

## 1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として中西亮介と武内康範が、10月から Hongrui HUANG が新しくメンバーに加わった。たま、中国科学アカデミーからの派遣博士研究員として JianLin WANG が12月から加わった。3月には学振特別研究員の一ノ倉聖が物質材料研究機構に移動した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもに半導体や金属、トポロジカル絶縁体結晶表面上に形成される種々の表面超構造や原子層を利用し、原子尺度の低次元電子系に固有な電子状態や電子輸送特性、スピン状態・スピン流を明らかにし、機能特性として利用することをめざしている。最近の主な話題は、トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体結晶の表面状態、ラシュバ効果によるスピン分裂した表面状態、グラフェン、シリセン、原子層超伝導などである。このようなナノマテリアルを様々な実験手法を用いて多角的に研究を行っている。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

### 1.1.1 表面電子・スピン輸送

#### タリウム2原子層での超伝導 - 金属 - 絶縁体転移

Si(111) 表面に形成されるタリウム (Tl) 2 原子層において、 $T_c = 0.96$  K の超伝導が発現することを発見したが、本年度はその面直磁場依存性を調べた。図 1.1.1 のように 0.4 T 以上の磁場中では絶縁体的な温度依存性となり、磁場誘起「超伝導 - 絶縁体転移」と解釈できる。0.4 T 以下の弱磁場中では、挿入図のように、あたかも「常伝導金属」のように、面抵抗が最低温度付近で一定の有限値をとった。これは、磁束運動による散逸に起因すると考えられており、「Bose 金属モデル」が最も良く磁場依存性を再現した。これは局所的に Cooper 対が生じているものの、系全体にコヒーレンスが広がっていない状態を指す。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

#### Pb/Ge(111) 原子層の超伝導

Ge(111) 表面上では、1.354 原子層 (ML) の Pb が SIC (striped incommensurate) 構造と呼ばれる相を形成し、それ以上の吸着量では SIC と Pb の 3 次元島が共存する。この系の極低温・強磁場下での電気伝導測定を行った結果、SIC 構造では、 $T < 5$  K で弱反局在効果に由来する電気抵抗の増加を観測した。SIC と Pb の 3 次元島の共存状態では、2 段階の電気抵抗の減少を観測した。 $T \sim 7$  K 付近での抵抗減少

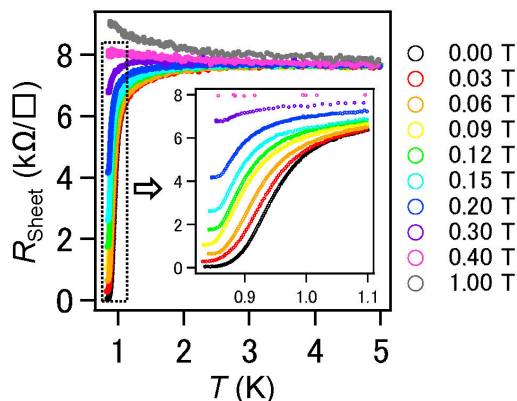


図 1.1.1: Si(111) 表面上のタリウム 2 原子層の電気抵抗の温度・印加磁場依存性. (S. Ichinokura, *et al.*, 2D Materials 4, 025020 (2017)).

は Pb 島に由来した超伝導転移と考えられ、 $T < 2$  K での抵抗減少は SIC 構造に由来した超伝導転移であり  $T_c = 0.75$  K と見積もられた。SIC 構造の超伝導発現には、Pb 島からのキャリアドープまたは Pb 島からの超伝導近接効果が寄与していると考えられる。

#### 水素終端 SrTiO<sub>3</sub> 表面の輸送特性

SrTiO<sub>3</sub>(001)-1 × 1 (TiO<sub>2</sub> 面) に原子状水素 H を暴露すると金属状態が出現することが報告されている。本研究では超高真空独立駆動 4 探針 STM 装置を用い、*in situ* で電気伝導特性を解析することにより、H 照射後の伝導が 2 次元的であり、伝導が表面領域でのみ起こっていることを明らかにした。さらに、抵抗値の温度依存性が熱活性型の特性を示した。表面近傍でバンドが下方に湾曲し、観測された伝導は表面空間電荷層由来であると言える。

#### 2 層グラフェンのインターカレーションとベリー位相

AB 積層構造の 2 層グラフェンではバンド分散が放物線的となるが、AA 積層構造ではベリー位相が  $\pi$  となりディラックコーン状の直線分散となって移動度が大幅に上昇する。しかし AA 積層構造を人工的に作成することは難しい。今回、超高真空中で AB 積層の 2 層グラフェンに Li をインターカレートして、更にそれを 900 °C に加熱して Li を脱離させると、観測されたシュブニコフドハース振動から、そのベリー位相は  $\pi$  となり、移動度が上昇することがわかった。この結果から AA 積層構造が実現していると言える。(東北大学との共同研究)

## スピン軌道相互作用系での円偏光誘起光起電力

強いスピン軌道相互作用をもつ表面ラシュバ系やトポロジカル絶縁体表面では、いわゆる「スピン・運動量ロッキング効果」により、特定の向きのスピンをもつ電子を光励起すると、それとは直角方向に光電流が流れ出す（逆ラシュバ・エーデルシュタイン効果）。よって、右向きか左向き円偏光によって生じる光起電力に違いが生じる（円偏光 photogalvanic 効果 CPGE）。超高真空中の試料に対して可視光および赤外光でこの効果を高感度で測定するためのシステムを作成した。その結果、Bi(111) および Bi/Ag(111) の表面ラシュバ系では CPGE が検出できなかったが、トポロジカル絶縁体である Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 表面では大きな CPGE が検出できた。前者では反対向きのスピンをもつ電子による相殺効果が効いて CPGE が消失しているが、後者ではその相殺効果が無いためと考えられる。

## トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜

SnTe はトポロジカル結晶絶縁体であり、鏡映対称性によって保護された表面状態を持つ。Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 表面を基板として MBE 法で薄膜作製した結果、極めて平坦性の高い単結晶薄膜の作製に成功した。電気伝導においてもトポロジカル表面状態由来と思われる弱反局在を観測した。また、キャリア補償のため、SnTe に 1% 程度の Li をドーブした試料を作製して、電気抵抗の温度依存性を測定した結果、低温で抵抗が増加する半導体的振る舞いが見られた。

## 4 探針型 STM による有機分子膜の電気伝導測定

4 探針型 STM を用いて、各種有機分子膜のナノスケールでの電気伝導の測定を試みている。化学専攻西原研から提供いただいた金属 Dithiolen 錯体ナノシートの電気伝導測定を行った。金属 Dithiolen 錯体は  $\pi$  共役電子系を持ち、有機伝導体として知られる。特に PtDithiolen 薄膜については、電子線照射やアニールによってキャリアがドーブされて電気伝導度が 5 桁以上増加して縮退半導体的振る舞いを示すことを見出した。（化学専攻との共同研究）

### 1.1.2 表面ナノ構造

#### Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te の角度分解光電子分光測定

SnTe や Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te では多数の Sn 欠損によって p 型になりやすいが、Sb をドーピングすることでフェルミ準位をバンドギャップ中に移動させることに成功した。その試料群において ARPES 測定を行った結果、理論計算によるバルクバンドからは導き出されないバンドを見出し、それが 2 次元性を持つ表面バンドであることが確認された。（広島大学・筑波大

学との共同研究）

#### (Pb,Bi)/Si(111) 原子層の電子状態

Si(111) 表面上に作成した (Pb,Bi) 原子層合金は、重元素のために強いスピン軌道相互作用と超伝導の可能性が期待できる。その電子状態を明らかにするため、走査トンネル顕微鏡・分光 (STM/S) 測定および角度分解光電子分光 (ARPES) 測定を行った。Pb と Bi の蒸着量比に応じて、 $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ 、 $6 \times 6$ 、 $2 \times 2$  など、様々な周期を取る表面規則合金を見出した。特に、 $6 \times 6$  においては、大きなフェルミ面を持つ金属的なバンド分散を観測した。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

## 磁性絶縁体/トポロジカル絶縁体のヘテロ構造

トポロジカル絶縁体において時間反転対称性を破ると異常量子スピンホール効果など興味深い現象を引き起こす。トポロジカル絶縁体 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 表面上に MnSe を蒸着した際、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 第一層目内部に MnBi<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> という新たな構造が形成されることが示された。この新規構造について、自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設 (UVSOR) での X 線磁気円二色性 XMCD 測定、及び東京大学低温センターの MPMS で磁化特性測定を実施した。Mn の L<sub>2,3</sub> 端で残留磁化に由来する XMCD スペクトルを観測し、MPMS によって、面直・面内方向双方で 4 K および室温において M-H カーブのヒステリシスが観測された。これらから、この新規構造が室温においても強磁性であること、及びその強磁性がトポロジカル表面状態にバンドギャップを誘起していることが分かった。（東京工業大学との共同研究）

## Au+Pb 表面合金相の観測

近年、我々は Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb) のような強いスピン軌道相互作用によってスピン分裂したバンドを持つ超伝導体を発見した。このような系ではスピン-重項と三重項クーパーペアの混合など興味深い現象が予言されている。さらに、我々はより転移温度の高い Rashba 超伝導体の候補物質として、Au と Pb を Si(111) 及び Ge(111) 基板上に蒸着して形成される表面合金超構造を研究した。その結果、Si(111)- $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ -(Au,Pb) と Ge(111)- $3\sqrt{3} \times 3\sqrt{3}$ -(Au,Pb) の 2 種類の表面超構造が金属的なバンドを持つことがわかった。今後、極低温での電気伝導測定を行う。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

## 2 層グラフェンの陽電子回折

グラフェン層間に金属原子 (Li, Ca, K など) をインターカレートした系では、超伝導が発現したり特

異なる積層構造が形成される。本研究では、SiC(0001)上に成長した2層グラフェンにLi原子をインターカレートした $C_6LiC_6$ の構造解析を、最表面原子層に極めて敏感な全反射高速陽電子回折法で行った。グラフェン層間へのLi原子のインターカレーション以外に、グラフェン-バッファ層間へもインターカレーションされ、層間距離が約0.5程度増加することもわかった。さらに、Li原子インターカレート前後での2層グラフェンの積層構造の変化が観測された。(高エネルギー加速器研究機構との共同研究)

### 1.1.3 新しい装置・手法の開発

#### 純スピン流注入プローブの開発

AFMやSTM、多端子プローバーに搭載でき、任意の場所でスピン流の生成・測定ができる純スピン流注入プローブの開発を行っている。本年度は昨年度までに開発した試作プローブの検証を行った。金の細線に面内方向の純スピンを注入すると、逆スピンホール効果によりスピンの向きと垂直な方向に電圧が発生する。プローブの向きを変更しながらこの電圧を測定することでスピン注入の検証した。測定された逆スピンホール抵抗は最大3mV/Aであったが、これは金としては典型的な値である。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われました。記して感謝いたします。

- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究A「超高真空SQUIDによる表面超構造超伝導のマイスナー効果の検出」(代表 長谷川修司)
- ・文部科学省 科研費 新学術領域研究「分子アーキテクトにクス：単一分子の組織化と新機能創成」計画研究「機能性4探針STMによる分子の電子・スピン輸送特性の研究」(代表 長谷川修司)
- ・文部科学省 科研費 新学術領域研究「トポロジックな物質科学のフロンティア」応募研究「単層2次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と、超伝導体との接合による協奏現象の探求」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究B「強磁性トポロジカル結晶絶縁体の開発とその空間反転対称性からみた特性の解明」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究B「独立駆動4探針・磁性探針STMによるスピン偏極した1次元電子系の研究」(代表 高山あかり)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的萌芽研究「多探針STMを用いた純スピン流プローブの開発」(代表 保原麗)

#### <受賞等>

- [1] 遠藤由大：第36回表面科学学術講演会 講演奨励賞(スチューデント部門)「SiC結晶上2層グラフェンの輸送特性およびLiインターカレートによる影響」(2017年3月10日)。
- [2] 遠藤由大：日本表面科学会 第4回関東支部セミナーポスター賞(日本表面科学会)「SiC上2層グラフェ

ンにおける量子輸送特性」(2016年10月18日)。

- [3] 一ノ倉聖：Springer Thesis Award, (2016年5月20日)
- [4] 一ノ倉聖：平成28年日本学術振興会リングウ・ノーベル賞受賞者会議派遣事業 採用・派遣(2016年6月26日-7月1日)。
- [5] 一ノ倉聖：表面科学会 第1回関東支部講演大会 講演奨励賞(日本表面科学会)「その場4端子電気伝導測定によるSiC上2層グラフェンの輸送特性」(2016年4月)。
- [6] 遠藤由大：表面科学会 第1回関東支部講演大会 学生講演奨励賞(日本表面科学会)「カルシウムをインターカレートした2層グラフェンにおける超伝導」(2016年4月)。
- [7] 長谷川 修司：2015年度(第14回)APEX/JJAP 編集貢献賞(応用物理学会)2016年4月。

#### <報文>

#### (原著論文)

- [8] S. Ichinokura, L. Bondarenko, A. Tupchaya, D. Gruznev, A. Zotov, A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconductivity in thallium double atomic layer and transition into an insulating phase intermediated by a quantum metal state*, 2D Materials **4**, 025020 (2017).
- [9] T. Nakamura, R. Yoshino, R. Hobara, S. Hasegawa, and T. Hirahara: *Development of a convenient in situ UHV scanning tunneling potentiometry system using a tip holder equipped with current-injection probes*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **14**, 216-224 (2016).
- [10] S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R.-Y. Liu, T. Someya, W.-C. Chen, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C.-M. Cheng, S.-J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T.-C. Chiang, and I. Matsuda: *Proving Nontrivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement*, Phys. Rev. Lett. **117**, 236402 (2016).
- [11] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya, *Origin of the large positive magnetoresistance of  $Ge_{1-x}Mn_x$  granular thin films*, Phys. Rev. B **95**, 014417 (2017).
- [12] R. Ishikawa, T. Yamaguchi, Y. Ohtaki, R. Akiyama, S. Kuroda, *Thin film growth of a topological crystal insulator SnTe on the CdTe (111) surface by molecular beam epitaxy*, Journal of Crystal Growth **453**, 124-129 (2016).

#### (国内雑誌)

- [13] 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, Andrey V. Matetskiy, Leonid V. Bondarenko, Alexandra Y. Tupchaya, Dmitry V. Gruznev, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin: *In situ 電気伝導測定によるRashba型表面構造(Tl, Pb)/Si(111)の超伝導の観測*, 表面科学 **37** (8), 363-368 (2016).

## (著書)

- [14] A. Takayama: *Anomalous Rashba effect of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES*, in e-Book: *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*, ISBN 978-953-51-5056-5.
- [15] 長谷川修司: 物理学を例にとって考える“研究する意味”, in 科学の技法 東京大学「初年次ゼミナール理科」テキスト、東京大学教養教育高度化機構初年次教育部門 増田建・坂口菊恵 編 (2017 東京大学出版会) pp. 214-221.

## (その他)

- [16] 長谷川修司: 役に立つ、役に立たない (巻頭エッセイ), 化学 71 (10), 11-12 (2016).
- [17] 長谷川修司: 学会の国際化 (巻頭言), 表面科学 37 (9), 415-415 (2016).

## (学位論文)

- [18] 遠藤由大: SiC 上 2 層グラフェンにおける量子輸送特性 (修士論文).

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 招待講演

- [19] S. Hasegawa: *Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors*, APCTP-Quantum Materials Symposium 2017, 2017 年 2 月 22 日, YongPyong Resort, Korea.
- [20] S. Hasegawa: *Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors*, 2017 中華民国物理年会 Taiwan-AVS Symposium on Frontiers of 2D Materials, 2017 年 1 月 17 日, 淡江大学、新台北、台湾.
- [21] S. Hasegawa: *Low-Dimensionality, Symmetry Breaking, and Topology on Surfaces*, 2016 IBS Conference -Surface Atomic Wires-, 2016 年 8 月 17 日, Pohang, Korea.
- [22] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 20th International Vacuum Congress, 2016 年 8 月 26 日, Busan, Korea.
- [23] S. Hasegawa: *Symmetry-Broken Monolayer Superconductors The 10th International Workshop on LEEM/PEEM*, 2016 年 9 月 14 日, Monterey, California, USA.
- [24] S. Hasegawa: *Superconductivity and Spin Current at Surface States*, Workshop at the Research Center Julich on Charge transport at surfaces and nanostructures with multi-probe techniques, 2016 年 9 月 21 日, Julich, Germany.
- [25] S. Hasegawa: *Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors*, Workshop of ENS-UTokyo, 2016 年 11 月 17 日, Ecole Normale Superieure, Paris (France).

- [26] S. Hasegawa: *Parity-Broken Atomic-Layer Superconductors*, MPI-UBC-UTokyo Workshop, 2016 年 12 月 5 日, 東京大学.
- [27] A. Takayama: *One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film studied by spin-resolved ARPES*, Spintronics-EMN Las Vegas Meetings, 2016 年 10 月 12 日, Las Vegas, USA.
- [28] S. Ichinokura: *Superconducting Properties of Tl Double Atomic Layer on Si(111)*, The 2nd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces and Crssoo-Strait Symposium on Solid Surfaces, 2016 年 11 月 14 日, National Taiwan University, Taipei.
- [29] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: *Superconductivity in Calcium-Intercalated Bilayer Graphene detected by in situ Resistivity Measurements in Ultrahigh Vacuum*, The 1st International Conference Graphene and related Materials: Properties and Applications, 2016 年 5 月 24 日, Paestum, Italy.

## 一般講演

- [30] S. Hasegawa, T. Nakamura, S. Ichinokura, R. Hobar, R. Akiyama, A. Takayama, A. V. Matetskii, A.V. Zotov, and A. A. Saranin, H. Kim, Y. Hasegawa: *A Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductor*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2017, 2017 年 1 月 13 日, 富良野、北海道.
- [31] D. Fan, H. Ishihara, R. Akiyama, R. Hobar, A. Takayama and S. Hasegawa: *Optical-Helicity-dependent Photocurrent in Strong Spin-Orbit Coupling Thin Films Grown on Si Substrate*, The 2nd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces and Crssoo-Strait Symposium on Solid Surfaces, 2016 年 11 月 14 日, National Taiwan University, Taipei.
- **The 20th International Vacuum Congress (IVC-20)**, 2016 年 8 月 21-26 日, Busan, Korea
- [32] Y. Endo, S. Ichinokura, K. Suzuki, K. Sugawara, R. Akiyama, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: *Transport properties of bilayer graphene studied by in situ four-point probe resistance measurements*, 8 月 24 日.
- [33] A. Takayama, Y. Endo, D. Fan, M. Imamura, K. Takahashi, S. Hasegawa: *Electronic Properties of Pb/Ge(111) studied by ARPES and transport measurements*, 8 月 25 日.
- [34] R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, S. Hasegawa: *Observation of the Shubnikov-de Haas oscillation in topological insulator  $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$  flakes*, 8 月 25 日.
- [35] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, R. Akiyama, A. A. Saranin, A. V. Zotov, Y. Hasegawa, S. Hasegawa: *STS measurements of monatomic-layer superconductor, Tl-Pb compound on Si(111)*, 8 月 25 日.

- [36] D. Fan, H. Ishihara, R. Akiyama, R. Hobara, A. Takayama, S. Hasegawa: *Helicity-dependent photovoltaic effect on Bi and Bi/Ag thin films*, 8月25日.
- [37] N. Fukui, R. Hobara, A. Takayama, R. Akiyama, S. Hasegawa: *Electrical resistance across atomic steps on topological insulator Pb-doped Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> surface*, 8月25日.
- [38] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: *Superconductivity in Ca-intercalated Bilayer Graphene*, 8月22日.
- [39] R. Akiyama, H. Ishihara, D. Fan, R. Hobara, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Observation of Spin-splitting Surface States in Bi and Bi/Ag Thin Films by Photogalvanic Effect*, PASPS-9, Kobe, Hyogo (2016年7月10日).
- [40] R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, and S. Hasegawa: *Shubnikov-de Haas oscillations in n and p-type topological insulator (Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> flakes*, NTTI2016 and NGS 17, Wuerzburg University (2016年7月25日).
- [41] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, A. V. Matetskiy, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Atomically Thinned Two-dimensional Superconductors*, The 66th Lindau Nobel Laureate Meeting, Lindau, Germany (2016年6月28日).
- (国内会議)
- 招待講演
- [42] 長谷川修司: ラッシュバ超伝導, 領域4, 領域7, 領域8, 領域9 合同シンポジウム『原子層関連物質における2次元超伝導現象』, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月19日(日) 大阪大学(豊中)(大阪).
- [43] 長谷川修司: 原子層二次元物質の超伝導, (公財)科学技術交流財団「次世代デバイス実現に向けた先端二次元物質の物理と化学」第1回研究会 2016年7月19日(火) 科学技術交流財団交流センター(名古屋).
- [44] 長谷川修司: バリティの破れた原子層超伝導, 物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 2016年11月1日(火) 東京大学物性研究所(柏).
- [45] 秋山了太: トポロジカル(結晶)絶縁体における電気伝導特性, 第1回 TIA 連携プログラム「強磁場計測とデータ解析技術の融合によるエネルギーデバイス材料評価システムの確立に向けた基礎調査研究」オープンセミナー, 2016年7月20日, 物質材料研究機構.
- [46] 秋山了太: *Properties of topological insulators probed by a magnetic field*, 東京大学物性研究所短期研究会「強磁場コラボラトリー, 国際協力と強磁場科学」, 2016年6月23日, 東京大学物性研究所.
- 一般講演
- [47] 保原麗, 長谷川修司: 純スピン流生成プローブの開発, 応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14日(火) パシフィコ横浜(横浜).
- 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月17日-20日(大阪大学 豊中キャンパス)
- [48] 中西亮介, 秋山了太, 鎮西弘毅, 長谷川修司: *Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi*上に成長したトポロジカル結晶絶縁体 *SnTe* 薄膜への *Li* ドーピング効果, 3月17日.
- [49] 中村友謙, Kim Howon, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 単原子層超伝導体 *Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl, Pb)*における非 *BCS* 的超伝導の観測, 3月17日.
- [50] 武内康範, 秋山了太, 保原麗, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巖, 長谷川修司: *in situ* 独立4探針 *STM* を用いた *SrTiO<sub>3</sub>* 表面への水素照射の影響評価, 3月17日.
- [51] 遠藤由大, 望月出海, 深谷有喜, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司: 全反射高速陽電子回折法による *SiC* 上の *Li* インターカレーション 2層グラフェンの構造解析, 3月17日.
- [52] 高山あかり, 中村友謙, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: *STM*・*ARPES* による *(Pb, Bi)/Si(111)* の構造および電子状態, 3月17日.
- [53] 中西亮介, 秋山了太, 奥山裕磨, 高木康多, S. V. Ere-meev, E. V. Chulkov, 横山利彦, 長谷川修司, 平原徹: トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ接合 *II*: 磁化特性, 3月17日.
- [54] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 野村健太郎, 高橋隆, 長谷川修司: *SiC* 結晶上2層グラフェンの輸送特性および *Li* インターカレートによる影響, 第8回低温センター研究交流会, 東京大学, 2017年2月23日.
- [55] 中西亮介, 秋山了太, 鎮西弘毅, 長谷川修司: *Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi*上トポロジカル結晶絶縁体 *SnTe* 薄膜への *Li* ドーピング効果, 第2回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会, 東北大学, 2016年12月16日.
- [56] 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Matetskiy, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 走査トンネル分光測定による表面超構造 *(Tl, Pb)/Si(111)* における超伝導の観測, 2016 真空・表面科学合同講演会, 名古屋国際会議場(名古屋), 2016年12月1日
- [57] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 野村健太郎, 高橋隆, 長谷川修司: *SiC* 結晶上2層グラフェンの輸送特性および *Li* インターカレートによる影響, 2016 真空・表面科学合同講演会, 名古屋国際会議場(名古屋), 2016年12月1日.
- [58] Fan Di, 石原大嵩, 秋山了太, 高山あかり, 保原麗, 長谷川修司, *Helicity-dependent photocurrent in thin films*, 2016 真空・表面科学合同講演会, 名古屋国際会議場(名古屋), 2016年11月29日.
- [59] 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司, A. V. Matetskiy, A. Z. Zotov, A. A.

- A. Saranin, 長谷川幸雄: 空間反転対称性の破れたモノレイヤー超伝導 *STS* 編, 平成 28 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「電荷とスピンの制御に基づく精密物性科学の構築とデバイス応用」, 技, 茂庭荘 (仙台), 2016 年 11 月 21 日.
- [60] 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 走査トンネル分光測定による  $(Tl, Pb)/Si(111)$  表面超構造における超伝導の観測, 物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 東京大学物性研究所 (柏), 2016 年 10 月 31 日.
- [61] 保原麗, 福居直哉, T. Pal, 坂本良太, 西原寛, 長谷川修司:  $4$  探針 *STM* による *Pt* ジチオレン錯体系分子性導体の電気伝導測定, 分子アーキテクトニクス研究会第 7 回研究会, 九州大学, 2016 年 10 月 20 日.
- [62] Di Fan, 秋山了太, 石原大嵩, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, *Helicity-dependent Photocurrent in Strong Spin-Orbit Coupling Thin Films*, 日本表面科学会第 4 回関東支部セミナー, 東京大学, 2016 年 10 月 18 日.
- [63] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 野村健太郎, 高橋隆, 長谷川修司: 2 層グラフェンの弱局在効果と *Li* インターカレートによる影響, 日本表面科学会第 4 回関東支部セミナー, 東京大学, 2016 年 10 月 18 日.
- [64] 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 走査トンネル分光測定による  $(Tl, Pb)/Si(111)$  表面超構造における超伝導の観測, 物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 東京大学物性研究所 (柏), 2016 年 10 月 31 日.
- [65] Di Fan, 秋山了太, 石原大嵩, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, *Helicity-dependent Photocurrent in Strong Spin-Orbit Coupling Thin Films*, 第 36 回表面科学会学術講演会, 名古屋国際会議場, 2016 年 11 月 30 日.
- [66] 高山あかり: *TRHEPD* を用いた 2 層グラフェン層間化合物  $C_6LiC_6$  の構造解析, 陽電子回折研究会, 高エネルギー加速器研究機構 (つくば), 2017 年 1 月 20 日.
- 日本物理学会 2016 秋季大会, 2016 年 9 月 13 日-16 日 (金沢大学, 角間キャンパス)
- [67] 高山あかり, 遠藤由大, Fan Di, 今村真幸, 高橋和敏, 長谷川修司:  $Pb/Ge(111)$  超薄膜における電子構造および輸送特性の膜厚依存性, 9 月 16 日.
- [68] 一ノ倉聖, Leonid V. Bondarenko, Alexandra Y. Tupchaya, Dimitry V. Gruznev, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin, 秋山了太, 長谷川修司:  $Si(111)-1 \times 1-Tl$  表面上に作製した  $Tl$  単原子層における超伝導, 9 月 16 日.
- [69] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司, 野村健太郎: *In situ* 極低温四端子電気伝導測定による  $SiC$  上 2 層グラフェンの量子輸送特性, 9 月 15 日.
- [70] 秋山了太, 中西亮介, 遠藤由大, 一ノ倉聖, 長谷川修司:  $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}-Bi$  上におけるトポロジカル結晶絶縁体  $SnTe$  薄膜の成長とその評価, 9 月 13 日.
- [71] 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: 純スピン流生成プローブの開発, 9 月 13 日.
- [72] 秋山了太: 単層 2 次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と超伝導との接合による協奏現象の探求, 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募班キックオフミーティング, 京都大学, 2016 年 6 月 4 日.
- [73] 一ノ倉聖, 菅原克明, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: カルシウムをインターカレートした 2 層グラフェンにおける超伝導, 表面科学会 第 1 回関東支部講演大会, 東京大学, 2016 年 4 月 9 日.
- [74] Fan Di, 石原大嵩, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司, *Photogalvanic effect on spin-splitting surface states in Bi and Bi/Ag thin films*, 表面科学会 第 1 回関東支部講演大会, 東京大学, 2016 年 4 月 9 日.
- (セミナー)
- [75] 長谷川修司: *Parity-Broken Atomic-Layer Superconductors*, 超伝導コロキウム, 2016 年 6 月 6 日, 東京大学物理学教室 (本郷).
- (講義等)
- [76] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部)・物性物理学 I (大学院), 2016 年度夏学期 (本郷).
- [77] 長谷川修司, 高山あかり, 中村友謙 (TA), 遠藤由大 (TA)、中西 亮介 (TA)、武内康範 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2016 年度冬学期 (本郷).
- (アウトリーチ)
- [78] 長谷川修司: ナノサイエンス 私たちの体や日常を支える極微の世界を探る, 日本鉄道運輸サービス協会 経営セミナー, JR 神田万世橋ビル, 2016 年 11 月 11 日.
- [79] 長谷川修司: 実験課題レポートの書き方、および LED によるプランク定数測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 静岡県教育委員会主催「オリンピックチャレンジ」, 2016 年 12 月 11 日, 静岡県総合教育センター (掛川): 茨城県立水戸第一高等学校, 2016 年 6 月 4 日: 栃木県立大田原高等学校, 2017 年 3 月 20 日.
- [80] 長谷川修司: キャリア・ディベロップメント, 科学先取りグローバルキャンパス岡山 (GSCO), 2017 年 3 月 26 日, 岡山大学 (岡山).
- [81] オープンキャンパス研究室公開 「表面的でない表面物理学」, 2016 年 8 月 4 日, 理学部 1 号館 B101 号室 (東京大学)
- [82] 模擬授業および研究室見学 福岡県立筑紫丘高等学校, 2016 年 8 月 2 日: 神奈川県立湘南高等学校, 2016 年 8 月 3 日: 島根県立松江北高等学校, 2016 年 10 月 6 日: 群馬県立前橋高等学校, 2016 年 11 月 8 日: 栃木県立宇都宮高等学校, 2016 年 11 月 29 日.

# 1 Hasegawa Group

**Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics**

**Members: Shuji HASEGAWA, Akari TAKAYAMA, and Ryota AKIYAMA**

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breakdown, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Electronic/spin/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces of metals, semiconductors, topological insulators, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films including monolayer materials such as graphene and silicene. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy (SEM), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy (PES), *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical Kerr effect apparatuses. Main results in this year are as follows.

## (1) Surface electronic/spin transport:

- Detection of superconductivity in double-layer Thallium and superconductor-insulator transition induced by magnetic field
- Shubnikov-de Haas oscillation at double-layer graphene with intercalation
- Transport, magnetism, and atomic structure at interface between a topological insulator and magnetic insulator
- Detection of Photogalvanic effect at surface states of topological insulators
- Measurements of conductivity of organic molecule sheets by using four-tip STM
- Measurements of superconductivity at metal-covered Ge(111) surface structures

## (2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:

- STM/S measurement at ultra-low temperature under magnetic field, on a monolayer superconductor Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl+Pb), revealing unconventional superconductivity nature
- Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) of topological crystalline insulators

## (3) Construction of new apparatuses:

- Fabrication of UHV-SQUID system to detect Meissner effect of atomic-layer superconductors
- Fabrication of a pure-spin-current injection probe

- [1] S. Ichinokura, L. Bondarenko, A. Tupchaya, D. Gruznev, A. Zotov, A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconductivity in thallium double atomic layer and transition into an insulating phase intermediated by a quantum metal state*, 2D Materials **4**, 025020 (2017).
- [2] T. Nakamura, R. Yoshino, R. Hobara, S. Hasegawa, and T. Hirahara: *Development of a convenient in situ UHV scanning tunneling potentiometry system using a tip holder equipped with current-injection probes*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **14**, 216-224 (2016).
- [3] S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R.-Y. Liu, T. Someya, W.-C. Chen, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C.-M. Cheng, S.-J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T.-C. Chiang, and I. Matsuda: *Proving Non-trivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement*, Phys. Rev. Lett. **117**, 236402 (2016)
- [4] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya, *Origin of the large positive magnetoresistance of  $Ge_{1-x}Mn_x$  granular thin films*, Physical Review B **95**, 014417 (2017).
- [5] R. Ishikawa, T. Yamaguchi, Y. Ohtaki, R. Akiyama, S. Kuroda, *Thin film growth of a topological crystal insulator SnTe on the CdTe (111) surface by molecular beam epitaxy*, Journal of Crystal Growth **453**, 124-129 (2016).

## 第I部

# 2015年度 物理学教室全般に関する報告





# 第1章 2015年度に開講された学部講義概要

## 1.0.1 固体物理学 II (大学院「物性物理学 I」共通) : 長谷川修司

### 1. 固体物理学 I の復習

自由電子気体、バンド構造、電子輸送、半導体、格子振動

### 2. 超伝導

歴史、マイスナー効果、ロンドン方程式、クーパー対、BCS 理論、超伝導電流と臨界電流、磁束の量子化、ジョセフソン効果、ボーズアインシュタイン凝縮

### 3. 磁性

常磁性と反磁性、交換相互作用、強磁性のバンドモデル、局在スピンモデル、磁気デバイス

### 4. 量子現象

低次元量子系、量子ホール効果、金属絶縁体転移、スピン軌道相互作用、トポロジカル物質