

1.1 長谷川研究室

4月から博士課程1年生として一ノ倉聖が、修士課程1年生として久保高幸と中村友謙が新しくメンバーに加わった。3月には申東潤と白井皓寅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。おもにシリコンや金属、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、それらナノスケール低次元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、ビスマス系合金結晶に表れるという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の研究も行っている。このようなナノマテリアルの原子配列構造や原子層成長の制御・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 表面電子輸送

スピン偏極イオン散乱分光法による Bi 表面での電流誘起スピン偏極の検出

ビスマス (Bi) は強いスピン軌道相互作用を持ち、その表面では空間反転対称性の破れによってスピン分裂した金属的な表面状態が存在することが知られている (Rashba 効果)。この表面では、電場 (電流) 印加によって面内方向にマクロなスピン偏極が生じることが期待されている (電流誘起スピン偏極)。しかし、電流を流しながら表面敏感なスピン偏極測定が必要であるため、実験的な研究例は少なかった。我々は、スピン偏極イオン散乱分光を用い、Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の発現を検証した。

Bi(111) 超薄膜は、分子線ビームエピタキシー (MBE) によって Si(111) 基板上に作成し、同一の超高真空チャンパー内でスピン偏極イオン散乱分光測定を行い、スピン偏極度の電流依存性を測定した。その結果、電流に起因するスピン偏極度の変化を観測した。また、スピン偏極の向きが電流の向きと直交していることも確認し、Rashba 系における電流誘起スピン偏極のモデルと一致している。表面での電流誘起スピン偏極の測定方法が確立したので、今後はトポロジカル絶縁体表面などへ展開していく。(物質材料研究機構との共同研究)

Bi₂Se₃ 超薄膜でのスピンホール効果の測定

トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ は、強いスピン軌道相互作用のために、電流を流すとスピンの向きに依存

して逆方向に偏向される (スピンホール効果) ことが期待される。この効果を検出すべく、Bi₂Se₃ 超薄膜を in situ で H 型構造に微細加工し、4 端子電気伝導測定を室温で行った。微細加工および電気伝導測定は、真空トンネルで接続された超高真空マルチチャンパーシステムで行われた。H 型構造は、図 1 挿入図に示すように、2 組のリード (電流および電圧リード) とその間をつなぐ架橋部からなる。電流リードに電流を流すとスピンホール効果によってスピン流が架橋部を流れ、逆スピンホール効果によって電圧リード間に電流が誘起されて電圧として検出される。図 1 は実際に測定された電圧を電流リードに流した電流で割った抵抗値であり、それは架橋部の幅 w と長さ L に依存する。黒実線はスピンホール効果を考えず電流の広がりによるオーム性抵抗のみを考えた場合の理論曲線であり、赤実線はスピンホール効果を取り入れた理論曲線である。実測値はスピンホール効果を考慮したほうがよく再現される。このフィッティングによってスピンホール角 (電場によって生まれるスピン流と電流との比) $\gamma = 0.032$ とスピン拡散長 $l_s = 230$ nm が得られた。 γ の値は白金などと同程度に大きい。また l_s は 1 K での先行研究と矛盾しない値になっている。この手法による表面系でのスピンホール効果検出が有効であることが示されたので、今後、膜厚や低温での測定などにより表面状態によるスピンホール効果の確証を得る予定である。

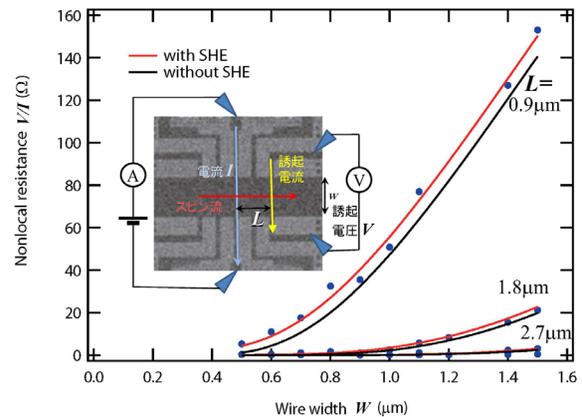


図 1.1.1: H 型構造の架橋部幅 w に対する抵抗 (V/I) の大きさ。黒実線はスピンホール効果がない場合の理論値。赤実線はスピンホール効果の存在を仮定した場合の抵抗の理論値。挿入図は試料の SEM 像および電気計測の模式図。

Si(110)2 × 5-Au 表面の 1 次元伝導

Si(110)2 × 5-Au 表面は、Si 基板表面上に金原子が一定方向に並んだ原子鎖が多数整列した構造であり、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ので、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探針法によって電気伝導測定を行った。RHEEDパターンが不明瞭な低品質の試料では、直線4端子法での探針間隔依存性が小さく、異方性も観測されないなど、これまでに測定された異方的二次元系とみなせる擬1次元系と同様の結果が得られた。一方、RHEEDパターンが明瞭な高品質の試料では直線4端子法でも異方性が観測されたり端子間隔が約50 μm 以下で探針間隔依存性が観測され、これまでの擬1次元系とは異なる現象が見られた。これは1次元性が強く表れた結果だと考えられるので、低温での測定や加熱条件依存性などを系統的に調べて1次元性伝導の確証を得る予定である。

Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面への磁性不純物添加

昨年度までにSi(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面が2.5 Kで超伝導転移をする表面超構造であることを明らかにした。今回、超伝導と近藤効果などの他の基底状態との競合を明らかにするために、この表面に磁性不純物であるCoを極微量添加して電気伝導の温度依存性を測定した。装置の不具合のため20 Kまでしか冷却できなかったが、蒸着量を0.05原子層まで増やしても、不純物添加の影響が電気伝導特性に顕著に現れることはなかった。今後、より低温まで冷却して近藤効果の発現の有無および局在超伝導への影響を観測する予定である。

1.1.2 表面ナノ構造

多層シリセンの構造解析

シリセンは単原子層のシリコンであり、その電子状態は、グラフェンと同様にディラック粒子系としての性質を持つと理論的には予言されている。しかし実験的にそれを確認できたかどうかは定かではない。単層シリセンは基板上に作成されるが、これまでの研究で基板とシリコンとの相互作用が強く、そのためにディラックコーンが消失することが示唆されていた。そこでこの単層シリセンをバッファ層として利用しようと、多層シリセンの研究が始まっており、やはりディラックコーンの存在の有無が議論されている。今回はこの議論に新たな知見を得るために多層シリセンの原子構造の解析を行った。試料はAg(111)基板表面上にSiを蒸着することで多層シリセンを作成し、低速電子回折(IV-LEED)測定を行った。その結果、多層シリセンのSi原子層はほぼダイヤモンド構造に近いものであり、表面にはSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造ができていることが分かった。これを踏まえてこれまで報告されているデータを解析し直すと、観測されていた特徴がほぼ全てSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造の金属的表面状態バンドの性質として説明される。よってAg上に成長させた多層シリセンと呼ばれているものは、今回の実験条件では作成できていない。

今後、別な基板を用いてディラックコーンが発現するシリセンの作成レシピを探索する必要がある。(東京大学物性研究所との共同研究)

Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面のSTM観察

In原子をSi(111)7 \times 7清浄表面に2原子層程度蒸着するとSi(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面が得られる。この表面は蒸着量の微妙な違いによりhex相とrect相の二種類存在することが知られていたが、最近、実は一種類しか存在しないのではないかということが議論されている。そこで本研究ではInの蒸着量を制御してSTM観察を行った。その結果、確かにInの蒸着量が少ないときは6回対称性のあるhex構造が観察され、多いときは2回対称性のrect構造が見られた。ただ両者の違いは非常に微妙なので注意深く見ないと間違える可能性がある。中間の蒸着量ではミクロスコピックに両者が共存している様子も分かり、確かに二種類の相があることが改めて確認された。

Si(111)上のBi(111)超薄膜の高分解能低エネルギー光電子分光

Si(111)上にBiを室温で蒸着するとBi(111)単結晶超薄膜が成長する。10年近くに渡ってこの系の表面状態の特異なバンド/スピン構造を研究してきたが、今回放射光施設(UVSOR)でこれまでより低温、高分解能、低エネルギーの直線偏光された放射光を用いて改めてその電子状態を測定した。その結果、次の2つのことが明らかになった。(i)点近傍では低エネルギー励起でもP偏光の光を用いたときは表面状態が観測されるが、S偏光を用いるとバルク状態が観測された。両者とも金属的であり、50年前に理論的に予言されたバルクバンドの半金属半導体転移は見られなかった。(ii)試料作成直後では表面状態にもバルク状態にも対応しないバンドがフェルミ準位近傍でブリルアンゾーンの広い範囲で見られた。今後更なる測定を行い、この状態の起源を探っていく。(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

トポロジカル絶縁体Bi₂Se₃(111)表面上に反強磁性体MnSe(111)を成長させると時間反転対称性を破ってディラックコーンにバンドギャップが開くとされている。これは理論上、Bi₂Se₃とMnSeとの界面の最隣接ユニット層(Quintuple layer, QL)のトポロジカルな性質が磁場によってその隣のQLに移動して最隣接QLが通常の絶縁体となるためである。この現象を確かめるべく、放射光施設UVSORで角度分解光電子分光測定を行った。その結果、Bi₂Se₃(111)上にMnSe(111)を成長させるにつれてフェルミ準位が下がってディラック点に近づくことがわかった。このことは、MnのみをBi₂Se₃上に蒸着しただけでは

起こらず、また、 Bi_2Se_3 と MnSe が界面で Se 原子層どうしが接触しているためでもない。今回の実験では、分解能不十分だったためディラックコーンにバンドギャップが開いているかどうかはわからなかった。今後は、放射光施設 UVSOR の光電子分光装置が高分解能化されたので、再び実験する予定である。また、低速電子回折での I V 実験によって、 Bi_2Se_3 と MnSe の界面の原子構造を調べる予定である。(分子科学研究所との共同研究)

トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 の Sb ドープによるフェルミ準位制御

トポロジカル絶縁体は、バルク内部が絶縁体であるが表面にはスピン偏極した電流が流れる金属的な表面状態を持つ。理論上はディラック点近傍にフェルミ準位が位置するが、実際の試料では格子欠損のためにキャリアがドープされてディラックコーンの位置がシフトしている。トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 は n 型となっているため、フェルミ準位以下にディラック点が位置している。一方、トポロジカル絶縁体 Sb_2Te_3 は p 型となっているため、フェルミ準位以上にディラック点が位置する。そのため、 Bi_2Te_3 に Sb をドープし三元合金を作ることにより、フェルミ準位の位置を制御できることが期待できる。そこでこの現象を確かめるべく、実験を行った。 Bi_2Te_3 薄膜成長時に Sb をドープするにつれてフェルミ準位が下がることが角度分解光電子分光により確認できた。分解能が低い場合ディラックコーンは見えないが、Bi に対して Sb の比が約 95% になると、バルク伝導帯がフェルミ準位より上に上がりバルク価電子帯のみが残ったので、フェルミ準位をディラック点近傍に移動できたといえる。今回の実験はまったく同じ先行研究があり、追試の意味しかないが、トポロジカル絶縁体に磁性体をつけることによりギャップが開くとされているので、フェルミ準位をディラック点近傍に制御して磁性体をつけてバンドギャップが開くかどうか確認する予定である。

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

超高真空・低温・高磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ (Scanning Tunneling Potentiometry) 装置の開発を行っている。この装置では、試料に電流を流して電位勾配をつくった状態で STM 測定を行う。その際、トンネル・バイアス電圧に直流成分と交流成分を加えることでトンネル電流に直流・交流成分を持たせ、直流成分は試料の電位分布の測定、交流成分は試料・探針間の距離制御に用いる。これにより、試料表面の構造と電位分布の二次元イメージングが同時に可能となる。本年度は、STP 用フィードバック回路を自作し、既存の STM コン

トローラと組み合わせることで STP 制御系を製作した。それを用いて、Si 基板上にエピタキシャル成長させた Bi(111) 表面において常温での STP 測定に成功した。また、従来の STP では試料を固定するための両端のクランプから電流を導入する手法が主流だが、本装置では低温での測定を目的として、STM 探針とは別に、試料に直接コンタクトさせて電流を導入するためのプローブを STM 探針近傍に備えた探針ホルダーを使用できる。この電流導入プローブを用いた STP 測定にも成功した。来年度は、低温・強磁場下での測定を目指し研究を進めていく。

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 挑戦的萌芽研究 「ナノスケール伝導用スピンプローブの開発とそれによる表面ラシュバ系のスピン流の研究」(代表 平原徹)
- ・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] 一ノ倉聖、申東潤、中村友謙：表面科学技術者資格認定 (公益社団法人日本表面科学会、2013 年 7 月)
- [2] 長谷川修司：Surface Science Highly Valued Reviewer (Elsevier)

<報文>

(原著論文)

- [3] P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Razado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasegawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, *Evidence of Dirac Fermions in Multilayer Silicene*, Appl. Phys. Lett, **102**, 163106 (Apr, 2013).
- [4] M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Magnetotransport measurements of a superconducting surface state of In- and Pb-induced structures on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **110**, 237001 (Jun, 2013).
- [5] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *In situ transport measurements on ultrathin Bi(111) films using a magnetic tip: Possible detection of current-induced spin polarization in the surface states*, New J. Phys. **15**, 105018 (Oct 2013).
- [6] M. Aitani, Y. Sakamoto, T. Hirahara, M. Yamada, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, and S. Hasegawa, *Fermi level tuning of topological insulator thin films*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 110112 (Oct, 2013).

- [7] N. Nagamura, R. Hobarra, T. Uetake, T. Hirahara, M. Ogawa, T. Okuda, K. He, P. Moras, P. M. Sheverdyayeva, C. Carbone, K. Kobayashi, I. Matsuda, and S. Hasegawa, *Anisotropic Electronic Conduction in Metal Nanofilms Grown on a One-Dimensional Surface Superstructure*, Phys. Rev. B **89**, 125415 (Mar, 2014).

(国内雑誌)

- [8] 長谷川修司, 究極のナノマテリアル 表面超構造, 自動車技術 **67** (11), 102 (Nov, 2013).

(著書)

- [9] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in "In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist" (World Scientific, 2013), pp. 156-163.
 [10] 長谷川修司, 問題 4.30 「良い論文を書くには?」, in 問題と解説で学ぶ表面科学 (現代表面科学シリーズ 6) (共立, Nov 2013). p.177

(その他)

- [11] 長谷川修司, 「求む異端児」—?, 理学部広報 (東京大学), (Jul, 2013).
 [12] 長谷川修司, 100年に一度の大改革?, 大学の物理養育 **19**, 134 (Nov, 2013).
 [13] 長谷川修司, 国際化いろいろ, 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 News Letters 巻頭言 (Sep, 2013).
 [14] 長谷川修司, 書評「だれが原子を見たか (江沢洋著)」, 日本物理学会 **69** (2), p. 117 (Feb, 2014).

(学位論文)

- [15] 白井皓寅: 多層シリセンの構造、バンド分散 および輸送特性 (修士論文).
 [16] 申東潤: 磁性原子が吸着した表面状態での電子輸送 (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [17] S. Hasegawa, *Surface Nanomaterials for Electronics and Spintronics*, Nanomeeting 2013 (Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics), 2013年5月28日 (Minsk, Belarus).
 [18] S. Hasegawa, *Charge and Spin Transport Topological at Surfaces with Strong Electron-Phonon and Spin-Orbit Couplings*, International Workshop and Final Conference on "Energy Dissipation at Surfaces", 2013年6月6日 (Bad Honnef, Germany).
 [19] S. Hasegawa, *Surface Nanomaterials for Sustainable Growth - Superconducting and Spin-split Surface States -*, The Second Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2013, Far Eastern Federal University), 2013年8月21日 (Vladivostok, Russia).

- [20] S. Hasegawa, *Spin Splitting and Spin Transport at Surface States of Non-Magnetic Materials with Strong Spin-Orbit Coupling*, 2013 NSFC-JSPS seminar on magnetic surface and films (Fudan University), 2013年10月22日 (Shanghai, China).

- [21] S. Hasegawa, *Spin at Crystal Surfaces*, Workshop on Quantum Materials (Max Planck Institute), 2013年12月9日 (Stuttgart, Germany).

- [22] T. Hirahara, *Topological Quantum Phase Transitions in Ultrathin Films*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月2日 (Gyeongju, Korea).

- [23] T. Hirahara, *Ultrathin films of topological insulators*, IMS workshop on Advanced Spectroscopy of Correlated Materials (ASCM 13), 2013年8月6日 (分子研, 岡崎).

一般講演

- [24] T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobarra, and S. Hasegawa, *Spin-Resolved Transport at Surface States: Current-Induced Spin Polarization and Spin Hall Effect*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2014, 2014年1月16日 (富良野, 北海道).

- [25] D. Y. Shin, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Electrical Conductivity of a Dilute Magnetic Surface Superstructure on Si(111)*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月3日 (Gyeongju, Korea).

- [26] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *In situ FIB Etching and Conduction Measurement of Microstructures on a Topological Insulator Thin Film*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月5日 (Gyeongju, Korea).

- [27] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobarra, and S. Hasegawa, *Surface-State Superconductivity*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月4日 (Gyeongju, Korea).

- [28] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *The modification of ultra-thin films and in situ electrical conduction measurements using a four-tip STM combined with FIB*, The 19th International Vacuum Congress (IVC-19), 2013年9月11日 (Paris, France).

- [29] T. Hirahara, *Ultrathin materials*, The 8th Japanese-French Frontiers of Sciences Symposium, 2014年1月28日 (Metz, France).

(国内会議)

招待講演

- [30] 長谷川修司: 4探針型走査トンネル顕微鏡によるナノスケール計測, 精密工学会 2014年度春季大会, 2014年3月20日 (東京大学 本郷キャンパス).

- [31] 長谷川修司: トポロジカル絶縁体の表面電子状態とスピン伝導, 日本磁気学会 第 191 回研究会 / 第 45 回スピントロニクス専門研究会 「ベリー位相とトポロジカル絶縁体」, 2013 年 7 月 9 日 (中央大学駿河台記念館).
- [32] 平原徹: ビスマスはトポロジカル物質か?, 科研費基盤研究 A 「固体中のディラック電子」第 3 回研究会, 2013 年 12 月 (赤穂温泉, 兵庫).
- [33] 平原徹: シリセンに関する実験の現状, 日本物理学会 2013 年度秋季大会領域 4,6,7 合同シンポジウム「トポロジカル絶縁体・超伝導体の新物質・新成長法・新構造」, 2013 年 9 月 (徳島大学, 徳島).
- 一般講演
- [34] 白井皓寅, 白澤徹郎, 平原徹, 高橋敏男, 長谷川修司: 多層シリセンの構造解析, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日 (東海大学, 神奈川).
- [35] 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: 低強磁場下で動作する走査トンネルポテンショメトリ装置の開発, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 29 日 (東海大学, 神奈川).
- [36] 一ノ倉聖, 平原徹, 鈴木拓, 長谷川修司: スピン偏極イオン散乱分光法を用いた Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の検証, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日 (東海大学, 神奈川).
- [37] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: *In situ* FIB 加工微細構造を用いた Bi₂Se₃ のスピンホール効果測定, 日本物理学第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 30 日 (東海大学, 神奈川).
- [38] 平原徹, 松波雅治, 羽尻哲也, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳: ビスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 日 (徳島大学).
- [39] 申東潤, 平原徹, 長谷川修司: Si(111) 上の希薄磁性表面の電気伝導, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日 (徳島大学).
- [40] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: Bi₂Se₃ 超薄膜でのスピンホール効果検出の試み, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 26 日 (徳島大学).
- [41] 原田勲, 右近修治, 江尻有郷, 興治文子, 北原和夫, 近藤一史, 近藤泰洋, 長谷川修司, 波田野彰: 物理チャレンジ 2013 報告: I. プレチャレンジ活動, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 26 日 (徳島大学).
- [42] 岸澤真一, 浅井吉蔵, 右近修治, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 下田正, 真梶克彦, 鈴木功 K, 瀬川勇三郎 L, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 深津晋, 味野道信: 第 9 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2013 実験問題, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 26 日 (徳島大学).
- [43] 白井皓寅, 平原徹, 長谷川修司: グラフェンの従兄弟シリセン, 平成 25 年度東北大学通研プロジェクト研究会, 2013 年 11 月 1 日 (ベルサンピアみやぎ泉, 宮城).
- [44] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: Bi₂Se₃ 薄膜の *in situ* 微細加工と 4 探針測定によるスピンホール効果検出の試み, 表面科学学術講演会, 2013 年 11 月 26 日 (つくば国際会議場, 茨城).
- [45] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: Si 結晶表面上の In および Pb モノレイヤー超伝導, 第 5 回低温センター研究交流会, 2014 年 2 月 27 日 (小柴ホール, 東京大学).
- (講義等)
- [46] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2013 年度夏学期 (本郷).
- [47] 長谷川修司, 溝川貴: 現代物理実験学 I, 2013 年度夏学期 (本郷).
- [48] 長谷川修司, 平原徹, 久保高幸 (TA), 中村友謙 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2013 年度冬学期 (本郷).
- [49] 長谷川修司, 小森文夫: 表面物理学 (物性物理学特論) (学部・大学院共通講義) 2013 年度冬学期 (本郷).
- [50] 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 1 月 25 日 (東京大学伊藤国際ホール, 本郷).
- (アウトリーチ)
- [51] 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 IPhO2013 日本代表選手候補者冬合宿, 2013 年 12 月 24 日 (八王子セミナーハウス, 東京).
- [52] 長谷川修司: 実験・実習: 大気圧を測ろう, 平成 25 年度女子中高生夏の学校 2013, 2013 年 8 月 9 日 (国立女性教育会館, 埼玉).
- [53] 長谷川修司, 他: 実験レポートの書き方, 大気圧測定実験, プランク定数測定実験等, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2014 年 3 月 22 日 (東北大学片平さくらホール, 仙台); 2014 年 3 月 15 日 (栃木県立宇都宮高等学校, 栃木); 2014 年 3 月 3 日 (熊本県立第二高等学校, 熊本).
- [54] 長谷川修司: 模擬授業 at 本郷, 2013 年 11 月 26 日 (栃木県立宇都宮高等学校); 2013 年 11 月 12 日 (群馬県立前橋高等学校); 2013 年 8 月 1 日 (神奈川県立湘南高等学校).

1 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

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 semiconductor surfaces, topological surfaces, and nano-scale phases such as surface superstructures and ultra-thin films. We use various kinds of ultra-high 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 measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic/spin transport:

- Detection of current-induced spin polarization at Bi(111) surface by using spin-polarized ion scattering spectroscopy
- Detection of spin Hall effect on Bi₂Se₃(111) surface by using *in situ* FIB-fabrication and four-tip STM
- Quasi-one-dimensional electronic transport on Si(110)-2×5-Au surface by using linear/square micro-four-point probe method
- Effect of magnetic impurities on surface electronic transport of Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In

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

- Structure determination of multi-layer Silicene by using I-V low-energy electron diffraction
- Discrimination between the hexagonal phase and rectangular phase of Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In by STM observation
- High-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy of Bi(111) ultrathin films
- Proximity effect at Bi₂Se₃/MnSe interface
- Tuning of Fermi-level position of a topological insulator Bi₂Se₃ by Sb doping

(3) Construction of new apparatuses: Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling microscope and scanning tunneling potentiometry.

- [1] P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Razado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasagawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, *Evidence of Dirac Fermions in Multilayer Silicene*, Appl. Phys. Lett, **102**, 163106 (Apr, 2013).
- [2] M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Magnetotransport measurements of a superconducting surface state of In- and Pb-induced structures on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **110**, 237001 (Jun, 2013).
- [3] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *In situ transport measurements on ultrathin Bi(111) films using a magnetic tip: Possible detection of current-induced spin polarization in the surface states*, New J. Phys. **15**, 105018 (Oct 2013).
- [4] M. Aitani, Y. Sakamoto, T. Hirahara, M. Yamada, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, and S. Hasegawa, *Fermi level tuning of topological insulator thin films*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 110112 (Oct, 2013).
- [5] N. Nagamura, R. Hobara, T. Uetake, T. Hirahara, M. Ogawa, T. Okuda, K. He, P. Moras, P. M. Sheverdyaeva, C. Carbone, K. Kobayashi, I. Matsuda, and S. Hasegawa, *Anisotropic Electronic Conduction in Metal Nanofilms Grown on a One-Dimensional Surface Superstructure*, Phys. Rev. B **89**, 125415 (Mar, 2014).
- [6] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in "In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist" (World Scientific, 2013), pp. 156-163.