

## 1.1 長谷川研究室

修士課程1年生として4月から遠山晴子と宮内恵太が、10月から Shengpeng LIU が新しくメンバーに加わった。3月末には高山あかり助教が早稲田大学理工学術院に転出し、中村友謙が博士課程を、中西亮介と武内康範が修士課程を修了して就職した。

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、多層膜(超格子)構造を利用し、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(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、原子層超伝導などである。このようなナノ材料を様々な実験手法を用いて多角的に研究を行っている。とくに、分子線エピタキシー法によるナノ材料の作成と物性測定を超高真空中で「その場」で行うことが本研究室の実験手法の特徴であり、そのための新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の成果を述べる。

### 1.1.1 表面電子・スピン輸送

#### SnTe/Bi(111)における界面超伝導

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜を Bi(111) 表面上に成長させたところ、転移温度 5.8 K 程度の超伝導が観測された。この超伝導は外部磁場の角度に対して2次元性を示すこと、そして面内臨界磁場が大きいことなどから界面で生じていると考えられる。いままでもトリピアル絶縁体の PbSe や PbTe で界面超伝導は報告されていたが、トポロジカル結晶絶縁体では本研究が初めてであり、無ドーブ SnTe の超伝導化という意味でも画期的である。今後、トポロジカル超伝導の可能性について検証を行う。

#### (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/MnTe 超格子における室温強磁性発現と異常ホール効果

トポロジカル絶縁体 (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (6nm 厚) と MnTe (2 単位層厚) の超格子構造を MBE 法によってエピタキシャル成長させた。(Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> では、Bi 対 Sb の組成比を調整してフェルミ準位がギャップ中に来るようにした。磁化測定から室温強磁性が確認され、トポロジカル表面に強磁性が誘起されている。そのような系では量子化した異常ホール効果である量子異常ホール効果(QAHE)が生じることが期待される。低温でのホール効果測定では異常ホー

ル効果が観測されており、今後さらにパラメータ最適化によって QAHE の実現を目指したい。

#### 単層 FeSe/SrTiO<sub>3</sub> における Bose Metal

単層 FeSe は 100 K 程度の転移温度を示す超伝導体として知られているが、そのメカニズムについては未だ議論が続いている。基板からの電子ドーブが重要であるとの指摘があり、本研究では絶縁性および導電性の SrTiO<sub>3</sub> 基板上に FeSe を 1 単位層程度だけ成長させ、磁気抵抗特性を測定した。その結果、両基板上において絶縁体-金属転移の一種である Bose Metal 的な振る舞いが見られ、位相の揃わないクーパー対による伝導が起こっている。転移温度と臨界磁場を用いてスケールリングすることで、Bose Metal の次元が分かり、両基板上ともに3次元 XY モデルで記述できることが分かった。これは1単位層よりも厚い領域にクーパー対が染み出していることを示唆しており、基板のフォノンが関与している可能性を示している。

#### 合金原子層における2次元超伝導

Si(111) および Ge(111) 基板上に Tl を 1 ML, Pb を 1/3 ML 蒸着すると  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl, Pb) の表面超構造を形成し、いずれもラシュバ効果によるバンドのスピン分裂が起こる。その輸送特性を測定した結果、Si, Ge 基板で、それぞれ臨界温度  $T_c = 2.25$  K と  $T_c = 2.03$  K で超伝導転移を示した。また、Tl の被覆率を 1 ML に固定し、Pb 蒸着量を増加した試料で測定した結果、Si(111)-4×4-(Tl, Pb), Ge(111)-3×3-(Tl, Pb) 相でも超伝導転移に由来する抵抗の減少が観測された。これら4つの構造における  $T_c$  を比較した結果、Ge 基板の方が Si 基板より低い。これは、格子間隔が Si よりも Ge の方が大きく、デバイ温度が低くなるため定性的には BCS 理論で説明できる。また、バンドのスピン分裂が小さいほど  $T_c$  が低くなる傾向がある。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

#### Ge(111)-SIC-Pb 原子層の近接効果による超伝導

Ge(111) 基板上に 4/3 ML の Pb を蒸着すると、SIC (stripe incommensurate, ストライプ型不整合) 相が形成されるが、それだけでは超伝導を示さない。しかし、その上に、サブモノレーヤーの Pb を追加蒸着すると、Pb アイランドが形成されることを STM で観察され、さらに超高真空中での4端子プローブ法による測定によって、Pb アイランドが  $T_c = 7$  K 付近で超伝導転移するとともに、SIC 相が  $T_c = 0.8$  K で超伝導転移した。SIC 相の超伝導は、Pb アイランドからの超伝導近接効果によるものと考えられる。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

## Pb 超薄膜の超伝導

Si(111) 基板上に成長させた Pb 超薄膜の超伝導転移温度  $T_c$  は膜厚に依存して変化すると報告されているが、本研究では基板との関連および超伝導の起源を調べた。STM と電子回折により薄膜の成長様式を観測し、ARPES 測定において Pb 薄膜が Ge(111) 基板上でも Si 基板上と同様に形成されることが分かった。超高真空中での *in situ* 電気伝導測定によって 3 および 10 ML の試料でそれぞれ  $T_c=3.6$  K と 6.0 K で超伝導を観測し、磁場依存性の測定より得られたコヒーレンス長を用い、それらが 2 次元超伝導であることを示した。試料表面で Pb 島がつかっていない場合でも近接効果によるクーバー対のしみ出しが表面超伝導を実現していると考えられる。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

## 円偏光によるスピン注入

スピン電荷変換は、スピントロニクスを中心課題の一つであり、そのために逆スピンホール効果 (ISHE) やスピン・運動量ロッキングされたフェルミ面 (逆ラシュバ・エーデルシュタイン効果, IREE) を利用する。いままで我々は、スピン・運動量ロッキングフェルミ面をもつトポロジカル物質  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  での円偏光依存光起電力効果を用いてスピン電荷変換を行った。そのとき、照射するレーザー光の試料表面上での位置依存性があることがわかった。解析とシミュレーションの結果、円偏光によって面直スピンの生成され、それが電流に変換される ISHE によることがわかった。よって、この物質では IREE と ISHE の両方ともスピン電荷変換に寄与していることになる。

## SiC 基板上に成長したグラフェンの電気伝導

SiC 基板上にグラフェンを作成する際、基板のドーパ量、バッファ層の有無、作成時の雰囲気などのパラメータを網羅的に変化させ、それらの試料の電気伝導特性を測定したが、バッファ層の有無やドメインサイズの違いは伝導度に大きな影響を及ぼさないことが判明した。温度依存性やプローブ間隔依存性から、電流のほとんどはグラフェンを流れていることも分かったが、最も伝導度に顕著に影響を与えるのは基板のドーパ量であった。これはディラック点付近ではキャリア数が少なく、基板からの電荷移動で容易にフェルミ準位の位置が変わり、結果として伝導度が大きく変化するためであると考えられる。(東北大学との共同研究)

## 金属ジチオレン錯体ナノシートの電気伝導測定

4 探針型 STM を用いて各種有機分子膜の微小フレークの電気伝導率を測定している。化学専攻西原研から提供いただいた亜鉛ジチオレン錯体 ( $\text{ZnDT}$ ) ナノシートと、Zn を他の金属原子に置換した金属置

換体ナノシートの伝導測定を行った。 $\text{ZnDT}$  は理論計算上絶縁体であるが、電気伝導測定でもそれが確認された。また、 $\text{ZnDT}$  ナノシートを Cu 溶液に曝すことで  $\text{CuDT}$  ナノシートが形成されることを電気伝導度から確認し、30 meV 程度のギャップを持つ半導体的な振る舞いを示した。同様に Ni、Pd、Co についても Zn と置換しうることを確認し、金属置換による各種ジチオレンシートの形成が可能となった。(化学専攻との共同研究)

## 遷移金属ダイカルコゲナイド $\text{Ti}_2\text{Te}$ 単層膜の CDW 転移

超薄膜において CDW 転移が予測されている遷移金属ダイカルコゲナイド  $\text{Ti}_2\text{Te}$  の輸送特性の膜厚依存性を明らかにするため、グラフェン/SiC 上に作成した 1~3 単位層の試料について輸送特性を測定した。実験の結果、1 単位層の試料において、150 K 前後で抵抗値の温度依存性が変化する様子を観測し、光電子分光による CDW 転移と良い一致を示した。(東北大学との共同研究)

### 1.1.2 表面・原子層ナノ構造

トポロジカル結晶絶縁体/強磁性体界面における強磁性の染み出し

トポロジカル(結晶)絶縁体の表面状態に強磁性を導入すると量子スピンホール効果など新規な伝導現象を実現できるが、強磁性体の近接効果によって表面状態に磁性を持たせることが本研究の狙いである。トポロジカル結晶絶縁体  $\text{SnTe}$ /強磁性体  $\text{Fe}$  という組み合わせで調べた。偏極中性子を反射させることで、 $\text{SnTe}$  側に界面から 3 nm 程度の深さまで強磁性が染み出していることが分かり、この領域では表面状態と強磁性が共存していると考えられる。トポロジカル結晶絶縁体では初めて示された結果である。(筑波大学、総合科学研究機構との共同研究)

## 青リンのエピタキシャル成長

二次元層状物質でワイドギャップ原子層半導体である青リンにアルカリ金属をインターカレートさせると、転移温度がおよそ 20 K の 2 次元超伝導が発現することが理論的に予測されている。本研究では MBE 法により  $\text{Au}(111)$  清浄表面上に黒リンを原料として蒸着することで大面積の高品質な青リンが得られることが RHEED によって確認された。成長温度やアニール時間・温度など各種パラメータを最適化することで格子定数の異なる二種類の相の青リンの作り分けに成功した。今後、青リン層間に Li インターカレートした構造の作製とその電気伝導を測定する。

### Ca インターカレート 2 層グラフェンの陽電子回折構造解析

Ca 原子をインターカレートした 2 層グラフェンは  $T_c^{onset} \neq 4 \text{ K}$  で超伝導転移することを当研究室で示していたが、その原子構造の詳細は未だ明らかでないため、全反射高速陽電子回折法を用いて、SiC(0001) 上の Ca インターカレート 2 層グラフェンの構造解析を行った。その結果、グラフェン-Buffer 層間に Ca 原子がインターカレートすること、グラフェン-グラフェン層間にはインターカレートしないことが明らかになった。また、インターカレートした Ca 原子の上下に存在する炭素原子層が AA 積層構造を形成していること、Ca 原子がインターカレートした層間の距離 (4.38 Å) が、Ca インターカレートしたバルクグラファイト  $\text{C}_6\text{Ca}$  の層間距離 (4.5 Å) に近いことが分かった。(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

#### 純スピン注入プローブ

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・測定ができるスピン注入プローブの開発を行っている。昨年度に引き続き試作プローブの検証と改良を行った。金の細線に面内方向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つつこの電圧を測定することでスピン注入の検証をおこなった。測定された逆スピンホール抵抗は最大 3 mV/A であった。これは発生するスピン圧を考慮するとたいへん大きな値であるが、スピンの拡散を考慮したシミュレーションを行った結果、合理的な値であることが分かった。

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 「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募研究 「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 「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)

< 受賞 >

- [1] 武内康範: The Best Poster Award at The 8th International Symposium on Surface Science (公益社団

法人日本表面科学会), *Two-dimensional conducting layer on SrTiO<sub>3</sub> surface induced by hydrogenation*, 2017 年 10 月.

- [2] 一ノ倉 聖、菅原 克明、高山 あかり、高橋 隆、長谷川 修司: 応用物理学会薄膜・表面物理分科会 第 2 回論文賞 (公益社団法人応用物理学会), 2018 年 3 月, 受賞論文: “*Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene* (ACS Nano, **10**, 2761-2765 (2016)) ”.
- [3] 遠藤 由大: 日本物理学会領域 9 第 3 学生賞 (日本物理学会第 73 回年次大会), 2018 年 3 月, 受賞発表: “全反射高速陽電子回折法による 2 層グラフェン層間化合物の構造解析”
- [4] 中西 亮介: 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程), 2018 年 3 月, 受賞修士論文: “トポロジカル (結晶) 絶縁体の薄膜作製と特性評価”.

< 報文 >

(原著論文)

- [5] T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T. Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov: *A large-gap magnetic topological heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer*, Nano Letters **17**, 3493-3500 (May, 2017)
- [6] R. Akiyama, Y. Takano, Y. Endo, S. Ichinokura, R. Nakanishi, K. Nomura, and S. Hasegawa: *Berry phase shift from  $2\pi$  to  $\pi$  in Bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption*, Appl. Phys. Lett. **110**, 233106 (4pp) (Jun, 2017).
- [7] P. Chen, Woei Wu Pai, Y.-H. Chan, A. Takayama, C.-Z. Xu, A. Karn, S. Hasegawa, M. Y. Chou, S.-K. Mo, A.-V. Fedorov, and T.-C. Chiang: *Emergence of charge density waves and a pseudogap in single-layer  $\text{TiTe}_2$* , Nature Communications **8**, 516-521 (Sep, 2017).
- [8] S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, M. Tanaka, *Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator  $\text{SnTe}$  using spin pumping*, Physical Review B **96**, 094424 (Sep, 2017).
- [9] Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: *Observation of Anisotropic Band Splitting in Monolayer  $\text{NbSe}_2$ : Implications for Superconductivity and Charge Density Wave*, npj 2D Materials and Applications, in press (2017).

(国内雑誌)

- [10] 高橋隆、菅原克明、一ノ倉聖、高山あかり、長谷川修司: 2 層グラフェン層間化合物の 2 次元超伝導, 表面科学 **38**, 460-465 (Sep, 2017).

(その他)

[11] 長谷川修司: 学会誌の3つの使い方 (巻頭言), 日本物理学会誌 **72** (10), 697 (Oct, 2017).

[12] 長谷川修司: エネルギーに関する教育と研究, 理科の教育 **66** (10), 637-640 (Oct, 2017) (東洋館出版).

(学位論文)

[13] 中村友謙: 単原子層超伝導の研究: 半導体表面上の Tl-Pb 合金 (博士論文).

[14] 中西亮介: トポロジカル (結晶) 絶縁体の薄膜作製と特性評価 (修士論文).

[15] 武内康範: SrTiO<sub>3</sub> 結晶表面とその上の2次元物質の輸送特性 (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

[16] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '17, 2017年12月8日, Hawaii (USA).

[17] S. Hasegawa: *Graphene Intercalation*, The 5th Workshop on Physics between Ecole Normale Supérieure and University of Tokyo, 2017年11月16日, University of Tokyo.

[18] A. Takayama: *One-dimensional edge states with spin splitting in bismuth*, Nano-Micro Conference 2017, 2017年7月22日, 上海 (中国).

[19] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 16th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces, 2017年7月3日, Hannover (Germany).

[20] S. Hasegawa: *Monatomic-Layer Superconductors*, The 13th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids - DSL2017, 2017年6月27日, Wien (Austria).

[21] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, Graphene EU Flagship-Japan Second Workshop, 2017年5月6日, Barcelona (Spain).

[22] S. Hasegawa: *Multi-probe Techniques for Surfaces and 2D Materials - Superconductivity and Spin Current at Surfaces -*, Surface Physics and LEEM workshop 2017, 2017年4月17日, 重慶大学 (中国).

一般講演

- Tsinghua University - the University of Tokyo Joint Symposium on Multidiscipline: Symposium on Materials and Physics, 2017年4月14日, 清華大学、北京 (中国)

[23] 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*.

[24] 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: *Monatomic-Layer Superconductors*.

[25] R. Akiyama, T. Yamaguchi, Y. Otaki, R. Ishikawa, R. Nakanishi, D. Fan, H. Sato, K. Shimada, E. F. Schwier, K. Miyamoto, A. Kimura, S. Hasegawa, S. Kuroda: *Observation of the surface Dirac cone in Sb-doped Pb<sub>x</sub>Sn<sub>1-x</sub>Te(111) thin films*, New Trends in Topological Insulators 2017年7月18日, Ascona (Switzerland).

[26] R. Nakanishi, R. Akiyama, K. Chinzei, S. Hasegawa: *2D transport properties of topological crystalline insulator SnTe films on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi*, International Conference on Topological Materials Science 2017, 2017年9月13日, 東京工業大学.

- The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), 2017年10月23-26日, つくば国際会議場

[27] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa and S. Hasegawa: *STM/STS measurements of monatomic layer superconductor; Tl-Pb alloy on Si(111)*, 10月23日.

[28] L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, A.N. Mihalyuk, C.R. Hsing, C.M. Wei, S. Ichinokura, S. Hasegawa, D.V. Gruznev, A.V. Zotov and A.A. Saranin: *Tl double layer on Si(111): formation, atomic and electronic structure, modification*, 10月23日.

[29] H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama and S. Hasegawa: *Superconductivity at SIC phase of Pb/Ge(111) surface studied by in-situ transport measurements*, 10月23日.

[30] Y. Takeuchi, R. Akiyama, R. Hobar, A. Takayama, S. Ichinokura, R. Yukawa, I. Matsuda and S. Hasegawa: *Two-dimensional conducting layer on SrTiO<sub>3</sub> surface induced by hydrogenation* (Best Poster Award), 10月23日.

[31] D. Fan, R. Hobar, R. Akiyama, A. Takayama and S. Hasegawa: *Investigation of helicity-dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials*, 10月23日.

[32] S. Ichinokura, S. Yoshizawa, A.V. Matetskii, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobar, T. Uchihashi, A.V. Zotov, A.A. Saranin and S. Hasegawa: *Superconductivity on Rashba spin splitting surface: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - (Tl, Pb)* (Best Poster Award), 10月24日.

[33] Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, T. Takahashi, K. Nomura and S. Hasegawa: *Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption*, 10月24日.

[34] Y. Okuyama, S.V. Ereemeev, R. Nakanishi, R. Akiyama, T. Shirasawa, K. Sumida, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ideta, K. Tanaka, E.V. Chulkov, S. Hasegawa and T. Hirahara: *Heterostructure of a topological insulator/magnetic insulator ultrathin film*, 10月26日.

● The Symposium on Surface and Nano Science 2018, 2018年1月10-14日, 富良野(北海道)

[35] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo and S. Hasegawa: *Structural analysis of bilayer graphene on SiC substrate by Total-reflection high-energy positron diffraction*, 1月11日.

[36] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *STM/STS measurements of atomic-layer superconductor; Tl-Pb alloy on Si(111)*, 1月11日.

[37] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Superconductivity of Pb ultrathin film on Ge(111) surface studied by in-situ four-point probe resistance measurement*, 1月11日.

[38] Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, S. Hasegawa, K. Suzuki, K. Sugawara, T. Takahashi, K. Nomura, and W.-X. Tang: *Graphene Intercalation*, 1月12日.

(国内会議)

招待講演

[39] 長谷川修司: 原子層超伝導, 京都大学基礎物理学研究所研究会 『超伝導研究の最先端: 多自由度、非平衡、電子相関、トポロジー、人工制御』 2017年6月19日 湯川記念館(京都大学).

[40] 高山あかり, 長谷川修司: Rashba系表面超構造の超伝導, 2017年真空・表面科学合同講演会, 日本表面科学会, 2017年8月19日 横浜市立大学(横浜).

[41] 長谷川修司: 基礎講座 『電子回折の基礎と応用』, 日本表面科学会 東北・北海道支部/関東支部合同セミナー 『量子ビームで見る原子層と表面』, 2017年11月11日 化学講堂(東京大学).

一般講演

[42] 武内康範, 秋山了太, 保原麗, 高山あかり, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巖, 長谷川修司: 独立4探針STMを用いた水素終端 SrTiO<sub>3</sub> 表面の輸送特性の *in situ* 評価, 第2回関東支部講演大会, 日本表面科学会, 東京大学, 2017年4月8日.

[43] 保原麗, 長谷川修司: 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, 分子アーキテクトニクス第8回領域会議, 九州大学, 2017年6月3日.

● 2017年真空・表面科学合同講演会, 日本表面科学会, 2017年8月17日, 横浜市立大学(横浜)

[44] 中村友謙, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: Ge基板上 Tl, Pb合金系表面超構造における超伝導の観測.

[45] 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 Li インターカレーション 2 層グラフェンの構造解析.

● 日本物理学会 2017 秋季大会, 2017 年 9 月 21 日-24 日 (岩手大学 上田キャンパス)

[46] 中田優樹, 菅原克明, 一ノ倉聖, 岡田佳憲, 一杉太郎, 是常隆, 長谷川修司, 佐藤宇史, 高橋隆: 空間反転対称性の破れた原子層 NbSe<sub>2</sub> の高分解能 ARPES, 9月21日.

[47] 中村友謙, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: Ge(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Tl, Pb) における超伝導転移の *in situ* 4 端子測定, 9月21日.

[48] 秋山了太, 渡辺和己, 中西亮介, 宮内恵太, 長谷川修司: Tl ドープトポロジカル結晶絶縁体 SnTe の構造・電気伝導特性, 9月21日.

[49] 中西亮介, 秋山了太, 鎮西弘毅, 福居直哉, 豊田良順, 西原寛, 長谷川修司: 微傾斜 Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Bi 上でのトポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜の成長とその構造・伝導評価, 9月21日.

[50] 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 Li インターカレーション 2 層グラフェンの構造解析, 9月21日.

[51] H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama and S.Hasegawa: *Superconductivity transition of SiC-Pb/Ge(111) studied by in-situ electrical transport measurement*, 9月21日.

[52] 高山あかり, 遠藤由大, 金観洙, 朴君昊, 遠藤則史, 保原麗, 吹留博一, 末光眞希, 長谷川修司: グラフェン/SiC の輸送特性: 基板との相互作用の効果, 9月21日.

[53] 石川諒, 伊藤寛史, 秋山了太, 仁谷浩明, 黒田眞司: MBE 法により成長した IV-VI 族希薄磁性半導体 (Sn,Mn)Te の構造と磁性の評価, 9月21日.

[54] 伊藤寛史, 大滝祐輔, 石川諒, 秋山了太, 黒田眞司: トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜の PbTe 表面への MBE 成長および電気伝導特性, 9月21日.

[55] 武内康範, 秋山了太, 保原麗, 高山あかり, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巖, 長谷川修司: 水素終端した SrTiO<sub>3</sub> 表面の 2 次元伝導層の輸送特性, 9月22日.

[56] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Hasegawa: *Investigation of helicity-dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials*, 9月23日.

[57] 佐藤誠, 並木雅俊, 近藤一史, 中屋敷勉, 毛塚博史, 長谷川修司, 田中忠芳, 鍵山茂徳, 江尻有郷: グローバル時代に対応した物理教育コンテンツの研究開発 VI. 中間報告, 9月23日.

[58] 大塚洋一, *et al.*: 物理チャレンジ 2017 報告: IV 第2チャレンジ実験問題, 9月23日.

- [59] 田中忠芳, *et al.*: 第 48 回国際物理オリンピック報告: I 日本代表候補者の教育研修, 9 月 23 日.
- [60] 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: グラフェンへのインターカレーション, 平成 29 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』2017 年 11 月 3 日 (金) 茂庭荘 (仙台).
- [61] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 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 Li インターカレーション 2 層グラフェンの構造解析, 東北・北海道支部/関東支部合同セミナー, 日本表面科学会, 東京大学 (東京), 2017 年 11 月 11 日.
- 強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端シンポジウム, 2017 年 11 月 29 日, 物質材料研究機構 (筑波)
- [62] 中西 亮介, 秋山了太, 長谷川修司: *Bi(111)/Si(111)* テンプレート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.
- [63] 武内康範, 保原麗, 秋山了太, 高山あかり, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巖, 長谷川修司: *SrTiO<sub>3</sub>(001)* 上への *FeSe* 薄膜の成長と *in situ* 電気伝導評価.
- [64] 宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 長谷川修司: *Au(111)* 上への青リンのエピタキシャル成長とその評価.
- [65] 遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, 高山あかり, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: その場電気伝導測定による半導体基板上的 Pb 超薄膜における超伝導特性, 第 9 回低温センター研究交流会, 伊藤国際研究センター (東京大学), 2018 年 2 月 20 日.
- [66] 宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 遠藤由大, 長谷川修司: Li インターカレートした青リンのエピタキシャル成長とその電気伝導特性, 第 9 回低温センター研究交流会, 伊藤国際研究センター (東京大学), 2018 年 2 月 21 日.
- [67] 保原麗, 長谷川修司: 純スピン流注入プローブの開発, 第 65 回応用物理学学会春季学術講演会, 早稲田大学 (西早稲田キャンパス), 2018 年 3 月 17 日.
- 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日-25 日 (東京理科大学, 野田キャンパス)
- [68] 秋山了太, 大滝祐輔, 伊藤寛史, 中西亮介, 宮内恵太, Eike Schwier, 木村昭夫, 島田賢也, S. V. Eremeev, E. V. Chulkov, 黒田眞司, 長谷川修司: *Sb* ドープトポロジカル結晶絶縁体 *Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(111)* 薄膜における 2 次元バンドの観測, 3 月 22 日.
- [69] 並木雅俊, 佐藤誠, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 毛塚博史, 田中忠芳, 鍵山茂徳, 江尻有郷: グローバル時代に対応した物理教育コンテンツの研究開発 VIII. 国際物理オリンピック実験再現 5, 3 月 22 日.
- [70] H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity on SiC phase of Pb/Ge(111) studied by in situ transport measurement*, 3 月 22 日.
- [71] 遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, 高山あかり, 長谷川修司: その場電気伝導測定による Ge 基板上的 Pb 超薄膜における超伝導特性, 3 月 22 日.
- [72] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 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 2 層グラフェン層間化合物の構造解析 (領域 9 学生賞授賞), 3 月 22 日.
- [73] 中田優樹, 菅原克明, 一ノ倉聖, 岡田佳憲, 一杉太郎, 是常隆, 長谷川修司, 高橋隆, 佐藤宇史: 原子層 *NbSe<sub>2</sub>* における CDW 転移: 高分解能 ARPES, 3 月 23 日.
- [74] Di Fan, Rei Hobara, Ryota Akiyama, Akari Takayama, Shuji Hasegawa: *Photoinduced Inverse Spin Hall effect on Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin film*, 3 月 24 日.
- [75] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司: 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) による 2 層グラフェン層間化合物の構造解析, 第 2 回陽電子回折研究会, 2018 年 3 月 30 日, 高エネルギー加速器研究機構 (茨城).
- (セミナー)
- [76] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, Department Colloquium, Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University 2018 年 2 月 28 日, Shanghai (China).
- (講義等)
- [77] 長谷川修司, 小森文夫: 物性物理学特論 (学部)・表面物理学 (大学院), 2017 年度夏学期 (本郷).
- [78] 長谷川修司, 秋山了太, 高山あかり, 遠山晴子 (TA), 宮内恵太 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2017 年度冬学期 (本郷).
- (アウトリーチ)
- [79] 荒木美菜子, 長谷川修司: 第 1 チャレンジ理論問題, 実験課題レポートの書き方, および LED 点灯回路の作成実習, 物理オリンピック日本委員会女子チャレンジ, 2018 年 2 月 18 日, 東京理科大学 (神楽坂).
- [80] 長谷川修司: 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2017 年 6 月 11 日, 茨城県立水戸第一高等学校 (茨城): 2017 年 11 月 25 日, 栃木県立宇都宮女子高等学校 (栃木), 2018 年 3 月 24 日, 栃木県立大田原高校 (栃木).
- [81] 長谷川修司, 近藤泰洋: 実験課題レポートの書き方, 重力加速度の測定実験, LED の電流電圧特性測定実験, 立命館慶祥高校数理・科学チャレンジ・ウインターキャンプ, 2017 年 12 月 26-28 日, 北海道青少年会館コンパス (札幌).
- [82] 長谷川修司: 先端科学の世界 ~ ナノサイエンスと顕微鏡 ~, 科学先取りグローバルキャンパス岡山 (GSCO), 2017 年 9 月 3 日, 岡山大学 (岡山).
- [83] 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」, 2017 年 8 月 3 日, 理学部 1 号館 B101 号室 (東京大学)
- [84] 模擬授業および研究室見学 茨城県立土浦第一高等学校, 2017 年 8 月 1 日: 神奈川県立湘南高等学校, 2017 年 8 月 2 日: 群馬県立前橋高等学校, 2017 年 11 月 14 日: 栃木県立宇都宮高等学校, 2017 年 11 月 28 日.

# 1 Hasegawa Group

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

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

Surfaces/interfaces of materials and atomic-layer 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) spin states and spintronics, and (5) 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 atomic-layer materials such as graphene and transition metal dichalcogenides. 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 effects apparatuses. Main results in this year are as follows.

## (1) Surface electronic/spin transports:

- Interface superconductivity at topological crystalline insulator/trivial semimetal junction
- Ferromagnetism and anomalous Hall effect at interface between topological insulator and ferromagnetic insulator
- Bose metal behavior at monolayer FeSe superconductor
- 2D superconductivity at monolayer alloy metallic surface superstructures
- 2D superconductivity by proximity effect
- Spin injection by circularly polarized light irradiation on topological insulators
- Electrical transport at Graphene
- Electrical transport of organic molecule sheets measured by four-tip STM
- CDW and transport at transition metal dichalcogenides

## (2) Surface phases and atomic-layer materials:

- Proximity effect at a interface between a topological crystalline insulator and a ferromagnetic metal
- Epitaxial growth of blue Phosphor atomic layers
- Structure analysis of Ca-intercalated bilayer graphene by positron diffraction

## (3) New methods:

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

- [1] T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T. Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov: *A large-gap magnetic topological heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer*, Nano Letters **17**, 3493-3500 (May, 2017)
- [2] R. Akiyama, Y. Takano, Y. Endo, S. Ichinokura, R. Nakanishi, K. Nomura, and S. Hasegawa: *Berry phase shift from  $2\pi$  to  $\pi$  in Bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption*, Appl. Phys. Lett. **110**, 233106 (4pp) (Jun, 2017).
- [3] P. Chen, Woei Wu Pai, Y.-H. Chan, A. Takayama, C.-Z. Xu, A. Karn, S. Hasegawa, M. Y. Chou, S.-K. Mo, A.-V. Fedorov, and T.-C. Chiang: *Emergence of charge density waves and a pseudogap in single-layer  $TiTe_2$* , Nature Communications **8**, 516-521 (Sep, 2017).
- [4] S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, M. Tanaka, *Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator  $SnTe$  using spin pumping*, Physical Review B **96**, 094424 (Sep, 2017).
- [5] Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: *Observation of Anisotropic Band Splitting in Monolayer  $NbSe_2$ : Implications for Superconductivity and Charge Density Wave*, npj 2D Materials and Applications, in press (2017).

## 第I部

# 2017年度 物理学教室全般に関する報告



# 第1章 2017年度に開講された学部講義概要

## 1.0.1 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通) : 長谷川修司, 小森文夫、

固体物理の知識を前提にして、固体表面の物理を、基礎概念から最新のトピックスを交えて解説する。

### 1. 概論

表面科学とは、歴史、ナノサイエンス・ナノテクと表面

### 2. 表面構造

表面超構造と相転移、回折法、顕微鏡法、動的過程

### 3. 表面電子状態

表面電子状態・トポロジカル表面状態、バンド分散・原子結合状態測定法((逆)光電子分光法、トンネル分光法、光電子分光)、スピン軌道相互作用、ラシュバ効果、電子ダイナミクス

### 4. 走査プローブ顕微鏡

原理、表面原子構造観察、局所電子状態・表面バンドの観測、表面電子定在波、原子マニピュレーション

### 5. 表面電子輸送

表面空間電荷層の2次元電子系、表面電子バンドの2、1次元電子系、表面スピン輸送、純スピン流、原子層超伝導

### 6. 表面超薄膜磁性

磁気モーメントと相転移、強磁性超薄膜、表面ナノ強磁性体、スピンダイナミクス