

1.1 長谷川研究室

修士課程1年生として4月から遠藤由大が、10月からDi Fanが新しくメンバーに加わった。3月には福居直哉と一ノ倉聖が博士課程を修了し、それぞれ理学系研究科化学専攻の特任研究員として転出、および当研究室の学振特任研究員に着任した。また、石原大嵩が修士課程を修了して企業に就職していった。

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、それら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、3次元バルク結晶の電子状態では見られない新しい現象を見出し、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

2層グラフェンにおける超伝導の観測

アルカリ(土類)元素をインターカレートしたグラファイトでは、「層間電子状態」によって超伝導が発現することが知られている。最近、グラフェンにおいても元素ドーブによる超伝導化が盛んに研究されている。2層グラフェン(Bilayer Graphene, BLG)の層間化合物に関してはSTM、ARPES、第一原理計算が行われている。CaをインターカレートとしたBLGにおいては層間電子状態がFermi面以下に存在するため、超伝導の発現が期待されていた。本研究ではBLGに超高真空中でLiやCaをインターカレートし、in situ低温電気伝導測定を行った。

BLGはSiC(0001)面上に脱離法によって作製し、ARPESによるバンド分散の測定から2層と同定した。大気中を輸送した後、超高真空サブケルビン4端子プローブ装置内で加熱によって表面を清浄化し、それにLiを室温蒸着するとグラフェン層間にLi原子がインターカレートされ、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の周期でオーダーする(Li-BLG)。さらに、Li-BLGを150に加熱しながらCaを蒸着するとLiとCaが置換し、Caがインターカレートする(Ca-BLG)。これらの試料にin situ電気伝導測定を行うと、Li-BLGが弱局在的な傾向を示して超伝導に転移しなかったのに対して、Ca-BLGは約2Kで超伝導転移を示した。この結果はBLGにおける初の超伝導観測であり、BLGにおいても層間電子状態と超伝導が密接に関連することを意味している。(東北大学との共同研究)

タリウム2原子層における超伝導の観測

Si(111)表面に形成されるTl単原子層表面構造Si(111)-1×1-TlはRashba効果を示すことから注目されていたが、バンド絶縁体的であるために電気伝導の研究は進んでいなかった。そこに、さらにTlを蒸着すると第1層とincommensurateな構造で金属的な電子状態を持つ第2層が形成され、Si(111)-6×6-Tl表面構造となる。この構造の光電子スペクトルの温度依存性から大きな電子格子相互作用定数 $\lambda = 1.86$ を持つことがわかった。バルクTlと同等のDebye温度を持つと仮定すると $T_C = 7.9 \sim 8.9$ Kでの超伝導転移が予測される。

本研究でSi(111)-6×6-Tl表面構造の作製及びin situ電気伝導測定を行ったところ、 $T_C = 0.962$ Kの超伝導転移を観測した。転移温度よりも高温から抵抗の減少が見られ、2次元超伝導に特徴的な振幅揺らぎの影響と考えられる。この T_C は、上述の光電子分光の結果から期待される T_C よりも低い。この原因としては、Debye温度がバルク値に比べて低いためか、あるいは構造欠陥に由来する乱れによる超伝導の抑制が考えられる。実際、常伝導抵抗は7.6k Ω であり、Cooper対の量子化抵抗 $h/4e^2 = 6.5$ k Ω よりも大きい。この抵抗は乱れ誘起超伝導-絶縁体転移の臨界点として知られており、この表面構造がその転移点近傍にあることを示している。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

トポロジカル絶縁体表面における原子ステップを横切る抵抗

トポロジカル表面状態では、スピンと運動量が常に直交するという性質がある(スピン・運動量ロッキング)。このため、その電子は、スピン反転が起こらない限り、原子ステップなどによって後方散乱されにくいといわれ、実際、STMによる電子定在波の観測によって検証された。その一方で、マクロな電気伝導に、この散乱抑制効果が現れるかは、直接的な測定がなされていない。

本研究では、トポロジカル表面電子状態の原子ステップを横切るときの電気抵抗を測定した。トポロジカル絶縁体超薄膜を微傾斜Si(111)基板に成長させて、原子ステップが一定方向に並んだ薄膜試料を作成し、正方4探針法でステップ平行およびステップ垂直方向の抵抗率を独立に測定した。初めに、表面状態のみがフェルミ面に存在する $(\text{Bi}_{0.80}\text{Pb}_{0.20})_2\text{Te}_3$ 試料におけるステップ垂直方向の抵抗率を測定し、そこからステップでの電子波動関数の透過率を求めた。その値は、トリピアル物質の透過率よりも高く、それはトポロジカル表面状態における後方散乱の抑制に起因していると考えられる。また、フェルミ面にバルク状態が共存する場合には透過率が低下することも併せて判明した。これは、バルクへの散乱の効果であると考えられる。さらに、 Bi_2Te_3 と Bi_2Se_3 と比較した場合、 Bi_2Te_3 のステップ透過率が低いことが判明した。これは、 Bi_2Te_3 と Bi_2Se_3 のフェルミ面のワーピング効果に起因した違いであると解釈

できる。

(Bi_xSb_{1-x})₂Te₃ におけるシュブニコフ・ドハース振動の観測

トポロジカル絶縁体 (Bi_xSb_{1-x})₂Te₃ は、Bi のドーピング濃度 x を変化させることで、フェルミ準位の位置をチューニングできる。フェルミ準位をギャップ中央に近い位置にチューニングできれば、トポロジカル絶縁体でしばしば問題となる、電気伝導におけるバルクの寄与を大幅に低減できる。本研究では、異なる x の試料 ($x = 0.29, 0.34, 0.42$) を用い、低温磁場中で *ex situ* の電気伝導測定を行い、シュブニコフドハース (SdH) 振動の観測を通じてその基礎物性を明らかにした。まず試料をへき開して薄片化し、それにインジウムボンディングを施し 4 端子測定を行った。作製した試料の全てにおいて抵抗の温度変化 (300 K ~ 2 K) は金属的となった。ホール電圧測定から、 $x = 0.29, 0.34$ の試料では p 型、 $x = 0.42$ の試料では n 型であった。また磁場を 14 T まで印加したところ、磁場の逆数に対して周期的に縦抵抗が振動する SdH 振動が観測された。振動は全ての試料で観測され、その結果から、移動度はフェルミ準位がギャップ中央に近いほど高く、 n 型の $x = 0.42$ では $17,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ に達した。これはトポロジカル表面状態由来の電気伝導であると考えられる。(広島大学・ノヴォシビルスク大学との共同研究)

SiC 上の二層グラフェンにおける電子局在

単層グラフェンにおいて、極低温領域で弱局在効果が観測され、その理論的なアプローチも盛んに行われており、電気伝導度の温度依存性および磁場依存性から様々な散乱過程の寄与を分離することができる。これらの先行研究を元に、今まで詳細な解析が行われていなかった SiC 結晶表面上に成長させた二層グラフェンにおける弱局在効果の詳細な解析を行った。結論としては、電気伝導に関与する散乱において弾性的なバレー内散乱の寄与が最も大きいことが判明した。このバレー内散乱は波数空間をわずかに移動する散乱であるため、その起源は SiC 基板中のイオン化したドーパントによる散乱と考えられる。実際にバレー内散乱長から計算された散乱中心密度とドーパント密度を比較すると、これらの値は同じオーダーであった。また、この二層グラフェンに Li をインターカレートし電気伝導測定を行った結果、Li からの電子ドーピングによる電気伝導度の増加を観測した。さらに、その試料を 900 °C で加熱することにより Li を脱離させ、2 層グラフェンに戻した試料を作製し、同様の伝導測定を行った結果、Li をインターカレートする前の 2 層グラフェンと比べて電気伝導度が下がった。今後は、この不可逆的な変化の原因を角度分解光電子法や全反射高速陽電子回折法を用いて解明していく。

トポロジカル絶縁体の近接磁場効果

磁性体がトポロジカル絶縁体の表面電子状態に及ぼす影響を輸送特定の観点から議論するため、反強磁性絶縁体 MnSe とトポロジカル絶縁体 Bi₂X₃ (X=Se, Te) のヘテロ接合界面において 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、MnSe/Bi₂Se₃ と MnSe/Bi₂Te₃ において、MnSe の膜厚が 1~5 BL (バイレイヤー) の範囲で金属的な伝導を示しつつも、MnSe 層が厚くなるにつれて電気伝導度が減少した。先行研究の ARPES 実験との比較により、電気伝導度減少の起源は、試料内部に拡散した Mn が散乱体として働くことが一因であると結論した。また、磁化率の *ex situ* 測定から界面において強磁性的性質を示すことが明らかになった。一方、東京工業大学・平原研究室との共同研究により、これらの試料の LEED-IV 法による構造解析を行った結果、ヘテロ接合界面では Mn と Bi が結合して新たな合金相構造が形成されている可能性を見出した。(東京工業大学との共同研究)

スピン分裂表面状態での Photogalvanic 効果

この研究の目的は、ラシュバ型スピン分裂した表面状態での「スピン・運動量ロッキング」を利用して、円偏光照射によってスピン偏極電流を励起し、それを検出することである。試料として、ラシュバ効果を示す Bi(111) 超薄膜および 1/3 原子層の Bi が吸着した Ag 超薄膜 Ag(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi、および比較のためにラシュバ効果を示さない Ag(111) 膜および Si(111) 基板を用いた。 $\lambda/4$ 板を回転させて照射する光の偏光状態を変えながら、試料両端の電極間に生じる光起電力を測定した。そのデータフィッティングでは、円偏光に由来する成分 (円二色性)、直線偏光に由来する成分 (線二色性)、そして偏光状態に依存しないバックグラウンド成分に分解して行った。円偏光依存成分は、ラシュバ型表面状態を持つ試料で大きく、ラシュバ効果を示さない試料では小さかった。また、表面垂直方向に対して光の入射角を反転すると、ラシュバ型試料では光起電力の符号が逆転した。これらの結果は、スピン・運動量ロッキングに起因するメカニズムで説明できる。今後、まだ理論的に説明されていない直線偏光依存成分の解釈を行う。

4 探針型 STM を用いた有機分子の電気伝導測定

分子によるデバイス構築にはその電気伝導メカニズムの正確な理解が必要である。我々は 4 探針型 STM を用いて、各種有機分子膜の電気伝導率の測定を試みている。本年度はグラフィジン、Fe/Co テルピリジンなど十数種類の測定を行った。

どの物質も、バンド計算などでは伝導性が大いに期待される試料であったが、実際に伝導性を持つ試料はわずかに二つだけであった。分子の伝導性を確認するためには、数十ミクロンサイズの試料片に探針を直接コンタクトして測定するという手法が有用

であることが確認された。

大阪大学家研究室から提供いただいた「Au ナノ粒子/チオフェンコンポジット」では、分子伝導でよく見られる高抵抗・非線形性が確認された。化学専攻西原研から提供いただいた Pt ジチオレンでは電子線照射時間に依存して伝導度が増大する現象が見られ、チャージアップの影響と思われる。(大阪大学および当理学系研究科化学専攻との共同研究)

1.1.2 表面ナノ構造

原子層超伝導 $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Tl,Pb})$ の超低温 STM/STS 測定

我々は、Rashba 効果によりスピン分裂したバンド構造を持つと同時に超伝導を示す単原子層物質 $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Tl,Pb})$ 表面構造を発見した ($T_C = 2.25 \text{ K}$)。これは、Si 表面上で Tl(1 原子層)と Pb(1/3 原子層)が混合した 1 原子層合金であり、空間反転対称性が破れているためにスピン一重項と三重項クーバー対の混合など特異な超伝導状態が期待される。

そこで、我々は、物性研究所において、0.5 K での STM/STS 測定を行い、超伝導ギャップ Δ の大きさが $\sim 0.8 \text{ meV}$ であった。伝導測定による T_C と合わせると、比 $\Delta(0)/K_B T_C$ は 4.0 となり、BCS による理論値 1.76 より大きな値を得た。また、磁場を印加してゼロバイアスコンダクタンスマッピングを行うことにより渦糸の観察を行ったところ、渦糸の中心においても STS スペクトルに超伝導ギャップに類似したディップ構造が観測されるという特異な結果を得た。また、超伝導ギャップの STS スペクトルが BCS 理論に基づく s 波を仮定した理論では再現されないこともわかった。これらのことは、この超伝導体が非 BCS 超伝導体であることを示唆している。(東京大学物性研究所との共同研究)

$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}(111)$ における角度分解光電子分光測定

SnTe は結晶構造の鏡映対称性に起因したトポロジカル表面状態を示す、「トポロジカル結晶絶縁体」であるが、 PbTe はトリピアル物質である。そのため、 SnTe に Pb をドーブして $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 混晶を作ると、 $x = 0.7$ 程度でバンド反転が解消され、トポロジカル表面状態が消失すると考えられている。また、 Pb のドーピングによって p 型の SnTe のキャリア密度を減らすことができることから、 $x = 0.7$ 以下において、ギャップ中にフェルミレベルをチューニングできると考えられる。その状態において磁性元素をドーブして強磁性状態を実現すれば、磁気摂動によってギャップレストポロジカル表面状態にギャップが開くと期待できる。本年度はまず MBE で作製した $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}(111)$ 薄膜 ($x = 0, 0.25, 0.5, 1.0$) について広島大学の放射光施設 HiSOR において角度分解光電子分光測定 (ARPES) を行った。入射フォ

トンエネルギーを変化させることでバンドの 2 次元性を検証した結果、 $x = 0.5$ 以下の試料において直線状の 2 次元的なバンド分散を確認した。今後更に解析し、このバンドの由来を調べ、 Pb ドープ濃度依存性を詳しく見ていく予定である。(広島大学・筑波大学との共同研究)

金属吸着 $\text{Ge}(111)$ 表面構造の電子状態

$\text{Ge}(111)$ 表面上に単原子層程度の Pb が吸着して作る表面超構造について、その輸送特性を明らかにするため、超高真空・極低温・強磁場下での in situ 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、 Pb を 4/3 ML 蒸着した $\text{Ge}(111)-\beta(\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Pb})$ では電気伝導度の温度依存性が絶縁体的な振る舞いを示したが、 Pb の蒸着量が 3 ML を超えた試料では 2 K 以下で金属的な伝導を観測した。これらのバンド構造を明らかにするため、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターにおいて ARPES 測定を行った。LEED 測定から、作成した 3 ML- $\text{Pb}/\text{Ge}(111)$ は $\text{Ge}(111)-\beta(\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Pb})$ と $\text{Pb}(111)-(1 \times 1)$ アイランドが混在している様子を観測した。一方で、そのバンド構造は $\text{Ge}(111)-\beta(\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Pb})$ 由来のバンドに加え、 $\text{Pb}(111)-(1 \times 1)$ ではない未知のバンド構造を持つことを明らかにした。 $\text{Si}(111)$ 基板上的同様の表面構造が超伝導になることから、今後、 $\text{Ge}(111)$ 上のこれらの構造の超低温での伝導特性を測定する予定である。

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

スピンを利用する技術、スピントロニクスが期待されているが、現在はスピン流の生成も測定も制限が大きい。スピントロニクスの発展には自由にスピン流の生成・測定ができるプローブが必須であり、本研究室では本年度からその製作を始めた。東京大学大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) の微細加工設備を用いて製作している。スピン注入に必要な各種金属を均質に積層パターンニングすること、プローブ先端にスピン拡散長よりも短い間隔での接合を作ることの 2 点が技術的に困難であったが、本年度はその設計および製作技術検証を終え、試作プローブが完成した。来年度はこれを用いて実際にスピン流の生成と測定を行い、注入プローブとしての機能の実証を行う。

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 「トポロジカル表面およびそのエッジ状態による電子・スピン輸送の研究」(代表 長谷川修司)

- ・文部科学省 科研費 新学術領域研究「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)
 ・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] 一ノ倉聖:平成 27 年度 理学系研究科研究奨励賞(博士課程)(東京大学大学院理学系研究科, 2016 年 3 月).

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene*, ACS Nano **10**, 2761 (Jan, 2016)).
- [3] T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi Level Position of Ultrathin Bi films*, Phys. Rev. Lett. **115**, 106803 (Sep, 2015).
- [4] A.V. Matetskiy, S. Ichinokura, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, R. Hobara, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductor with giant Rashba effect: One-atomic-layer Tl-Pb compound on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (Oct, 2015).
- [5] A.V. Matetskiy, I. A. Kibirev, T. Hirahara, S. Hasegawa, A.V. Zotov, and A.A. Saranin: *Direct observation of a gap opening in topological interface states of MnSe/Bi₂Se₃ heterostructure*, Appl. Phys. Lett. **107**, 091604 (Sep, 2015).
- [6] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Ishikawa and S. Kuroda: *Two-dimensional quantum transport of multivalley (111) surface state in topological crystalline insulator SnTe thin films*, Nano Research **9**, 490 (Feb, 2016).

(総説)

- [7] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi: *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena, **201**, 105 (May, 2015).

(国内雑誌)

- [8] 一ノ倉聖, 平原徹, 酒井治, 長谷川修司, 鈴木拓: ビスマス表面におけるスピン依存イオン散乱, 表面科学 **36**, 408 (Aug, 2015).

- [9] 長谷川修司: 物理学, この 30 年: 表面物理学, パリティ **30**, 14 (Apr, 2015).

(著書)

- [10] 長谷川修司: 研究者としてうまくやっていくには, (講談社ブルーバックス, Dec, 2015).
- [11] 長谷川修司, 他分担執筆, パリティ編集委員会編: 先生, 物理っておもしろいんですか?, (丸善, May, 2015).

(その他)

- [12] 長谷川修司: 研究・開発, この人間的な営み, 本 (講談社, Jan, 2016).
- [13] 長谷川修司: 物理チャレンジ 2015, いよいよ始まる, 大学の物理教育 **21**, 93 (Jul, 2015).

(学位論文)

- [14] 一ノ倉 聖: 超高真空中でのその場電気伝導測定を用いた半導体表面上の原子層超伝導に関する研究 (博士論文).
- [15] 福居 直哉: トポロジカル絶縁体の原子ステップが輸送特性に与える影響 (博士論文).
- [16] 石原 大高: スピン分裂表面状態と光誘起電圧の円二色性 (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [17] S. Hasegawa, *Atomic-Layer Superconductors*, International Symposium on Two-Dimensional Layered Materials and Art: Two Worlds Meet, 2016 年 3 月 24 日, IMERA, Marseille (France).
- [18] S. Hasegawa, *Atomic-Layer Superconductors*, Cooperation in Physics Workshop of LMU-UTokyo, 2016 年 3 月 1 日, 小柴ホール, 東京大学.
- [19] S. Hasegawa, *Atomic-Layer Superconductors*, The 16th Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, 2016 年 2 月 19 日, 小柴ホール, 東京大学.
- [20] S. Hasegawa, *Charge/spin transport and superconductivity at Rashba spin-split surface states*, The 23rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM23), 2015 年 12 月 11 日, ニセコ, 北海道.
- [21] S. Hasegawa, *Surface Transport of Topological and Non-topological Materials*, The 10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC'15), 2015 年 10 月 26 日, 松江, 島根.
- [22] S. Hasegawa, *Charge/Spin Transport at Surfaces*, The 7th International Conference on Scanning Probe Spectroscopy and Related Methods (SPS'15), 2015 年 6 月 22-24 日, Poznan (Poland).

- [23] S. Hasegawa, *Surface transport below 1 K*, International Workshop on LEED and Related Techniques, 2015 年 5 月 28 日, Hannover (Germany).
- 一般講演
- [24] S. Ichinokura, *Superconductivity in Ca-intercalated Bulayer Graphene*, Tsinghua-UTokyo Workshop on Recent Topic in Materials Physics, Science and Engineering, 2016 年 3 月 10 日, 東京大学.
- [25] S. Ichinokura, *Two-Dimensional Superconductor with a Giant Rashba Effect: Monatomic Layer Tl-Pb Compound on Si(111)*, Cooperation in Physics Workshop of LMU-UTokyo, 2016 年 3 月 2 日, 東京大学.
- [26] N. Fukui, *In situ Measurements of Transport Properties in Topological Insulator $(Bi_{1-x}Pb_x)_2Te_3$ with Atomic Steps*, Cooperation in Physics Workshop of LMU-UTokyo, 2016 年 3 月 2 日, 東京大学.
- [27] S. Ichinokura, T. Nakamura, H. Kim, A. Takayama, R. Hobara, S. Hasegawa, Y. Hasegawa, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, *Two-dimensional superconductor with a giant Rashba effect: monatomic layer Tl-Pb compound on Si(111)*, The 16th Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, 2016 年 2 月 20 日, 東京大学.
- [28] S. Hasegawa, S. Ichinokura, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, A.V. Zotov, and A. A. Saranin, *Superconductivity in Rashba-Type Spin-Split Surface States: $Si(111)-\sqrt{3}\times\sqrt{3}-(Tl,Pb)$ Surface Superstructure*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2016, 2016 年 1 月 16 日, 富良野 (北海道).
- [29] T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, T. Hajirc, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, K. Kobayashi, and S. Hasegawa, *Surface and Bulk States of Ultrathin Bi films: Electronic Structure and Transport Properties*, The 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), 2015 年 11 月 19 日, 広島国際会議場 (広島).
- [30] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, and S. Kuroda : *2-dimensional transport of the topological surface state in $SnTe(111)$ films*, The 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), 2015 年 11 月 17 日, 広島国際会議場 (広島).
- [31] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Sakurai, and S. Kuroda : *Two-dimensional weak antilocalization in topological crystalline insulator $SnTe$ thin films*, New Trends in Topological Insulators 2015, 2015 年 8 月 8 日, San Sebastian (Spain).
- [32] R. Hobara, N. Fukui, T. Nakamura, and S. Hasegawa: *Electronic conductance measurement of Au nano particle/Thiophene compound by multi-probe STM*, International Workshop on Molecular Architectonics, 2015 年 8 月 4 日, 知床, 北海道.
- (国内会議)
- 招待講演
- [33] 長谷川修司:トポロジカル物質のインパクト, 日本表面科学会中部支部・日本真空学会東海支部合同講演会, 2015 年 4 月 25 日, 名古屋工業大学, 愛知.
- 一般講演
- [34] 一ノ倉 聖、菅原克明、高山あかり、高橋隆、長谷川修司: *Ca*-インターカレートした 2 層グラフェンにおける超伝導, 第 7 回 低温センター研究交流会, 2016 年 2 月 23 日, 東京大学.
- [35] 福居 直哉、保原麗、高山あかり、秋山了太、長谷川修司: 原子ステップをもつトポロジカル絶縁体の *in situ* 輸送特性観測, 第 7 回 低温センター研究交流会, 2016 年 2 月 23 日, 東京大学.
- 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日-22 日 (東北学院大学, 仙台)
- [36] 平原徹, 白井皓寅, 羽尻哲也, 松波雅治, 田中清尚, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳: *ピスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証 II*, 2015 年 3 月 19 日,
- [37] 福居直哉, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司: *原子ステップをもつトポロジカル絶縁体の in situ 輸送特性観測*, 2015 年 3 月 19 日.
- [38] 並木雅俊, 毛塚博史, 長谷川修司, 真野絢子, 中屋敷勉, 田中忠芳, 近藤一史, 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 III*. 国際物理オリンピック実験再現, 2015 年 3 月 19 日.
- [39] 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: *極低温その場 4 端子電気伝導測定による 2 層グラフェンの輸送特性*, 2015 年 3 月 19 日.
- [40] 秋山了太, 角田一樹, 一ノ倉聖, 木村昭夫, Konstantin Kokh, Oleg Tereshchenko, 長谷川修司: *$(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ における量子振動および量子コヒーレント輸送の観測*, 2015 年 3 月 19 日.
- [41] 一ノ倉聖, 菅原克明, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: *Ca*-インターカレートした二層グラフェンにおける超伝導, 2015 年 3 月 22 日.
- [42] 一ノ倉聖, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, 保原麗, 秋山了太, 高山あかり, A.A. Saranin, 長谷川修司: *in situ* 電気伝導測定による *Rashba* 系表面構造 (*Tl, Pb*)/*Si(111)* の超伝導の観測, 2015 年真空・表面科学合同講演会 2015 年 12 月 1 日, つくば国際会議場 (茨城).
- [43] 中村友謙, 芳野諒, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: *走査トンネルポテンシオメトリ法による表面上の単一ステップでの抵抗測定*, 2015 年真空・表面科学合同講演会 2015 年 12 月 2 日, つくば国際会議場 (茨城).

- [44] 一ノ倉聖, 菅原克明, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: *Ca* をインターカレーションしたバイレイヤーグラフェンの超伝導, 第6回分子アーキテクトニクス研究会 2015年10月24日, 京都大学桂キャンパス(京都).
- 日本物理学会 2015 秋季大会, 2015年9月16日-19日 (関西大学)
- [45] 一ノ倉聖, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, 保原麗, 秋山了太, 高山あかり, A.A. Saranin, 長谷川修司: *Rashba* 系表面構造 (*Tl, Pb*)/*Si(111)* における二次元超伝導: *in situ* 電気伝導測定, 2015年9月16日.
- [46] 石原大嵩, 福居直哉, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 平原徹, 長谷川修司: 可視光レーザーを用いた表面ラッシュバ系における光誘起電圧の円二色性: *Bi* 表面および *Bi* 吸着 *Ag* 表面, 2015年9月16日.
- [47] 花塚真大, 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司: *Pb/Ge(111)* 超薄膜における構造と輸送特性, 2015年9月18日.
- [48] 保原麗, 福居直哉, 中村友謙, 丹波俊輔, 家裕隆, 安蘇芳雄, 長谷川修司: 多探針 *STM* を用いた金ナノ粒子/チオフェン複合粒子の電気伝導測定, 2015年9月18日.
- [49] 秋山了太, 一ノ倉聖, 角田一樹, 木村昭夫, Konstantin Kokh, Oleg Tereshchenko, 長谷川修司: トポロジカル絶縁体 (Bi_xSb_{1-x})₂*Te*₃ における *in situ* および *ex situ* 電気伝導測定による表面状態の比較検証, 2015年9月18日.
- [50] 久保高幸, 中西亮介, 高山あかり, 福居直哉, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: 4端子電気伝導測定による *MnX/Bi₂X₃* (*X=Se, Te*) 薄膜の輸送特性, 2015年9月19日.
- [51] 右近修治, 一宮彪彦, 井通暁, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 真梶克彦, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 味野道信: 物理チャレンジ 2015 報告: IV 第2チャレンジ実験問題, 2015年9月19日.
- [52] 興治文子, 田中忠芳, 伊東敏雄, 植田毅, 川村清, 杉山忠男, 東辻浩夫, 波田野彰, 松澤通生, 吉田弘幸, 中屋敷勉, 江尻有郷, 真梶克彦, 鈴木功, 深津晋, 光岡薫, 毛塚博史, 榎優一, 江馬英信, 大森亮, 澤岡洋光, 笠浦一海, 川畑幸平, 佐藤遼太郎, 中塚洋佑, 濱崎立資, 山村篤志, 長谷川修司, 北原和夫: 国際物理オリンピック 2015 日本代表候補者への教育研修報告, 2015年9月19日.
- [53] 並木雅俊, 田中忠芳, 鍵山茂徳, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 江尻有郷: グローバル時代に対応した物理コンテンツの研究開発 II. 国際物理オリンピック 実験問題考察, 2015年9月19日.
- [54] 長谷川修司: 表面・分子系での電子・スピン伝導, 新学術領域分子アーキテクトニクス第5回領域会議, 2015年4月24日, 千葉大学(千葉).
- (セミナー)
- [55] 秋山了太, *Two dimensional electrical transport in topological crystalline insulator SnTe thin films*, 東京大学理学部物理教室ランチトーク, 2015年5月8日, 東京大学.
- [56] Shuji Hasegawa: *Four-tip STM and micro-four-point probes to measure electronic/spin transport at surfaces and nanostructures*, Max Planck Institute of Microstructure Physics-Halle, 2015年5月26日, Halle (Germany).
- [57] Shuji Hasegawa: *Charge/spin transport and superconductivity at spin-split surface states*, International Center of Quantum Materials, Peking University, 2015年12月24日, Beijing (China).
- [58] 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美の世界を探る, 東京銀杏会 第23回銀杏講演会, 2016年2月19日, 学士会館(東京).
- (講義等)
- [59] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「歴史を変えた物理」(駒場1年生向), 2015年度夏学期(駒場).
- [60] 長谷川修司, 小森文夫: 物性物理学特論(表面物理学), 2015年度夏学期(本郷).
- [61] 長谷川修司, 高山あかり, 秋山了太, 中村友謙(TA), 遠藤由大(TA): 物理学実験 I (3年生) 電子回折, 2015年度冬学期(本郷).
- (アウトリーチ)
- [62] 長谷川修司, 並木雅俊: 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, 2016年3月12日, 栃木県立宇都宮高等学校(栃木).
- [63] 長谷川修司: 科学の世界 ~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), 2015年8月23日, 岡山大学(岡山).
- [64] 長谷川修司: ナノワールドの探索 ~私たちの日常を支える極微の世界~, 東大理学部 高校生のための夏休み講座 2015, 2015年8月20日, 東京大学(東京).
- [65] 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」, 2015年8月6日, 理学部1号館B101号室(東京大学).
- [66] 模擬授業および研究室見学 兵庫県立姫路西高等学校, 2015年8月3日; 札幌市立札幌開成中等教育学校, 2015年8月7日; 神奈川県立湘南高等学校, 2015年8月7日; 群馬県立前橋高等学校, 2015年11月10日; 栃木県立宇都宮高等学校, 2015年12月1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, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *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 Ca-intercalated double-layer graphene grown on Silicon Carbide crystal surface
- Detection of carrier localization in double-layer graphene at low temperatures, depending on thermal-treatment history
- Detection of superconductivity of double-layer Thallium on Silicon crystal
- Detection of electrical resistance across atomic steps on topological insulator crystals, revealing suppression of backscattering in the topological surface states
- Detection of Shubnikov-de Haas oscillation in topological surface states, revealing high mobility depending on the Fermi-level position
- Transport, magnetism, and atomic structure at interface between a topological insulator and magnetic insulator
- Detection of Photogalvanic effect in Rashba-type spin-splitting surface states
- Measurements of conductivity of organic molecule sheets by using four-tip STM

(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 the superconducting energy gap and vortex structure.
- Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) of topological crystalline insulators
- ARPES of metal-covered Ge(111) surface structures, possible monolayer superconductors

(3) Construction of new apparatuses:

- Fabrication of a pure-spin-current injection probe

- [1] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene*, ACS Nano **10**, 2761 (Jan, 2016)).
- [2] T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi Level Position of Ultrathin Bi films*, Phys. Rev. Lett. **115**, 106803 (Sep, 2015).
- [3] A.V. Matetskiy, S. Ichinokura, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, R. Hobar, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductor with giant Rashba effect: One-atomic-layer Tl-Pb compound on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (Oct, 2015).
- [4] A.V. Matetskiy, I. A. Kibirev, T. Hirahara, S. Hasegawa, A.V. Zotov, and A.A. Saranin: *Direct observation of a gap opening in topological interface states of MnSe/Bi₂Se₃ heterostructure*, Appl. Phys. Lett. **107**, 091604 (Sep, 2015).
- [5] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Ishikawa and S. Kuroda, *Two-dimensional quantum transport of multivalley (111) surface state in topological crystalline insulator SnTe thin films*, Nano Research **9**, 490 (Feb, 2016).
- [6] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi : *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena, **201**, 105 (May, 2015).

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 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)、電子ダイナミクス

4. 走査プローブ顕微鏡

走査トンネル顕微鏡の原理、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、表面・単原子層超伝導

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