

## 1.1 長谷川研究室

4月から高山あかりが助教として、また、修士課程1年生として石原大嵩が新しくメンバーに加わった。6月には助教の平原徹が東京工業大学准教授として転出した。12月には助教として秋山了太が着任した。3月には久保高幸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超薄膜を利用し、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、ピスマス系合金結晶に表れるトポロジカル表面状態やグラフェン、シリセン、モノレイヤー超伝導などである。このようなナノマテリアルの原子配列構造や成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、スピン状態、電子励起などを、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

#### スピン分裂した表面状態での超伝導の検出

近年、Si基板上的金属吸着表面構造でRashba効果によるスピン分裂、及び超伝導を示す系が各々発見されたが、その両者を併せ持つ系はまだ見つからない。最近、Tl(1原子層)とPb(1/3原子層)の両者をSi表面に吸着させたSi(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl, Pb)構造においてRashba分裂した大きなFermi面が観測された。我々はこの表面構造を超高真空中で準備して*in situ*で4端子電気伝導測定を行った。その結果、極低温まで金属的な電気伝導を保ち、2.2 K程度で超伝導転移を示した。転移温度よりも高温から抵抗の減少が始まっており、2次元超伝導に特徴的な振幅揺らぎを取り入れた理論式(Aslamazov-Larkin-Maki-Thompson補正)でfittingできた。

一方、2次元超伝導体は $T_C$ 以下でBerezinskii-Kosterlitz-Thouless(BKT)転移を示すことが知られており、 $I-V$ 特性にその兆候が現れる。そこで $T_C$ 近傍で $I-V$ 特性の測定を行うと、2.2 K付近で $V \propto I$ から $V \propto I^3$ への飛びが見られた。この事実から、この系は、Si基板上に形成された原子一層の化合物における2次元超伝導体であるといえる。このように、この表面がRashba効果と超伝導を併せ持つことが明らかとなった。今後はそのスピン輸送特性や空間反転対称性が超伝導に及ぼしている影響を調べる予定である。(ロシア科学アカデミー・オートメーションプロセス制御研究所との共同研究)

#### スピンホール効果の検出

トポロジカル絶縁体の表面状態において、電場の印加によって流れる電流の方向と垂直方向にスピン流が流れる「スピンホール効果(SHE)」が発現する可能性がある。我々は、トポロジカル絶縁体である $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (111)の薄膜をSi(111)基板上に成長させ、*in situ*で集束イオンビーム(FIB)でH字型の構造に微細加工し、さらに*in situ*で4探針プローブで電気伝導測定を行った。まずH字構造の例えば左側の縦棒に相当する部分に電流を流すと、SHEによりスピン流がHの横棒を流れる。そのスピン流が右側の縦棒に到達し、そこでSHEの逆過程(逆スピンホール効果)によって電流に変換される。実際に測定を行ったところ、右側の縦棒で有限の電圧が観測された。電圧にはSHEに由来するもののほかに、オーム則に従う伝導による電圧降下も含まれるはずで、両者を分離するには工夫が要る。SHEの大きさであるスピンホール抵抗率(SHEによって生じた電圧を流した電流で割った値)は、通常のオーム則の抵抗率に比例する場合、あるいはその2乗に比例する場合、または定数である場合など様々なモデルが考えられる。よって、測定された電圧が、試料の抵抗率の違いに対してどのように変化するか調べれば、SHEの成分が非線形の応答として観測される可能性がある。試料の抵抗率を変える方法には不純物の添加なども考えられるが、今回は温度を変えながら電圧を測定した。その結果、オーム則の抵抗では説明できない成分が見いだされた。今後この成分が膜厚を変えることでどのように変化するかなど、系統的に調べて表面状態でのSHEの確証を得る。

#### Nickel Bis(dithiolene) Complex $\pi$ -Nanosheetの電気伝導測定

この物質は「カゴメ格子」状の単分子層物質であり、2次元トポロジカル絶縁体の有機物シートとして理論的に予想されているが、本測定によって極めて高い電気伝導度を持つことが示された。従来は、多数のフレークをペレット状に固めた試料で電気伝導度を測定していたが、本研究では、4探針STM装置を用いて、単一フレークに4本の探針を接触させて電気伝導度を測定した。その結果、従来の値より一桁以上高いことが判明した。もし、この物質が2次元トポロジカル有機絶縁体であるのなら、この高い電気伝導度はエッジ伝導に起因していると思われる。さらに酸化還元によって値が変わることもわかった。酸化還元反応によって物質をトポロジカル物質からトリビアル物質に転移させている可能性がある。(化学専攻との共同研究)

#### ラッシュバ効果による光誘起電圧の円二色性の検出

スピン偏極したバンドを持つ物質では、円偏光によって電子がスピン選択的に励起されて光電流に円二色性が現れることが予想され、トポロジカル絶縁

体表面や量子井戸において実際に観測されている。我々は、同じくスピン偏極した表面電子状態を持つラッシュバ系で光誘起電圧の円偏光依存性とその発現機構を明らかにするため、Si(111) 基板上に成長させた Bi(111) 超薄膜および  $\text{Ag}(111)-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Bi 超薄膜を用いて測定を行った。実験ではレーザーの直線偏光を  $\lambda/4$  板によって円偏光に変換して試料に照射し、誘起される電圧の変化を測定した。その結果、左右円偏光で光誘起電圧に差が現れること、光誘起電圧は入射角に依存していること、およびその電圧差はレーザーの波長に依存していることが明らかになった。特に Bi/Ag 超薄膜では短波長で電圧の円二色性が顕著に大きくなった。しかし円二色性が観測されないと予想されていた Si(111)- $7\times 7$  清浄表面においても若干の電圧差が見られることから、今後はロックイン検出を導入することで測定精度を高め、波長依存性を詳細に検証することで光誘起電圧の円二色性のメカニズムを探っていく。

### Bi 超薄膜における磁気輸送測定

Bi はバルク状態では半金属であるが、その (111) 面における表面状態では金属的なフェルミ面を持ち、電気伝導に寄与していることが超高真空中での *in situ* 電気伝導測定で判明している。しかし、表面状態とバルク状態との間でどのような相互作用をしているかは不明であった。そこで、Bi 膜の膜厚を変えてバルクの寄与の大きさを変えながら、主に弱反局在に着目して電気伝導を測定した。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 *in situ* で測定した。その結果、6~16 BL において磁気抵抗の磁場依存性がほとんど膜厚に依存せず、この膜厚領域では表面状態の伝導が支配的であると推測される。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、バルクが伝導に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ンネルが形成されているためと考えられる。今後は、Bi のフェルミ準位を操作して測定を行っていく予定である。

### Si(110)- $2\times 5$ -Au 表面の 1 次元伝導の測定

Si(110) $2\times 5$ -Au 表面では、Si 基板上に金原子が一定方向に並んで原子鎖が一定間隔で多数整列し、擬 1 次元金属的な電子状態を持つことが知られている。他の擬 1 次元金属表面系と比べると Au 原子鎖間の相互作用が弱いため、1 次元性が強く表れることが期待される。そこでこの表面を 4 探針法によって超高真空中 *in situ* で電気伝導測定を行った。その結果、4 本の探針を等間隔で直線上に配置して測定する直線 4 端子法において、(1) 探針間隔が 10  $\mu\text{m}$  より狭い場合には抵抗値が探針間隔によって大きく変化した。(2) 端子の配置が原子鎖と平行の場合と垂直の場合で異なる探針間隔依存性を示した。(3) 電流プ

ローブと電圧プローブの組み合わせを入れ替えると、その抵抗値の比が探針間隔に依存して変化した。これらの結果は、原子鎖方向とそれに直角方向で伝導度の異なる異方的 2 次元系とはみなせないことを示しており、従来の擬 1 次元表面構造と著しく異なる。この結果は、電流分布が広がらずに 1 次元的に流れることで解釈できると予想されるので、シミュレーションとの定量的な比較を行う。

### 1.1.2 表面ナノ構造

#### Bi 超薄膜の半金属・半導体転移の検出

Bi バルク結晶は、価電子帯上端と伝導体下端のエネルギー位置がほとんど一致している半金属（ゼロギャップ半導体）であるが、十分に薄い膜状になると、膜面垂直方向にキャリアが閉じ込められるので、その方向のエネルギーが量子化されて量子井戸状態となる。その結果、価電子帯の上端が少し下がり、伝導帯の下端が少し上がるので、バンドギャップが開いて半導体となることが予想される。しかし、この「半金属・半導体転移」の確証は長い間得られていなかった。それは、Bi は非常に強い金属的な表面電子状態を持ち、バルク電子状態がそれによって隠されてしまうためであった。今回、シンクロトロン光電子分光法によって、励起光のエネルギー依存性や偏光依存性を詳しく調べることによって、360 原子層厚の薄膜において半導体状態になっていることを確認し、上記の転移を観測することに成功した。しかし、興味深いことに、さらに薄い 60 原子層厚になると電子状態は再び（半）金属の状態にもどった。これは表面電子状態とバルク状態との間の電荷移動によって電荷中性点が変わったためと解釈された。（東京工業大学および分子科学研究所との共同研究）

#### トポロジカル絶縁体の近接磁場効果の検出

トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (111) 表面上に反強磁性体  $\text{MnSe}$ (111) を成長させると、その磁場の影響によって時間反転対称性が破られ、ディラックコーンのディラック点にエネルギーギャップが開くことが予想されている。そこで、角度分解光電子分光測定を行った結果、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  上の  $\text{MnSe}$  層数が増えるにつれてバルクバンドおよび表面バンドに電子ドーピングしていくこと、さらに 2 BL 成長した状態でディラック点にギャップが開くことを観測した。また、この系でマイクロ 4 端子電気伝導測定を行った結果、 $\text{MnSe}$  の層数が増えるにつれて抵抗率が増加した。これは上述の電子ドーピングから期待される変化と逆である。また、低温領域において、抵抗値に温度ヒステリシスが現れることを観測した。これらは  $\text{MnSe}$  の磁性特性と関連していると思われる。今後、さらに詳細な実験を行い、ARPES 測定との比較などから、これらの物性発現の起源について議論する予定である。（東京工業大学および分子科学研究所との共同研究）

### 1.1.3 新しい装置・手法の開発

#### 低温強磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ装置の開発

昨年度に引き続き、超高真空・極低温・強磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ (STP) 装置の開発及び STP 測定を行った。STP は走査トンネル顕微鏡 (STM) から派生した実験手法であり、試料表面の構造と電位分布を同時にイメージングすることができるので、ミクロな構造に対応した電気伝導特性を視覚的に捉えられる。本年度は、Si 基板上にエピタキシャル成長させた Bi(111) 薄膜 (厚さ ~9 BL) について、5 K での STP 測定に成功した。その結果、5 K ではステップ近傍のポテンシャル像において、常温では見られなかった振動構造が観測された。この振動構造の波数は、Bi(111) 表面状態においてスピンを保存する散乱ベクトルの波数と同程度であった。一方、走査トンネル分光法 (STS) によって電子状態密度の変調 (電子定在波) が同じ波数の振動構造として観測されたが、ステップ近傍での位相シフトがポテンシャル像の振動構造と異なっていた。来年度は試料表面上で厳密に同じ場所で STP/STS 測定を行い、ポテンシャル像での振動構造の起源を明らかにしていきたい。(東京工業大学との共同研究)

#### FIB-4 探針 STM 装置の改造

集束イオンビーム (FIB) 装置と 4 探針 STM 装置を組み合わせた FIB-STM を用いた多探針 STM 測定、特にトンネル接触による電子輸送の測定を行うべく準備を行っている。今年度は以前から問題になっていた走査電子顕微鏡 (SEM) の分解能の向上、および低温での動作の安定化を図り、動作確認を行った。2 探針同時のトンネル接触による電気伝導測定には、分解能の高い SEM および極低温での安定動作が必要であるが、SEM は環境由来の擾乱磁場によって分解能が悪化しており、また極低温での 2 次電子検出効率の低下が問題であった。そこで、超高真空槽中にパーマロイ製の磁気シールドを設置し、磁場遮蔽の対策を行った結果、環境磁場の影響は 100 分の 1 以下に抑えることができた。また同時に 2 次電子検出効率を上げるために内部熱シールドの内側に 2 次電子検出器を搭載し、極低温まで安定して SEM 観察できる改造を行った。これらにより室温から極低温の範囲で分解能 30 nm 程度の分解能が安定して得られるようになった。並行して未完成であった制御ソフトの製作にも着手し、直接コンタクトによる電気伝導測定が安定して行える状態になった。トンネル接触を安定して得ることはまだできていない。これには機械的安定性および制御ソフトの完成が必要であるため、来年度にこれらの対策を行う。

#### Bi 超薄膜におけるスピン依存イオン散乱の検出

スピン偏極イオン散乱分光 (SP-ISS) とは、スピン偏極した He<sup>+</sup> ビームを試料表面に照射して表面でのスピン偏極度を測定する手法であり、強磁性体の最表面磁性の研究に用いられてきた。しかし、近年、非磁性体試料でもスピン非対称性が観測された。その起源はスピン軌道相互作用 (SOC) と標的原子の中心力ポテンシャルの効果と考えられるが、詳細は未解明である。本研究では強い SOC を持つ Bi に着目し、Si(111) 基板上の Bi(111) 薄膜を成長させ、それに対し *in situ* で SP-ISS を行った。その結果、Bi におけるスピン非対称性はイオンの入射方向には依存せず、散乱角、入射エネルギーに強く依存した。散乱角依存性は SOC モデルと一致する一方、入射エネルギー依存性は単純な SOC モデルからの逸脱が見られた。これらの結果は、衝突の際の He<sup>+</sup> と標的原子間の仮想的な電荷移動がスピン依存散乱に寄与することを示唆している。

Bi 表面では、Rashba 効果によってスピン偏極電流の発生が期待されている。昨年度には、Bi 表面に電流を流しながら SP-ISS 測定を行い、電流に依存するスピン偏極度の変化を得たが、その原因がスピン偏極電流であるのか、上述のスピン依存散乱の効果であるかは未解決であった。今年度得られた知見に基づいて解析と測定条件の見直しを行い、スピン偏極電流を抽出することが今後の課題である。(物質・材料研究機構との共同研究)

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)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究 (A) 「スピン偏極走査ポテンシオメトリ装置の開発と微細加工した表面ラシュバ系のスピン伝導」(代表 平原徹)
- ・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)

< 受賞等 >

- [1] 高山あかり：第 7 回井上リサーチアワード (公益財団法人井上科学振興財団, 2015 年 2 月)。
- [2] 高山あかり：第 9 回日本物理学会若手奨励賞 (一般社団法人日本物理学会, 2015 年 3 月)。
- [3] 一ノ倉聖：Travel Award at The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7)(公益社団法人日本表面科学会, 2014 年 11 月)。
- [4] 高山あかり：平成 26 年度講演奨励賞 (新進研究者部門) (公益社団法人日本表面科学会, 2014 年 11 月)。
- [5] 一ノ倉聖：平成 26 年度講演奨励賞 (スチューデント部門) (公益社団法人日本表面科学会, 2014 年 11 月)。

< 報文 >

(原著論文)

- [6] M. Aitani, T. Hirahara, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, S. Hasegawa: *In situ Magnetotransport Measurements of Ultrathin Bi films: Evidence for a Surface-Bulk Coherent Transport*, Phys. Rev. Lett. **113**, 206802 (Nov, 2014).
- [7] T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa, and T. Takahashi: *Structure and transport properties of Cu doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> films*, Phys. Rev. B **89**, 195311 (May, 2014).
- [8] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Structure Determination of Multilayer Silicene Grown on Ag(111) films by Electron Diffraction: Evidence for Ag Segregation at the Surface*, Phys. Rev. B **89**, 241403(R) (Jun, 2014).
- [9] N. Fukui, R. Hobara, T. Hirahara, Y. Miyatake, H. Mizuno, T. Sasaki, T. Nagamura, and S. Hasegawa: *In-situ Micro-fabrication and Measurements of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Ultrathin Films in a Multi-chamber System having Focus Ion Beam, Molecular Beam Epitaxy, and Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **12**, 423 (Oct, 2014).
- [10] R. Sakamoto, T. Kambe, T. Kusamoto, T. Pal, N. Fukui, T. Shimojima, Z. Wang, T. Hirahara, K. Ishizaka, S. Hasegawa, F. Liu, and H. Nishihara: *Redox control and high conductivity of nickel bis(dithiolene) complex  $\pi$ -nanosheet, a candidate of the first organic topological insulator*, J. Am. Chem. Soc. **136** (41), 14357 (Sep, 2014).
- [11] S. Ichinokura, T. Hirahara, S. Hasegawa, O. Sakai and T.T. Suzuki: *Electron-spin dependent <sup>4</sup>He<sup>+</sup> ion scattering on Bi surfaces*, Radiation Effects and Defects in Solids **169** (12), 1003 (Nov, 2014).
- [12] T.T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinokura, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Target element dependent spin-orbit coupling in polarized <sup>4</sup>He<sup>+</sup> ion scattering*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (Dec, 2014) DOI:10.1016/j.nimb.2014.11.055.
- [13] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi: *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena (Nov, 2014 online).
- [14] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film*, Phys. Rev. Lett. **114**, 066402 (Feb, 2015).
- (国内雑誌)
- [15] 長谷川修司: 表面での電子・スピン輸送研究の最近の展開, 表面科学 **36**, 112 (Mar, 2015).
- (その他)
- [16] 長谷川修司: ローラー先生の思い出, 表面科学 **35** (10), 550 (Oct, 2014).
- [17] 長谷川修司: 物理チャレンジ 10 周年と 2022 年国際物理オリンピック日本大会, 大学の物理教育 **20**, S57 (Nov, 2014).
- [18] 長谷川修司: 編集後記, 日本物理学会誌 **69** (11), 802 (Nov, 2014).
- (学位論文)
- [19] 中村友謙: ビスマス薄膜における走査トンネルポテンシオメトリ測定 (修士論文).
- [20] 久保高幸: トポロジカル絶縁体/磁性薄膜ヘテロ接合の電子構造と輸送特性 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [21] S. Hasegawa, *Spin-split surface states and electronic/spin transport therein*, The 11th Surface Nanoscience Workshop, 2015 年 2 月 14 日, PyeongChang (Republic of Korea).
- [22] S. Hasegawa, *Spins Transport at Crystal Surfaces*, The 2nd International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON '14), 2014 年 11 月 28 日, National Museum of Emerging Science and Innovation (Mirai-kan), Tokyo.
- [23] S. Hasegawa, *Spins at Crystal Surfaces*, LMU-Todai Cooperation in Physics Workshop, 2014 年 10 月 27 日, Ludwig-Maximilians-Universität München (Germany).
- [24] A. Takayama, *Edge state of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES*, Horn 教授を囲む通研共プロ研究会, 2014 年 6 月 11 日, 東北大学通研 (仙台).
- 一般講演
- [25] R. Akiyama, *Two-dimensional weak antilocalization in topological crystalline insulator SnTe thin films*, The Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015, 2015 年 1 月 31 日, 延世大学 (ソウル, 韓国).
- [26] A. Takayama, *One-dimensional edge states with giant spin splitting in bismuth thin film*, The Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015 2015 年 1 月 31 日, 延世大学 (ソウル, 韓国).
- [27] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa, *Silicene, is it a cousin of Graphene?*, The Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015, 2015 年 1 月 31 日, 延世大学 (ソウル, 韓国).
- [28] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa, *Silicene, is it a cousin of Graphene?*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2015, 2015 年 1 月 16 日, Furano (富良野, 北海道).

- [29] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *Electron structure of Bi edge state studied by spin-resolved ARPES*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2015, 2015年1月17日, Furano (富良野、北海道).
- [30] T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, *Spins Current at Surfaces*, Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, 2014年9月30日, Far-Eastern Federal University, Vladivostok (Russia).
- [31] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *1D Rashba effect for edge state of bismuth thin film studied by spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy*, The 2nd International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON'14), 2014年11月27日 (Tokyo, Japan).
- [32] S. Hasegawa, T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobara, A. Takayama, *Spin Current at Surfaces of Strong Spin-Orbit Coupling Materials*, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (PacSurf 2014), 2014年12月8日, Hapuna Beach Prince Hotel, Hawaii (USA).
- **The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7)**, 2014年11月3-6日 (くにびきメッセ, 松江)
- [33] T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa and T. Takahashi: *Structure and Transport Properties of Cu-Doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Films*.
- [34] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi and S. Hasegawa: *Structure determination of multilayer silicene grown on Ag(111) films by electron diffraction: Evidence for Ag segregation at the surface*.
- [35] S. Ichinokura, T. Hirahara, S. Hasegawa, O. Sakai and T.T. Suzuki: *Electron-spin dependent <sup>4</sup>He<sup>+</sup> ion scattering on epitaxially-grown Bi surfaces*.
- [36] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *The electric conduction anisotropy of topological insulator thin films, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> grown on a vicinal substrate*.
- [37] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi and T. Takahashi: *Edge state of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [38] 高山あかり: (若手奨励賞) スピン分解光電子分光によるV族半金属薄膜におけるラッシュバ効果の研究, 日本物理学会 第70回年次大会 早稲田大学 (早稲田キャンパス) 2015年3月23日.
- [39] 高山あかり: スピン分解光電子分光によるBi薄膜の電子状態の研究, 育志賞研究発表会, 2014年8月20日 (東京工業大学東工大蔵前会館, 東京).
- [40] 長谷川修司: 走査プローブ顕微鏡の現在、過去、未来, 日本表面科学会 実用顕微評価技術セミナー 2014, 東京大学 本郷キャンパス, 2014年6月6日.
- [41] 長谷川修司: 走査プローブ顕微鏡 ピコスケールで物質の表面を観る、計る、加工する, 日本顕微鏡学会 第24回電子顕微鏡大学, 東京大学 本郷キャンパス, 2014年6月13日 (金).
- 一般講演
- [42] 福居直哉, 保原麗, 高山あかり, 平原徹, 長谷川修司, 表面での原子ステップを横切る電気伝導, 平成26年度 東北電気通信研究所プロジェクト研究会「非平衡スピン/ゆらぎの精緻な制御と観測による新規ナノデバイスの開拓研究」2014年11月13日, ベルサンピアみやぎ泉 (宮城).
- [43] 高山あかり: 高分解能4探針STMによる局所的電子・スピン輸送特性の測定, 新学術領域研究分子アーキテクニクス 第3回領域全体会議 2014年6月13日 (金), 天童温泉「滝の湯」(山形県天童市).
- 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月21-24日 (早稲田大学, 東京)
- [44] 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教育コンテンツの研究開発.
- [45] 石原大嵩, 福居直哉, 花塚真大, 保原麗, 高山あかり, 平原徹, 長谷川修司: BiおよびBi/Ag薄膜のラッシュバ効果による光誘起電圧の円二色性.
- [46] 久保高幸, 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司: 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.
- [47] 秋山了太, 藤澤和輝, 山口智也, 黒田眞司: トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜における2次元表面電気伝導測定.
- [48] 平原徹, 久保高幸, Andrei Mateckij, 高山あかり, 松波雅治, 羽尻哲也, 田中清尚, 木村真一, 長谷川修司: トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ構造の電子状態.
- [49] 中村友謙, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, 平原徹: 低温強磁場下におけるBi超薄膜の走査トンネルポテンショメトリ測定.
- [50] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: Si(110)2 × 5-Au における擬1次元伝導の測定.
- 第6回 低温センター研究交流会, 2015年3月4日 (小柴ホール, 東京大学)
- [51] 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: 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.
- [52] 花塚真大, 相谷昌紀, 平原徹, 一ノ倉聖, 申東潤, 長谷川修司: ビスマス超薄膜の磁気輸送測定.

- [53] 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: *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.
- 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7-10 日 (中部大学, 愛知)
- [54] 長谷川修司, 原田勲, 近藤泰洋, 江尻有郷, 興治文子, 近藤一史, 並木雅俊, 増子寛, 光岡薫, 味野道信: 物理チャレンジ 2014 報告: I プレチャレンジ
- [55] 深津晋, 一宮彪彦, 井通暁, 右近修治, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 岸澤真一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 下田正, 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, 味野道信: 物理チャレンジ 2014 報告: IV 第 2 チャレンジ実験問題.
- [56] 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: *Bi* 超薄膜の走査トンネルポテンショメトリ測定: エッジでのポテンシャル異常.
- [57] 鈴木拓, 酒井治, 一ノ倉聖, 平原徹, 長谷川修司: ヘリウムイオン散乱におけるスピン軌道相互作用の標的要素依存性.
- [58] 長谷川修司: はじめに 金属吸着半導体表面から何を学んだか .
- [59] 伊藤俊, 平原徹, 申東潤, 一ノ倉聖, 松田巖, 長谷川修司: *Si(111)-√7 × √3-In* の 2 つの超構造 *hex/rect* の STM 観察.
- [60] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: 微斜面 *Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, *Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>* 薄膜の異方的電気伝導.
- [61] 一ノ倉聖, 酒井治, 長谷川修司, 平原徹, 鈴木拓: *Bi* 表面におけるスピン偏極イオン散乱分光.
- [62] 白澤徹郎, 杉木祐人, 平原徹, 長谷川修司, 高橋敏男: *Cu* ドープ *Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>* 薄膜の構造と電子輸送特性.
- 日本表面科学会 第 34 回学術講演会, 2014 年 11 月 6-8 日 (くにびきメッセ, 松江)
- [63] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: 微斜面トポロジカル絶縁体薄膜の電気伝導異质性.
- [64] 一ノ倉聖, 平原徹, 酒井治, 長谷川修司, 鈴木拓: *Bi* 表面におけるスピン依存イオン散乱.
- [65] 高山あかり, 佐藤宇史, 相馬清吾, 小口多美夫, 高橋隆: *Bi* 薄膜におけるエッジ構造のスピン分解 ARPES. (セミナー)
- [66] 長谷川修司: 韓流、自己流、スピン流, 東京大学理学部物理教室ランチトーク, 2014 年 5 月 2 日 (金) 東京大学 (本郷).
- [67] 高山あかり: *High-Resolution Spin-Resolved Photoemission Spectrometer and the Rashba Effect in Bismuth Thin Films*, 東京大学理学部物理教室ランチトーク, 2014 年 10 月 31 日 (金) 東京大学 (本郷). (講義等)
- [68] 長谷川修司, 溝川貴: 現代物理実験学 I, 2014 年度夏学期 (本郷).
- [69] 長谷川修司, 高山あかり, 一ノ倉聖 (TA), 花塚真大 (TA), 福居直哉 (TA), 石原大嵩 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2014 年度冬学期 (本郷).
- [70] 長谷川修司: ナノサイエンスとナノテクノロジー, 東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム (東大 EMP), 2014 年 6 月 14 日および 2015 年 1 月 24 日, 東京大学伊藤国際ホール (本郷). (アウトリーチ)
- [71] 長谷川修司: 得意技で田舎から世界にはばたけ, みずほのフェスティバル実行委員会・瑞穂野地区 PTA 連絡協議会 平成 26 年度教育講演会, 2014 年 11 月 22 日, 瑞穂野地区市民センター (宇都宮).
- [72] 長谷川修司: ナノワールドの探索, 「科学先取りグローバルキャンパス岡山」キックオフシンポジウム, 2014 年 8 月 23 日, 岡山大学 50 周年記念ホール (岡山).
- [73] 高山あかり: 見えないものを見る 異常感知能力を鍛えて電子の世界を覗く, 東大理学部 高校生のための夏休み講座 2014, 2014 年 8 月 21 日 (小柴ホール, 東京大学).
- [74] 長谷川修司: 実験課題レポートの書き方、大気圧測定実験、プランク定数測定実験, 静岡県教育委員会主催「オリンピックチャレンジ」, 2014 年 12 月 24 日, 静岡県総合教育センター (掛川).
- [75] 長谷川修司, 近藤泰洋: 実験課題レポートの書き方と重力加速度/ホール効果の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2014 年 12 月 6 日, 福島高校 (福島).
- [76] 長谷川修司: 実験・実習: LED を光らせよう, 平成 26 年度女子中高生夏の学校 2014, 2014 年 8 月 8 日, 国立女性教育会館 (埼玉).
- [77] 長谷川修司, 近藤泰洋: 物理チャレンジ紹介と実験課題レポートの書き方, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2014 年 6 月 8 日, 千葉市科学館 (千葉).
- [78] 長谷川修司, 北原和夫, 田中忠芳: 実験課題レポートの書き方とプランク定数の測定実験 KIT サイエンスシティ プロジェクト公開講演会 (物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ) 2014 年 4 月 26 日, 金沢工業大学 (石川).
- [79] 長谷川修司: 実験データの解析, 物理オリンピック日本委員会 IPhO2015 日本代表選手候補者春合宿, 2015 年 3 月 26 日 (東京工科大学, 八王子).
- [80] 長谷川修司, 並木雅俊: 実験レポートの書き方および重力加速度測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2015 年 3 月 14 日 (栃木県立宇都宮高等学校, 栃木).
- [81] 模擬授業および研究室見学 茨城県立土浦第一高等学校, 2014 年 8 月 4 日: 兵庫県立姫路西高等学校, 2014 年 8 月 5 日: 福岡県立筑紫丘高等学校, 2014 年 8 月 5 日: 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」 2014 年 8 月 7 日: 北海道札幌西高等学校, 2014 年 8 月 7 日: 神奈川県立湘南高等学校, 2014 年 8 月 7 日: 兵庫県立豊岡高校 2014 年 12 月 25 日: シンガポール国立大/オーストラリア・ラトロープ大 2015 年 1 月 27 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 and symmetry breakdown. (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, topological surfaces, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films such as graphene and silicene. We use various kinds of ultrahigh vacuum experimental techniques, 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 measurements. Main results in this year are as follows.

**(1) Surface electronic/spin transport:**

- Detection of superconductivity in giant Rashba spin-split surface states
- Detection of spin Hall effect on Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>(111) surface by using *in situ* FIB-fabrication and four-tip STM
- Detection of circular dichroism in photocurrent due to spin-split surface states
- Detection of Quasi-one-dimensional electronic transport on Si(110)-2×5-Au surface
- Detection of Surface-bulk coherent transport in Bi ultrathin films

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

- Detection of semimetal-to-semiconductor transition in Bi ultrathin film
- Detection of magnetic proximity effect at topological insulator/magnetic material interface

**(3) Construction of new apparatuses:**

- Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling potentiometry
- Spin-dependent scattering of He ion beam by Bi ultrathin films
- Improvements in a combined UHV system of focused ion beam, four-tip STM, SEM and RHEED-MBE

- [1] M. Aitani, T. Hirahara, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, S. Hasegawa: *In situ Magnetotransport Measurements of Ultrathin Bi films: Evidence for a Surface-Bulk Coherent Transport*, Phys. Rev. Lett. **113**, 206802 (Nov, 2014).
- [2] T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa, and T. Takahashi: *Structure and transport properties of Cu doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> films*, Phys. Rev. B **89**, 195311 (May, 2014).
- [3] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Structure Determination of Multilayer Silicene Grown on Ag(111) films by Electron Diffraction: Evidence for Ag Segregation at the Surface*, Phys. Rev. B **89**, 241403(R) (Jun, 2014).
- [4] N. Fukui, R. Hobara, T. Hirahara, Y. Miyatake, H. Mizuno, T. Sasaki, T. Nagamura, and S. Hasegawa: *In-situ Micro-fabrication and Measurements of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Ultrathin Films in a Multi-chamber System having Focus Ion Beam, Molecular Beam Epitaxy, and Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **12**, 423 (Oct, 2014).
- [5] R. Sakamoto, T. Kambe, T. Kusamoto, T. Pal, N. Fukui, T. Shimojima, Z. Wang, T. Hirahara, K. Ishizaka, S. Hasegawa, F. Liu, and H. Nishihara: *Redox control and high conductivity of nickel bis(dithiolene) complex  $\pi$ -nanosheet, a candidate of the first organic topological insulator*, J. Am. Chem. Soc. **136** (41), 14357 (Sep, 2014).
- [6] S. Ichinokura, T. Hirahara, S. Hasegawa, O. Sakai and T.T. Suzuki: *Electron-spin dependent  $^4\text{He}^+$  ion scattering on Bi surfaces*, Radiation Effects and Defects in Solids **169** (12), 1003 (Nov, 2014).
- [7] T.T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinokura, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Target element dependent spin-orbit coupling in polarized  $^4\text{He}^+$  ion scattering*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (Dec, 2014) DOI:10.1016/j.nimb.2014.11.055.
- [8] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi: *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena (Nov, 2014 online).
- [9] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film*, Phys. Rev. Lett. **114**, 066402 (Feb, 2015).

# 第1章 2014年度に開講された学部講義概要

## 1.0.1 現代実験物理学I：溝川貴司，長谷川修司

4学期の「物理実験学」に引き続いて，主として物性物理学に関連する実験手法について，「物理実験I」および「物理実験II」で行う実験を中心に，物理的な原理や歴史的な背景とともに最近の話題も含めて概説する。

### 1. 低温

- 1.1 低温技術
- 1.2 超流動
- 1.3 超伝導

### 2. 真空

- 2.1 真空技術
- 2.2 電子線
- 2.3 その他の粒子線

### 3. 電気と光

- 3.1 電気回路
- 3.2 電磁波の発生と計測
- 3.3 磁場の発生と計測

### 4. X線

- 4.1 X線の発見
- 4.2 特性X線と連続X線
- 4.3 Moseleyの法則
- 4.4 Thomson散乱とCompton散乱
- 4.5 X線回折結晶学
- 4.6 X線研究の拡がり
- 4.7 CT
- 4.8 リソグラフィ
- 4.9 宇宙X線

### 5. 電子

- 5.1 粒子性と波動性
- 5.2 電子回折と顕微鏡
- 5.3 Aharonov-Bohm効果
- 5.4 トンネル効果と走査トンネル顕微鏡
- 5.5 スピン