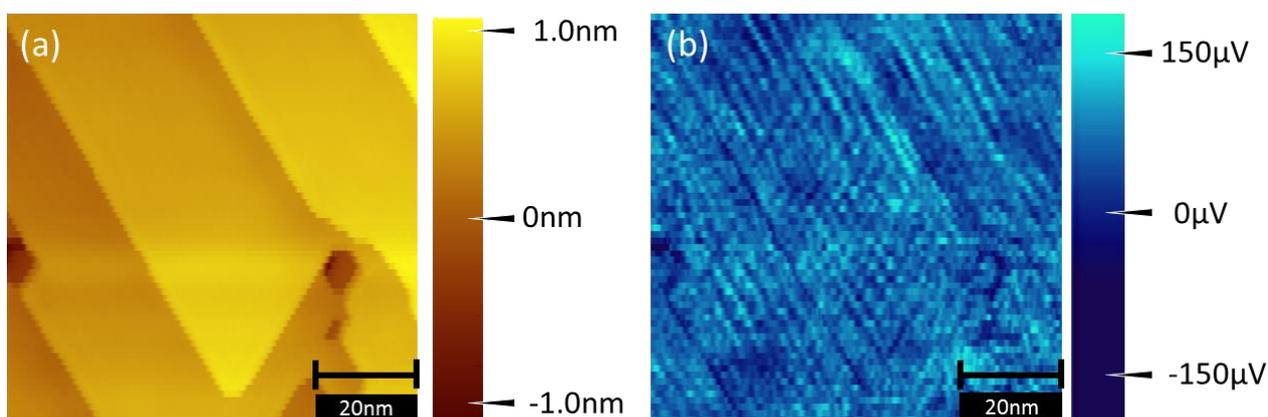


図 1. (a)トポグラフィ像 (b)ポテンシャル像

交流電圧 0.5 mV, 交流周波数 593.1 Hz, トンネル電流 10 pA, サンプル電流 ~0 mA

[1] P.Muralt and D.W.Pohl, Appl. Phys. Lett. **48**, 514 (1986).

[2]中村 他、日本物理学会 2014 年秋季大会 7aAK-1

# O-11 逆ペロブスカイト Sr<sub>3</sub>PbO における三次元ディラック電子 3D Dirac electrons in anti-perovskite Sr<sub>3</sub>PbO

理学系研究科 物理学専攻 高木研究室

白井優美, 葉山慶平, A. Yaresoko, A. W. Rost, C. Muehle, J. Nuss, 高木英典

ディラック電子とはディラックが相対論的量子力学に基づいて提唱した、エネルギー線形分散をもつ準粒子である。近年、ディラック電子が様々な物質中で多彩な物性を生み出すことが注目されている。

逆ペロブスカイト A<sub>3</sub>BO (A=Ca,Sr,Ba;B=Pb,Sn) は3次元的なディラック電子構造をもつと理論的に提案されている[1]。図1に結晶構造を示した。まずBサイトが立方体を形成している。そして通常のペロブスカイトとは「逆」にA原子が八面体を形成し、その中心に酸素原子が位置する。Sr<sub>3</sub>PbOの電子配置をみると Sr<sup>3+</sup>Pb<sup>4+</sup>O<sup>2-</sup>となっていてPbのp軌道は6個全て埋まっている。通常PbはPb<sup>2+</sup>,Pb<sup>4+</sup>をとることを考慮するとPb<sup>4+</sup>はエネルギー的に不安定な状態にある。そのためPbのp軌道はフェルミ面に近いところに存在し、アルカリ土類金属のd軌道とオーバーラップする。p軌道とd軌道は混成してバンドギャップが開く。ところが対称性によってk<sub>x</sub>,k<sub>y</sub>,k<sub>z</sub>軸方向に限りほぼ混成が0で、バンドがディラック点1点において交わる点が存在する。またバンド計算によって他のバンドはフェルミ面を横切らないことがわかっていて。よってA<sub>3</sub>BOはフェルミ面にディラック点のみが存在するため、ディラック電子系における物性探索の舞台として相応しい。元素の置換で系統的調査が可能になることもこの物質群の強みである。

我々はSr<sub>3</sub>PbOの単結晶を用いて輸送特性や磁気トルクを測定した。両方の測定において量子振動が観測された。1ポケットあたり  $n \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$  と低キャリアかつ非常に軽い有効質量  $0.016m_e$  が見積もられた。この軽有効質量はディラック電子の存在を支持し、バンド計算の結果 ( $\sim 0.02m_e$ ) と一致する。磁気抵抗は2Kで数百%という非常に大きな値を示した。弱磁場では古典的な二次関数的な振る舞い、強磁場では線形不飽和な振る舞いが観測された(図2)。これはディラック電子系に普遍的な特徴である。一般に、有限磁場下で電子のエネルギーはランダウ準位に量子化される。さらに高磁場下で全ての電子が最低ランダウ準位に閉じ込められる状態を量子極限とよぶ。磁気抵抗の8.3Tにおける大きなうねりはランダウ準位  $n=1$  軌道のフェルミ面通過に対応し、これより高磁場の振る舞いは量子極限に起因している可能性がある。磁気抵抗が磁場のみに依存し温度依存性がないことも、量子効果の影響と考えられる。ディラック電子は自由電子の1/100倍軽いいため金属の場合の1/100の磁場で量子化できることと、ランダウ準位間のエネルギーよりもフェルミエネルギーが小さいことが、研究室環境での量子極限の観測を可能にしている。

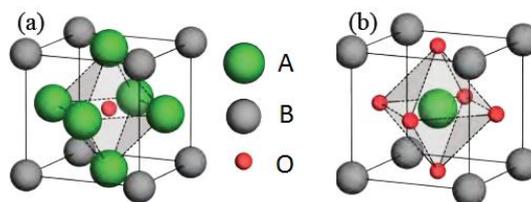


図1:(a)逆ペロブスカイト構造 (b)通常のペロブスカイト構造[1]

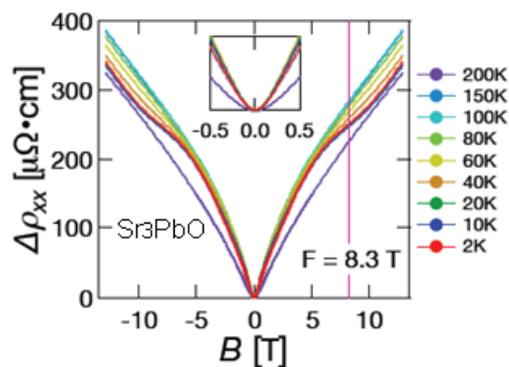


図2:磁気抵抗の磁場依存性

[1] T.Kariyado *et al.*, J.Phys. Soc.Jpn. **80** 083704(2011)

## ポスター発表

## P-01

# ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 超格子薄膜におけるフラストレート磁性の制御 Tuning Magnetic Property of Geometrically Frustrated Systems by Fabricating Spinel-type ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Superlattices

東大院工 物理工学専攻川崎研究室<sup>1</sup>, 理研 GEMS<sup>2</sup>

村田智城<sup>1</sup>, 打田正輝<sup>1</sup>, 小塚裕介<sup>1</sup>, 川崎雅司<sup>1, 2</sup>

幾何学的フラストレーションを持つ磁性体は、磁気モノポールや量子スピン液体状態などの興味深い磁気状態の舞台となることから注目されている。本研究ではフラストレート磁性体研究の新しい試みとして、フラストレート磁性体である ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> と ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の超格子薄膜を作製し、磁性制御を行った。

薄膜成長にはパルスレーザー堆積法を用いた。ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> と同じスピネル型構造を持つ MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(111)基板上に薄膜成長を行い、基板からコヒーレントに単結晶の薄膜を成長させた。ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Zn[Fe,Cr]O<sub>4</sub> 薄膜をそれぞれ作製し、また ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> と ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> を  $m$  ユニットセルずつ交互に積層した [ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>] <sub>$m$</sub>  / [ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>] <sub>$m$</sub>  ( $m = 1, 2, 4, 10$ ) の薄膜を作製した。成膜は基板温度 550 °C、酸素分圧 1 mTorr の環境下で行った。Fig. 1 に超格子薄膜の X 線回折測定の結果を示す。超格子構造に由来するサテライトピーク及び膜厚フリッジを観測することができ、スピネル型構造の酸化物としては非常に高品質な超格子薄膜の作製に成功した。

作製した薄膜の磁化率の温度依存性を測定すると、それぞれ 30 K 以下の低温でスピングラス転移を示した。Fig. 2 に示すようにスピングラス転移温度  $T_g$  は超格子層厚  $m$  に対応して系統的に変化した。ここで ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> と ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の固溶体である Zn[Fe,Cr]<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 薄膜の測定結果を  $m = 0$ 、別途測定した ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 薄膜と ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 薄膜の磁化率の平均値を  $m = \infty$  としている。点線で示すように、 $m = \infty, 10, 4, 0$  と超格子層厚  $m$  を薄くするにつれてスピングラス転移温度が上昇しており、これは超格子界面がスピングラス転移を誘起するためであると考えられる。一方、 $m = 2, 1$  ではスピングラス転移が低温まで抑制された。報告されている磁気相関長 [1][2] と同程度まで超格子層厚  $m$  を薄くすることで、バルクとは異なる新しい磁気状態を実現することに成功したと考えられる。

[1]K. Kamazawa *et al.*, PRB **65**, 024412 (2003)

[2]S. -H. Lee *et al.*, Nature **418**, 856 (2002)

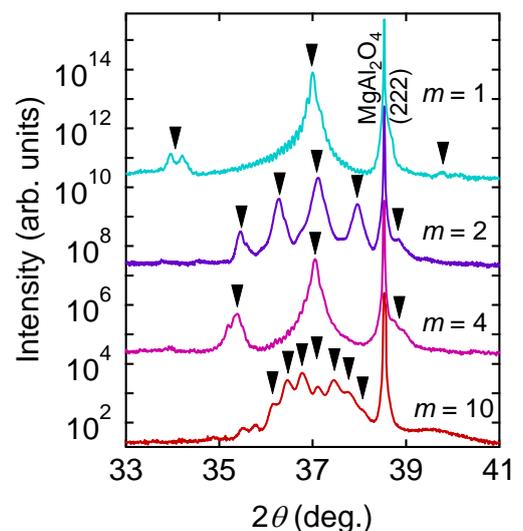


Fig. 1 X-ray  $2\theta$  scans of the superlattice films. Triangles indicate the main and satellite peaks of superlattices.

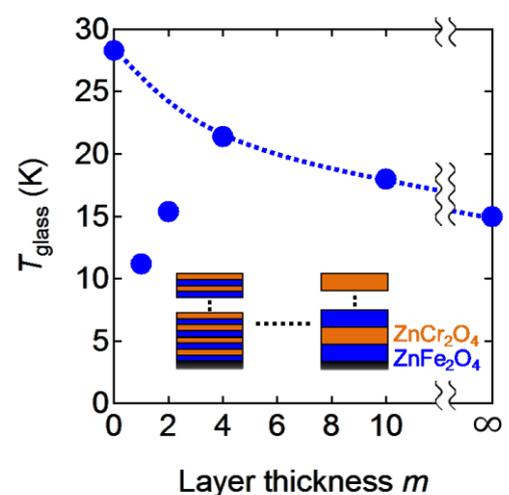


Fig. 2 Spin-glass transition temperature  $T_g$  as a function of layer thickness  $m$ . Inset shows a schematic view of the superlattice films.

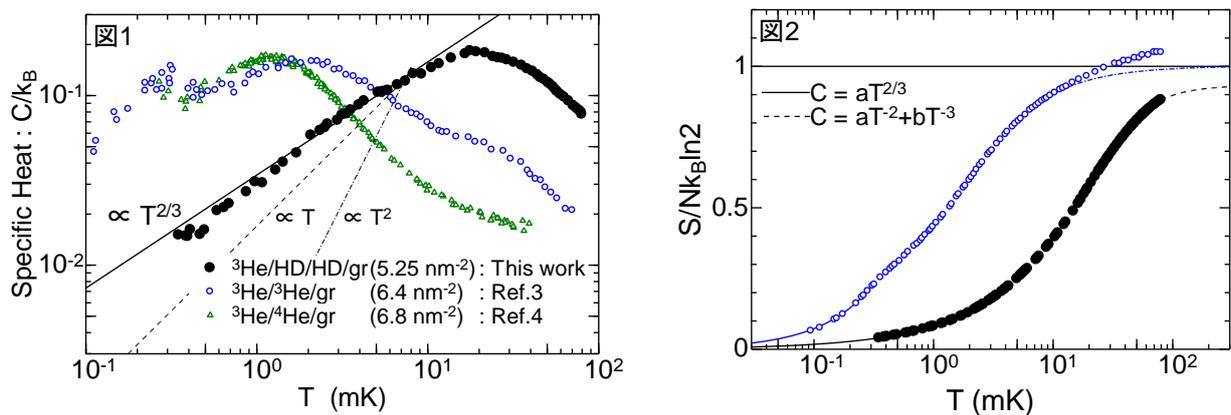
# P-02 2次元ヘリウム3の量子スピン液体相の比熱

## Specific Heat of the Gapless Spin Liquid Phase in 2D Solid $^3\text{He}$

理学系研究科 物理学専攻 福山研究室<sup>A</sup>、低温センター<sup>B</sup>  
 鎌田雅博<sup>A</sup>、中村祥子<sup>B</sup>、松井朋裕<sup>A</sup>、福山 寛<sup>A,B</sup>

三角格子など幾何学的なフラストレーションをもつ格子におかれた量子スピン系 ( $S=1/2$ ) の最近接間に反強磁性相互作用が働くとき、絶対零度でも長距離秩序や凍結がない量子スピン液体状態が生まれる。近年、スピン励起にギャップのないギャップレス・量子スピン液体状態 (以下、「スピン液体」) の候補物質が2次元固体ヘリウム3 ( $^3\text{He}$ ) [1]をはじめ多彩な物質系[2]で報告され、注目されている。

我々は、グラファイト表面に低温で物理吸着した単原子層の固体  $^3\text{He}$  の核スピン系の比熱測定からスピン液体相の磁気素励起の正体を探っている。この量子スピン系は、(1) ほぼ完全な2次元系で不純物効果が皆無、(2) 三角格子構造をもつ、(3) 4体あるいは6体までのリング交換相互作用 ( $J_P$ ) が競合する、(4) 低温物性がスピン自由度のみで決まる、など数々の特長をもつ。今回、グラファイト表面を重水素化水素 (HD) 2分子層でプレコートした上に単原子層固体  $^3\text{He}$  試料を作成し、その比熱を  $0.35 \leq T \leq 90$  mK の広い温度範囲で測定した (図1)。この試料 ( $^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ 系) は、先行研究の  $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ 系[3]や  $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{g}$ 系[4]に比べてかなり低密度 ( $5.25 \text{ nm}^{-2}$ ) なたため  $|J_P|$  が大きく、相対的により低温まで測定が可能となった。その結果は、スピンの短距離相関発達に対応する比熱のブロードなピークが 20 mK 付近に一つだけ観測され (図中●)、 $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ 系 (図中○) のダブルピーク構造とは明らかに異なる。また、ピークより低温の広い温度範囲 ( $0.35 \leq T \leq 7$  mK) で比熱は温度の  $2/3$  乗に比例する。比熱データから求めたエントロピー変化はほぼ  $k_B \ln 2$  に等しく (図2)、観測した比熱が純粋にスピン自由度のみを反映していることが分かる。 $2/3$  乗則は、他のスピン液体候補物質で報告されている  $C \propto T$  や、反強磁性スピン波で期待される  $C \propto T^2$  と異なるこれまで報告されたことのない特異な温度依存性であるが、スピノンあるいはマヨラナフェルミオンなど新奇な磁気素励起を仮定する理論予測[5]とは整合する。



[1] H. Fukuyama, JPSJ, **77** 111013 (2008). [4] D. Sato *et al.*, JLTP, **158**, 201 (2010).  
 [2] L. Balents, Nature **464**, 199 (2010). [5] O.I. Motrunich, PRB **72**, 045105 (2005); S.S. Lee and P.A. Lee,  
 [3] K. Ishida *et al.*, PRL, **79**, 3451 (1997). PRL **95**, 036403 (2005); R.R. Biswas *et al.*, PRB **83**, 245131(2011).

# P-03 スピネル型フェライト( $\text{Fe,Ti}$ ) $_3\text{O}_4$ 薄膜の キャリア制御と磁性 Carrier control and magnetic properties of spinel ferrite ( $\text{Fe,Ti}$ ) $_3\text{O}_4$ thin films

工学系研究科 電気系工学/バイオエンジニアリング専攻 田畑研究室  
 山原 弘靖、那須 英和、足立 真輝、高橋 雅尚、関 宗俊、田畑 仁

【はじめに】 ランダムネスとフラストレーションが共存するスピングラスの統計力学的理論はニューラルネットワーク情報工学の分野で広く研究されている[1]。一方、物質としてのスピングラスを脳型メモリに応用した研究は殆どない。スピングラス材料においてキャリアタイプの制御ができれば、半導体デバイスの基本となる pn 接合素子の基礎的要素となりうる。そこで本研究ではマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )に非磁性イオン ( $\text{Ti}^{4+}$ ) を導入することにより、キャリアタイプ制御とスピングラス磁性発現を試みた。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  は逆スピネル構造 ( $\text{A}^{3+}\text{B}^{2+}\text{B}^{3+}\text{O}_4$ ) を取り、B サイトに位置する  $\text{Fe}^{3+}$  ( $S=5/2$ ) と  $\text{Fe}^{2+}$  ( $S=4/2$ ) の間の電子ホッピングにより高い電気伝導率が実現するが、p 型伝導に関する報告は殆ど無い。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  に  $\text{Ti}^{4+}$  を添加すると、電荷補償により  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  が増大し、n 型から p 型伝導へのキャリア制御が実現すると考えられる [2]。一方、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の磁気構造は各イオン間の交換相互作用 ( $|J_{AB}| \gg |J_{BB}| > |J_{AA}|$ ) の関係からフェリ磁性が支配的である。Fe イオンサイトを非磁性イオン ( $\text{Ti}^{4+}$ ) で置換することにより、スピングラス状態が形成されると考えられる。

【実験方法】  $\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  (FTO) 薄膜はパルスレーザー堆積法 (PLD 法) により  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (001)スピネル基板に堆積した。X 線回折(XRD)の結果、(001)配向した FTO 薄膜のエピタキシャル成長を確認している。キャリアタイプは熱起電力測定による Seebeck 係数の符号から判定した。磁気特性は超伝導量子干渉計 (SQUID : 低温センター共同利用装置) を用いて計測した。

【結果と考察】 熱起電力計測の結果 (図 1(a))、Ti 置換量 ( $x$ ) の増加に従い Seebeck 係数が単調に増加し、 $x < 0.75$  で n 型伝導、 $x = 0.8$  で p 型伝導を示すことがわかった。X 線吸収分光の結果、Ti は 4 価の状態 Fe の八面体副格子を置換しており、Fe の形式価数は Seebeck 係数の傾向と同様に Ti 置換に伴って減少しており、設計指針に従った試料の作製を確認した。高 Ti 置換の試料 ( $\text{Fe}_{2.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_4$ ) に対して、磁気特性を詳細に調べた結果、260 K 付近に転移温度をもつクラスタースピングラスの挙動を示すことがわかった (図 1(b))。以上のキャリア制御されたスピングラスの実現は新規脳型メモリ素子への応用が期待される。

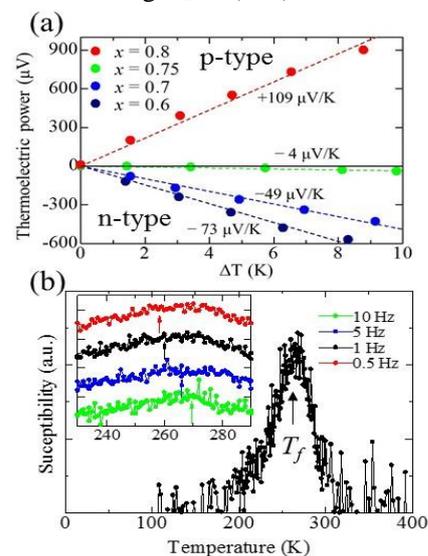


図 1 (a)  $\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  薄膜の熱起電力測定, (b)  $\text{Fe}_{2.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_4$  薄膜の AC 磁化率の温度依存性

[1] K. Binder, A. P. Young, Rev. Mod. Phys. **58** 801 1986.

[2] M. Seki *et al.* Appl. Phys. Lett. **99** 242504 2011.

# P-04 光誘起構造相転移を示す集積型 Co–W オクタシアノ錯体 Cyanido-bridged Co–W bimetal assembly showing photo-induced structural phase transition

理学系研究科 化学専攻 大越研究室

宮本 靖人、尾崎仁亮、梅田喜一、井元健太、所裕子、中林耕二、大越慎一

当研究室では、シアノ架橋型金属錯体に着目し、光磁性などの様々な光機能性を示す物質を報告してきた [1]。例えば、Co–W オクタシアノ金属錯体は照射により  $\text{Co}^{\text{II}}\text{–W}^{\text{V}}$  相と  $\text{Co}^{\text{III}}\text{–W}^{\text{IV}}$  相の間の電荷移動相転移を示し、磁性や色彩が大きく変化する。本研究では、Co–W オクタシアノ錯体  $(\text{H}_5\text{O}_2^+)[\text{Co}^{\text{III}}_6(4\text{-ブロモピリジン})_2[\text{W}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]]$  (**1**) を合成し、大きな体積変化を伴う光誘起相転移現象を観測したので報告する。

**1** は  $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  と 4-ブロモピリジン塩酸塩の混合溶液に  $\text{Na}_3[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  水溶液を滴下して攪拌することで青色粉末試料として得られた。粉末 X 線回折(XRD)測定および Rietveld 解析から、**1** の結晶構造を明らかにした (図 1)。シアノ基によって架橋された Co と W により、二次元レイヤー構造を形成していた。また、層間にはオキソニウムカチオン  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  が挿入されていた。液体ヘリウムを冷媒として用いた超伝導量子干渉素子計により磁化率の温度依存性を測定すると、2 K から 340 K の温度範囲でおよそ  $0 \text{ cm}^3 \text{ K mol}^{-1}$  の値を示した。これより、2 K から 340 K の温度範囲で  $\text{Co}^{\text{III}}\text{–W}^{\text{IV}}$  の電子状態を示すことが明らかとなった。

次に、照射前後での結晶構造の変化を調べた。室温においてナノ秒パルスレーザー光 (波長 800 nm) を **1** に 1 ショット照射したところ、試料の色彩が青色から赤色へと変化した。照射前後での分光測定から、照射により  $\text{Co}^{\text{II}}\text{–W}^{\text{V}}$  相が生成していることが明らかとなった。また、照射前後で XRD 測定を行うと、元のピーク強度が減少して新たなピークが生成していることがわかった (図 2)。Rietveld 解析の結果、照射により約 10% もの体積変化を示すことが明らかとなった。この大きな体積変化は、電荷移動により Co–N の結合距離が大きく変化したことに由来すると考えられる。

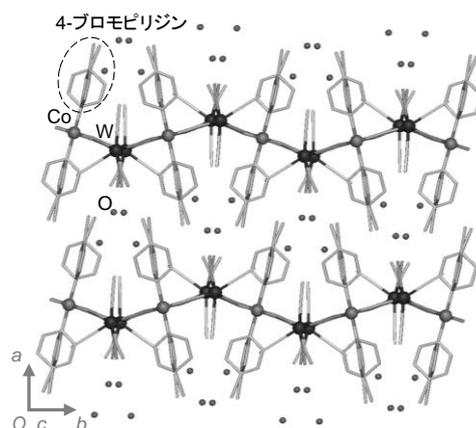


図 1. **1** の結晶構造.

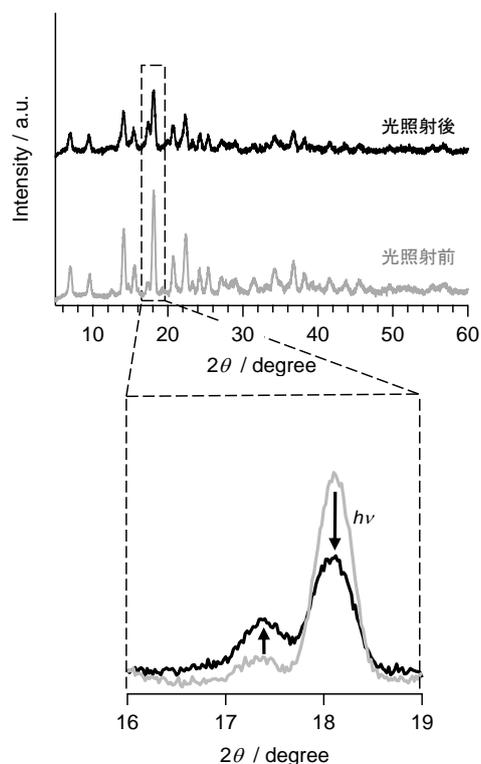


図 2. 照射前後の XRD パターン.

[1] S. Ohkoshi and H. Tokoro, Acc. Chem. Res. **45** 1749 (2012).

## **Ultralow mode-volume photonic crystal nanobeam cavities for high-efficiency coupling to individual carbon nanotube emitters**

**H. Machiya<sup>1</sup>, R. Miura<sup>1</sup>, S. Imamura<sup>1</sup>, A. Ishii<sup>1</sup>, X. Liu<sup>1</sup>, T. Shimada<sup>1</sup>,  
S. Iwamoto<sup>2</sup>, Y. Arakawa<sup>2</sup>, Y. K. Kato<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo**

**<sup>2</sup> Institute of Industrial Science, The University of Tokyo**

The unique emission properties of single-walled carbon nanotubes are attractive for achieving increased functionality in integrated photonics. In addition to being room-temperature telecom-band emitters that can be directly grown on silicon, they are ideal for coupling to nanoscale photonic structures. Here we discuss high-efficiency coupling of individual air-suspended carbon nanotubes to silicon photonic crystal nanobeam cavities [1]. Photoluminescence images of dielectric- and air-mode cavities reflect their distinctly different mode profiles and show that fields in the air are important for coupling. We find that the air-mode cavities couple more efficiently, and estimated spontaneous emission coupling factors reach a value as high as 0.85. We also describe our recent efforts on optimizing the designs of air-mode cavities and their fabrication processes. Our results demonstrate advantages of ultralow mode-volumes in air-mode cavities for coupling to low-dimensional nanoscale emitters.

This work was supported by SCOPE, KAKENHI (24340066, 24654084, 26610080, 26870167), Asahi Glass Foundation, Canon Foundation, KDDI Foundation, as well as the Project for Developing Innovation Systems and the Photon Frontier Network Program of MEXT, Japan. A.I. is supported by MERIT and JSPS Research Fellowship. The devices were fabricated at the Center for Nano Lithography & Analysis at The University of Tokyo.

---

[1] R. Miura, S. Imamura, R. Ohta, A. Ishii, X. Liu, T. Shimada, S. Iwamoto, Y. Arakawa, Y. K. Kato, Nature Commun. **5**, 5580 (2014).

## 熱分解黒鉛シート PGS の物性評価 Characterization of PGS: Pyrolytic Graphite Sheet

低温センター<sup>A</sup>、理学系研究科・物理学専攻・福山研究室<sup>B</sup>  
中村 祥子<sup>A</sup>、宮藤 大輔<sup>B</sup>、藤井 武則<sup>A</sup>、戸田 亮<sup>A</sup>、福山 寛<sup>A,B</sup>

黒鉛は、劈開性、高融点、高熱伝導率などの特徴から、摺動材、るつぼ、熱伝導シートなど多方面で応用される物質である。また、黒鉛塊の層間を化学的手法で引き剥がして内部に大きな吸着面積（2～20 m<sup>2</sup>/g）をもたせた剥離黒鉛は、2次元物質の吸着基板として基礎研究に利用されている[1]。しかし、剥離後の黒鉛微結晶の連結性が悪く、ヘリウム薄膜のトランスポート測定を行う場合、試料のごく一部の超流動密度しか検出できないという問題がある。そこで我々は、ポリイミドフィルムを熱分解して黒鉛化し圧延した厚さ 10～100 μm の柔軟性黒鉛シート (PGS: Pyrolytic Graphite Sheet)[2]の最表面が吸着基板に使えないかと考えた。種々の顕微鏡を使った表面観測、X線構造解析、電気抵抗率測定、等温吸着曲線測定を行った結果、17 μm 厚の PGS は、代表的な剥離黒鉛の Grafoil や結晶性がより高い ZYX より結晶の連結性が優れ、超流動薄膜のトランスポート測定により適した吸着基板であることが分かった。

PGS の面内電気抵抗率は、剥離黒鉛と同様、低温でピークをもつ特異な温度依存性を示す (図 1)。このピークは低温で支配的になる単結晶グラファイト的な正の温度依存性と高温で顕著になるホッピング伝導による負の温度依存性の競合の結果生ずる。17 μm 厚 PGS は、Grafoil、ZYX、100 μm 厚 PGS に比べて最も高いピーク温度 (50 K) と最も低い抵抗率をもつことから、結晶の連結性が良いことが分かる。一方、等温吸着曲線を見ると、整合相形成に由来する substep 構造も含めて、17 μm 厚 PGS は Grafoil と似た微結晶サイズをもつようである (図 2)。観測された比表面積 (≈0.07 m<sup>2</sup>/g) の値から、吸着表面がほぼ最表面だけであることも確認できた。

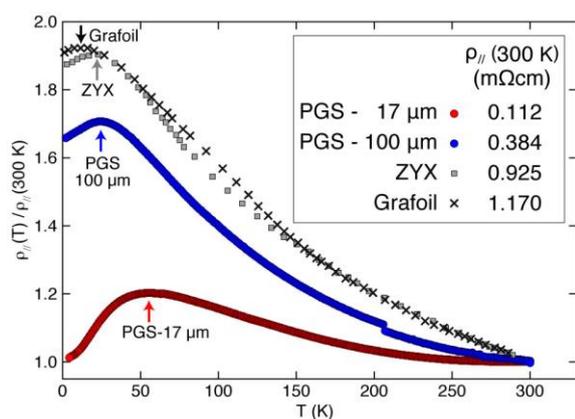


図 1. PGS と剥離黒鉛(Grafoil, ZYX)[1]の面内電気抵抗率の温度依存性。T=300 K の値(凡例内)で規格化。

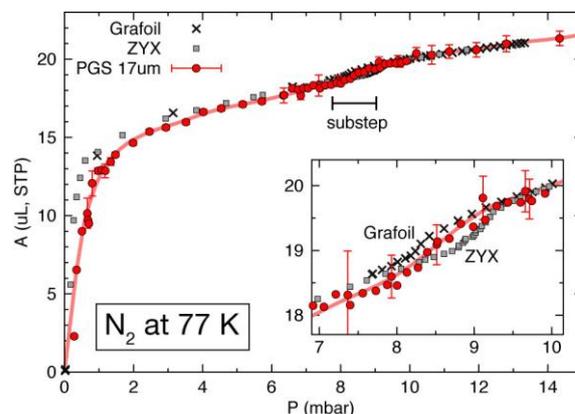


図 2. 17 μm 厚 PGS に対する窒素の等温吸着曲線。×は Grafoil [1]、□は ZYX [3]。挿入図は substep の拡大図。

[1] Y. Niimi, S. Murakawa, Y. Matsumoto, H. Kambara and H. Fukuyama, Rev. Sci. Instrum. **74**, 4448 (2003).

[2] Automotive & Industrial Systems Company, Panasonic Corporation.

[3] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui and H. Fukuyama, J. Low Temp. Phys. **171**, 711 (2013).

# P-07 単層グラフェンにおける非線形テラヘルツファラデー回転 Nonlinear terahertz Faraday rotation in monolayer graphene

理学系研究科・物理学専攻、低温センター・研究開発部門 島野研究室  
湯本 郷、松永 隆佑、島野 亮

炭素原子が蜂の巣上に二次元的に配列した単層グラフェンでは、その電子のバンド分散が低エネルギー領域では結晶運動量に比例して線形分散となる。これは相対論的粒子である質量ゼロ・ディラック粒子が固体電子系で実現されているとみなすことができ、単層グラフェンではその相対論的性質を反映した多くの特異な現象が発現する。顕著な例として、ディラック電子に特徴的な  $\pi$  ベリー位相に由来してホール伝導度が  $e^2/h$  の半整数倍に量子化する（スピン・バレーの自由度は除く）という半整数量子ホール効果が直流応答で観測された。さらに、この現象はテラヘルツ（光学）領域においても半整数量子ファラデー回転として現れ、単層グラフェンを透過したことによる偏光面の回転角（ファラデー回転角）が磁場に依らずディラック電子に特徴的な値で一定となる [1]。また、単層グラフェンではその非線形応答も特異な振る舞いを示すと期待されており、磁場下单層グラフェンに強い静電場を印加するとランダウ準位が崩壊することが理論的に予言されている[2]。

そこで我々はこのランダウ準位崩壊現象が強いテラヘルツ電場に対しても生じるかを検証するため、テラヘルツ時間領域分光法と呼ばれる電場の時間波形が測定可能な手法と、ワイヤーグリッド偏光子を用いた偏光測定法を組み合わせることにより、単層エピタキシャルグラフェンにおけるテラヘルツファラデー回転を測定した。図1は  $B = 1\text{ T}$  での各テラヘルツ電場尖頭値に対するファラデー回転角 ( $\theta_F$ )・楕円率 ( $\eta_F$ ) スペクトルである。 $E_{\text{THz}} \sim 1\text{ kV/cm}$  では線形領域であると考えられ、古典モデルであるドルーデモデルでよく再現される。フィッティングにより、サイクロトロン周波数は  $\sim 10\text{ meV}$  (2.5 THz)と求まる。 $E_{\text{THz}} \sim 6\text{ kV/cm}$  では電場により緩和定数とフェルミエネルギーが大きくなったと考えられるドルーデモデルにより再現できる (図1 青実線)。一方、 $E_{\text{THz}} \sim 25\text{ kV/cm}$  においてはサイクロトロン共鳴構造が観測されず、また高周波数側で  $\theta_F \sim 0\text{ mrad}$ 、 $\eta_F \sim 0$  となりあたかも磁場が消失したように見え、現象論的にもドルーデモデルでは再現できない応答を観測した。

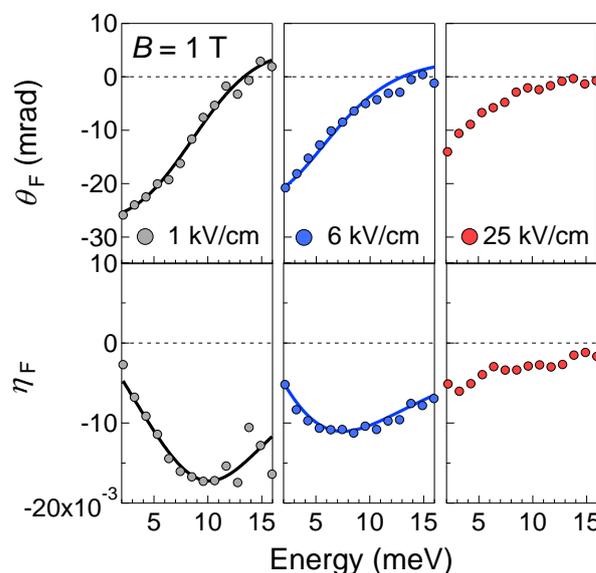


図1:  $B = 1\text{ T}$  におけるファラデー回転角・楕円率スペクトルの電場強度依存性。実線 (1 kV/cm、6 kV/cm)はドルーデモデルによるフィッティング。

[1] R. Shimano, G. Yumoto, J. Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto, and H. Aoki, *Nature Communications* **4**, 1841 (2013).

[2] V. Lukose *et al.*, *PRL* **98**, 116802 (2007).

## P-08 Electric field control of magnetism in Pd/Co/Pt structure

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 絢<sup>1</sup>, 早川 大智<sup>1</sup>, 日比野 有岐<sup>1</sup>, 小山 知弘<sup>1</sup>, 三輪 一元<sup>2</sup>,  
小野 新平<sup>2</sup>, 千葉 大地<sup>1</sup>

We achieved to control magnetism in Pd, which is normally a paramagnetic metal, by changing the electron density of the surface of it through applying gate electric field.

Recently, electric field control of magnetism in ultra-thin ferromagnetic metals has attracted attention in the research field of spintronics [1, 2]. Electrical modulation of electron density at the surface of them plays a main role for achieving it. On the other hand, it is known that the magnetic moment is induced in a layer made of normally a non-magnetic element by contacting it with that of a ferromagnetic transition metal element [3](the ferromagnetic proximity effect). We aimed to control this proximity-induced magnetic moment in Pd by applying gate electric field.

For the observation of the change in the magnetic moment under gating, we deposited MgO/Pd(1.7 nm)/Co( $t_{Co}$ )/Pt(4.1)/Ta from the surface side on an intrinsic Si substrate by rf sputtering. From the separate measurement (Pd thickness dependence of the magnetic moment), the proximity-induced moment was confirmed to reach even to the outermost surface for the present Pd thickness (not shown). We fabricated an electric double layer capacitor structure [2] with an ionic liquid as a gate insulator. A gate voltage  $V_G$  was applied between the bottom Pd and the top nonmagnetic Au electrode through the ionic liquid.

Figure shows the temperature  $T$  dependence of the perpendicular component of the magnetic moment,  $m_{\perp}$ , under the application of  $V_G = 0$  V, +2.0 V, -2.0 V for sample with  $t_{Co} = 0.10, 0.19$  nm (positive  $V_G$  corresponds to the increase of the electron density in the Pd layer). Due to the screening effect, the electron density was expected to be changed only at the outermost atomic layer of the Pd layer. The reproducible result was obtained in similar samples with different  $t_{Co}$ .

This work was supported by Grant-in-aid for Scientific Research (S) from JSPS, the PRESTO program from JST and the Cryogenic Research Center, the University of Tokyo.

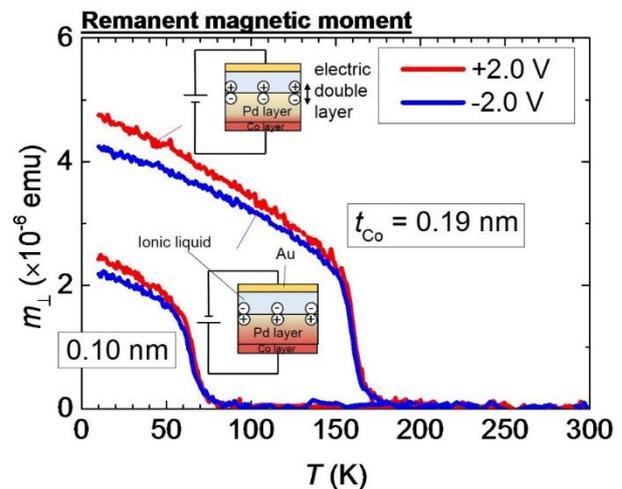


Fig. 1:  $T$  dependence of  $m_{\perp}$  under the application of  $V_G$  of 0 V, +2.0 V, and -2.0 V

[1]D. Chiba *et al.*, *Nature Mater.* **10**, 853 (2011).

[2]K. Shimamura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 122402 (2012).

[3]F. J. A. den Broeder *et al.*, *J. Appl. Phys.* **61**, 4317 (1987).

# P-09 ペロブスカイト型酸窒化物 $\text{SrNbO}_{3-x}\text{N}_x$ の巨大正磁気抵抗 Giant positive magnetoresistance in perovskite oxynitride $\text{SrNbO}_{3-x}\text{N}_x$

東京大学大学院理学系研究科 化学専攻 固体化学研究室  
岡 大地、廣瀬 靖、長谷川 哲也

【序】ペロブスカイト型酸化物  $\text{ABO}_3$  は代表的な酸化物電子材料であり、金属イオンの組成を制御することで多彩な機能が開発されてきた。近年、酸素の一部を窒素で置換したペロブスカイト型酸窒化物  $\text{ABO}_{3-x}\text{N}_x$  (図 1) の合成が可能になり、新奇電子材料として注目を集めている。酸化物への窒素添加はホールドーピングの手法として活用されてきたが、窒素は伝導パスとして働く  $\text{-O-B-O-}$  ネットワーク中に導入されるため、電気物性への構造的な影響も予想される。しかし、酸窒化物は高密度試料の合成が難しいため正確な電気測定ができず、この構造的効果は理解が進んでいない。この課題の解決策として、我々は窒素プラズマ援助パルスレーザー堆積法による高品質なエピタキシャル薄膜の合成に取り組んできた[1,2]。本研究では  $B$  サイト金属として

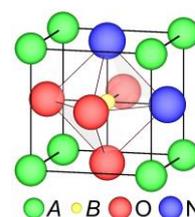


図 1. ペロブスカイト型酸窒化物  $\text{ABO}_2\text{N}$  の単位構造。

柔軟な価電子数を持つ Nb に着目し、一連の  $\text{SrNbO}_{3-x}\text{N}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜を合成し、窒素導入が電気輸送特性に与える影響を詳細に調べた。

【 $\text{SrNbO}_{3-x}\text{N}_x$  薄膜の合成】真空チャンバ内で  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  焼結体を KrF エキシマレーザーによりアブレーションし、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 装置により活性化した窒素と  $\text{KTaO}_3$  単結晶の(100)面上で反応させた。基板温度は  $630^\circ\text{C}$  とし、合成時の ECR 投入電力により窒素含有量  $x$  を制御した。X 線回折測定により、いずれの薄膜も基板上にエピタキシャル成長したペロブスカイト型の結晶であることを確認した。

【電気輸送特性評価】エンドメンバーである  $\text{SrNbO}_3$  は  $10^{-6}$ – $10^{-5} \Omega\text{cm}$  台の低い抵抗率  $\rho$  と金属的な温度依存性 ( $d\rho/dT > 0$ ) を示した。窒素を導入すると抵抗率が徐々に上昇するとともに半導体的な振る舞い ( $d\rho/dT < 0$ ) へと変化していき、 $\text{SrNbO}_2\text{N}$  ( $x = 1.02$ ) は 0 K に向けて抵抗率が発散する絶縁体的挙動を示した (図 2a)。これは  $\text{O}^{2-}$  サイトに導入された

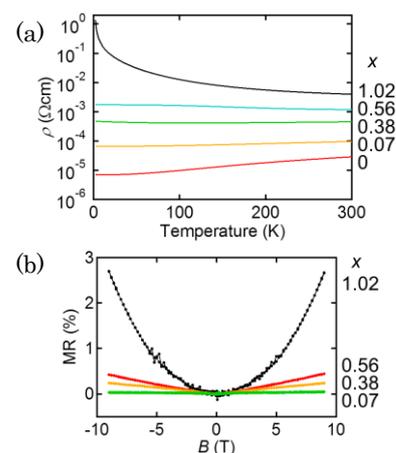


図 2.  $\text{SrNbO}_{3-x}\text{N}_x$  薄膜の (a) 抵抗率の温度依存性および (b) 10 K における磁気抵抗。

$\text{N}^{3-}$  がホールドーパントとして作用し、Nb の価電子数が 1 から 0 に変化したことに起因する。さらに、低温領域では磁場印加による  $\rho$  の上昇が観察された (図 2b)。この正磁気抵抗 (MR) 効果は窒素含有量  $x$  の増加に伴い増大し、 $\text{SrNbO}_2\text{N}$  は 2 K、9 T において 50% の大きな値を示した。 $\text{SrNbO}_2\text{N}$  の低温における抵抗率の挙動が可変領域ホッピングとして説明できることから、 $\text{-O-B-O-}$  ネットワーク中にランダムに導入された窒素がキャリア電子を極度に局在化し、磁場による波動関数収縮効果によって抵抗値が大きく増大したと考えている。酸窒化物の電気伝導において窒素置換による局在化の効果を観察した例は本研究が初めてであり、今後の酸窒化物の電気伝導研究の指標となると期待される。

[1] D. Oka *et al.*, Cryst. Growth Des. 14, 87 (2013). [2] D. Oka *et al.*, Sci. Rep. 4, 4987 (2014).

## P-10 Spin-State Switching in Nanosized Cyanido-Bridged $\{M_9[M'(CN)_8]_6\}$ ( $M = Co, Fe; M' = Re, W$ ) Clusters

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, School of Science

Szymon Chorazy, Robert Podgajny, Koji Nakabayashi, Barbara Sieklucka, Shin-ichi Ohkoshi

Thermal phase transitions related to the spin-state switching of metal centers can be realized by a spin crossover (SCO) phenomenon, or a charge transfer induced spin transition (CTIST) found in some bimetallic mixed-valence materials. Both SCO and CTIST effects can be induced by changes in temperature, or light irradiation, in heterometallic cyanido-bridged coordination systems. In this context, we present a series of cyanido-bridged  $\{M_9[M'(CN)_8]_6\}$  ( $M = Co, Fe; M' = Re, W$ ) molecules revealing thermally induced CTIST and SCO (Figure 1).<sup>[1-3]</sup>  $\{Fe^{II}_9[Re^V(CN)_8]_6\}$  cluster shows the spin crossover phase transition at  $T_{1/2} = 195$  K which occurs selectively for a single  $Fe^{II}$  embedded in the center of a cluster core.<sup>[1]</sup> The analogous  $\{Fe_9[W(CN)_8]_6\}$  reveals the thermal phase transition at  $T_c = 211$  K connected with a charge transfer between Fe and W ions. The  $^{HS}Fe^{II} - W^V$  isomer dominates at high temperatures, and the  $^{HS}Fe^{III} - W^{IV}$  redox pair is observed below phase transition, which results in the unprecedented reversed thermal hysteresis loop in magnetic measurements.<sup>[2]</sup> The addition of  $Co^{II}$  into this topology gives the unprecedented trimetallic  $\{Fe_6Co_3[W(CN)_8]_6\}$  cluster which combines the thermally induced  $Fe^{II/III} - W^{IV/V}$  charge transfer with the charge transfer induced spin transition (CTIST) phenomenon between  $^{HS}Co^{II} - W^V$  and  $^{LS}Co^{III} - W^{IV}$  electronic isomers dominated at high and low temperatures, respectively.<sup>[3]</sup> The whole series of mixed trimetallic  $\{Fe_xCo_{9-x}[W(CN)_8]_6\}$  ( $x = 1 - 8$ ) clusters show the strong dependence of the transition temperature and the size of related thermal hysteresis loop on the ratio between two different 3d metal ions.

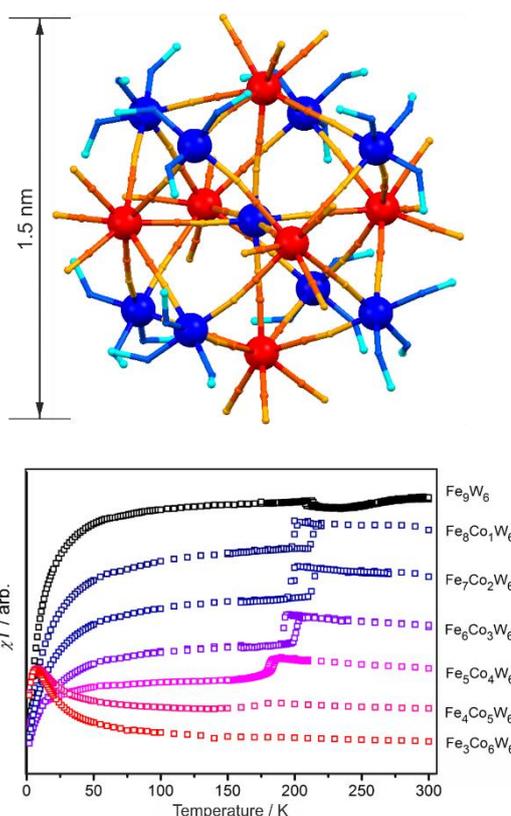


Figure 1. The structure of  $\{M^{II}_9[M'^V(CN)_8]_6\}$  ( $M = Co, Fe$  - blue balls;  $M' = Re, W$  - red balls) cluster, and magnetic characteristics for mixed  $\{Fe_xCo_{9-x}W_6\}$  series.

[1] S. Chorazy, R. Podgajny, K. Nakabayashi, J. Stanek, M. Rams, B. Sieklucka and S. Ohkoshi, *Angew. Chem. Int. Ed.* doi: 10.1002/anie.201500288 (2015). [2] S. Chorazy, R. Podgajny, W. Nogas, W. Nitek, M. Kozieł, M. Rams, E. Juszyńska-Gałązka, J. Żukrowski, C. Kapusta, K. Nakabayashi, T. Fujimoto, S. Ohkoshi and B. Sieklucka, *Chem. Commun.* **50** 3484 (2014). [3] R. Podgajny, S. Chorazy, W. Nitek, M. Rams, A. M. Majcher, B. Marszałek, J. Żukrowski, C. Kapusta and B. Sieklucka, *Angew. Chem. Int. Ed.* **52** 896 (2013).

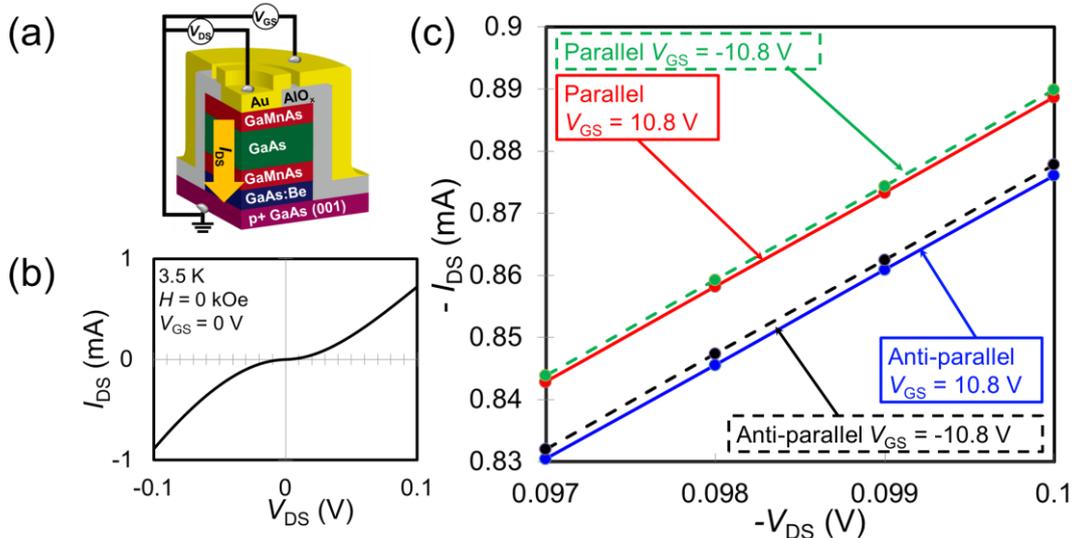
# GaMnAs を用いた縦型スピン MOSFET の作製、及び そのスピン依存伝導特性の評価

工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢研究室  
金木俊樹、浅原弘勝、大矢忍、田中雅明

強磁性体をソース・ドレイン電極とする MOS 電界効果トランジスタ(スピン MOSFET[1])は微細化によらない MOSFET の性能向上手法として精力的に研究されている。現在まで、面と平行に電流が流れる平面型構造の MOSFET のソースとドレインに MnAs[2]や Fe/MgO[3]を用いたスピン MOSFET の動作が報告されている。しかし、磁気抵抗比は非常に低く、より大きな磁気抵抗比を有したスピン MOSFET が求められている。そこで我々は、Figure 1 に示すように膜面に垂直に電流が流れる縦型スピン MOSFET 構造を作製した。ソース、及びドレインの強磁性材料として強磁性半導体 GaMnAs を採用した。GaMnAs は GaAs と良好なヘテロ接合を形成しかつ磁気抵抗効果を示すことが報告されており[4]、側面から GaAs にゲート電界を印加することによってスピン MOSFET として動作することが期待される。

低温分子線エピタキシー法により、 $\text{Ga}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{As}$  (20 nm) / GaAs (9 nm) /  $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$  (20 nm) / GaAs:Be (50 nm) / p+GaAs (001) からなる磁気トンネル接合を成長した。フォトリソグラフィとウェットエッチングにより直径 200  $\mu\text{m}$  の円柱形に加工し、原子層堆積法により 150°C で  $\text{AlO}_x$  を 27 nm 成膜した。コンタクトホールを形成した後、金電極を蒸着した。作製したデバイスの模式図を Figure 1 に示す。磁気トンネル接合上部電極、下部電極、円柱側面をそれぞれドレイン、ソース、ゲートと定義し、ソースを接地した。3.5 K において、上部磁性層及び下部磁性層の磁化が平行及び反平行の状態、ゲート電圧  $V_{\text{GS}}$  を印加しながらソース・ドレイン電流  $I_{\text{DS}}$  のソース・ドレイン電圧  $V_{\text{DS}}$  依存性を測定した。Figure 2 に  $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$  における  $I_{\text{DS}} - V_{\text{DS}}$  特性を示す。トンネル伝導を示唆する非線形な電流電圧特性が観測された。Figure 3 に  $V_{\text{DS}} = -0.1 \text{ V}$  付近における  $I_{\text{DS}} - V_{\text{DS}}$  特性の磁化状態及び  $V_{\text{GS}}$  依存性を示す。 $I_{\text{DS}} - V_{\text{DS}}$  特性を磁化状態及び  $V_{\text{GS}}$  によって制御することに成功した。

謝辞：貴重なアドバイスと絶縁膜形成にご協力いただいた千葉大地先生、小山知弘先生（東大物工）、高木信一先生、竹中充先生（東大電気系）に感謝いたします。本研究は、科学研究費(No. 23000010, No. 26249039)、先端融合 COE、MERIT の援助を受けた。



**Figure 1**(a) Schematic illustration of the device structure. The actual device has a cylindrical shape. (b) The source-drain current  $I_{\text{DS}}$  as a function of  $V_{\text{DS}}$  at  $V_{\text{G}} = 0$ . (c) The source-drain voltage ( $-V_{\text{DS}}$ ) dependence of  $-I_{\text{DS}}$  with different magnetization configuration and  $V_{\text{GS}}$  around the  $-V_{\text{DS}}$  of 0.1 V. All the data were obtained at 3.5 K.

文献：[1] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **84**, 2347 (2004). [2] R. Nakane *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 113001 (2010). [3] T. Sasaki *et al.*, Phys. Rev. Applied **2**, 034005 (2014). [4] D. Chiba *et al.*, Physica E **21**, 966 (2004).

## Fe ultrathin films on a cleaved GaAs surface

理学系研究科・物理学専攻・岡本研究室

北垣 育大、柘富 龍一、岡本 徹

電子局在と強磁性の関連を調べるため、低温真空中で劈開したGaAs表面に急冷蒸着させる手法[1]により形成した2種類の膜厚(2 MLと6 ML)のFe超薄膜に対し電気伝導測定を行った。

いずれの膜厚においても異常Hall効果が観測され、2 MLにおいても強磁性を示すことがわかった。Hall角は、Feの膜に対するどの先行研究[2]よりも大きな値となった。2 ML膜では6 ML膜に比べて弱い磁場で抵抗が飽和したが(図1)、これは6 MLが反磁場に由来する面内異方性をもつものに対して、2 ML膜がそれを上回る面直方向の磁気異方性をもつと考えると説明できる。また2 ML膜ではHall抵抗にヒステリシスが観測された。

2 ML膜では負の、6 ML膜では正の磁気抵抗効果が観測された。これは我々のものよりも平坦性が悪い基板を用いた先行研究[3]と完全に矛盾する結果である。なお、磁気抵抗効果は面内磁場に対しても観測された。

縦抵抗および異常Hall抵抗は温度の対数に比例して変化するが(図2)、 $\ln T$ の係数は過去の研究[4]に比べて大きい。

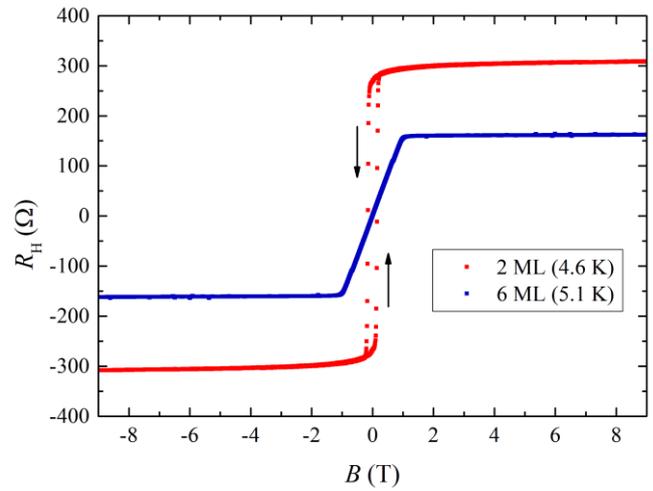
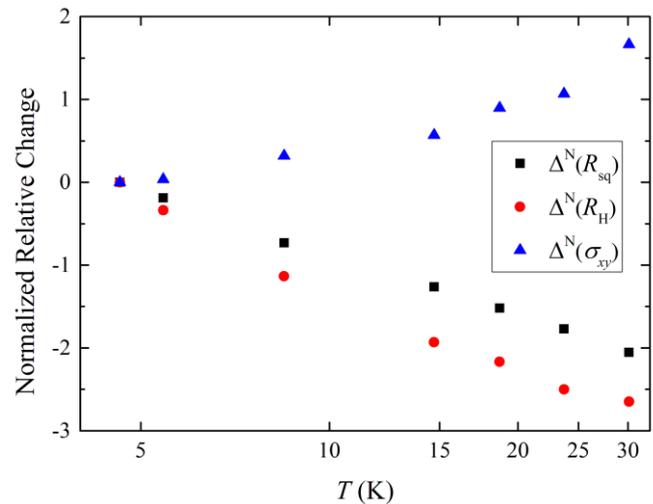


図1. Fe膜の異常Hall効果。

図2. 縦抵抗と異常Hall抵抗の $\ln T$ 依存性。[1] T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto, *Physical Review Letters* **111**, 057005 (2013).[2] S. Sangiao *et al.*, *Physical Review B* **79**, 014431 (2009).[3] N. Kurzweil, E. Kogan, A. Frydman, *Physical Review Letters* **102**, 096603 (2009).[4] P. Mitra *et al.*, *Physical Review Letters* **99**, 046804 (2007).

P-13

# ノンシンモルフィック導電体 $\text{IrO}_2$ における キャリアタイプの磁場スイッチング Field-Direction Switching of A Type of Charge Carriers in Non-symmorphic $\text{IrO}_2$

工学系研究科 物理工学専攻 川崎研究室<sup>1</sup>,  
理化学研究所 創発物性科学研究センター<sup>2</sup>

打田 正輝<sup>1</sup>, 佐野 航<sup>2</sup>, 高橋 圭<sup>2</sup>, 是常 隆<sup>2</sup>, 小塚 裕介<sup>1</sup>, 有田 亮太郎<sup>2</sup>,  
十倉 好紀<sup>1</sup>, 川崎 雅司<sup>1,2</sup>

Band structure and its filling are fundamental factors determining electronic features in materials. The energy band is directly affected by some interactions such as electron correlation or spin-orbit coupling, which can give rise to distinct electronic phases depending on the band filling. Here we consider the electronic structures from a standpoint of the space group, especially unique dispersions and derived functions of non-symmorphic materials, which possess symmetry operations of screw rotation or glide mirror. The non-symmorphic crystals have been theoretically reexamined in recent years for possible non-trivial phases relevant to the non-symmorphic crystalline symmetry [1,2]. The non-symmorphic symmetry operations stick bands together and provide accessional degeneracies at high symmetry points, resulting in highly anisotropic folded Fermi surfaces near the Brillouin zone boundary. Therefore, a dominant type of charge carriers (electron or hole) is expected to be strongly dependent on the crystal orientation or capable of being switched by external stimuli.

Here we prepare non-symmorphic  $\text{IrO}_2$  single-crystalline films with various growth orientations by molecular beam epitaxy method, and systematically quantify their Hall effect for the corresponding field directions. The results clearly demonstrate that the carrier type can be intrinsically switched by controlling the field direction, as also evidenced by first-principles calculations showing nontrivial momentum dependence of the group velocity and mass tensor on the folded Fermi surfaces and its anisotropic nature for the field direction.

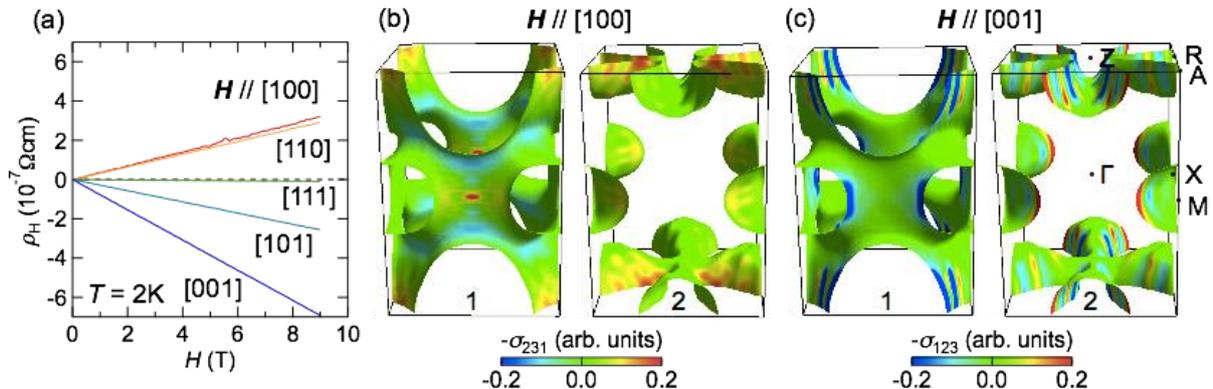


Fig. (a) Field-direction dependent Hall resistivity and (b),(c) calculated  $\sigma_{\alpha\beta\gamma}$  contribution on two Fermi surfaces.

[1] S. A. Parameswaran, A. M. Turner, D. P. Arovas, and A. Vishwanath, Nat. Phys. **9**, 299 (2013).

[2] C.-X. Liu, R.-X. Zhang, and B. K. VanLeeuwen, Phys. Rev. B **90**, 085304 (2014).

# P-14      ガンマ型五酸化三チタンとデルタ型五酸化三チタンの相転移に関する研究

## Phase transitions of $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$ and $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$

理学系研究科化学専攻大越研究室

奈須義総、田中研二、宮本靖人、尾崎仁亮、田中宗、永田利明、箱江史吉、吉清まりえ、中川幸祐、梅田喜一、井元健太、所裕子、生井飛鳥、大越慎一

【緒言】チタン 3 価 ( $\text{Ti}^{3+}$ ,  $3d^1$ ,  $S=1/2$ ) を含む酸化チタンは、その d 電子により黒色を示し、金属-半導体転移などの相転移を示す物質が多い。 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  は低温で  $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  に相転移するが、 $\delta$  相の原子座標、電気伝導度、光学特性など、その物性はほとんど知られていなかった。本研究では、 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  および  $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  について、原子座標、電気伝導度、光学特性を明らかにし、第一原理計算を用いてその相転移について議論したので報告する！。

【実験および結果】合成は、二酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ ) を水素気流中で還元焼成することにより行った。粉末 X 線回折から得られた試料は室温において単斜晶系  $I2/c$  の  $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  であることがわかった。温度を下げていくと、240 K 以下で 51.6°、52.2° などに新しいピークが現れ、構造相転移したことがわかった。150 K の XRD パターンをリートベルト解析した結果、単斜晶系  $P2/a$  の、より低い対称性をもつ  $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  に相転移することがわかり、また、原子座標の決定に成功した(図 1)。電気伝導度の温度依存性は四端子法を用いて行った(図 2)。 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  (320 K) では  $4.7 \text{ S cm}^{-1}$  と比較的高い伝導度を示したが、温度を下げていくと 240 K 付近で急激な伝導度の減少が観測された。 $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  (70 K) では  $2.5 \times 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$  と低い電気伝導度を示し、 $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  が半導体相であることを示唆した。赤外分光(IR)測定の結果、 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  (300K) は赤外領域において平らな高い吸収を示した。温度を下げて IR 測定を行うと、 $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  (150 K) では 0.4 eV 以下の低エネルギー領域での吸収が減り、バンドギャップが 0.07 eV の半導体であることが示唆された。超伝導干渉素子計を用いた磁化率の温度依存性測定からは、 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  はパウリ常磁性であり、 $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  は非磁性であることが示唆された。これら電気伝導度測定、IR 測定、磁化率測定は、低温センターから供給して頂いた寒剤を用いて実験を行った。第一原理計算からは、 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  でフェルミエネルギーにおいて閉じていた状態密度が、 $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  では上部ハバードバンドと下部ハバードバンドに分裂することが分かった。 $\gamma$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  から  $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  に相転移することに伴い、電荷密度図から伝導パスが途切れることが示唆され、この相転移がモット・ハバード型金属-半導体相転移であることが示唆された。

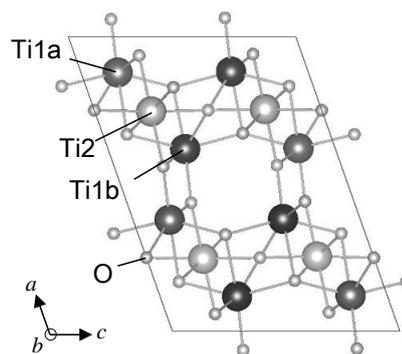


図 1.  $\delta$ - $\text{Ti}_3\text{O}_5$  の結晶構造.

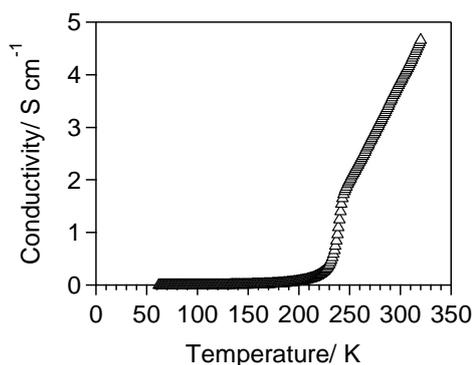


図 2. 電気伝導度の温度依存性.

[1] K. Tanaka, T. Nasu, Y. Miyamoto, N. Ozaki, S. Tanaka, T. Nagata, F. Hakoe, M. Yoshikiyo, K. Nakagawa, Y. Umeta, K. Imoto, H. Tokoro, A. Namai, S. Ohkoshi, *Cryst. Growth Des.*, 15, 2, 653, (2015).

# P-15 Magneto-optical and magneto-transport characteristics of heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering & Information Systems, The University of Tokyo.

<sup>2</sup>Department of Physical Electronics, Tokyo Institute of Technology.

°Nguyen Thanh Tu,<sup>1</sup> Pham Nam Hai,<sup>1,2</sup> Le Duc Anh,<sup>1</sup> and Masaaki Tanaka<sup>1</sup>

For more than two decades, most of the studies on III-V based ferromagnetic semiconductors (FMSs) have been concentrated on Mn-doped FMSs, such as (In,Mn)As and (Ga,Mn)As. However, the maximum Curie temperature  $T_C$  of (Ga,Mn)As (200 K) and (In,Mn)As (90 K) are still much lower than room temperature despite their high hole densities ( $10^{20}$ - $10^{21}$  cm<sup>-3</sup>) [1,2]. Furthermore, there has been a dispute on the band structure and the origin of ferromagnetism. Recently, we have successfully grown a new p-type Fe-doped FMS (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb ( $x = 3.9 - 13.7\%$ ) thin films by low-temperature molecular beam epitaxy (LT-MBE). (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb ( $x = 3.9 - 13.7\%$ ) is an intrinsic FMS and has zinc-blende-type crystal structure with spin split band structure. In particular,  $T_C$  (140 K) of (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb at  $x = 13.7\%$  is the highest in narrow gap III-V FMSs, indicating that (Ga,Fe)Sb is promising for high- $T_C$  FMS [3]. In this paper, we present the magneto-optical and magneto-transport properties of heavily Fe-doped (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb with  $x = 17\%$  and  $20\%$  grown by LT-MBE. Figure 1(a) shows the MCD spectra of our (Ga,Fe)Sb samples at 5 K with a magnetic field of 1 T applied perpendicular to the film plane. For a reference, we also show the MCD spectrum of an undoped GaSb, in which the MCD intensity is very small. In contrast, the MCD spectra of (Ga,Fe)Sb show strongly enhanced peaks at  $E_1$  (2.19 eV) and  $E_1 + \Delta_1$  (2.63 eV), corresponding to the optical critical point energies of the GaSb band structure [4,5]. Furthermore, we see no broad background which would be observed if metallic Fe nanoclusters existed. This result indicates that heavily Fe-doped (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb ( $x = 17\%$  and  $20\%$ ) still maintains the zinc-blende crystal structure with large spin-split band structure due to the s,p-d exchange interaction. Figures 1(b) and 1(c) show the MCD- $H$  characteristic and anomalous Hall effect (AHE), respectively, of the sample with  $x = 20\%$  at various temperatures. Clear hysteresis was observed at low temperature, demonstrating the presence of ferromagnetic order. The hysteresis disappears at 300 K, indicating that the sample does not contain superparamagnetic Fe nanoclusters. Furthermore, the obtained  $T_C$  (230 K) of Ga,Fe)Sb ( $x = 20\%$ ) is the highest value reported in III-V FMSs so far. Our results open up a new possibility for room temperature FMS.

This work was supported by Grant-in-Aids for Scientific Research including the Specially Promoted Research and the Project for Developing Innovation Systems of MEXT.P.N.H. acknowledges the support from the Murata Science Foundation, and L.D.A. acknowledges the JSPS Fellowship for Young Scientists and a Grant-in-Aid for Scientific Research No. 257388.

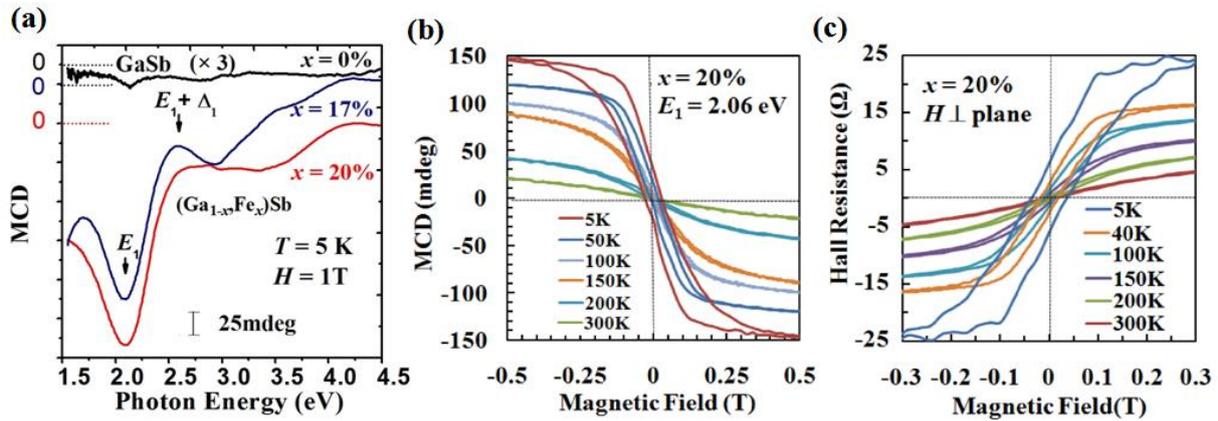


Fig. 1.(a) Reflection MCD spectra measured at 5 K under a magnetic field of 1 Tesla applied perpendicular to the film plane for samples with  $x = 17\%$  and  $20\%$ . MCD spectrum of a reference undoped GaSb sample is also shown. (b) MCD- $H$  characteristics and (c) Hall resistance of the (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb sample with  $x = 20\%$  at various temperatures.

## 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] N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **105**, 132402 (2014).
- [4] R. R. L. Zucca, Y. R. Shen, Phys. Rev. B. **1**, 2668 (1970).
- [5] D. E. Aspnes, C. G. Olson and D. W. Lynch, Phys. Rev. B. **14**, 4450 (1976).

## 高周波電磁波吸収特性を示すインジウム置換型 イプシロン酸化鉄

### High-frequency electromagnetic wave absorption properties of indium-substituted epsilon iron oxide

理学系研究科、化学専攻、大越研究室  
吉清まりえ、生井飛鳥、大越慎一

イプシロン型酸化鉄 ( $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )は自然界では見られない希少な酸化鉄の多形であり、その物性は知られていなかったが、2004年に当研究室で単相合成に初めて成功し、この物質が室温において20 kOeという巨大な保磁力を示すことを見出した[1]。また、 $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ は182 GHzという高周波の電磁波を吸収し、その磁気特性や電磁波吸収特性は $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ のFeイオンを他の金属イオンで置換することにより、幅広く制御できることを報告している[2]。本発表では、インジウム置換型 $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\epsilon$ - $\text{In}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ )について磁気特性及び電磁波吸収特性における金属置換効果を調べたので報告する[3]。

$\epsilon$ - $\text{In}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ の合成には、逆ミセル法とゾルゲル法とを組み合わせた手法を用い、FeとIn原料の割合を変えることにより $x=0, 0.04, 0.09, 0.13, 0.18$ の五種類の試料を得た。結晶構造はいずれも斜方晶系の結晶構造であり、四種類あるFeサイトのうち、Inイオンは特にBサイトを選択的に置換する傾向が見られた(図1a)。また、透過型電子顕微鏡(TEM)像から、得られた試料はいずれも球形のナノ微粒子であることがわかった(図1b)。磁化測定の結果、In置換に伴い保磁力は21.9 kOe ( $x=0$ )から5.9 kOe ( $x=0.18$ )まで減少し、また、テラヘルツ時間領域分光法により測定した電磁波吸収特性では、吸収周波数が182 GHz ( $x=0$ )から110 GHz ( $x=0.18$ )まで減少した(図1c)。このような振る舞いは、 $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の磁気異方性を担っているとされるBサイトのFeイオンを、非磁性のInイオンで置換したことにより磁気異方性が低下したことに起因していると考えられる[4]。

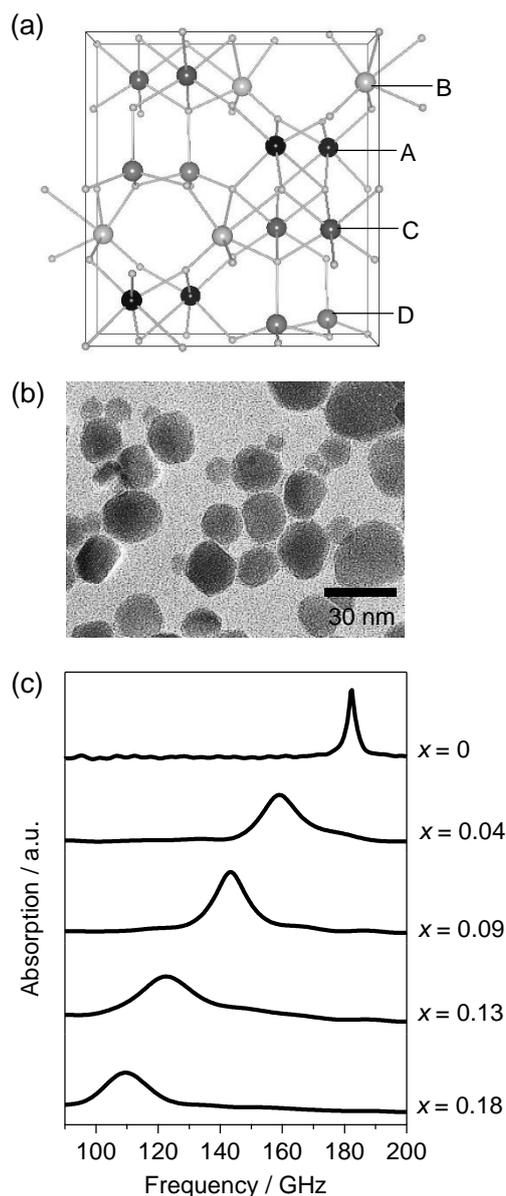


図 1. (a)  $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の結晶構造。(b)  $\epsilon$ - $\text{In}_{0.18}\text{Fe}_{1.82}\text{O}_3$  の TEM 像。(c)  $\epsilon$ - $\text{In}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  の電磁波吸収スペクトル。[3]

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

[2] S. Ohkoshi and H. Tokoro, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 86, 897 (2013).

[3] M. Yoshikiyo, A. Namai, M. Nakajima, K. Yamaguchi, T. Suemoto, and S. Ohkoshi, *J. Appl. Phys.*, 115, 172613 (2014).

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

## P-17 リンパ節探索用磁気プローブの開発及び磁性流体蓄積量の測定

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻関野研究室

大久保哲 塩澤幹雄 井上雄介 キムドンミン

大崎博之 益子裕介 日下部守昭 関野正樹

乳がんの治療では、転移の有無を判定するために、リンパ節を探索して組織学的に検査する必要がある。従来の探索法では放射性同位体が用いられるため、法規制などにより使用できる病院が制限されている。このような問題を解決するために我々は、リンパ系に磁性流体を投与し、リンパ節に蓄積した磁性流体を検知することでリンパ節の位置を特定するためのプローブを開発している。これまでに、数値解析と実験によって最適な設計を行い、その結果に基づいて機器を開発し、臨床評価も進めている[1]。開発したリンパ節探索用磁気プローブを図1に示す。磁気プローブの先端は非磁性のシャフトの先端に小型磁気センサを取り付けており、その周りに円筒形の永久磁石を取り付けている。小型磁気センサは、中心軸上の磁束密度がゼロになる点に置いた。磁性流体を検出する原理は、まず磁気プローブに磁性流体が近づくと永久磁石により磁性流体が磁化される。磁性流体が磁化されると、小型磁気センサの周りの磁束密度が変化する。これを磁気センサで検出することによって、磁性流体を検知可能としている。臨床評価では磁性流体注入部とリンパ節上で、センサ出力の変化が観測され、磁気プローブによる磁性流体の検出に成功した。さらに、低温センターのSQUID磁化測定装置を利用して、摘出したリンパ節と磁性流体5  $\mu\text{L}$ 、10  $\mu\text{L}$ の三つの試料に対して磁化率測定を行った。その結果を図2に示す。測定したリンパ節試料は全体積の半分であるため、リンパ節内に蓄積した磁性流体量は約8  $\mu\text{L}$ 相当であることが分かった。

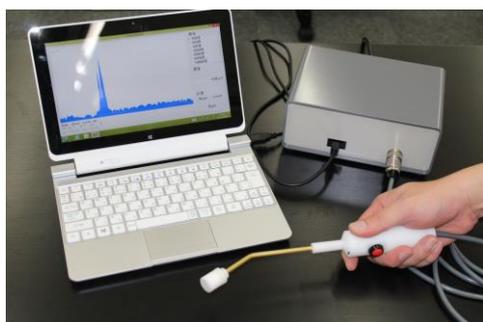


図1. リンパ節探索用磁気プローブ

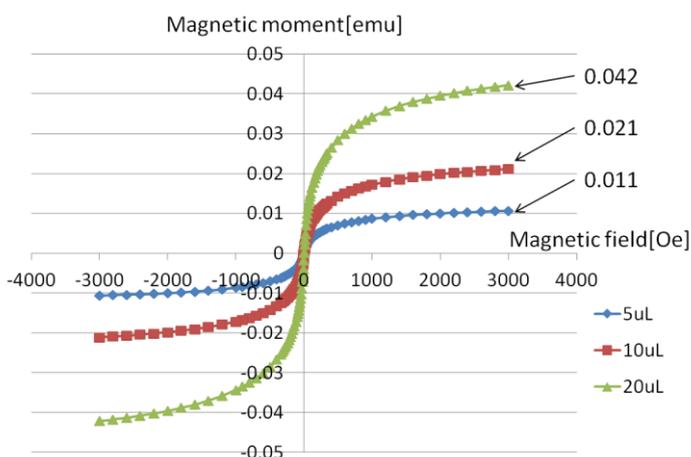


図2. 摘出したリンパ節の磁化特性

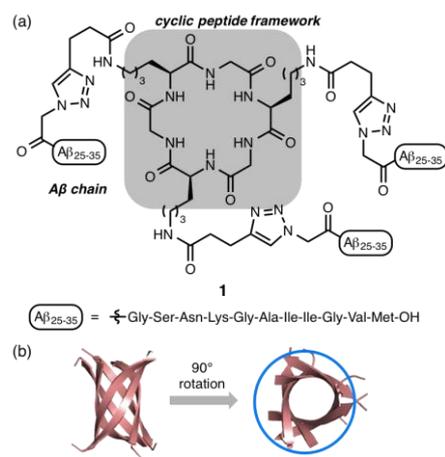
[1] 大久保哲, 井上雄介, キムドンミン, 大崎博之, 益子裕介, 日下部守昭, 関野正樹:「がん転移に關与するリンパ節を特定するための磁気プローブの開発」, 電気学会マグネティックス医用・生体工学合同研究会資料, MAG-12-125, MBE-12-94 (2012)

Chemical Synthesis of Amyloid β Trimer toward Mechanism  
Investigation of Alzheimer Disease<sup>1</sup>薬学系研究科・薬科学専攻・有機合成化学教室, <sup>2</sup>JST-ERATO篠田 清道<sup>1</sup>, 相馬 洋平<sup>1,2</sup>, 金井 求<sup>1,2</sup>

【背景】アミロイドは、様々な疾患に関与する凝集性タンパク質である。その一種であるアミロイドβ (Aβ)は、アルツハイマー病に関与するとされる40残基程度のペプチドである。種々の凝集体の中で特にオリゴマーの神経毒性が強いとされているため、真に有効な創薬標的はオリゴマーであると考えられている。しかしAβの高い凝集性ゆえ、生化学的手法では凝集混合物から所望のオリゴマーを化学的に純粋な形(二量体のみ、三量体のみ、など)で単離することはできない。もし化学的に純粋なオリゴマーが得られれば、よりクリアな性質解析が可能になる。そこで我々は、所望のAβオリゴマーを有機化学的に合成し、化学的に純粋な形で単離した上で、その性質解析を行うことを計画した。

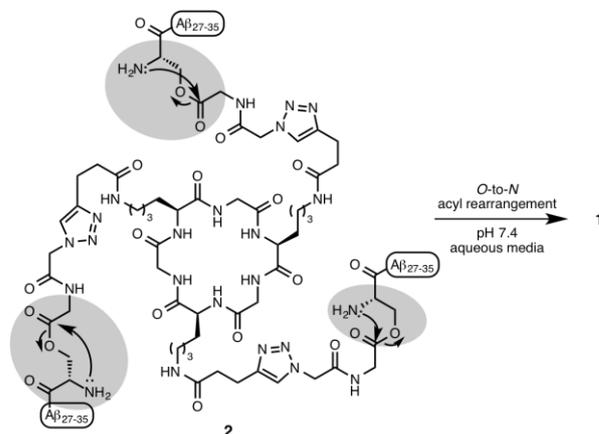
【設計】アミロイドオリゴマーは一般に、β-バレル構造を共通構造として有すると考えられている[1]。β-バレル構造内の各ペプチド鎖が仮想的な環状骨格との共有結合により連結することに着目し(Figure 1b), 我々は、環状ペプチド骨格にAβ部分配列Aβ<sub>25-35</sub>を結合させた化学連結型Aβ<sub>25-35</sub>三量体**1**を設計した(Figure 1a)。

【結果・考察】ペプチド固相合成と引き続きヒュスゲン環化反応により、**1**の高水溶性前駆体**2**を合成した。**2**は生理的条件下に付すことで定量的に**1**へと変換された(Scheme 1)。本系を用いて**1**の性質評価を行ったところ、**1**は対応する単量体Aβ<sub>25-35</sub>と比べて高い凝集性および細胞毒性を示した。この結果は、**1**が凝集中間体たるネイティブのAβオリゴマーの性質そのものを反映していることを示唆している。すなわち我々は、**1**を用いることで、化学的に純粋なAβ<sub>25-35</sub>三量体を起点とする凝集・毒性発現を初めて捉えることに成功したと言える。本研究成果は、化学的に純粋なAβオリゴマーを基盤としてAβの毒性本体を解明するための第一歩であると考えられる。

[1] A. Laganowsky *et al.*, *Science* **2012**, 335, 1228–31.

**Figure 1.** (a) 化学連結型Aβ<sub>25-35</sub>三量体の構造。(b) αBクリスタリン部分配列六量体の結晶構造およびこれを90°回転させたもの。ペプチド鎖を結合させる仮想的な環状骨格を円で示した。

## Scheme 1.



# P-19 タンパク質三量体による G タンパク質共役型内向き整流性カリウムチャンネル活性制御機構の構造生物学的解明

## Structural elucidation of the regulation mechanism of G protein-gated inwardly rectifying potassium channel by G protein

薬学系研究科 生命物理化学教室

加納 花穂、外山 侑樹、岩橋 優太、間瀬 瑠子、横川 真梨子、大澤 匡範、嶋田 一夫

G タンパク質共役型内向き整流性カリウムチャンネル (GIRK) は、四量体として機能し、膜の興奮性を抑制することで心拍数の制御などを担う。G タンパク質共役型受容体 (GPCR) のリガンド刺激により G タンパク質ヘテロ三量体 ( $G\alpha\beta\gamma$ ) が解離して生じた  $G\beta\gamma$  が、GIRK の細胞内領域に結合することにより GIRK は開口する。一方、GPCR のリガンド刺激非存在下においても GIRK は基底電流を生じており、その大きさは生理的環境下では過度の膜興奮性の低下を防ぐために抑制性の制御を受けている[1]。この基底電流の抑制 (priming) は、 $G\alpha\beta\gamma$  が GIRK に直接結合することで生じることが示唆されているが、その分子機構は不明である。そこで本研究では、NMR 法を用いて  $G\alpha\beta\gamma$  と GIRK 細胞内領域の相互作用様式を明らかにし、priming の構造機構を解明することを目的とした。

GIRK 上の  $G\alpha\beta\gamma$  結合部位を明らかにするため、マウス GIRK1 細胞内領域 (残基番号 41-63,190-386; GIRK<sub>CP</sub>) を観測対象とした  $G\alpha\beta\gamma$  との転移交差飽和 (TCS) 実験を行った。 $G\alpha\beta\gamma$  結合部位の NMR シグナルには顕著な強度減少が生じるが、20.9 %以上の強度減少を示した 15 残基は GIRK<sub>CP</sub> の 2つのサブユニットにまたがって位置したことから、この部位で  $G\alpha\beta\gamma$  と GIRK<sub>CP</sub> が直接結合することがわかった (図 2. A)。また、GIRK<sub>CP</sub> に  $G\alpha\beta\gamma$  を添加した際、 $G\alpha\beta\gamma$  の直接の結合もしくは結合に伴う構造変化により化学シフト変化する残基には、顕著なシグナル強度減少が生じる。 $G\alpha\beta\gamma$  を 13 当量添加時、45.0 %以上の強度減少を示した 22 個の残基 (図 2. B) は TCS 実験より同定した  $G\alpha\beta\gamma$  結合部位に加えて、結合部位から離れたサブユニット界面および  $\beta$ H- $\beta$ I ループに存在したことから、 $G\alpha\beta\gamma$  結合に伴いサブユニット界面および  $\beta$ H- $\beta$ I ループに構造変化が生じることが示唆された。特に  $\beta$ H- $\beta$ I ループはイオン透過路開閉に関わることから、priming は、 $G\alpha\beta\gamma$  の結合による GIRK サブユニット相対配置および  $\beta$ H- $\beta$ I ループ構造の変化に起因することが示唆された。

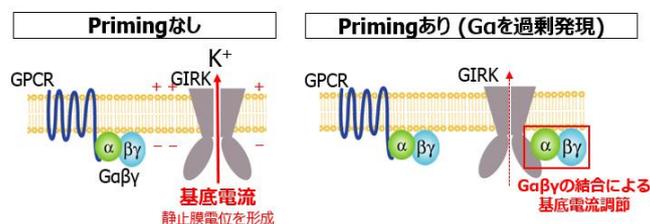


図 1.  $G\alpha$  を発現させた細胞では基底電流が抑制される (priming)

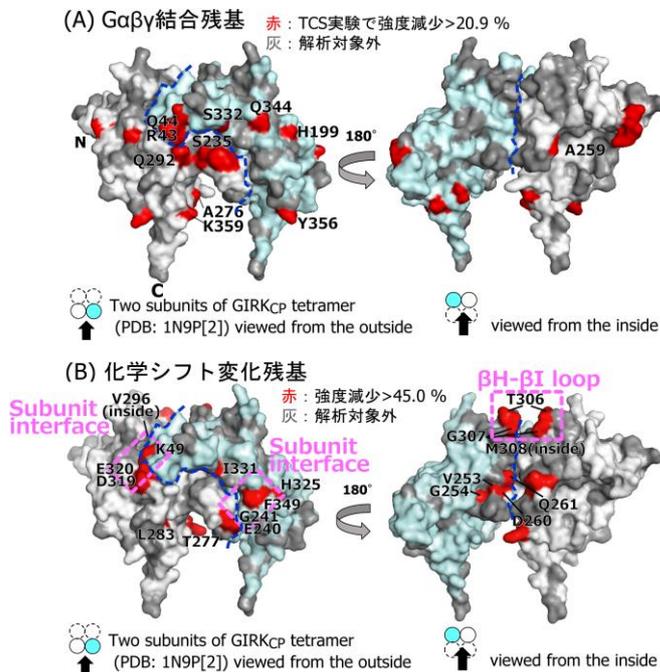


図 2. GIRK<sub>CP</sub> 分子上の(A) $G\alpha\beta\gamma$  結合残基および (B)化学シフト変化残基のマッピング

[1] M. Rubinstein *et al.*, J. Physiol. **581.1** 17 (2007) [2] M. Whorton & R. MacKinnon, Cell **147** 199 (2011)

# P-20 表面弾性波を用いた量子もつれ電子対の分離

## Entangled electron-pair splitting using surface acoustic wave

工学系研究科・物理工学専攻・樽茶研究室

伊藤諒 高田真太郎 山本倫久 C. Bauerle A.D.Wieck 樽茶清悟

低温環境中の電子は、熱による状態の擾乱が小さいために、大きな空間スケールに渡って量子力学的な性質を保持する。二次元電子ガスを有する GaAs 半導体基板表面にゲート電極を配すると、それに電圧を印加することによって電子系を自在にデザインし、電子の量子状態を制御することが可能になる。例えば、電子を 0 次元空間に閉じ込めた量子ドットでは、任意の整数個の電子を閉じ込めて制御することができる。量子力学的な性質が最も顕著に現れる状態の一つは、区別できない離れた量子間の非局所な量子もつれ状態である。ベルの不等式の破れによって古典力学の帰結との違いを明らかにできるこの状態の生成は、量子情報分野では必須とされている。本研究では、GaAs の圧電性を利用して、電子の伝送回路の分岐において電子スピンの非局所な量子もつれを生成した。

GaAs 基板の表面を伝わる結晶の歪みの波（表面弾性波）は、電子に対し、動く電気ポテンシャルの波として働く。一次元経路を形成するゲート電圧による横方向の閉じ込めと表面弾性波による進行方向の閉じ込めを組み合わせると、動く量子ドットに電子を閉じ込めて輸送することが可能になる。実験では、二電子のみを動く量子ドットに閉じ込め、空乏化した経路を輸送した。動く量子ドット中の電子対の基底状態は、量子もつれ状態であるスピン一重項である。図 1 の微細分岐構造を用いて電子対を上下の別の経路へと空間分離すれば、非局所な量子もつれ状態を生成できる。

動く量子ドットに閉じ込められて微細分岐構造まで輸送された電子対は、分岐において上下の経路へ振り分けられる。しかし、二つの電子が同じ経路へと振り分けられる過程は、分岐後の電子間斥力によりエネルギー的に制限される。この帯電エネルギーを利用した電子対分離は、この構造のポテンシャルを変調するゲート電圧の関数として、各経路に入る電流  $I$  ( $e \times$  各ドットの電子数  $\times$  周波数  $f$ ) に  $I = ef$  のプラトー構造が出現することから確認できる（図 2）。

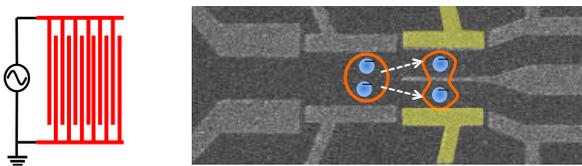


図 1 試料写真。左:楕円電極。表面弾性波を発生させる役割を果たす。右:試料構造。橙線:動く量子ドットの輪郭。黄色ゲートと中央ゲートを調整すると電子対を分割できる。

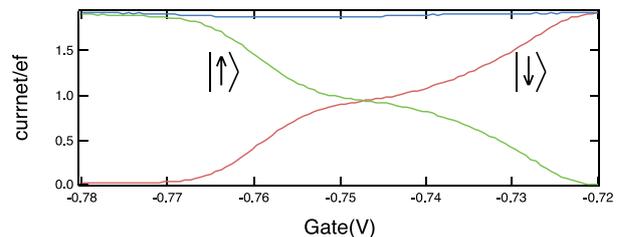


図 2 二電子対分離実験結果。縦軸は各経路の動く量子ドット中の電子数。緑線:上側経路電子数。赤線:下側経路電子数。青線:合計電子数。図 1 の黄色ゲートを上下反対方向に振ることにより電子を上下に分離した。上下電子数が 1 となる領域で安定な構造が出現している。

## テラヘルツ強電場による バルク GaAs 中励起子のイオン化機構の研究 THz field induced exciton ionization in GaAs

東京大学 理学系研究科物理学専攻、低温センター研究開発部門 島野研究室  
海老原周、吉岡信行、関口文哉、松永隆佑、島野亮

原子や分子における光によるイオン化の機構は、光電場によるトンネルイオン化か、あるいは光子吸収の二つに大別され、両極限での様相は良く理解されているものの、これらの中間的領域に関しては依然として議論がなされている。半導体中に光励起された電子と正孔は、低温低密度領域においてクーロン引力により互いに束縛し、励起子を形成する。励起子は水素原子と類似の束縛系であり、従って電場パルスに対する励起子の応答を調べることで、二体束縛系のイオン化機構の新たな知見を得られる。但しその束縛エネルギーは通常数 meV から数十 meV で、周波数にするとテラヘルツ(THz)帯となる。そこで我々は典型的な直接遷移型半導体 GaAs を対象として、強い THz 電場による励起子のイオン化機構を明らかにする実験を進めてきた。

GaAs 中励起子の束縛エネルギーは 4meV (~1THz) なので、バンド間に光励起された電子正孔系から励起子が形成されると、この周波数帯に励起子内部遷移の吸収が現れる。それゆえ、光パルス励起後に時間遅延をつけた微弱な THz 帯プローブパルスを照射し、その吸収を測定することで励起子形成のダイナミクスを調べることが可能である。更に THz プローブパルスが試料に当たる直前に強い THz パルスを照射すると、励起子のイオン化が生じ、強い THz パルスを照射しない場合と比べて励起子 1s-2p 遷移の吸収が減少する。その減少の割合を調べることで、強い THz パルスによる励起子イオン化の様子を調べることが可能である。

図 1 に光励起から 500 ps 後に照射した THz プローブパルスによる

透過率スペクトルを示す。プローブパルスの 8ps 前に THz ポンプパルスを照射し、その強度を変化させた。格子温度は 5K である。THz ポンプパルスの電場が弱い領域では 1s-2p 遷移に相当する 0.75THz にピークを持つ誘導吸収スペクトルが観測され、励起子が蓄積していることがわかる。電場振幅が強くなるとともに励起子のイオン化が進み、3.6kV/cm より大きな電場では励起子ピークが完全に消失して励起子は全てイオン化されたことが確認された。ここから THz 電場尖頭値と励起子密度の関係を決定することが可能である。講演では、励起子密度の定量的評価とこれに基づくイオン化機構の考察、及び電子正孔系の励起子モット転移近傍における振舞いについて議論する。

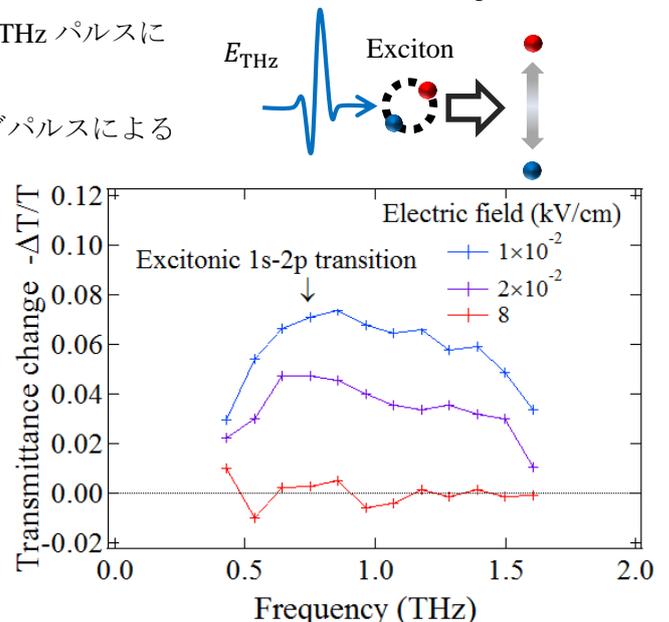


図 1 光励起された GaAs の THz 帯透過率変化スペクトル。励起子 1s-2p 遷移に相当する 0.75THz にピーク構造が観測される。高強度 THz 電場パルスにより励起子密度が減少してゆく様子を示す。

## P-22 カーボンナノチューブにおける熱電特性の電界制御

### Electric field control of thermoelectric properties in carbon nanotubes

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室, 理研 CEMS<sup>A</sup>, 早大先進<sup>B</sup>, 首都大理工<sup>C</sup>  
飯塚 貴彦, 清水 直<sup>A</sup>, 蒲 江<sup>B</sup>, 濱畑 裕紀<sup>B</sup>, 柳 和宏<sup>C</sup>, 竹延 大志<sup>B</sup>, 岩佐 義宏

カーボンナノチューブ (CNT) は、その結晶構造を反映した 1 次元的電子状態を有することが知られている[1-3]。熱電特性はフェルミ準位近傍における状態密度を反映し、特にゼーベック係数は状態密度の変化が激しい場合に増大する可能性がある。そのため、キャリアドーピングによりフェルミ準位を制御した場合、CNT の 1 次元的状態密度に特徴的な熱電特性や、更には状態密度の特異点近傍で熱電性能の向上などが観測できると期待される。

キャリアドーピングの手法として、電界効果トランジスタ (FET) 構造を利用した電界効果ドーピングを用いると、ゲート電圧に対応して連続的かつ精密にキャリア密度を制御することが可能である。特にゲート絶縁層にイオン液体を用いた電気二重層トランジスタ (EDLT) では、従来の固体絶縁層を用いた FET を越える高キャリア密度を誘起できる[4]。実際に単層 CNT 薄膜において EDLT 構造を利用したキャリア制御を行った場合、1 次元的サブバンド構造を反映した電気伝導度と光学吸収スペクトルの変化が観測されている[3]。半導体型単層 CNT 薄膜において複数の状態密度ピークに対応する変化が得られているのみならず、金属型単層 CNT 薄膜においても状態密度ピークを越えた変化が得られており、同様の試料で熱電特性を測定すれば、熱電特性においても 1 次元的状態密度を反映した変化が期待される。

本研究では、半導体型・金属型単層 CNT 薄膜を用いた EDLT デバイスを作製し、そのゼーベック係数と電気抵抗のゲート電圧依存性を測定した。この際、リーク電流の熱起電力測定への影響を低減するため、ゲート電圧印加後 200 K に冷却して測定を行った。その結果、抵抗測定ではゲート電圧に対応して、p 型・n 型伝導両方を示す両極性動作を観測した。また、先行研究と同様の電気伝導率のステップ状の変化という、1 次元的状態密度を反映していると考えられる変化が得られた。ゼーベック係数もまたゲート電圧に依存して大きく変化し、電気抵抗から予想される伝導キャリア変化に対応した符号変化を観測した。このゼーベック係数や見積もられたパワーファクターにおいて、電気伝導の変化と対応した、CNT の 1 次元的状態密度を反映していると思われる、特徴的なゲート電圧依存性が得られた。

当日は、これら CNT-EDLT デバイスにおける熱電特性のゲート電圧依存性を報告し、その詳細について議論したい。

---

[1] J. P. Small *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 256801 (2003)

[2] Y. Nakai *et al.*, Appl. Phys. Express **7**, 025103 (2014)

[3] H. Shimotani *et al.*, Adv. Funct. Mater. **24**, 3305 (2014)

[4] H. T. Yuan *et al.*, Adv. Funct. Mater. **19**, 1046 (2009)

## Magnetotransport Measurements of Ultrathin Bi Films on Si(111)

理学系研究科物理学専攻・長谷川修司研究室

花塚真大、相谷昌紀、平原徹、一ノ倉聖、申東潤、長谷川修司

V族元素であるBiはバルクでは半金属として知られているが、近年のBi超薄膜におけるARPES測定により、その(111)面における表面状態では半金属とは異なり大きなフェルミ面を持つことが明らかになっている[1]。この表面状態のバンドは、Biの強いスピン軌道相互作用のために大きなスピン分裂を起こしていることが知られている(ラッシュバ効果)。一方、同じく強いスピン軌道相互作用を持つ物質群として近年活発に研究が行われているのがトポロジカル絶縁体である。理想的なトポロジカル絶縁体では、金属的な表面状態と絶縁体的なバルク状態を持つが、実際の多くの試料ではバルクも電気伝導に大きく寄与しており、超薄膜においては表面状態とバルク状態が結合し、コヒーレントな単一の伝導チャネルを形成すると考えられている[2]。Bi超薄膜においても表面とバルクが共に電気伝導に寄与していることが判明しているが[3]、両者がどのように関係しているかは不明であった。

我々は、表面とバルクという2つの伝導チャネルの関係性を明らかにするため、膜厚を変えてバルクの寄与の大きさを操作しながら、主に弱反局在に着目して電気伝導を測定した[4]。弱反局在はスピン軌道相互作用の強い系での電気伝導に特有の正の磁気抵抗を示す現象であり、位相緩和長など様々な情報を引き出せる。実験では、まず試料を0.8 Kまで冷却し、0-7 Tの範囲で電気抵抗の磁場依存性を測定した。この際、表面状態を保護するため試料を作成した超高真空装置から大気に取り出さず、*in situ*での測定を行った。図1に、4-20 BLの範囲の様々な膜厚で測定し、磁気抵抗を規格化した結果を示す。6-20 BLの膜厚で弱反局在に特徴的な低磁場での急激な磁気抵抗の増大と、磁場の二乗に比例する古典的磁気抵抗を観測した。一方、4 BLでは弱反局在を示すものの、上に凸の磁気抵抗を示した。この振る舞いは4 BLでは膜の成長方位が異なり、金属的な表面状態を持たないためと考えられる[5]。ここで特に注目されるのは、6-16 BLにおいて古典的磁気抵抗の磁場依存性がほぼ膜厚に依存していないことである。この結果からは6-16 BLの膜厚領域では表面状態の伝導が支配的であることが推測される。しかし、反弱局在を解析して得られた位相緩和長の結果は、膜厚に対してほぼ線形な依存性を示し(図2)、バルクが伝導に大きく関与していることを示唆する。これらの一見矛盾する結果は、Bi超薄膜においてはトポロジカル絶縁体超薄膜と同様に表面状態とバルク状態が結合し、コヒーレントな単一の伝導チャネルが形成されているためと考えられる。当日は以上の結果の詳細に加えて電気抵抗の温度依存性についても報告する。

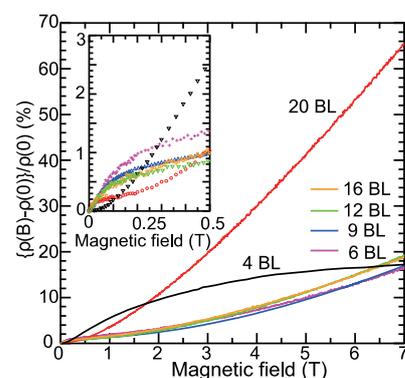


図1. Bi超薄膜における磁気抵抗の膜厚依存性

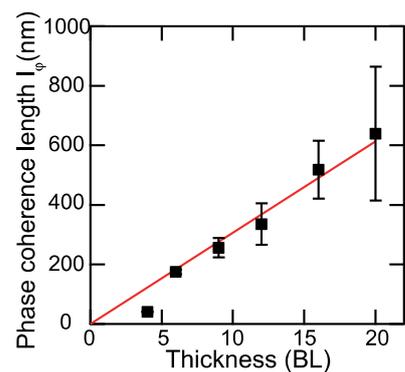


図2. 位相緩和長の膜厚依存性

[1] T. Hirahara *et al.* Phys. Rev. Lett. **97**, 146803 (2006). [2] D. Kim *et al.* Nat. Commun. **4**, 2040 (2013).

[3] T. Hirahara *et al.* Appl. Phys. Lett. **91**, 202106 (2007). [4] M. Aitani *et al.* Phys. Rev. Lett. **113**, 206802 (2014).

[5] T. Nagao *et al.* Phys. Rev. Lett. **93**, 105501 (2004).

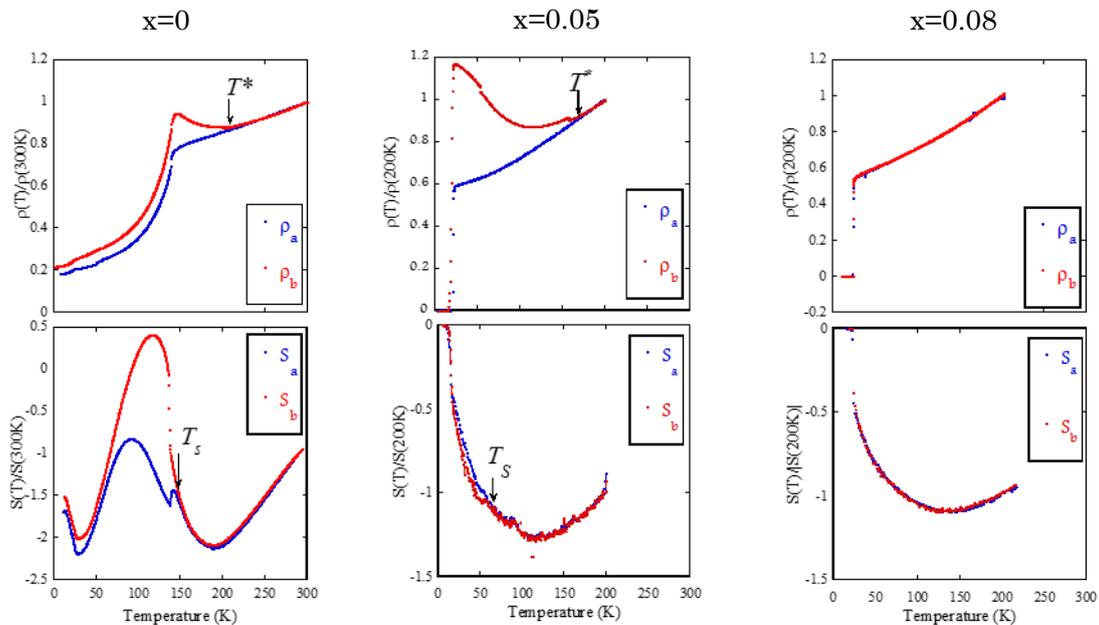
P-24

## 鉄系超伝導体における熱輸送特性の異方性 Anisotropy in the thermoelectric properties of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$

工学系研究科・物理工学専攻・岩佐研究室（低温センター）  
白地 貴一

鉄系超伝導体の一つである  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  は、 $T_s$  以下の低温の反強磁性秩序相よりもはるかに高温  $T^*$  から電気抵抗率に異常な異方性が報告されている[1]。その起源については再構築されたフェルミ面の異方性によるものか、Co による異方的散乱によるものか議論されているが、その詳細は明らかにされていない。本研究では電気抵抗率に加えて散乱時間に依存しない物理量であるゼーベック係数の異方性の測定を行った。

通常、非双晶化にはクランプで試料を挟んで面内方向に圧力をかける方法が用いられるが今回はピエゾ素子が低温で伸長することを利用して引っ張り圧力をかける手法を確立し、非双晶化を行った。self-flux 法で作成した  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  試料に一軸圧力を加えることで非双晶化したうえで a、b 軸方向それぞれに対し、電気抵抗率、ゼーベック係数を同時に測定できる測定系を開発した。電気抵抗率、ゼーベック係数の測定結果を図に示す。電気抵抗率については既に報告されているような大きな面内異方性が  $T^*$  以下の温度で見られた[1]。ゼーベック係数については抵抗率が異方性を示す温度  $T^*$  では顕著な異方性は現れず  $T_s$  以下の温度で異方性が現れた。このことより電気抵抗率の異方性の起源は、 $T^*$  以下ではドーブした Co 不純物や格子欠陥による電子の異方的な散乱、 $T_s$  以下では再構築されたフェルミ面に異方性が現れるためであると考えられる。



図：  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  における抵抗率および熱起電力の面内異方性異方性

[1] Jiun-Haw Chu, et al.: Science, 329, 824 (2010).

## **P-25    Transport and NMR studies of the Dirac electrons in $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>**

Dong Liu<sup>1</sup>, Kazuya Miyagawa<sup>1</sup>, Masafumi Tamura<sup>2</sup>, Kazushi Kanoda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Applied Physics, University of Tokyo*

<sup>2</sup>*Department of Physics, Tokyo University of Science*

The organic conductor,  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> ( $\alpha$ -I<sub>3</sub> in short), being probably the first material that possesses both charge ordering (CO) and Dirac Fermion (DF) phases right beside each other in the  $P$ - $T$  phase diagram [1], has been affording us an unprecedented opportunity for studying the interplay between the strong correlation and the massless nature of the charged carriers. Compared to the celebrated DF system, graphene, the DF phase in  $\alpha$ -I<sub>3</sub> is unique in that its Dirac cones are tilted [2, 3] with an averaged Fermi velocity approximately one order of magnitude smaller [1] than that of graphene, which indicates that the ratio of the Coulomb repulsion to the kinetic energy, namely, the strength of interaction, is ten times larger than in graphene. NMR experiments on the DFs in  $\alpha$ -I<sub>3</sub> under high hydrostatic pressure also revealed the reshaping of the Dirac cones very probably due to electron correlations [3]. In this study, we explored the change from CO to DFs of the electron system of  $\alpha$ -I<sub>3</sub> by transport measurements to probe the charge degrees of freedom, and by <sup>13</sup>C NMR studies to probe the spin degrees of freedom, under controlled pressures. The results are summarized as follows:

(1) The low-temperature resistivity upturn near the charge neutrality point of the Dirac cone is found to be pressure-dependent and is argued as an intrinsic behavior of DFs in the presence of electron correlations. It is noted that the Dirac point is properly approached in the bulky single crystal of  $\alpha$ -I<sub>3</sub>, while in graphene the Dirac point is obscured by the inevitable formation of electron/hole puddles.

(2) It is found that the charge excitation gap is suppressed in association with a decrease in CO transition temperature on increasing pressure; however, the spin excitation gap shows no obvious pressure dependence [4], which may suggest the existence of some unusual transport channels or inhomogeneity.

[1] N. Tajima *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **75**, 051010 (2006); N. Tajima *et al.*, Europhys. Lett., **80**, 47002 (2007).

[2] S. Katayama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **75**, 054705 (2006).

[3] M. Hirata, Doctor's thesis, Dept. Appl. Phys. Univ. Tokyo (2012).

[4] K. Ishikawa, Master's thesis, Dept. Appl. Phys. Univ. Tokyo (2012).

理学系研究科・物理学専攻、低温センター研究開発部門 島野研究室

濱田 裕紀, 富田 圭祐, 松永 隆祐, 島野 亮

超伝導体は、U(1)対称性の破れによる2次相転移を起こし、その基底状態は巨視的な波動関数で表されるようになり、これが相転移の秩序変数となる。最近、高強度テラヘルツ電場に対する *s* 波超伝導体の応答を調べることで、この秩序変数の振幅成分の振動モード（ヒッグスモード）が観測され[1]、さらに電場の2乗成分にヒッグスモードが共鳴して巨大な非線形応答が生じることが報告されている[2]。この集団励起モードが、*d* 波超伝導体のような、波数空間において秩序変数が異方性を持つような超伝導体において、どのように現れるかはとても興味深い問題である。理論的には、*d* 波超伝導体において多軌道性を反映して複数のヒッグスモードが現れることも示唆されているが[3]、ギャップにノードがあるためにヒッグスモードより低エネルギーにある1粒子励起への速い緩和が生じるとも考えられ、その振る舞いは明らかにされていない。本研究では、*d* 波超伝導体である銅酸化物高温超伝導体YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>薄膜を対象にして、ヒッグスモードに起因して起こると予想される非線形応答を調べることを目的に実験を行った。

試料として LaAlO<sub>3</sub> 基板上的の厚さ 100 nm の YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 試料（最適ドーピング:  $T_c = 90$  K）を用いた。パルス面傾斜法を用いて LiNbO<sub>3</sub> の光整流により発生させた高強度テラヘルツ波（尖頭値約 300 kV/cm）を照射し、それによって生じた非線形応答のダイナミクスを、800 nm の光パルスの反射率変化( $\Delta R/R$ )によりプローブした。 $T_c$  以下において、テラヘルツ電場の2乗の波形を反映したコヒーレントな応答が負の信号( $\Delta R/R < 0$ )に現れることがわかった。一方で、室温でも数十 ps の寿命を持つ( $\Delta R/R > 0$ )の信号が観測されるが、 $T_c$  より少し上の温度から、寿命の増大とともに急激に信号強度が増強し、 $T_c$  直上で最大になる様子が観測された。講演では、これら二つの応答の詳細と *d* 波超伝導体におけるヒッグスモードとの関係について議論する。

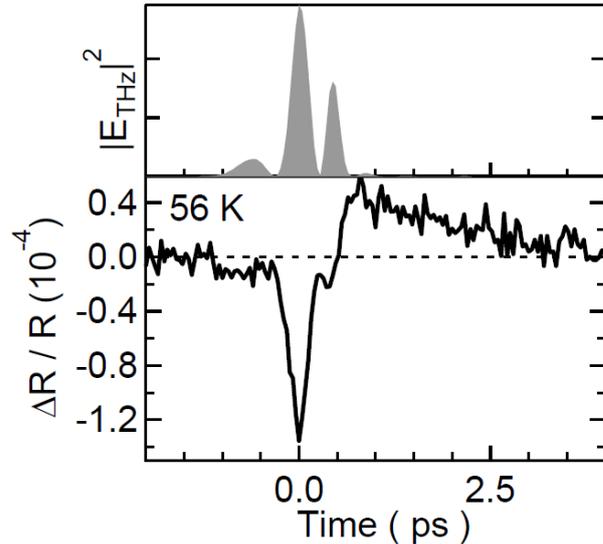


図: テラヘルツ波パルスによる反射率変化( $\Delta R/R$ )のダイナミクス

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

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

[3] Y. Barlas *et al*, Phys. Rev. B **87**, 054503 (2013).

## P-27 層状シアノ架橋型金属集積体におけるメタ磁性的挙動

理学系研究科化学専攻大越研究室

中林耕二・Szymon Chorazy・高橋大祐・木下敬皓・大越慎一

シアノ架橋型金属集積体は、外部刺激に応答する磁性体や電気物性を合わせ持つ磁性体などの機能性磁性体として注目されている[1]。シアノ架橋型金属集積体は、シアノ金属錯体と遷移金属イオンを水または有機溶媒中で混合することによって粉末または結晶として得られる。この合成手法を基に、金属イオン比を変えたり、有機配位子を加えたりすることにより、0次元～3次元の多様な構造体が合成されている。本発表では、従来と異なる非プロトン性溶媒を用いた合成手法により得られた層状シアノ架橋型金属集積体  $\text{Cs}_4\text{Co}^{\text{II}}[\text{Mo}^{\text{V}}(\text{CN})_8]\text{Cl}_3$  (**CsCoMo**) および  $\text{Cs}_4\text{Co}^{\text{II}}[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]\text{Cl}_3$  (**CsCoW**)の結晶構造、磁気特性について報告する[2]。

**CsCoMo** および **CsCoW** は、 $\text{CsCl}$  を含んだ  $\text{CoCl}_2$  のアセトン溶液に  $\text{Cs}_3[\text{M}^{\text{V}}(\text{CN})_8]$  ( $\text{M} = \text{Mo}$  or  $\text{W}$ )水溶液をゆっくり拡散させることにより結晶として得た。単結晶 X 線構造解析より、両化合物は層状構造を有しており、各層は金属イオンがシアノ基で架橋された2次元シート  $\{\text{Co}^{\text{II}}[\text{Mo}^{\text{V}}(\text{CN})_8]\text{Cl}_3\}^{4-}$  を形成していることが明らかになった (図 1a)。また、 $\text{Cs}^+$ イオンは2次元シート間およびシート内に存在していた。液体ヘリウムを用いた磁化測定より、 $\chi T$  値は室温から徐々に増加し、25 K で最大値を迎えた後、急激に減少し、2 K においてはほぼゼロに近づいた (図 1b)。また、2 K における磁場-磁化曲線においては、24 kOe 付近から磁化が急激に増加し、90 kOe の時に  $\text{Co}^{\text{II}}$  ( $S = 1/2$ ,  $g = 13/3$ ) と  $\text{W}^{\text{V}}$  ( $S = 1/2$ ,  $g = 2.0$ ) 上のスピンの強磁性的に配列したときの磁化の値  $3.2 \mu_B$  とほぼ一致することが明らかになった (図 1c)。これらの磁化測定で観測される現象は、2次元シート内で強磁性秩序が起り、その強磁性シート間は互いに反強磁性的に配列するようなメタ磁性的挙動に由来する。反強磁性相から強磁性相に転移するために必要な外部磁場が 24 kOe と大きいのは、 $\text{Co}^{\text{II}}$  の異方性に由来する磁気異方性が大きいためであると考えられる。

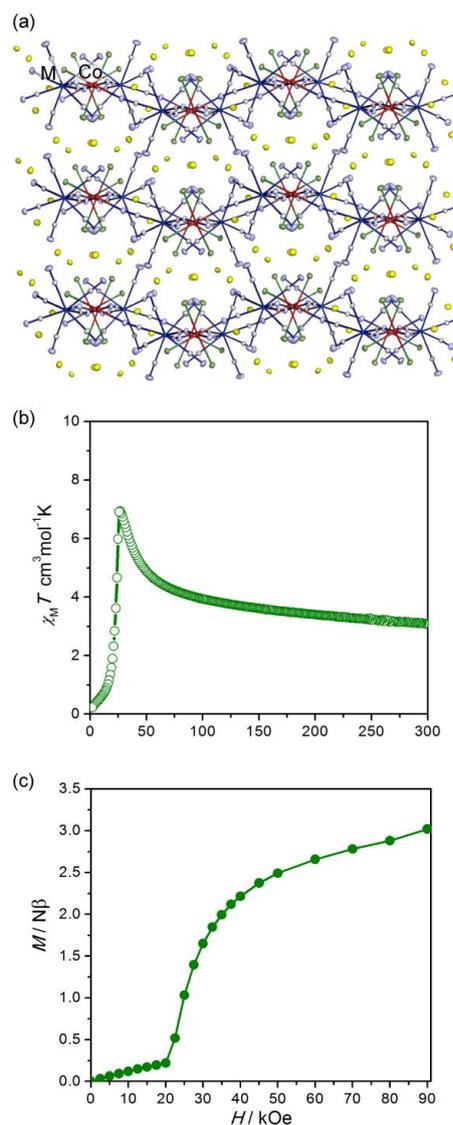


図 1. (a) **CsCoM** ( $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$ )の結晶構造 (b) 磁化率温度依存性プロット (c) 磁場-磁化曲線

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

[2] K. Nakabayashi, S. Chorazy, D. Takahashi, T. Kinoshita, B. Sieklucka, S. Ohkoshi, *Cryst. Growth Des.*, 14, 6093 (2014).

## P-28 Band structure near the Fermi level in GaMnAs studied by time-resolved light-induced reflectivity measurements

Tomooaki Ishii<sup>1</sup>, Tadashi Kawazoe<sup>1</sup>, Yusuke Hashimoto<sup>2</sup>, Hiroshi Terada<sup>1</sup>, Iriya Muneta<sup>1</sup>, Motoichi Ohtsu<sup>1</sup>, Masaaki Tanaka<sup>1</sup>, and Shinobu Ohya<sup>1</sup>

Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo<sup>1</sup>, Radboud Univ. Nijmegen<sup>2</sup>

There have been intense discussions over the Fermi level ( $E_F$ ) position in GaMnAs [1-4]. So far a number of studies have indicated that  $E_F$  exists in the impurity band (IB) in the band gap ( $E_g$ ) [3-4], while recent time-resolved measurements of the light-induced reflectivity have shown results indicating that  $E_F$  exists in the valence band (VB) [2]. When the pump fluence is high, it may cause the accumulation of photo-carriers, which can shift the absorption edge [5], and thus the definition of both  $E_g$  and  $E_F$  can be obscure. In our study, we carefully carry out time-resolved reflectivity measurements with low fluence pump to suppress the accumulation of photo-carriers.

We grew 100-nm-thick  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  films with  $x=1\%$ ,  $3\%$ , and  $6\%$  after growing a 20-nm-thick GaAs buffer layer on semi-insulating (S.I.) GaAs (001) substrates by low-temperature molecular beam epitaxy. The  $\text{Ga}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{As}$  film was annealed at  $240^\circ\text{C}$  for 89 h. The Curie temperature of the  $\text{Ga}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{As}$ , and  $\text{Ga}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{As}$  films is 13 K, 38 K, and 120 K, respectively. Time-resolved reflectivity measurements were performed by using pump-probe procedure and a pulsed light source with time duration of 3 ps and a repetition rate of 80 MHz. At time  $t$  after the irradiation of the pump pulse with the fluence of  $0.16 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ , the low-power probe pulse with  $1 \text{ nJ}/\text{cm}^2$  and the same photon energy as that of the pump light was irradiated to the sample, probing the reflectivity change  $\Delta R/R$ . Photo-excited carrier density is estimated to be below  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  by assuming that the pump-pulse light is absorbed only in the GaMnAs layer. This is two orders magnitude smaller than the carrier density for the previous study [2]. The photon energy resolution of  $\sim 1 \text{ meV}$  in our experiment is also much higher than the previous works [2,6].

Figure 1(a) shows  $\Delta R/R$  measured at 5 K for the S.I. GaAs substrate and for the  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  films at  $t=166 \text{ ps}$ . Generally, as shown in Fig. 1(b), positive  $\Delta R/R$  peaks are observed above  $E_g$  due to band filling (BF) and near  $E_g$  due to band-gap renormalization (BGR). Figure 1(c) shows possible photo-induced electron transitions in GaMnAs. In Fig. 1(a), a clear peak is observed at  $\sim 1.51 \text{ eV}$  (pointed by the green arrow) for all the samples. This can be attributed to BGR and thus assigned to  $E_g$ . In the data for the GaMnAs films, we see clear structures in the region having lower energy than  $E_g$ , which means that electrons (and thus  $E_F$ ) exist in the band gap (Fig. 1(c)). The peaks pointed by red arrows in Fig. 1(a) are attributed to BGR due to photo-carriers excited from  $E_F$  to CB. Also, the positive peak observed between the red and green arrows when  $x=3\%$  and  $6\%$  is attributed to BF induced by electrons excited from IB to CB. The BGR peaks pointed by the red arrow shifts to the lower energy with increasing  $x$  from 1%, which is consistent with the previous resonant tunneling experiments indicating that  $E_F$  moves away from VB with increasing  $x$  from 1% [4]. The energy difference between  $E_F$  and the top of VB in  $\text{Ga}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{As}$  in our study is  $\sim 40 \text{ meV}$  smaller than that in the previous report [3]. This may imply that there is still a small amount of influence of photo-carriers, which have a long life time and slightly shift the absorption edge.

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research including Specially Promoted Research and FIRST program of JSPS.

[1] T. Jungwirth *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 227201 (2010). [2] T. de Boer *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 033202 (2012). [3] S. Ohya *et al.*, Nature Physics **7**, 342 (2011). [4] I. Muneta *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 032411 (2013). [5] B. R. Bennett *et al.*, J. Quantum Electronics **26**, 113 (1990). [6] S. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **88**, 262101 (2006).

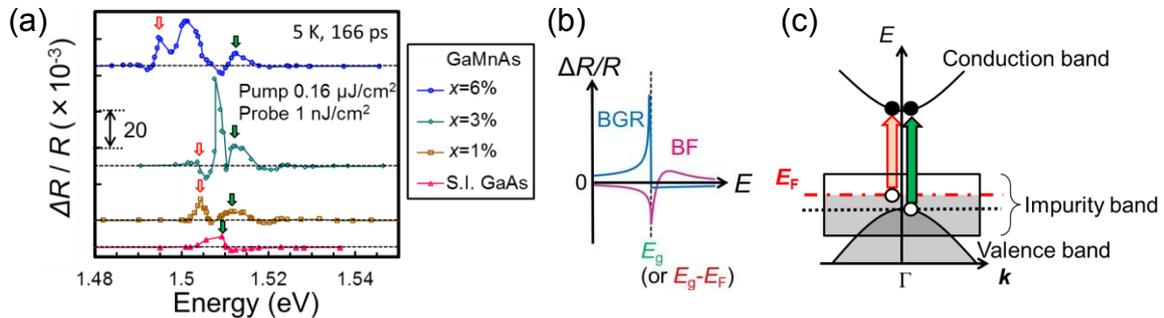


Fig. 1 (a) Energy dependence of  $\Delta R/R$  measured at 5 K for the S.I. GaAs substrate (red) and the  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  films with  $x=1\%$  (brown),  $3\%$  (green), and  $6\%$  (blue) at  $t=166 \text{ ps}$ . The red and green arrows are the positive  $\Delta R$  peaks caused by BGR induced by the electrons excited from  $E_F$  to CB and from VB to CB, respectively. (b) Schematic  $\Delta R/R$  components due to BF (red curve) and BGR (blue curve) [5]. If the peak of the positive  $\Delta R/R$  component due to BGR is larger than the peak of the negative  $\Delta R/R$  component due to BF, the positive  $\Delta R/R$  peak near  $E_g$  due to BGR can be observed. (c) Photo-induced electron transitions from  $E_F$  to the CB (red arrow) and from VB to CB (green arrow) in GaMnAs.

## P-29 大きな磁気異方性を有する Co-Nb オクタシアノ金属錯体

理学系研究科化学専攻大越研究室

井元健太、中林耕二、宮本靖人、織作恵子、大越慎一

我々のグループでは、複数種の金属イオンがシアノ化物イオン(CN)によって多次元的に架橋されたシアノ架橋型金属錯体において、光、熱、電場等の様々な刺激にตอบสนองして磁気特性が変化する機能を報告してきた。<sup>[1]</sup>本研究では、コバルトイオンと8配位型のオクタシアノニオブ(IV)酸イオン、有機配位子4-ピリジンカルボキシアルドキシムを組み合わせたシアノ架橋型金属錯体、 $\text{Co}^{\text{II}}_2[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8] \cdot (4\text{-ピリジンカルボキシアルドキシム})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (**1**)の物性を検討したところ、15000 Oe という高い保磁力を有することを見出したので報告する。<sup>[2]</sup>

$\text{K}_4[\text{Nb}^{\text{IV}}(\text{CN})_8]$ 水溶液と、 $\text{Co}^{\text{II}}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 、4-ピリジンカルボキシアルドキシム、酢酸カリウムの混合溶液を拡散法により反応させることにより合成した化合物 **1** は、

単結晶構造解析より空間群  $I4_1/a$  に属する正方晶の結晶構造を有していた。Co イオンと Nb イオンはシアノ基(CN)によって交互に架橋されており、 $-\text{Co}-\text{NC}-\text{Nb}-$ という骨格から三次元ネットワーク構造体が形成されていた(図 1a)。Co にはシアノ基の N 原子 2つと有機配位子の N 原子 4つが配位し、シアノ基の N 原子と Co との距離の方が、有機配位子の N 原子と Co との距離よりも短く、歪んだ八面体型構造( $D_{4h}$  対称)となっていた。Nb には 8つのシアノ基の C 原子が配位しており、そのうち4つのシアノ基の N 原子が Co に配位していたが、他の4つの N 原子は配位していなかった。化合物 **1** の磁化測定を行ったところ、18 K 以下で強磁性を示し、飽和磁化の値から  $\text{Co}^{\text{II}}$  ( $S = 3/2$ )と  $\text{Nb}^{\text{IV}}$  ( $S = 1/2$ )の副格子磁化の間に強磁性的な磁気相互作用が働き、平行に配列したフェロ磁性体であることがわかった。また、磁化の結晶方位依存性から結晶の  $c$  軸方向が磁化容易軸、 $a$  および  $b$  軸方向が困難軸であった。また、 $a$  軸方向に磁場を印加した磁化磁場曲線において 15000 Oe という大きな保磁力が観測された(図 1b)。

Co イオン周りの分子軌道計算の結果、磁気軌道が縮退していることがわかり、Co 周りの歪んだ配位環境におけるスピン軌道相互作用により大きな磁気異方性が観測されたことが示唆された。

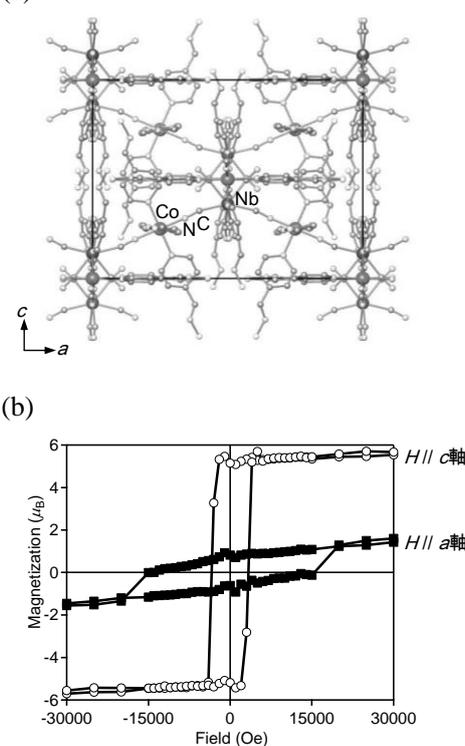


図 1. (a) 化合物 **1** の結晶構造. (b)  $a$  軸および  $c$  軸に外部磁場を印加した際の化合物 **1** の磁気ヒステリシス.

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

[2] K. Imoto, M. Takemura, K. Nakabayashi, Y. Miyamoto, K. K. Orisaku, S. Ohkoshi, Inorg. Chim. Acta. **425** 92 (2015).

## P-30 s 波超伝導体におけるヒッグスモードの減衰機構 Damping mechanism of Higgs mode in s-wave superconductors

理学系研究科・物理学専攻、低温センター・研究開発部門 島野研究室  
富田圭祐, 濱田裕紀, 松永隆佑, 島野亮

超伝導体には、U(1)対称性の自発的破れに伴って、秩序変数の振幅と位相のそれぞれの揺らぎに対応する2つの集団励起モードが現れる。このうち近年ではヒッグスモードとも呼ばれている振幅モードは、分極を伴わないため線形領域では電磁場と結合せず、観測が困難であった。最近我々はs波超伝導体 NbTiN において、テラヘルツ(THz)ポンプ-THzプローブ法を用いてヒッグスモードの観測に成功したことを報告した[1]。THzポンプパルスを用いて準粒子を直接ギャップ端に励起することで超伝導体に非断熱的な摂動を与え、その応答として現れる秩序変数の時間変化をもう1つのTHzプローブパルスで検出することにより、ヒッグスモードを時間領域で観測することが可能である。本研究では、ヒッグスモードの減衰機構を明らかにすることを旨とし、減衰ダイナミクスの温度依存性およびTHzポンプパルスの励起強度依存性を詳細に測定した。

その結果、十分低温かつ弱励起条件ではヒッグスモードは、指数関数的な減衰よりもむしろ時間のべき乗に従った減衰を示すことがわかった。さらに励起強度を増すにつれて減衰が速くなり、指数関数的な減衰へと変化していくことがわかった。この振る舞いは、ヒッグスモードという集団励起モードが個別励起モードへと無衝突で減衰することを示した理論計算とよく整合している[2]。この振る舞いはプラズマにおけるランダウ減衰とよく似ているが、超伝導体ではローレンツ不変なバンド分散を持つことに起因してべき乗という特異な減衰が現れる。アンダーソン擬スピンモデルで表した場合、ヒッグスモードは各波数で定義される擬スピンの集団的に同期して歳差運動している状態に対応する[3]が、擬スピンのラーモア周波数が波数ごとに少しずつ異なるため、歳差運動が徐々に非同期化することでヒッグスモードが減衰する。実験で観測されたべき乗の減衰は、十分低温かつ弱励起においては、ヒッグスモードが減衰しても個々の擬スピンの歳差運動は非常に長いコヒーレンス時間を持つことを示唆している。

一方、ヒッグスモードの温度依存性を調べたところ、温度上昇に伴ってべき乗の減衰から指数関数的な減衰へと移り変わるとともに急速に減衰してほとんど観測できなくなることがわかった。また、転移温度の異なる複数の試料を用いて比較したところ、同じギャップの大きさでも十分低温ではヒッグスモードが明瞭に現れることがわかった。このことから、温度上昇に伴って、熱励起された準粒子やフォノン等との散乱によってヒッグスモードは急速に減衰すると結論付けた。

---

[1] R. Matsunaga, Y. I. Hamada, K. Makise, Y. Uzawa, H. Terai, Z. Wang, and R. Shimano, Phys. Rev. Lett. **111**, 057002 (2013).

[2] A.F. Volkov and Sh. M. Kogan, Journal of Experimental and Theoretical Physics **38**, 1018 (1974).

[3] R. A. Barankov, L. S. Levitov, Phys. Rev. Lett. **96**, 230403 (2006).

## P-31 Pd/Co/Pt 構造における磁気異方性の電界制御

<sup>1</sup>東京大学院工学系研究科 物理工学専攻 千葉研究室 <sup>2</sup>電力中央研究所  
日比野有岐<sup>1</sup>、大日方絢<sup>1</sup>、小山知弘<sup>1</sup>、三輪一元<sup>2</sup>、小野新平<sup>2</sup>、千葉大地<sup>1</sup>

We show a voltage-induced change in magnetic anisotropy of a perpendicularly magnetized Pd/Co/Pt system. It is well known that magnetic moment is induced in the non-magnetic Pd or Pt at the interface with ferromagnetic materials, which is called the ferromagnetic proximity effect [1, 2]. By applying gate voltage between the Pd/Co/Pt bottom electrode and an Au top electrode in a field-effect structure, we controlled the electron density at the Pd surface, where the magnetic moment is induced.

The sample of MgO (2.0)/Pd (0.86)/Co (0.4)/Pt (2.4)/Ta (2.6) was deposited on a GaAs substrate by rf-sputtering. Inside the bracket shows the thickness of each layer in nano meter. From the Pd thickness dependence of the magnetic moment, the polarization due to the proximity effect was expected to be induced in the whole region of the top Pd layer. A polymer film containing an ionic liquid with the top Au electrode was put on the

sample to control the electron density of the Pd surface by a gate voltage. A Hall measurement was used in order to measure the in-plane saturation field  $H_s$  of the system. Normalized in-plane magnetization curve obtained from the Hall measurement is shown in Fig.1.  $H_s$  of the system was largely modulated by changing the gate voltage. The change in the magnetic anisotropy energy per unit area was estimated to be  $\sim 120 \mu\text{J}/\text{m}^2$ , which is comparable with that in the previous reports [3, 4].

The electric field effect observed here is most likely attributed to the electric field induced modulation of the Pd surface. One of the possible origin of the effect is the relative change of electron occupation state in 4d orbit. The electric field effect on the coercive field and the conductance is also discussed.

This work was supported by Grant-in-aid for Scientific Research (S) from JSPS, the PRESTO program from JST, and was partly performed using facilities of the Cryogenic Research Center, the University of Tokyo.

- [1] F. J. A. den Broeder *et al.*, J. Appl. Phys. 61, 4317 (1987).
- [2] H. Nemoto *et al.*, J. Appl. Phys. 97, 10J109 (2005).
- [3] T. Nozaki *et al.*, Nature Nanotechnol. 4, 158 (2009).
- [4] F. Bonnel *et al.*, Appl. Phys. Lett. 96, 212503 (2010).

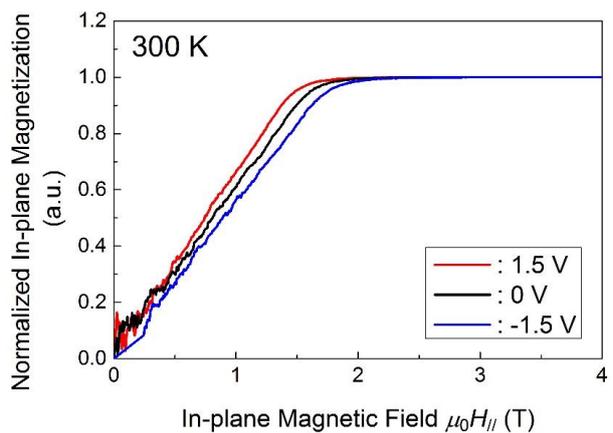


Fig. 1: Normalized In-plane magnetization curve at 300 K under the application of +1.5, 0, and -1.5 V.

P-32

## s波超伝導体 NbNにおける ヒッグスモードとテラヘルツ波の非線形共鳴 Nonlinear resonance between Higgs mode and terahertz wave in s-wave superconductor NbN

理学系研究科物理学専攻 低温センター研究開発部門 島野研究室  
松永隆佑、島野亮

対称性が自発的に破れた系では、秩序パラメーターの振幅および位相がマクロに振動する集団励起モードが存在する(図)。特に振幅モードの方は素粒子物理におけるヒッグス粒子とのアナロジーから近年ではヒッグスモードとも呼ばれ、近年興味を集めている。しかし超伝導状態のヒッグスモードは線形応答の範囲では光と直接相互作用しないため、これまでほとんど調べられていなかった。最近我々はs波超伝導体 Nb<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>N に対してモノサイクル高強度THzパルスを用いてギャップ端に高密度の準粒子を直接励起することで非断熱的な摂動を与え、その応答として現れるヒッグスモードを時間分解検出することに成功し[1]、その周波数が理論で予測された通り秩序パラメーター $2\Delta$ とよく一致することを確認した。

本研究では、ギャップエネルギー $2\Delta$ よりも低い周波数の強い電磁波に対するBCS状態のコヒーレントな応答を調べた。s波超伝導体 NbN のギャップエネルギー $2\Delta(T=0)=1.3$  THzよりも周波数の低い狭帯域高強度THzパルス(中心周波数 $\omega=0.6$  THz)を生成し、 $2\Delta$ の値を温度によって制御しながら THz ポンプ-THz プロブ測定を行った。その結果、狭帯域THz波が照射されている間、秩序パラメーターが周波数 $2\omega$ でコヒーレントに振動し、さらに $3\omega$ の周波数を持つ高調波が高効率に発生することを発見した[2]。これらの現象は、単色電磁場中でのBCS状態の時間発展を Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づいて解くことで非常によく説明することができる。興味深いのは、これらの非線形振動が $2\omega=2\Delta$ を満たすときに共鳴的に増強することである。これはベクトルポテンシャルの偶数次の項がスカラー量であるヒッグスモードと相互作用することに由来しており、電磁場と集団励起モードが非線形応答領域で共鳴することにより巨大なTHz帯非線形応答が発現することを明らかにした[2]。この結果はマクロな量子状態を光によって超高速に制御する新たな道筋を示すものであり、高温超伝導体など基底状態の性質が明らかにされていない量子凝縮相を調べる新たな手法として確立されることが期待される。

本講演は青木秀夫、辻直人、藤田浩之、杉岡新(以上、東大理)、王鎮、寺井弘高、牧瀬圭正(以上、情報通信研究機構)、鶴澤佳徳(国立天文台)各氏との共同研究に基づくものである(所属は当時)。

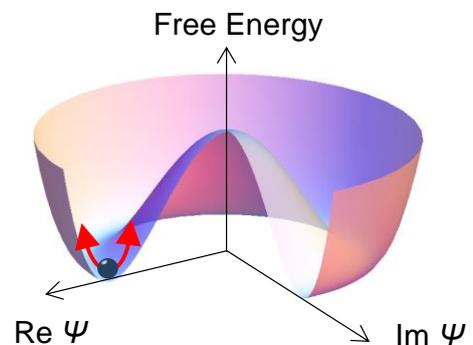


図 複素秩序パラメーターの関数としてプロットした自由エネルギーの模式図。赤の矢印はヒッグスモードを示す。

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

[2] R. Matsunaga, N. Tsuji, H. Fujita, A. Sugioka, H. Aoki, R. Shimano *et al.*, Science **345**, 1145 (2014).

# P-33 ハーフホイスラートポロジカル半金属 RTBi (R=Lu,Y;T=Pt,Pd)の作製と電気物性

## Crystal growth and electrical properties of half-Heusler topological semimetal RTBi(R=Lu,Y;T=Pt,Pd)

工学系研究科・物理工学専攻・樽茶研究室（低温センター）  
中村 隼也

ハーフホイスラー合金 RTBi(R=Lu,Y;T=Pt,Pd)は空間反転対称性の破れた結晶構造をとり、空間反転対称性の破れた系における超伝導体として興味を持たれる[1]。このような系の特徴として、超伝導状態においてクーパー対のシングレットとトリプレットが混成することが知られている。本研究では RTBi の低温での超伝導特性を調べた。特に図1に示す LuPdBi と YPdBi は初めて超伝導を確認した。また、上部臨界磁場が、シングレット対が対破壊を起こすパウリリミットよりも大きいことから、トリプレットの混成を示唆する結果が得られた。

一方、RTBi はスピン軌道相互作用の大きい物質であるため、 $\Gamma$ 点においてバンド反転が生じ、トポロジカル半金属になると理論的に予言されており[2]、本研究では RTBi トポロジカルな性質についても研究を行った。トポロジカル絶縁体の表面には二次元ディラック電子が存在し、またトポロジカルとトリビアルの境界ではバルクのバンドが線形分散になるといわれている。本研究ではディラック電子系の存在を確認することはできなかったが、図2のように電子比熱係数の磁場依存性において低磁場にピークが観測され、この振る舞いがディラック電子系を持つ有機導体の振る舞いと類似しているなどの興味深い結果が得られた。そこで、RTBi の電氣的輸送特性や熱起電力の測定、また圧力をかけることによってバンド反転の大きさを変化させた時や、ギャップを開いた時の電氣的輸送現象の変化からトポロジカルな性質に迫るための手がかりを得ようと試みた。

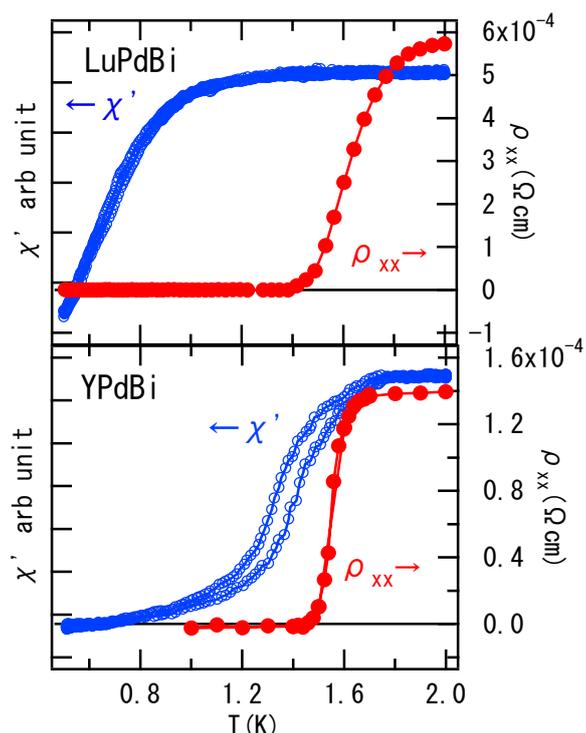


図1: LuPdBi と YPdBi の電気抵抗率と交流磁化率における超伝導転移

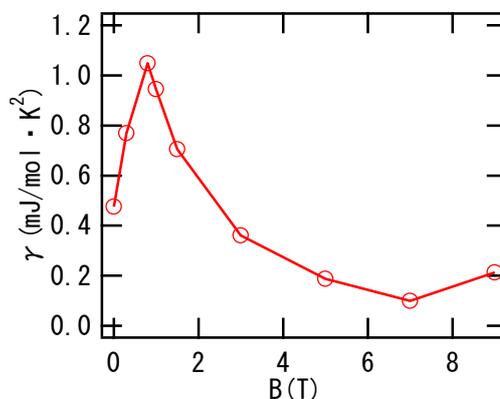


図2: YPtBi における電子比熱係数の磁場依存性。低磁場にピークが観測される。

[1] F. F. Tafti *et al.*, Phys. Rev. B **87** (2013) 184504  
[2] W. Al-Sawai *et al.*, Phys. Rev. B **82** (2010) 125208

P-34

## MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 薄膜における 磁性 / トポロジカル絶縁体界面の輸送特性 Transport property of magnetic insulator/topological insulator interface in MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin film

理学系研究科・物理学専攻・長谷川修司研究室  
久保高幸、福居直哉、一ノ倉聖、保原麗、高山あかり、長谷川修司

トポロジカル絶縁体は、バルクは絶縁体の性質をもつが、その表面状態はスピン偏極した金属的伝導を持つ物質群であり、近年精力的に研究されている。このスピン偏極した表面状態はディラックコーンのようなバンド構造をもつが、磁性不純物などによって表面状態の時間反転対称性が破られることでディラック点にギャップが開くことが知られており[1]、これまでトポロジカル絶縁体Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>に磁性をもつMnをドーピングした系での研究結果が報告されている[2,3]。一方で、トポロジカル絶縁体と磁性薄膜のヘテロ接合界面における実験例はこれまで報告はされていなかった。本研究では、磁性/トポロジカル絶縁体ヘテロ接合界面の輸送特性を明らかにするため、MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>ヘテロ接合薄膜の作成および4端子プローブ「その場」電気伝導測定を行った。なお、冷却過程は液体Heを用い50K/hのペースで室温から10Kまで温度を変化させ、また、低温から室温にかけては、13K/hのペースでヒーターを使用して昇温させた。

図1に試料の模式図を示す。6QLのBi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>超薄膜上に、反強磁性絶縁体であるMnSeを1~5BL薄く蒸着している。図2(a)は冷却過程での電気抵抗の温度依存性を示した結果である。MnSeを1BL蒸着すると、全体の抵抗値は上昇するが、金属的な伝導を保つことから、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の伝導を測定していると考えられる。また、1BL-MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>ヘテロ接合薄膜の冷却/昇温過程の測定において、図2(b)に示すようなバルクのMnSeに似た電気抵抗ヒステリシスが観測されたことから、電気伝導においてMnSeによる磁性の影響が表れていると考えられる。講演では、より詳細な実験結果を報告し、MnSeの蒸着量と電気抵抗の関係および物性発現の起源について議論を行う。

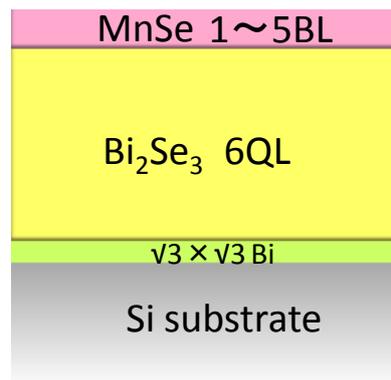


図1. MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の模式図

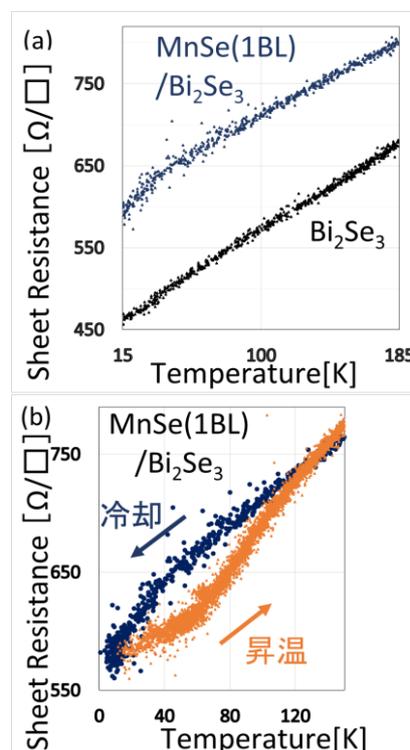


図2.(a) Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> および MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の冷却過程での抵抗の温度依存性  
(b) 1BL-MnSe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の冷却/昇温過程における抵抗の温度依存性

[1] S. V. Eremeev *et al.* PRB **88**, 144430 (2013).

[2] S. Y. Xu *et al.* Nature Physics **8**, 616 (2012).

[3] Y. H. Choi *et al.* Appl. Phys. Lett **101**, 152103 (2012).

## 超流動ヘリウム 3B 相表面のマヨラナコーンの直接観測 Direct observation of Majorana cone at surface of superfluid helium three B phase

低温センター 研究開発部門  
村川 智

近年、量子ホール効果の現れるトポロジカル絶縁体から着想を得たトポロジカル超伝導・超流動が大きな注目を集めている。トポロジカル超流体は、従来の区分では、通常の s 波超流体とは異なる d 波や p 波のような異方的超伝導・超流動といわれていたもの一部である。それらの異方的超流体ではエネルギーギャップ内に低エネルギーの表面アンドレーエフ束縛状態があることが示されていた。この表面束縛状態は、トポロジカル絶縁体、超流体の概念を用いて、バルクのエネルギーギャップと対応して、ギャップレスな低エネルギー状態が界面に現れることで説明されている(バルク-エッジ対応)。このように、トポロジカル物質の特徴は界面に現れるため、界面状態の研究が活発に行われている。

超流動ヘリウム 3( $^3\text{He}$ )もトポロジカル物質の一つである。超流動  $^3\text{He}$  は不純物が非常に少ないため、p 波スピン 3 重項超流動体であることなどバルクの性質は詳細に研究されている。よって、バルクとの違いを見る表面状態の研究を行う試料として理想的である。超流動  $^3\text{He}$  には複数の相があるが、その中でもバルクで等方的なギャップ  $2\Delta$  を持つ B 相と呼ばれる相は、3次元のトポロジカル超流動体である。この表面状態は準粒子と反準粒子が同一であるマヨラナ準粒子であり、そのエネルギー分散関係は線型になる(マヨラナコーン)ということが理論的に示され、それを示唆する実験結果が得られている[1]。

しかし、その研究はエネルギー状態密度を示したのみで分散関係を直接観測したわけではない。本研究では、超流動  $^3\text{He}$  B 相の表面束縛状態のマヨラナコーンを直接観測することを目指す。液体ヘリウム中に温度計とヒーターを備えた黒体放射体を用いて、準粒子ビームを壁に打ち込み、量子アンドレーエフ反射して戻ってくる準粒子を検出する[2]。過去においては壁に浅い方向から侵入する実験のみが行われていたが、この量子アンドレーエフ反射の確率は表面状態密度による。壁に対する準粒子の入射角度を変化させながら測定を行うことで、表面状態の分散関係を得ることが出来る。

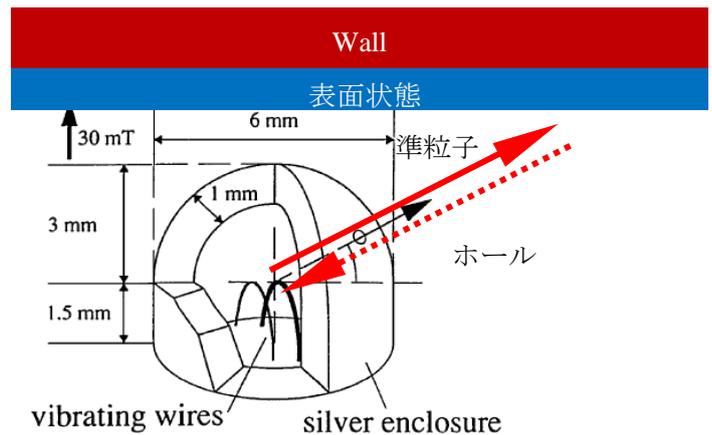


図 1. 実験装置の概念図[2]

[1] S. Murakawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 155301 (2009), S. Murakawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 013602 (2011).

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

# P-36 強磁性半導体EuO薄膜におけるトポロジカルホール効果の観測 Observation of Topological Hall Effect in Ferromagnetic Semiconductor EuO Thin Films

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻川崎研究室  
大内祐貴, 小塚裕介, 打田正輝, 上野和紀, 塚崎敦, 川崎雅司

トポロジカルホール効果は、ホール測定に現れる、磁化に比例しない特異な異常ホール効果であり、磁性体中のスピンの向きが非共面的に配置されることに由来すると考えられている[1]。この効果は、2-in-2-out パイロクロア型モリブデン酸化物や渦巻き状の磁気スキルミオンを有する B20 型化合物など、磁氣的フラストレーションや対称性の低下に伴い特異な磁気構造が誘起される物質において報告されてきた[1,2]。近年、典型的なハイゼンベルグ強磁性体と考えられてきた EuO の単結晶薄膜において、同様の特異な磁気構造を示唆するトポロジカルホール効果が観測された[3]。本研究では、ホール効果の印加磁場角度・膜厚依存性を調べ、特異なスピン構造の解明へ磁気伝導からアプローチした。

YAlO<sub>3</sub> 基板上にパルスレーザー堆積法を用いて EuO 単結晶薄膜を作製した。膜厚の異なる試料(20-230nm)をホールバー形状に加工し、強磁性転移点以下の金属的な電気伝導を示す低温において、印加磁場角度を変えながら磁気輸送特性を評価した。

図 1(a)に膜厚 50 nm 試料における異常ホール効果の印加磁場角度依存性を示す。B = ±2 T 付近に観測されるトポロジカルホール効果のピークが、印加磁場方向を面直方向から数度傾けることで消失した[4]。ピークの大きさから非共面スピン配置による有効磁場を計算すると、図 1(b)に示すように、膜厚 100 nm 以下の試料で急激に有効磁場が増大した。二次元スキルミオンを仮定すると、その半径は 150 nm 程度となる。これらの結果から、薄膜化により EuO に面直異方性の強い非共面的スピン構造が形成できることを初めて明らかにした。

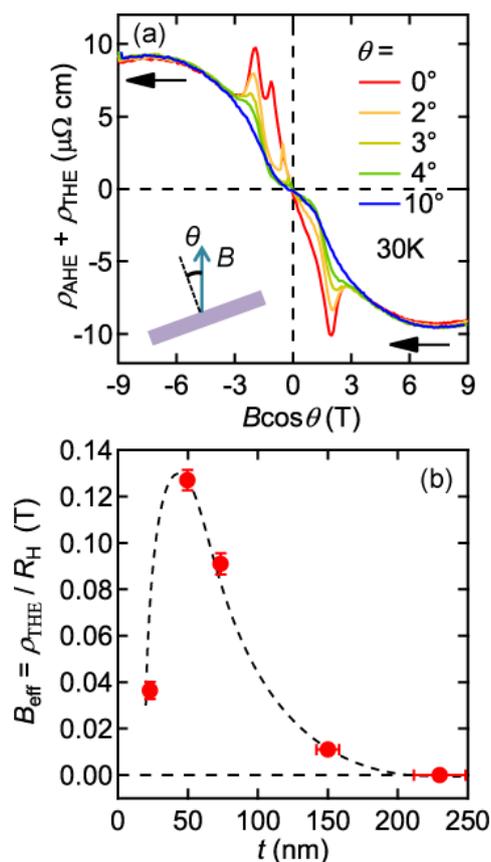


図 1. (a)印加磁場角度を変化させたときの異常ホール抵抗率の磁場依存性。(b)印加磁場角度変化から見積もられた実効磁場 ( $B_{\text{eff}}$ ) の試料膜厚依存性。

[1] N. Nagaosa and Y. Tokura, Nature Nanotech. **8**, 882 (2013).

[2] N. Nagaosa *et al.*, Rev. Mod. Phys. **82**, 1539 (2010).

[3] Y. Ohuchi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 121114(R) (2014).

[4] T. Yokouchi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 064416 (2014).

# P-37 水素プラズマによって異方性エッチングされた グラファイト表面の STM/S 観測 STM/S Studies of Graphite Surfaces Anisotropically Etched by Hydrogen Plasma

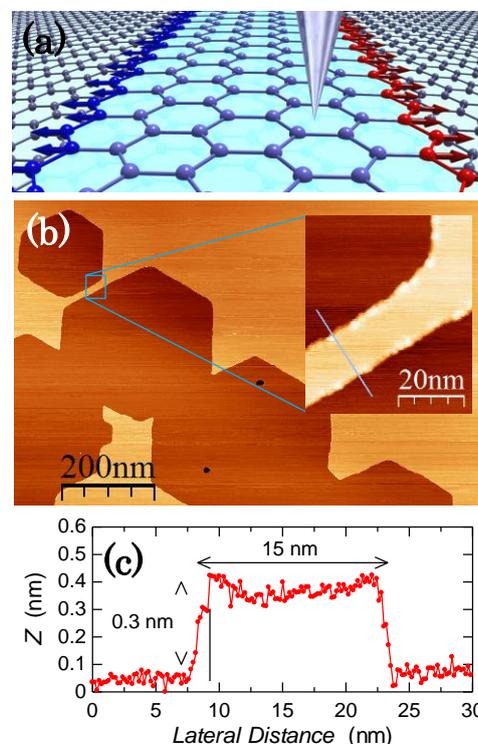
理学系研究科・物理学専攻・福山研究室<sup>A</sup>、低温センター<sup>B</sup>  
佐藤秀樹<sup>A</sup>、大庭悠輔<sup>A</sup>、松井朋裕<sup>A</sup>、福山 寛<sup>A,B</sup>

グラファイトの端にはアームチェア型とジグザグ型の2種類の端構造が存在する。このうち、水素終端されたジグザグ端には局在電子状態が存在し[1]、ジグザグ端が 10 nm 程度に接近して存在するジグザグナノリボンにおいてはスピン偏極状態が安定化すると考えられている[2]。本研究では、こうした水素終端ジグザグナノリボンをグラファイト表面に高密度で作ることを目標として、水素を用いた表面エッチングの方法をいくつか試みた。

まず、鉄微粒子を触媒とする水素分子によるエッチングや、熱垂離して作った水素原子によるエッチングによって、グラファイト表面を異方性エッチングできることが分かった。しかし、これらの方法で得たステップは密度が低く、ナノリボンを得るには十分でなかった。

一方、高温で水素プラズマに曝すと、グラファイト表面に六角形のナノピットが作成できる (図(b))。図(c)に示すように、ピットの深さは単原子層深さに相当しており、ピット周辺の原子画像からピットのエッジは選択的にジグザグ方向を向いていることが分かった。従って、図(b)挿入図に示すように、ピットで挟まれた領域に、単原子層高さのジグザグナノリボンが作成できる。反応初期の小さなピットは円形に近いが、反応時間と共にピットの数は増え、大きくなるにつれて形状は六角形に近づく。また、プラズマを生成する高周波電源の出力を大きくすると、ピット密度が増すと共に、2層目3層目にもピットが形成され始める。このことから、水素プラズマにはグラファイト表面に欠陥を作る作用と、その欠陥を六角形のピットに整形する異方性エッチングの効果があることが分かる。発表では、グラファイト表面と水素プラズマとの反応について述べると共に、ジグザグナノリボンの STM/S 測定の結果を紹介する。

図: (a) スピン偏極ジグザグナノリボンのイメージ図。(b) 水素プラズマで異方性エッチングしたグラファイト表面の STM 画像 ( $I_t = 1$  nA,  $U_g = 500$  mV, 室温大気中)。挿入図: ピットで挟まれた領域に、幅 15 nm、長さ 90 nm のナノリボンが見られる。(c) 図(b)挿入図中の実線に沿ったラインプロファイル。



[1] Y. Niimi *et al.*, Appl. Surf. Sci. **241**, 43 (2005); Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 085421 (2006); Y. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **71**, 193406 (2005). [2] L. Pisani *et al.*, Phys. Rev. B **75**, 064418 (2007).

# P-38 IV 族強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge:B}/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ 接合系 における磁気抵抗効果

## Magnetoresistance of the Group-IV Ferromagnetic Semiconductor $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge:B}/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ Junctions

工学系研究科・電気系工学専攻・田中大矢研究室  
伴 芳祐、中根 了昌、田中 雅明

Si や Ge をベースにした IV 族強磁性半導体の研究は、現在の Si テクノロジーとの整合性を期待して 10 年以上に渡り行われて来た。我々のグループは Ge に Fe を添加した強磁性半導体  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  の創成を試み、低温分子線エピタキシー(LT-MBE)法により Fe や Fe 化合物の異相の析出がない母材の Ge のダイヤモンド構造を保った単結晶の強磁性半導体の作製に成功した[1]。  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  は B を同時にドーピング[2]する事で、磁性に関係なくキャリア濃度を変える事が出来る特性を持っており、これは半導体との伝導率不整合の問題のないスピン注入源としての可能性も示唆している。しかし、この材料のスピン依存伝導特性に関しては、未だ良く分かっていない部分が多く残されている。  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  においてスピン偏極電流が生成可能かは課題の一つであり、本研究ではスピン偏極電流による伝導特性が観測されるかを検証する目的で研究を行った。  $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y/\text{Ge:B}(4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})/\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  の 3 層構造を SOI (silicon-on-insulator) (001) 基板上に MBE 成長し、低温においてその横伝導特性を観測した。 Ge:B の抵抗は  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  に対して、低温において 1/100 程度の抵抗値であるため、大半の電子は Ge:B 層を伝導し、  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ge:B}$  界面において散乱を受けながら伝導すると考えられる。

本研究では、エピ層のみの伝導特性を明らかにするために、基板に電流が流れる事を防ぐ目的で SOI (001)基板を用いた。この基板は犠牲酸化により表面の Si の膜厚さを 13nm まで薄くして結晶成長を行った。 MBE により 200°C で  $\text{Ge}_{1-y}\text{Fe}_y$  ( $y = 10.5 \%$ ) 30 nm / Ge:B ( $4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) 2.7 - 10 nm /  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 14.0 \%$ ) 30 nm / 13 nm SOI (001) sub. の層構造を成長した (Fig.1)。 MBE 成長時の RHEED 像は、 $2 \times 2$  のストリークを示し、平坦な  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ge:B}$  界面が形成されている事が分かった。成長した薄膜は  $600 \times 50 \mu\text{m}$  の Hall bar 形状の素子に加工し、この素子について低温において磁気伝導特性を測定した。

12 K において Ge:B 2.7 - 10 nm の試料の抵抗の磁場依存性を測定した。一定電流下で磁場  $H$  は面内の [110] 方向に印加し、  $H = -1 \text{ T} - 1 \text{ T}$  の範囲で掃引し、4 端子測定により 200  $\mu\text{m}$  幅のチャネル電極間の電圧を測定した。低い電流値(-10  $\mu\text{A}$ ) では磁気抵抗は観測されないが、比較的高い電流値において正の磁気抵抗が観測される傾向が見られた。同試料(Ge:B 2.7 - 6.8 nm)について 12 K における  $I-V$  特性も測定を行った。600  $\mu\text{m}$  のチャネルに対して 2 端子測定により  $I-V$  測定した。その結果 100 V 以上の電圧を印加する事により 100 V 前後の電圧において急激に電流が流れる  $I-V$  特性が観測された。電圧の掃引を往復するとヒステリシスを描く事や、磁場を印加することによってこの特性が抑制される事が分かった。また、磁場  $H = 0$  を基準とした磁気抵抗比については最大で数 1000 % の正の磁気抵抗比が観測された。検証の結果、このような磁気抵抗や  $I-V$  特性は、  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  の単層膜でも観測された。これらの測定結果について SQUID により測定した磁化曲線の形と磁気抵抗の形を比較すると、GMR 効果では説明できない。これらの結果は、いずれも磁気抵抗スイッチ効果[3]と特徴が類似している。さらに詳しい物理的機構については当日に報告する。



Fig. 1 Schematic sample structure

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

[2] Y. Ban, Y. Wakabayashi, R. Akiyama, R. Nakane, and M. Tanaka, AIP Advance **4**, 097108 (2014).

[3] H. Akinaga, M. Mizuguchi, K. Ono and M. Oshima, Appl. Phys. Lett. **76**, 357 (2000).

# P-39      ロジウム置換型イプシロン酸化鉄の合成と その巨大磁気異方性および高周波ゼロ磁場強磁性共鳴 The synthesis of rhodium substituted epsilon-iron oxide and its large magnetic anisotropy and high-frequency zero-field ferromagnetic resonance

理学系研究科、化学専攻、大越研究室  
生井飛鳥、吉清まりえ、大越慎一

酸化鉄  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の多形( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )の一つ  $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  について、当研究室では単相での初合成を行い、この物質が大きな磁気異方性を有し、磁性金属酸化物最大の保磁力および磁性体最高のゼロ磁場強磁性共鳴を示すことを見出してきた[1]。本発表では、ロジウム置換型  $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\epsilon$ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ )の化学的合成、結晶構造、磁気特性、ゼロ磁場強磁性共鳴について報告する[2,3]。

$\epsilon$ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  はメソポーラスシリカを鋳型に用いたナノ微粒子合成法あるいはゾルゲル法により合成を行った。得られた試料は 20~40 nm サイズのナノ微粒子であり、誘導プラズマ結合質量分析計による組成分析および粉末 X 線回折を用いた結晶構造解析により、 $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の 4 つある鉄サイトの一つを Rh イオンが選択的に置換した  $\epsilon$ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  が得られていることが分かった(図 1a)。磁気特性を測定したところ、 $\epsilon$ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  は  $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を上回る大きな室温保磁力を示し、例えばメソポーラスシリカを鋳型に用いたナノ微粒子合成では、保磁力はロジウム置換に伴い、22 kOe ( $x=0$ )から 27 kOe ( $x=0.14$ )まで増大した。さらに、磁場印加により結晶方位を揃えた試料では 31 kOe という磁性金属酸化物最大の保磁力を示した(図 1b)。このような大きな保磁力の起源としては、粒径が十分に小さく単磁区構造をとるため物質が持つ磁気異方性を最大限に引き出したこと、 $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  が元々持つ大きな磁気異方性に加えてロジウムイオンの軌道角運動量が寄与して一イオン異方性が向上したことが考えられる。

テラヘルツ時間領域分光法を用い、100 GHz 以上の高周波ミリ波領域において電磁波吸収特性を調べたところ、ゼロ磁場強磁性共鳴による電磁波吸収ピークが観測され、共鳴周波数は 182 GHz ( $\epsilon$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )から 222 GHz ( $\epsilon$ - $\text{Rh}_{0.19}\text{Fe}_{1.81}\text{O}_3$ )へとロジウム置換量の増大に伴い高くなっていった。ゼロ磁場下の強磁性共鳴では、共鳴周波数は異方性磁界に比例して高くなることから、今回観測された磁性体最高の共鳴周波数は、 $\epsilon$ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  の大きな磁気異方性により達成されたものと考えられる(図 1c)。

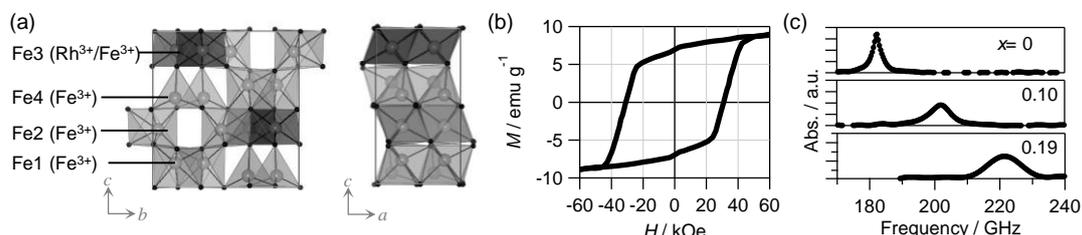


図 1  $\epsilon$ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  の(a)結晶構造、(b)結晶配向体の磁気ヒステリシス<sup>[2]</sup>、(c)ミリ波吸収スペクトル<sup>[3]</sup>。

[1] A. Namai, S. Sakurai, M. Nakajima, T. Suemoto, K. Matsumoto, M. Goto, S. Sasaki, S. Ohkoshi, **J. Am. Chem. Soc.**, 131, 1170 (2009).

[2] A. Namai, M. Yoshikiyo, K. Yamada, S. Sakurai, T. Goto, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, T. Suemoto, H. Tokoro, and S. Ohkoshi, **Nature Communications**, 3, 1035 (2012).

[3] A. Namai, M. Yoshikiyo, S. Umeda, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, K. Yamaguchi, T. Suemoto, and S. Ohkoshi, **J. Mater. Chem. C**, 1, 5200 (2013).

# P-40 GaMnAs における本質的な反射磁気円二色性スペクトル Intrinsic spectrum of reflection magnetic circular dichroism of GaMnAs thin films

工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢研究室  
寺田 博、大矢 忍、田中 雅明

The band structure of ferromagnetic semiconductor GaMnAs has been studied and discussed with magnetic circular dichroism (MCD) spectroscopy. It is known that blue shifts of  $E_0$  peak, which corresponds to the band gap, are observed in the reflection MCD spectra of GaMnAs [1]. These results seem to imply that GaMnAs is degenerated; however, in the recent studies of resonant tunneling spectroscopy, it has been revealed that the Fermi level of GaMnAs stays in the band gap even when Mn is heavily doped [2]. In this study, we successfully obtain the intrinsic MCD spectra of GaMnAs, which is not influenced by optical interference using the experimentally estimated off-diagonal element  $\varepsilon_{xy}$  of the dielectric tensor of GaMnAs. We find that the MCD spectra can be strongly influenced by optical interference and that the experimental spectra of thin films even with 10 - 20 nm thicknesses can be different from the intrinsic MCD spectra.

We have grown GaMnAs thin-film samples composed of  $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$  ( $d$  nm)/ GaAs (100 nm) on semi-insulating GaAs (001) substrates by low temperature molecular beam epitaxy (inset of Fig. 1(a)). The main panel of Fig. 1(a) shows the experimental MCD spectra measured at 5 K for the GaMnAs thin films with various thicknesses  $d$  with the external magnetic field  $\mu_0 H = 1$  T applied perpendicular to the sample plane. The black vertical broken lines represent the energies of the critical points of GaAs at 4.2 K. As shown in Fig. 1(a), the MCD spectra are strongly dependent on  $d$ ; the peaks' position and sign of the MCD spectra intricately vary with  $d$ . We have successfully estimated  $\varepsilon_{xy}$  of GaMnAs that can explain the  $d$  dependence of MCD spectra of GaMnAs in the previous study [3]. Figure 1(b) shows the MCD spectra of GaMnAs calculated by using the estimated  $\varepsilon_{xy}$ , and Fig. 1(c) shows the real and imaginary parts of the estimated  $\varepsilon_{xy}$ . For better fitting, the values of  $d$  are slightly changed from nominal  $d$  in the calculation. As shown in Figs. 1(a) and (b), the MCD spectra are quantitatively reproduced for all the  $d$  values by using the same  $\varepsilon_{xy}$  shown in Fig. 1(c). The calculated MCD spectrum that is free from interference is shown in Fig. 1(b) with the black curve. In the calculation of the intrinsic MCD spectra, we took the limit of MCD as  $d$  approaches infinity. We see that the calculated intrinsic MCD spectrum is largely different from the experimental MCD spectra of the GaMnAs thin films. Even though the  $E_0$  peak in the experimental MCD spectra of GaMnAs shown in Fig. 1 with arrows shifts from the band gap energy of GaAs (= 1.5 eV), it is not the case in the intrinsic MCD spectrum. This means that the band structure should be discussed with intrinsic MCD spectra, but not with experimental raw spectra.

This work was partly supported by Grant-in-Aids for Scientific Research including Specially Promoted Research, and Project for Developing Innovation Systems of MEXT.

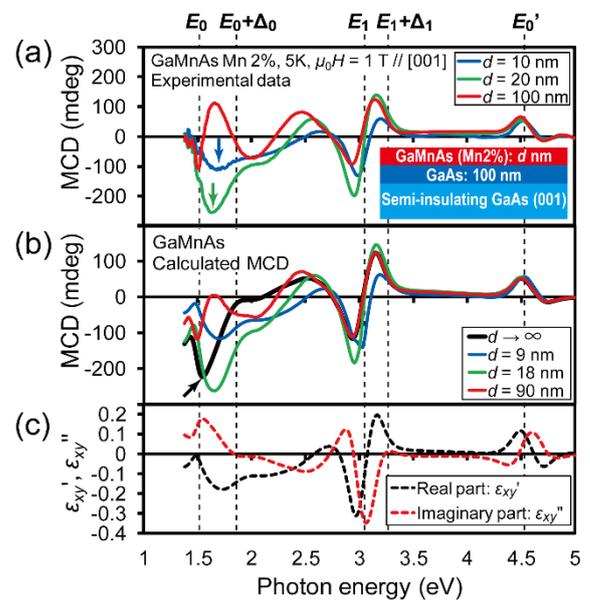


Fig. 1 (a) Experimental MCD spectra of the  $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$  films with  $d = 10$  (blue curve), 20 (green curve), and 100 nm (red curve) at 5 K with  $\mu_0 H = 1$  T applied perpendicular to the film plane. The inset shows the schematic sample structure of our  $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$  samples. (b) Calculated MCD spectra of the  $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$  films with  $d = 9$  (blue curve), 18 (green curve), 90 nm (red curve), and the calculated intrinsic MCD spectrum (black curve). (c) The real (black) and imaginary (red) parts of  $\varepsilon_{xy}$  experimentally estimated for  $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ .

[1] T. Jungwirth *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 227201 (2010).

[2] I. Muneta, H. Terada, S. Ohya and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **103**, 032411 (2013).

[3] H. Terada, S. Ohya and M. Tanaka, The 75th JSAP Autumn Meeting 2014, 20a-S10-6.

# P-41 原子・分子修飾したグラフェンの低温電気伝導特性

## Low temperature transport properties of graphene modified by atoms/molecules

理学系研究科 物理学専攻 福山研究室<sup>A</sup>、工学系研究科 電気系工学専攻<sup>B</sup>、低温センター<sup>C</sup>  
 中山 和貴<sup>A</sup>、松井 朋裕<sup>A</sup>、Eric Lebrasseur<sup>B</sup>、三田 吉郎<sup>B</sup>、福山 寛<sup>A, C</sup>

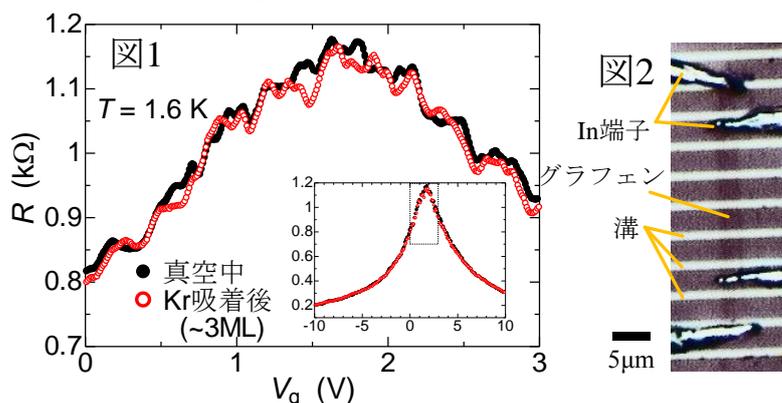
グラフェンは炭素原子のハニカム格子からなる理想的な2次元物質である。線形のエネルギー分散をもち、電子やホールがニュートリノと同じ質量ゼロのディラック粒子として振舞うため基礎物理の観点から注目される一方、高い熱伝導度、電気伝導度を備え、機械的にも強くしなやかであることから、優れた次世代エレクトロニクス素材としての応用が期待されている。特にスイッチング素子への利用にはゲート電圧制御によるオンオフ特性を実現する必要がある、そのためのバンドギャップ誘起等、グラフェンの物性制御に向けた研究が世界中で進められている。我々は、グラフェンの原子・分子表面修飾による物性制御に注目している。グラフェンに対して $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ 構造でLi原子を吸着させた場合ハニカム格子の対称性が破れバンドギャップが誘起されると予測される[1]。また、グラフェンと吸着子の電子親和力の差を利用して電子やホールをドーピングしたり、不均一ポテンシャルを誘起することで伝導度や移動度を変えることができる[2]。

本研究では、グラフェンのKr吸着によるバンドギャップ誘起、およびN<sub>2</sub>O吸着による物性変化をT = 1.6 Kの低温に至る電気伝導度測定により探索した。試料はSiO<sub>2</sub>/n-Si基板上に劈開した単層グラフェンで、レジストによる表面汚染を防ぐためIn細線を電極としてグラフェン上に直接融かし付けた後、真空容器(セル)封入前に真空中・200℃でのベーキングを行い、大気からの吸着物を除去した。吸着面密度を精密に制御するため、セル内には36 m<sup>2</sup>の表面積を持つ劈開グラファイトも封入した。KrをT = 100 Kでセルに導入し、48 Kへ徐冷してグラフェン上に $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ 構造形成に相当する面密度で吸着させ、バンドギャップ誘起を期待したが、電気伝導度のゲート電圧依存性に有意な変化は確認できなかった。また、Krを吸着したまま1.6 Kまで冷却して電気伝導度の温度依存性を測定したが、不純物に由来する量子伝導と思われるピーク構造が見られたものの(図1)、Kr由来の変化は確認できなかった。一方、N<sub>2</sub>OはT = 140 Kで飽和蒸気圧近くまで一定量をセルに導入しておき、110 K、50 Kに冷却して吸着させたが、こちらも電気伝導度に有意な変化は確認できなかった。

以上の原因として、グラフェン下の基板が影響している可能性がある。そこで、その影響をできるだけ排除するため、1 μm幅のマイクロな溝を表面に多数微細加工[3]したSiO<sub>2</sub>/n-Si基板上に劈開した

suspended グラフェン試料(図2: 光顕写真)も作成した。これを用いた吸着実験の結果も発表する予定である。

- [1] Farjam *et al.*, PRB **79**, 045417 (2009).
- [2] Chen *et al.*, Nat. Phys. **4**, 377 (2008);  
Hong *et al.*, PRB **83**, 085410 (2011).
- [3] 大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)にて加工。



# MgZnO/ZnO二次元電子系における最近の発展

## Recent advancements in the MgZnO/ZnO two-dimensional electron system

工学系研究科物理工学専攻<sup>1</sup>, 東北大学金属材料研究所<sup>2</sup>, JST-PRESTO<sup>3</sup>, 理研-CEMS<sup>4</sup>  
 J. Falson<sup>1</sup>, Y. Kozuka<sup>1</sup>, A. Tsukazaki<sup>2,3</sup>, M. Kawasaki<sup>1,4</sup>

The MgZnO/ZnO two-dimensional electron system has emerged in recent years among oxide materials to display exceptionally long electron scattering times on the order of 300 ps (See Fig. 1a). The realization of such quality outside of the realm of traditional semiconductor materials has resulted in the observation of unique electron correlation phenomenon at low temperatures, such as an anomalous series of even-denominator fractional quantum Hall states<sup>[1]</sup>.

In this presentation we canvass recent advances in this system. In addition to the long transport scattering time, we reveal that the quantum scattering time is on the order of 20 ps, which is comparable to the best AlGaAs/GaAs heterostructures in existence. This

value takes into account all scattering events and is an indication of a materials “quality”. We explain these improvements through an understanding of scattering mechanisms, while relating the high quality to the observation of exotic phenomenon such as the fractional quantum Hall effect and microwave induced resistance oscillations.

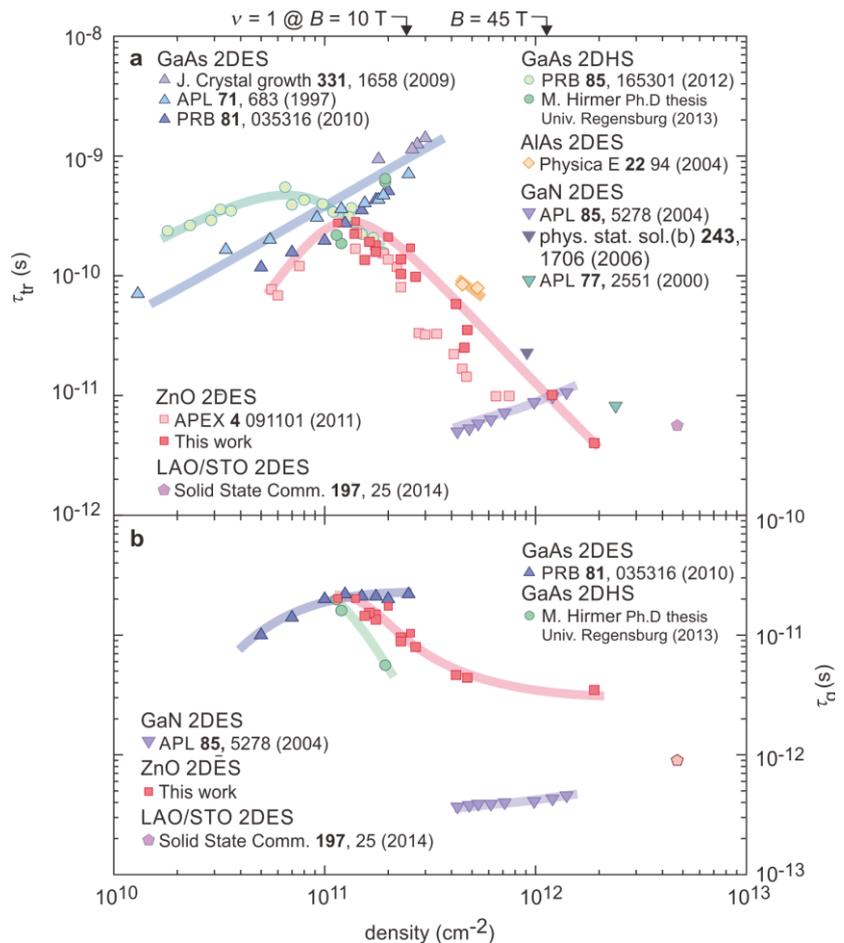


Figure 1: Inter-material comparison for prevailing high quality two-dimensional electrons systems of **a**, transport scattering times  $\tau_{tr}$  and **b**, quantum scattering times  $\tau_q$ .

[1] J. Falson, *et al.* Nature physics, *in press*.

# P-43 オクタシアノニオブ金属錯体における高プロトン伝導性 High proton conductivity on octacyanonioabate-based metal assembly

理学系研究科化学専攻大越研究室  
中川幸祐、井元健太、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[1-3]。本研究では、Mn-Nb オクタシアノ金属錯体である  $\text{Mn}_3[\text{Nb}(\text{CN})_8]_2$

$(4\text{-aminopyridine})_{10}(4\text{-aminopyridinium})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (**1**)において  $\sigma = 4.6 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$  という高い伝導性を見出した。**1** は構造中にプロトン化した非配位有機分子を持ち、プロトン伝導経路の一部となっていた。

単結晶構造解析を行った結果、**1** は Mn と Nb がシアノ基で架橋された2次元層状構造を持つことが分かった(図1)。2次元ネットワーク構造の空隙には、プロトン化された非配位有機分子と結晶水分子が存在していた。Mn イオンに配位した水分子、結晶水分子およびプロトン化非配位有機分子は、3次元水素結合ネットワークを形成していることが示唆された。低温センターより供給される液体ヘリウムを用いて磁気特性の測定を行ったところ、磁場中冷却磁化曲線において20 K 付近より磁化が増大した後9 K 付近を境に磁化が減少するという振る舞い

が見られた。また、磁化-磁場曲線の測定では、200 Oe において変曲点を示すという結果が得られた。これらの結果から、**1** はスピントリップを示すメタ磁性体であることが示唆された。さらに、室温において**1** 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% RHでの伝導度( $\sigma$ )は  $1.0 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$  と求められた(図2)。次に、温度を上げて測定すると $\sigma$ は増加していき、322 Kでは  $4.6 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$  という値を示した。この結果に基づく  $\ln(\sigma T)$  対  $T^{-1}$ プロットより、活性化エネルギー( $E_a$ )は0.48 eV と見積もられた。また、湿度減少に伴って $\sigma$ は著しく低下し、45% RHでは  $\sigma = 1.7 \times 10^{-8} \text{ S cm}^{-1}$  という値を示した。湿度100%において観測された**1** の高い伝導率は、超イオン伝導に分類される。プロトン化非配位有機分子、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、バケツリレのようにプロトンが伝導したことにより、**1** が高い伝導性を示したと考えられる(Grotthuss機構)。

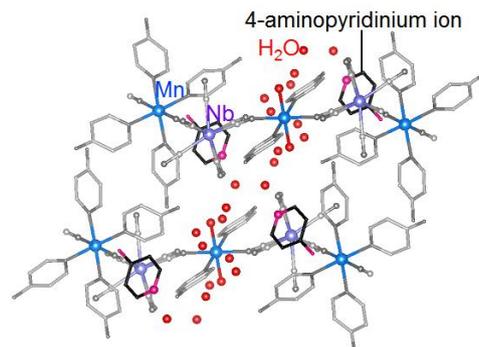


図1. *b* 軸方向から見た**1**の構造

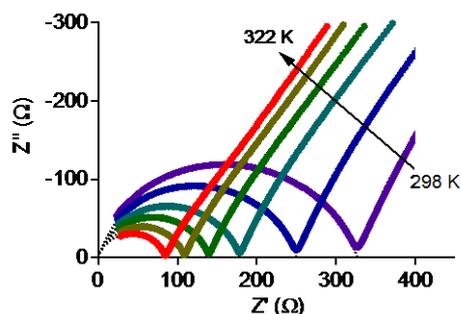


図2. **1**の伝導率の温度依存性の測定結果

[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).

### 1. 背景と目的

環境ノイズは、磁気計測に大きな影響を与える。よって、磁気計測において環境ノイズ源とその特性を明らかにすることは重要である<sup>[1]</sup>。本研究では、磁気計測が行われている低温センター共同利用研究室および工学部 10 号館で、主要因となる地下鉄やエレベータの運転状況に照らしてノイズ発生源について定量的に検討した。さらに、小型磁気シールドボックスによるノイズ抑制効果を評価した。

### 2. 測定方法

#### 2-1. 環境磁気ノイズの測定

南北(X)、東西(Y)、鉛直(Z)方向からの環境ノイズを測定するため、広範囲の三軸磁界を測定できるフラックスゲート磁束計実験室内の環境ノイズの経時変化測定を行った。

#### 2-2. 測定環境

低温センター205号室の鉛直、東方向に東京メトロ千代田線の根津駅があり、大学敷地と並行するように軌道が走っている。千代田線の起動電力は直流 1500 V あり、架線への漏れ電流は最大で 400~900 A であると予測する。また、約 2 m の位置にエレベータがある。

#### 2-3. 小型磁気シールドボックス

遮蔽性の高いパーマロイ素材を使用した 2 層構造で、床の鉄筋からの影響を防ぐために、アルミニウムで作られた非磁性架台の上に固定されていることが特徴である。

### 3. 結果

#### 3-1. 低温センター及び実験室内の環境磁気ノイズ

フラックスゲート磁束計で測定した環境ノイズの経時変化量を図 1 に示す。日中は三軸方向それぞれに大きな変動がある。夜間の地下鉄休止時間帯においては変動幅が大幅に減少し、三軸ほぼ同一であった。根津駅方面からの電流値の計算結果は 578 A となり、予測値とほぼ一致した。また、エレベータを任意に移動させた結果、エレベータの昇降に合わせて磁束計も同様に变化した。曝露磁界の測定においては、低温センター、実験室、共にノイズレベルに差異はなかった。

#### 3-2. 小型磁気シールドボックスの評価

シールドボックス内の環境ノイズの経時変化量は最大で 1/50 程度の減衰を確認した。また室内と同様に夜間の地下鉄休止時間帯では変動幅が減少し、三軸ほぼ同時であった。実験室とシールドボックス内の同時計測による周波数特性を図 2 に示す。背景ノイズ(0.1~100 Hz)、電気機器から発生する商用電源磁気ノイズ(50 Hz)と特定周波数のノイズの混在していることが確認できる。1 Hz 以下の低周波ノイズに関しては、3 軸それぞれ 1/20~1/30 に低減されていることを確認した。

### 4. 考察

本研究では、実験室及び低温センターの環境ノイズ源について検討を行い、磁気シールドボックスによるノイズ低減効果を評価した。今回の測定により、環境ノイズは地下鉄の運行が主な起因であることがわかった。しかし、微弱磁場計測では、今回用いた小型シールドボックスでは、遮蔽効果が不十分であると考えられる。その一方、補償コイルにより磁場を発生させてノイズの低減を行うアクティブ磁気シールド法もある。今後は磁気シールドボックスと補償コイルによる低周波環境ノイズの低減を検討する。

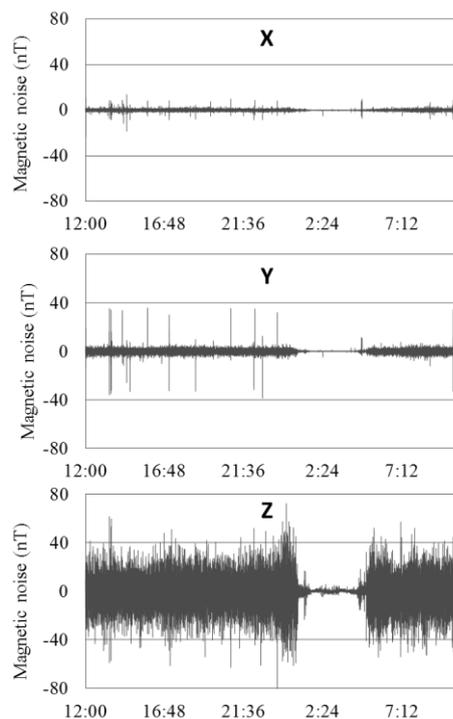


図 1. 低温センター 205 号室  
環境ノイズ測定結果

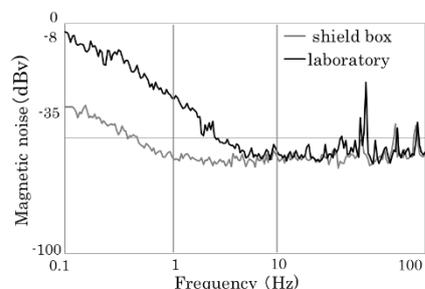


図 2. 実験室とシールドボックス  
のノイズ周波数特性

[1] 山崎 慶太:「環境磁気ノイズと磁気シールド技術 I : 電車に起因する磁界変動」, 日本応用磁気学会誌 29(4) pp. 405-415 (2005).

## P-45 錫吸収体を搭載した超伝導転移端センサの開発 Development of TES microcalorimeters with Sn absorber

<sup>1)</sup>東大工・バイオエンジニアリング専攻・原子力国際専攻・高橋研究室

<sup>2)</sup>理研・テラヘルツイメージング研究室

<sup>3)</sup>日本原子力研究開発機構・大洗研究開発センター

○畠山 修一<sup>1</sup>, 入松川 知也<sup>1</sup>, 大野 雅史<sup>1</sup>, 高橋 浩之<sup>1</sup>,

ダマヤンティ トウシャラ<sup>2</sup>, 大谷 知行<sup>2</sup>

高崎 浩司<sup>3</sup>, 安宗 貴志<sup>3</sup>

微量な試料を精密に元素分析・核種同定しうる次世代 $\gamma$ 線分光技術は、非破壊かつリアルタイムで生体組織や細胞内に含まれるトレーサを高感度に識別しうる可能性を秘めており、また、被曝医療における早期体内汚染の診断へ適用できるため非常に有用である。本研究では極低温における超伝導体の急峻な温度抵抗変化を動作原理とする超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor : TES) 型マイクロカロリメータを用いて、優れたエネルギー分解能で高感度に $\gamma$ 線を検出する次世代 $\gamma$ 線精密分光技術の開発を行っている。放射性試料を用いた核種同定実験から、半導体検出器では見分ける事が不可能な $\gamma$ 線及び蛍光X線のピークをTESによって高感度に検出・分離することに成功した。我々が開発を行っているTES型マイクロカロリメータは極低温における超伝導体の急峻な温度抵抗変化を用いたスペクトロメータであり、既存放射線検出器とは全く異なる検出原理を有し、半導体検出器と比較してエネルギー分解能を2桁程向上させる事が可能となる。

本研究では、超伝導イリジウム/金 (Ir/Au) 薄膜温度センサ上に、金のバンプポストを設置し、錫吸収体を搭載した検出素子の開発を行い<sup>1)</sup>、これまでに 59.5 keV ( $^{241}\text{Am}$ )、122 keV ( $^{57}\text{Co}$ ) の $\gamma$ 線に対してそれぞれ 156 eV FWHM、166 eV FWHM のエネルギー分解能を達成している<sup>2)</sup> (図1参照)。さらに、Pu試料の精密測定実験より Ge 半導体検出器では識別不可能な  $^{239}\text{Pu}$  (56.8 keV) のピークを高感度に検出・分離する事に成功している<sup>2)</sup>。現在、希釈冷凍機から完全に分離独立させた GM プレクーリングユニットを有する新しい低振動冷却システムを導入し、この冷却システム内に多画素読み出し回路を組み込んだ検出システムを構築している。これにより、ノイズレベルの低減とピクセルアレイ化(大面積化)が実現され、さらなる検出性能の向上が期待される。

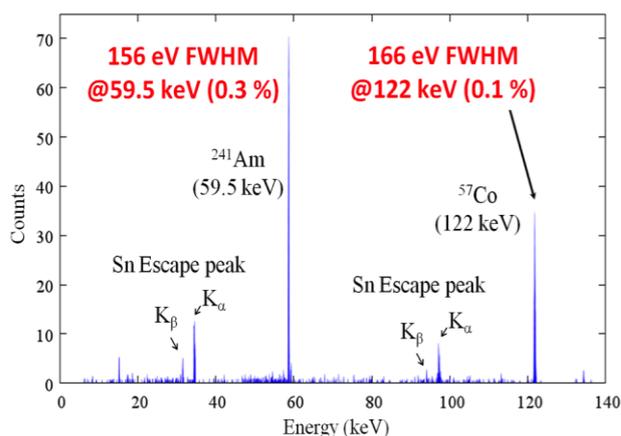


図 1.  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$  線源のエネルギースペクトル

[1] S. Hatakeyama et al., "Development of Hard X-ray and Gamma-ray Spectrometer Using Superconducting Transition Edge Sensor", IEEE Trans. Appl., Vol.23, no.3, 2100804, 2013.

[2] S. Hatakeyama et al., "Gamma-ray Spectrometer based on Transition Edge Sensor for Nuclear Materials Analysis", J. Low Temp. Phys., in press, 2014.

## P-46 Enhancement of ferromagnetism by manipulating the wavefunctions in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells

工学系研究科電気系工学専攻田中研究室

Le Duc Anh, Pham Nam Hai<sup>i</sup>, 田中雅明

工学系研究科応用物理工学専攻岩佐研究室

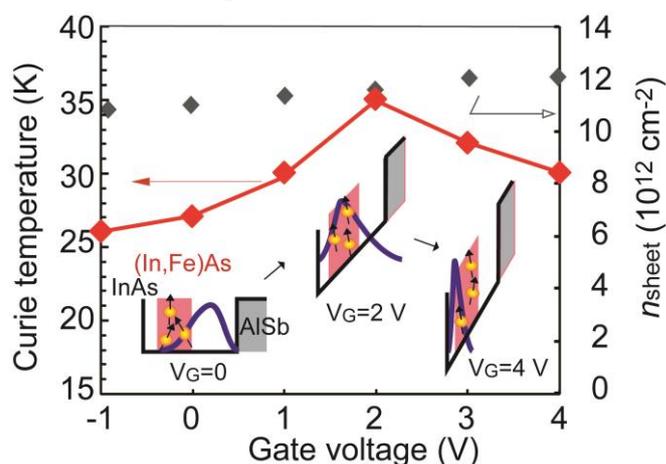
笠原裕一<sup>ii</sup>、岩佐義宏

In quantum wells (QWs) containing a n-type ferromagnetic semiconductor (FMS) (In,Fe)As thin layer, the quantum size effect (QSE) gives a unique opportunity to tune the ferromagnetism by manipulating the two dimensional wavefunctions using a gate voltage  $V_G$ . This method has enabled us to effectively decrease the Curie temperature ( $T_C$ ) of a (In,Fe)As thin film ( $\Delta T_C/T_C = -42\%$ ) with almost no change in carrier density<sup>1</sup>. Here we show that by designing an appropriate QW structure,  $T_C$  of the (In,Fe)As thin film can also be enhanced with the same method.

We used a trilayer QW consisting of InAs (2 nm)/ (In<sub>0.94</sub>,Fe<sub>0.06</sub>)As (5 nm)/ InAs (3 nm)/ Si-doped InAs (5 nm) on AlSb (300 nm), grown on a semi-insulating GaAs (001) substrate by molecular beam epitaxy. The sample was patterned into a 50×200 μm<sup>2</sup> Hall bar; a Au/Cr side-gate electrode was deposited; then the channel was covered with an electrolyte to form the FET structure. The transport and magnetic properties of the trilayer QW were characterized mainly by Hall measurements. The Si donors in the bottom 5 nm InAs layer supply electrons into the QW, as well as attract the electron wavefunctions towards the AlSb barrier side (see the left inset of Fig. 1). Thus, the electron carriers and the Fe magnetic moments in the QW are initially separated when the gate voltage  $V_G$  is 0. When applying positive  $V_G$ , the two dimensional wavefunctions are moved towards the (In,Fe)As layer, thus the overlap of the wavefunctions and the local Fe magnetic moments is increased. As a result,  $T_C$  is enhanced and reaches a maximum when the overlap is largest at  $V_G = 2$  V (middle inset of Fig.1). Further increase in  $V_G$  to 3 - 4 V leads to a decrease in  $T_C$  because the overlap is decreased (right inset of Fig.1). As shown in Fig. 1, while the electron sheet density ( $n_{\text{sheet}}$ ) of the QW is nearly unchanged (largest  $\Delta n_{\text{sheet}} = 1.3 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>),  $T_C$  of the (In,Fe)As layer was increased from the initial value of 27 K ( $V_G = 0$  V) to 35 K ( $V_G = 2$  V) and then decreased to 30 K ( $V_G = 4$  V). This result indicates that one can freely control the  $T_C$ - $V_G$  relationship by designing the magnetic QW structure. The present electrical control of ferromagnetism by wavefunction manipulation in n-type FMS QW demonstrated in this study is attractive for novel device applications.

This work is supported by Grant-in-Aids for Scientific Research including the Specially Promoted Research, the Project for Developing Innovation Systems of MEXT, and the JSPS KAKENHI project number 257388.

**Fig. 1** Change of  $T_C$  (red diamonds) and  $n_{\text{sheet}}$  (grey diamonds) of the (In,Fe)As FET structure with different gate voltage  $V_G$ . The change of  $T_C$  is caused by the movement of the electron wavefunction inside the trilayer InAs/(In,Fe)As/InAs QW (illustrated in the insets).



[1] L. D. Anh *et al.*, 61st JSAP Spring Meeting, 19p-E7-14, Aoyama Gakuin University, March 17-20, 2014

<sup>i</sup> 現所属：東京工業大学理工学系研究科電子物理学専攻、<sup>ii</sup> 現所属：京都大学理学研究科物理学専攻

# P-47 超小型サブミリケルビン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<sup>A</sup>、理学系研究科・物理学専攻・福山研<sup>B</sup>  
戸田 亮<sup>A</sup>、福山 寛<sup>A,B</sup>

近年、物質合成技術の発展によって不純物の少ない高品質試料が合成されるようになり、量子臨界現象をはじめとしたさまざまな分野でより低温域での実験が望まれている。20 mK 程度までの極低温環境は自動制御可能な市販の希釈冷凍機で実現できるが、1 mK を切る超低温環境を連続的に実現でき、操作も簡便な市販の冷凍機は現在までのところない。通常、超低温の生成には銅の核断熱消磁冷凍法を用いるが、これには 200  $\mu$ W@100 mK 以上の冷却力をもつ希釈冷凍機と 70 mm 以上のボア径で 8 T 近い最大磁場を実現できる超伝導マグネットという大型設備が必要になる。測定対象にも強磁場を印加したい場合、冷凍用の磁場との干渉を回避するためさらに大型になり、特殊な実験室の建設が必要になる。また、単発式冷却なので連続的に超低温を得ることはできない。そこで我々は、既存の希釈冷凍機に搭載できるほど小型で、0.7 mK までの任意の温度を連続発生でき、かつ自動制御で取り扱いも簡便な「超小型サブミリケルビン連続冷凍システム」の開発を始めた。開発したシステムを低温センターに設置して共同利用に供するだけでなく、多くの研究者が手元で手軽に扱えるものを目指している。

本システムでは、消磁物質として増強核磁性体 PrNi<sub>5</sub> を用いる。Van Vleck 常磁性体である PrNi<sub>5</sub> では、Pr 原子核が感じる磁場は、超微細相互作用によって外部磁場の約 12 倍となる[1]。図 1 に示すように、1.2 T の磁場で、8 T を印加した銅と同じ冷却能力（単位体積あたりのスピンエントロピー減少量）が得られる。このため、外界への漏れ磁場がほとんどないよう冷凍用のマグネットを磁気シールドで囲んでも、最外径 38 mm、長さ 150 mm の円筒内に納めることができる。これを希釈冷凍機の混合器上に 2 つ搭載し、4 つの Zn 超伝導熱スイッチ(Zn-HSW)を用いて切り替え使用することで、連続的な冷却が可能となる（図 2）。本ポスターでは、このシステムの特徴や設計の詳細を発表する。

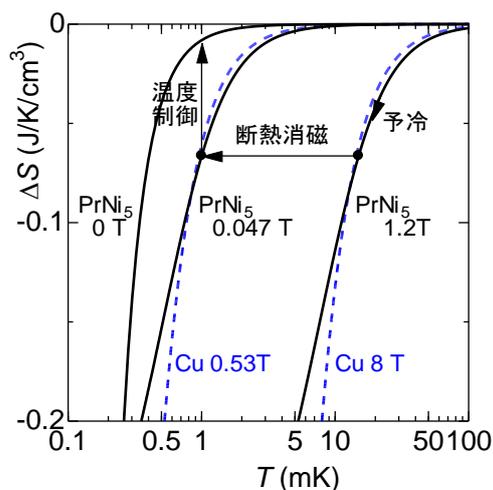


図 1. 核断熱消磁冷凍中のエントロピー

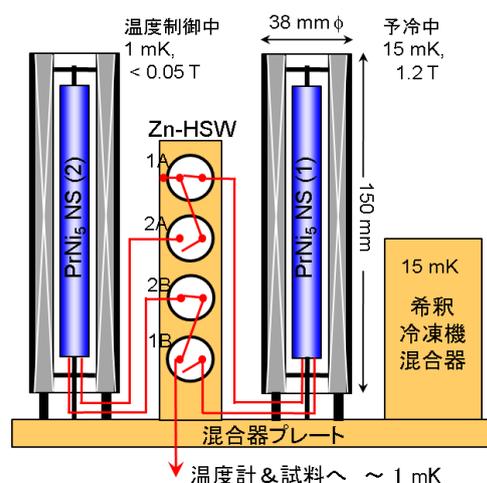


図 2. 小型連続冷凍システムの概要

[1] F. Pobell, "Matter and Methods at Low Temperatures 2nd Ed.", Springer (1996).

## 低温センター

寺岡 総一郎、戸田 亮、阿部 美玲、加茂 由貴、志村 芽衣

低温センターでは、学内の低温研究のために使用する液体窒素・液体ヘリウムを供給しており、その供給量は年々増加している。寒剤の利用者向けに安全講習会を毎年開催しているが、こちらの受講者も年々増加しているところである。低温研究の広がりに伴い、低温実験や寒剤の取り扱いに関する問い合わせも増えていることから、今回、平成 26 年度技術職員研修「低温技術（初学者コース）」を開催することにした。

本研修は、寒剤の取り扱いや低温実験に詳しくない初学者の方に、寒剤の安全な取り扱い方法を講義および実習を通して身につけていただくことを目的としている。講義では 1) 低温寒剤の取扱い（低温寒剤の使用に関するルール・法規制、低温寒剤の性質と安全な取り扱い方法、低温センターからの寒剤入手方法）、2) 低温実験の基礎（温度の定義、様々な温度計の測定原理と留意点、低温環境の維持と温度制御法）、3) 液体ヘリウムの使い方（液体ヘリウムの性質、液体ヘリウム移送方法、蒸発ヘリウムガスの回収）、4) 低温の生成、5) 低温環境での実験技術（真空環境について、低温環境で測定する場合の留意点（微小信号測定）、超伝導の利用（マグネット、SQUID））について説明する。実習では、1) 液体窒素使用実習（液体窒素容器の保管管理と運搬、液体窒素の移送・汲出し、液体窒素を用いた物質冷却と物性変化）、2) ガスボンベ使用実習（ガスボンベの設置・確認運搬、圧力調整器の取付と使用）、3) 液体ヘリウムトランスファ実習/液化回収設備見学、4) 液体ヘリウムトランスファ実習、5) 真空シール実習、6) 液体ヘリウム使用実習（予冷、液体ヘリウムのトランスファ、交換ガスによる冷却、液体ヘリウムの蒸発冷却）を予定している。このうち液体窒素を用いた物質冷却実習では試料物質に予め熱電対を埋め込んでおき試料中心温度をモニターする。冷却曲線には膜沸騰領域と核沸騰領域の境界に対応して冷却曲線に折曲りを生じ、途中から冷却速度が速くなる筈である。さらに金属と樹脂とでは後者のほうが先に核沸騰領域に移行するが、最終的には金属が早く熱平衡に達することの観測を目標としている。異種材料の熱収縮差のデモンストレーション実験も準備中である。液体ヘリウム使用実習では小分け容器から別の小分け容器に液体ヘリウムを移送（トランスファ）する作業と熱音響式液面計の使用方法を習得する。移送後は液量を計測して移送効率の評価も行う予定である。また低温実験技術の実習としてインジウムを用いた断熱真空容器（缶）の低温真空シール作業とヘリウムリークディテクタの使用法、熱交換ガスによる冷却方法の習得、ならびに熱交換ガスの有無による冷却効果の違いのデモンストレーション実験などを予定している。ポスターでは講習の実施当日の様子などを紹介する。

# P-49 本郷キャンパスでの寒剤供給業務紹介

## Introduction about liquid nitrogen supply and liquid helium supply in Hongo campus

低温センター 液化供給部門  
 加茂 由貴、志村 芽衣、寺岡 総一郎、○阿部 美玲

低温センターではかねてから低温センターウェブサイト[1]や安全講習会資料[2]など各種資料の英文化作業を進めている。液化供給部門でも寒剤供給の受け方の英文化に着手した。本発表では、本郷キャンパス内での寒剤供給の概要、液体窒素や液体ヘリウムの供給方法や関連する諸手続き、液体窒素容器等再検査について、主なポイントを英文で紹介する。

来年度前半にはこれらの内容を「低温センター利用の手引き（寒剤編[3]、容器等再検査編[4]）」の英文版としてまとめ、低温センターウェブサイトへ掲載したいと考えている。



図 1. 液化供給部門の業務

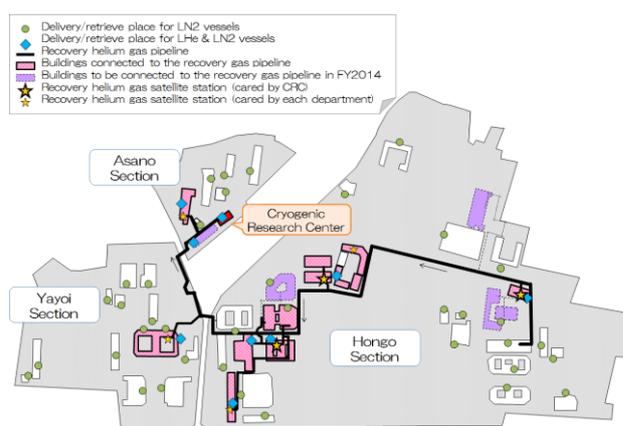


図 2. 本郷地区キャンパス 寒剤集配場所及びヘリウムガス回収配管網概略図

[1] Cryogenic Research Center, The University of Tokyo

(オンライン) [http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/index\\_e.html](http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/index_e.html)

[2] Safety Training Program (オンライン) [http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/gyomu/koshu/index\\_e.html](http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/gyomu/koshu/index_e.html)

[3] 利用の手引き(寒剤編) (オンライン) <http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/parts/tebiki-kanzai.pdf>

[4] 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>

## 特別講演

# 特別講演 研究対象としてのヘリウムの量子物性 Research Interests of Helium as a Condensed Matter

理学系研究科・物理学専攻、低温センター

Department of Physics, Graduate School of Science, Cryogenic Research Center

福山 寛

Hiroshi Fukuyama

For most of researchers, liquid helium is just a cryogen with which they can produce very low temperatures or high magnetic fields using superconducting magnets. It is indispensable in many research fields from basic to applied ones, and perhaps the most common usage of helium is MRI diagnostics and NMR spectroscopy at present. In this talk, I would like to draw attention to another worth of helium as a condensed matter for basic research.

Since over a hundred years ago when helium gas was first liquefied by Kamerlingh-Onnes in Leiden, liquid helium has been a long subject of research of quantum condensed matters usually called “quantum liquids and solids”. Electron is a major player in ordinary materials and its properties are determined by quantum mechanics, Fermi statistics and Coulomb interaction. However, it is impossible to create quantum liquids and solids only by electrons without host atoms. On the other hand, helium atom is light enough so as to be a quantum matter and can condense into liquid or solid by themselves. In addition, the existence of two stable isotopes,  $^4\text{He}$  and  $^3\text{He}$ , makes this system even more interesting particularly from theoretical viewpoint since  $^4\text{He}$  is a particle obeying the Bose statistics (boson) while  $^3\text{He}$  is a particle obeying the Fermi statistics (fermion).

Many new concepts, such as the superfluidity, Bose-Einstein condensation, macroscopic quantum coherence, quantum vortex, p-wave spin-triplet BCS state, Kosterlitz-Thouless transition, nuclear spin ordering and ring exchange, have been drawn in the long research history of this field [1,2]. I will review selected topics in the light of close relationship to current interests in broad condensed matter physics, i.e., exotic quasiparticles like spinon and Majorana fermion, order parameter collective modes like Higgs mode, supersolid like nematic phase, etc.

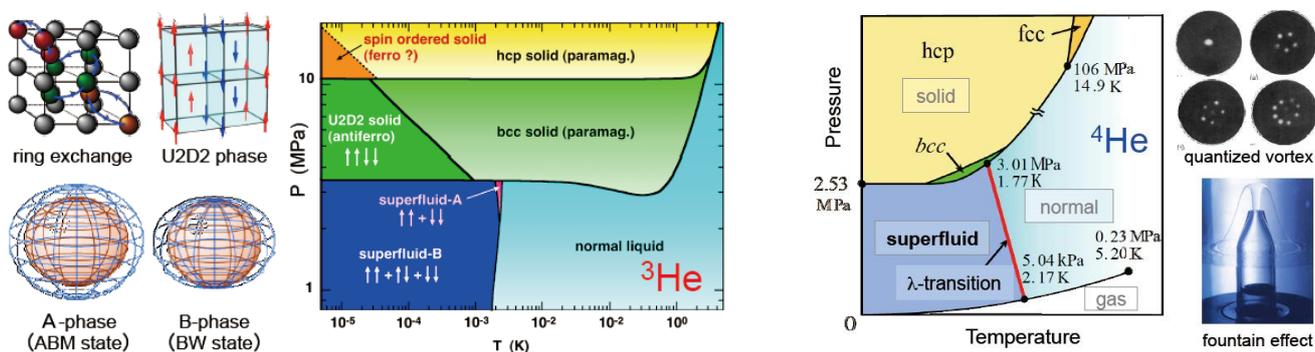


Fig. 1 . Phase diagrams and some related physical concepts of  $^3\text{He}$  (left) and  $^4\text{He}$  (right).

[1] A. J. Leggett, *Quantum Liquids* (Oxford University Press, NY, 2006).

[2] D. D. Osheroff, *Nuclear Magnetic Order in Solid  $^3\text{He}$* , *J. Low Temp. Phys.* **87**, 297 (1992).







第6回  
低温センター研究交流会  
概要集

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2286）

e-mail：conference@crc.u-tokyo.ac.jp

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



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO