

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として上田洋一と山田学が新しくメンバーに加わった。3月には、植竹智哉、最首祐樹、坂本裕介が修士課程を修了して企業や官公庁に就職し、研究員であった保原麗も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の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、モノレイヤ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、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

トポロジカル表面状態の輸送特性

後述するように、トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 に微量の Pb をドーピングすることによって真に絶縁体であるトポロジカル超薄膜 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Te}_3$ を作成できたので、その輸送特性を大気に曝すことなく *in situ* で測定した。このような *in situ* 電気伝導測定はこれまでに例がなく、他の測定例では常に大気暴露による表面電子状態の変化が問題となっている。 Pb を混ぜない場合はやはり電気伝導が主にバルクキャリアによって担われていることが分かった。 Pb の濃度を増やしていくと電気伝導度は減少し、バルクがフェルミ準位よりも上に行った $x = 0.14$ で電気伝導度はほぼ一定になり、電子状態の変化と対応付けることによって表面状態のみの伝導度を導出することに成功した。測定された値は $0.5 \times (e^2/h)$ であり、理論が予言する単一ディラックコーンの電気伝導度とも良い一致を示し、確かに表面状態のみを測定できていることが裏付けられた。今後は電気伝導度の温度依存性および表面に不純物を吸着させた場合の振る舞いを調べる予定である。

Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の検出

$\text{Bi}(111)$ の表面状態は大きなラシュバパラメータを持ち、ラシュバ分裂している事が実験的にも報告されている。このようなラシュバ分裂した系に電流を流すと電流と表面の両方に垂直な方向にスピンが偏極することが理論的に予言されており、電流誘起スピン偏極と呼ばれている。しかし、電流誘起スピン

偏極は電氣的に検出された報告はまだない。磁性体を電気伝導測定の探針として用いた場合、探針の磁化と試料中のスピンの向きとが平行か反平行化で測定される電位が変わり、相反定理が破れる。本研究で、Bi 超薄膜において電気伝導測定を行い、磁性体探針を用いた時のみ相反定理が破れることを確かめた。探針の配置に対する相反定理の破れの振る舞いは電流誘起スピン偏極によるものと矛盾せず、電流誘起スピン偏極を電気伝導測定から初めて実験的に検出する事に成功したと言える。今後は、Bi 超薄膜の膜厚依存性などから、表面状態の寄与を見積もる予定である。

強磁性共鳴による Bi のスピンホール効果測定

電荷の流れを伴わないスピンの流れ、いわゆる“純スピン流”は低消費電力デバイス開発に向けて大きな注目を集めている。Rashba 効果によってスピン分裂したバンド構造を持つ表面状態は大きなスピンホール角（電流と生成されるスピン流との比）を示すことが理論的には期待されているが、実験的検証は皆無である。また表面状態以前にスピン軌道相互作用が大きい Bi に関しては、バルクのスピンホール角を同定した例はこれまでに知られていない。そこで本研究では超高真空中で作成した高品質 Bi 超薄膜を大気中でデバイス加工し、磁性体の強磁性共鳴を用いてスピンホール効果を測定した。Bi のスピンホール角は 1

温度可変型 4 探針 STM 装置による $\text{Si}(111)\text{-}4 \times 1\text{-In}$ 表面の電気伝導測定

擬 1 次元的表面は、その次元性から朝永-ラッティンジャー液体やパイエルス転移など興味深い物理現象の舞台となる。特に、 $\text{Si}(111)\text{-}4 \times 1\text{-In}$ 表面構造は、In 原子の原子鎖が異方的に形成され、擬 1 次元金属的な電子状態をもつ表面として盛んに研究が行われている。この表面は、100 K 程度の低温において $8 \times 2\text{-In}$ 相への構造相転移と電荷密度波 (CDW) の形成を伴うパイエルス転移を起こし、金属-絶縁体転移を起こすことが知られている。

本研究室で開発を進めてきた温度可変型 4 探針 STM 装置での正方 4 探針測定法により、 $4 \times 1\text{-In}$ 表面の電気伝導度の温度依存性を In 鎖に平行方向と垂直方向とをそれぞれ独立に測定することに成功した。その結果、In 鎖に垂直方向の電気伝導度は、下地 Si 基板の空間電荷層の電導度が支配的であり、平行方向は In 鎖自体の伝導度と下地の空間電荷層の伝導度の足し合わせたものとして測定されることが分かった。In 鎖の伝導度は測定された平行方向の伝導度から垂直方向の伝導度を差し引くことによって得られる。これにより、In 鎖の電気伝導度は約 110 K において電導度に金属-絶縁体転移による急激な減少が見られた。また、RHEED パターンの温度依存性からも 110 K 付近において 4×1 から 8×2 への転移が確認され、電気伝導度測定の結果と矛盾しない

結果が得られた。さらに、電導度測定から得られた転移後のバンドギャップの大きさは、光電子分光測定による結果とほぼ一致するものとなった。

1.1.2 表面ナノ構造

トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 超薄膜への Pb ドープによるフェルミ準位制御

スピン軌道相互作用が強い物質において、バルクの方はバンドギャップが開いて絶縁体であるが、エッジ（表面）に金属的なディラックコーンが形成されるトポロジカル絶縁相が発現することがあり、昨今理論的に話題になっている。しかし実験的には単結晶バルクを用いると十分低温においても電気伝導度に起源が不明のバルク金属成分が残っているために、表面状態のみの特性を評価することに成功した例はない。我々は一貫してトポロジカル絶縁体を超薄膜にして表面のバルクに対する比を大きくしようと試みている。本年は 3 nm 厚の Bi_2Te_3 超薄膜を超高真空中で作成し、その電子状態を角度分解光電子分光法で調べた。Pb をドープしない膜はやはり Te 欠損により n 型にドープされていたが、Pb をドープすると確かにバルクバンドがフェルミ準位より上に動き、半導体になる。同時に分散の形が変化して孤立したディラック点を持つ理想的なディラックコーンが形成されることが明らかになった。（ロシアトムスク大学、スペインバスク大学との共同研究）

Si(110) 2×5 -Au 表面の原子構造解析及び欠陥密度の評価

Si(110) 2×5 -Au は理想的な擬 1 次元金属電子状態をもつことが報告されている。Si(111) 4×1 -In、Si(553)-Au、Si(557)-Au など、過去に研究がなされてきた他の Si 結晶表面上の擬 1 次元金属系とは異なり、Si(110) 2×5 -Au は原子鎖間の相関が弱く低温においてもパイエルス転移せずに金属性を維持するなどの特徴を持つことから電子の非フェルミ液体的な振る舞いが観測される朝永-ラッティン ジャー液体の実現が期待できる。しかしこの系に関する研究報告は光電子分光や簡単な STM 観察のみであり、電気伝導測定はおろか原子構造の確定すらなされていない。そこで本研究では低温型 STM 装置を用いて、この系の表面モルフォロジーの原子分解能 STM 観察を行った。その結果、作成条件の制御からだけでは不可避な点欠陥が形成されることがわかった。今後は低温型独立駆動 4 探針 STM 装置を用いて Si(110)- 2×5 -Au の表面電気伝導度の異方性、温度依存性を測定し、その輸送機構を明らかにすることを目指す。

Co 薄膜の磁気異方性と表面構造

近年、学術的な興味のみならず産業応用面でもナノ物理学への期待が高まっており、特に（光）磁気ディスクに代表される低次元系磁気記録媒体の磁化特性評価が急務となっている。前年度に改良された磁気光学 Kerr 効果（SMOKE）測定装置はその目的に適うものである。本装置によって、異なる表面構造上に成長させた Co 超薄膜の磁気異方性が、Co の膜厚や試料作製温度、測定温度によって明確に異なることが明らかになった。本年度は、より詳細に条件を変えて SMOKE 測定を進め、得られた磁化特性と STM 観察による実空間の構造解析、RHEED（反射高速電子回折）による逆空間構造解析を結びつけて説明することを試みた。その結果として、Si(111)- 7×7 表面、Ag(111) 表面、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面を基板にそれぞれ成長させた 2 原子層厚の Co 薄膜の磁気異方性と形状の異方性がコンシステントに対応していること、ある膜厚を超えると Co が結晶性の変化を示し、保磁力の急激な増加をもたらすことなどが分かった（図 1.1.1 参照）。

1.1.3 新しい装置・手法の開発

サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発

当研究室では、表面電気伝導測定に特化したマイクロ 4 端子プローブ装置が稼働中であるが、その装置での最低到達温度は 10 K 程度である。また、最低到達温度が 1.8 K の極低温 4 探針 STM 実証機でも電気伝導測定時には極低温を安定に保つことは容易ではない。そこでモノレイヤー超伝導体の検出を実現するため、新たにソーブションポンプ方式の冷却系を持ち、1 K 以下の極低温を保って超高真空中で表面電気伝導測定が可能で、超伝導マグネットによって 7 T までの高磁場を印加できる「サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置」の開発に着手した。本年度は（1）試料準備室、転換処理室、観測ヘッド、冷却系、排気系などの一連の真空・低温装置の設計・製作（2）測定値のばらつきを軽減を目指した測定回路の設計・製作（3）測定用ソフトウェアの作成を行い、 4He を用いた冷却テストによってサンプル付近で最低到達温度 0.8 K を達成した。また、最高到達磁場 7 T も確認した。今後は（4）プローブのサンプルへの自動アプローチ機構を製作し、プローブの破壊や測定値のばらつきをさらに軽減させ、モノレイヤー超伝導の電気伝導や臨界磁場、近藤効果などの測定を行う予定である。

極低温 4 探針 STM 実証機の開発

4 K 以下での極低温での動作と、装置稼働率の向上、さらには集束イオンビーム（FIB）による加工、原子間力顕微鏡（AFM）との複合による更なる先端的な応用計測手法の確立、また、長年の夢である遅延グリーン関数の実空間マッピングとモノレイヤー超

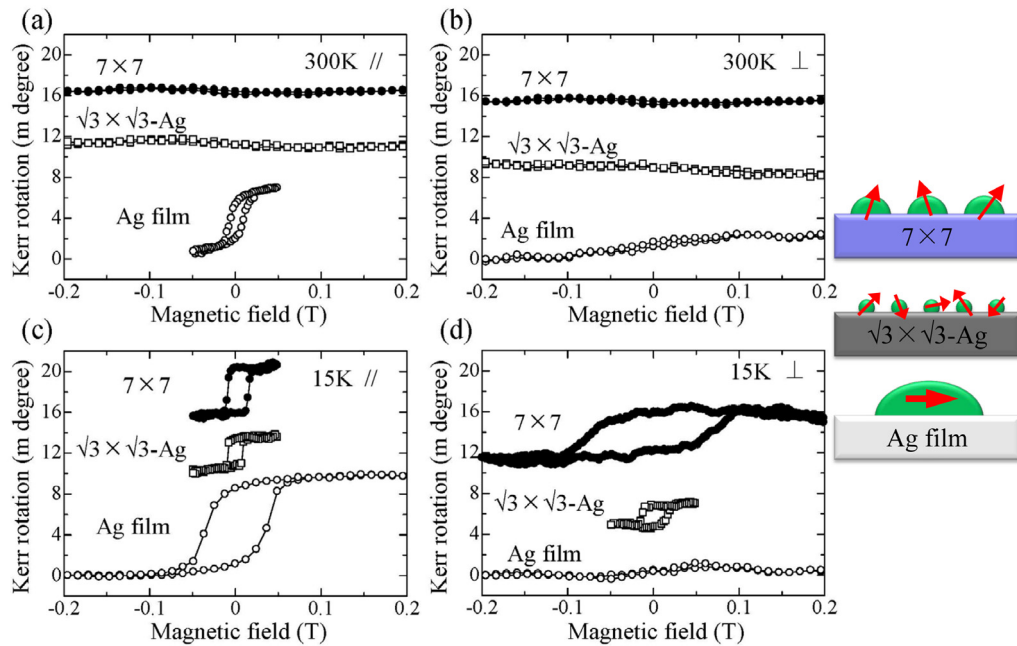


図 1.1.1: 3 種類の基板表面上に成長させた 2 原子層厚の Co 超薄膜の磁化ヒステリシス特性。基板は Si(111)- 7×7 表面, Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面、および Ag(111) 表面である。(a)(c) 表面平行方向の磁化、(b)(d) 表面垂直方向の磁化。(a)(b) 300 K, (c)(d) 15 K での測定。模式図は 3 つの基板表面上での Co 薄膜のモルフォロジーと磁化を表している。

伝導の検出を狙い、極低温型 4 探針 STM 実証機の開発を ユニソクと共同で行っている。本年度には、集束イオンビーム装置との結合が実現し、微細加工された表面・薄膜系の輸送特性の測定に着手した。また、2 探針による同時トンネル分光測定が実現し、遅延グリーン関数の実測に一歩近づいた。

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 「ミリケルビン・マイクロ 4 端子プローブ法の開発とモノレイヤー超伝導の探索」(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ッシュバ系のスピンの研究」(代表 平原徹)
- ・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業 プロトタイプ実証・実用化プログラム 「マルチプローブ顕微鏡プローバースystem」(代表 長村俊彦)

また、長谷川は今年度開催された下記の 3 つの国際会議の Co-chairman を務めた。

- ・The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2010 年 9 月 27-29 日 (Vladivostok, Russia).
- ・SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, 2010 年 7 月 5-7 日 (東京大).
- ・Symposium on Surface and Nano Science 2011

(SSNS '11), 2011 年 1 月 19-22 日 (栗石).

< 受賞 >

- [1] 平原徹: (社) 日本表面科学会 第 20 回 (平成 22 年度) 奨励賞 「ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導」
- [2] 長谷川修司: (社) 日本表面科学会 第 15 回 (平成 22 年度) 学会賞 「表面電気伝導と表面構造・電子状態との関連の研究」

< 報文 >

(原著論文)

- [3] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobar, T. Eguchi, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *Metallic Transport in a Monatomic Layer of In on a Silicon Surface*, Physical Review Letters **106**, 116802 (Mar, 2011).
- [4] N. Miyata, R. Hobar, H. Narita, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Development of surface magneto-transport measurement with micro-point probe method and the measurement of Bi nanofilm on Si(111)*, Japanese Journal of Applied Physics **50**, 036602 (Mar, 2011).
- [5] I. Matsuda, K. Kubo, F. Nakamura, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, H. Narita, Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Electron*

compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional triangle lattice, Physical Review B **82**, 165330 (Nov, 2010).

- [6] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Takeichi, H. Miyazaki, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakizaki, and S. Hasegawa: *Anomalous transport in an n-type topological insulator ultrathin Bi₂Se₃ film*, Physical Review B **82**, 155309 (Oct. 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [7] H. Morikawa, K. S. Kim, Y. Kitaoka, T. Hirahara, S. Hasegawa and H. W. Yeom: *Conductance transition and interwire ordering of Pb nanowires on Si(557)*, Physical Review B **82**, 045423 (Jul, 2010).
- [8] A. Nishide, Y. Takeichi, T. Okuda, A. A. Taskin, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, A. Kakizaki, Y. Ando, and I. Matsuda: *Spin-polarized surface bands of a three-dimensional topological insulator studied by high-resolution spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy*, New Journal of Physics **12**, 065011 (Jun, 2010).
- [9] Y. Niinuma, Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobar, S. Hasegawa, H. Mizuno, and T. Nagamura: *Development of an UHV-SMOKE system using permanent magnets*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **8**, 298 (Jun, 2010).
- [10] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: *Topological metal at the surface of an ultrathin Bi_{1-x}Sb_x alloy film*, Physical Review B **81**, 165422 (Apr, 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [11] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: *Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi₂Se₃ films*, Physical Review B **81**, 165432 (Apr, 2010).
- [12] K. He, Y. Takeichi, M. Ogawa, T. Okuda, P. Moras, D. Topwal, A. Harasawa, T. Hirahara, C. Carbone, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Direct spectroscopic evidence of spin-dependent hybridization between Rashba-split surface states and quantum-well states*, Physical Review Letters **104**, 156805 (Apr, 2010).
- [13] N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobar, T. Hirahara, P. Moras, D. Topwal, C. Carbone, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Enhanced spin relaxation in a quantum metal film by the Rashba-type surface*, Phys. Rev. B, in press.

(総説)

(国内雑誌)

- [14] 武市泰男、何珂、奥田太一、平原徹、柿崎明人、松田巖：ラッシュバ分裂した表面状態との混成により誘起された金属量子井戸状態のスピン分裂, 表面科学 **31**, 493 (Sep, 2010).
- [15] 村上修一、平原徹、松田巖：トポロジカル絶縁体の物理, 日本物理学会誌 **65**, 840 (Nov, 2010).
- [16] 平原徹：トポロジカル絶縁体超薄膜の電子構造, 分子研レターズ **63**, 34 (Feb, 2011).
- (プロシーディングス)
- [17] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: *A topological metal at the surface of an ultrathin Bi_{1-x}Sb_x alloy film*, Proceedings of The Ninth Russian-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, Eds. A. A. Saranin and S. Hasegawa, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, pp. 232-236 (Jan, 2011).
- (著書)
- [18] 物理チャレンジ・オリンピック日本委員会編 (長谷川修司 分担執筆)：オリンピック問題で学ぶ世界水準の物理入門 (丸善, Apr, 2010).
- (その他)
- [19] 長谷川修司、興治文字：2010 年度公開講座「超伝導からみる科学技術の最先端」報告, 大学の物理教育 **17**(1), 40 (Mar, 2011).
- (学位論文)
- [20] 植竹智哉：温度可変型 4 探針 STM による擬 1 次元金属表面の電気伝導測定 (修士論文).
- [21] 最首祐樹：磁気光学 Kerr 効果法によるコバルト超薄膜の磁気異方性測定と STM 観察 (修士論文).
- [22] 坂本裕介：トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態および輸送特性 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [23] S. Hasegawa, T. Tono, Y. Sakamoto, and T. Hirahara: *Spin transport at surfaces with strong spin-orbit coupling*, RIEC International Symposium and The 9th Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2010 年 11 月 16 日 (宮城).
- [24] S. Hasegawa: *Nano Transport with Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, National Conference on Nano, Surface and Graphene Sciences and Technologies 2010, 2010 年 9 月 11 日 (南京大, 中国).
- [25] S. Hasegawa: *Electronic and Spin Transport at Surfaces and nanostructures*, 18th International Vacuum Congress, 2010 年 8 月 24 日 (北京, 中国).
- [26] S. Hasegawa: *Spin-Split Surface States due to Rashba Effect and Topological Insulators*, Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy 3 Conference, 2010 年 8 月 20 日 (ソウル国立大, 韓国).

- [27] S. Hasegawa: *Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators*, The Workshop 2010 on "Electronic, transport, and optical properties of low-dimensional systems" (WS10-ETOLDS), 2010年6月1日 (Valencia, Spain) .
- [28] T. Hirahara and S. Hasegawa: *Surface states of Rashba-spin-split type and topological insulators*, Korean Physical Society meeting, 2010年4月21日 (Daejeon, 韓国).
- [29] T. Hirahara: *Ultrathin films of topological insulators*, JSPS A3 Foresight Program Autumn School for Young Scientist, 2010年11月10日 (京都)
- 一般講演
- [30] T. Hirahara, Y. Sakamoto, S. Hasegawa: *Ultrathin films of topological insulators*, Symposium on Surface and Nano Science 2011 (SSNS '11), 2011年1月19日 (栗石).
- [31] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*, The 18th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2010年12月9日 (伊豆).
- [32] S. Hasegawa, T. Hirahara, Y. Sakamoto: *Topological surface states of Bi alloys on Si surfaces*, The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2010年9月29日 (Vladivostok, Russia).
- [33] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*, The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2010年9月27日 (Vladivostok, Russia).
- **International vacuum congress (IVC-18)**, 2010年7月23-27日 (北京)
- [34] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: *A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film*.
- [35] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, Y. Takeichi, T. Komorida, S. Kimura, A. Kakizaki, S. Hasegawa: *Electronic structure of a topological insulator Bi_2Se_2 ultrathin films on a Si surface*.
- [36] Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobara, S. Hasegawa : *SMOKE measurements of magnetic thin films*.
- [37] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobara , T. Hirahara , S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Transport properties of Ag quantum films formed on $Si(111)4 \times 1$ -In measured by low-temperature four-tip STM*.
- [38] T. Tono, T. Hirahara, S. Hasegawa : *In situ detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*.
- **SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures**, 2010年7月5-7日 (東京大)
- [39] T. Hirahara: *The physics of topological insulators studied using ultrathin films*.
- [40] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, Y. Takeichi, T. Komorida, S. Kimura, A. Kakizaki, S. Hasegawa: *Electronic structure of a topological insulator Bi_2Se_2 ultrathin films on a Si surface*.
- [41] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobara , T. Hirahara , S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Transport properties of Ag quantum films formed on $Si(111)4 \times 1$ -In measured by low-temperature four-tip STM*.
- [42] Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobara, S. Hasegawa : *SMOKE measurements of magnetic thin films*.
- [43] F. Nakamura, K. Kobayashi, S. Hasegawa, A. Ichimiya, and I. Matsuda: *Energy and phase-shift analyses of $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ phase of Si surface with pseudopotential approach*.
- [44] T. Tono, T. Hirahara, S. Hasegawa: *In situ detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*.
- [45] R. Hobara, N. Nagamura, T. Takeshi, U. Tomoya, U. Yoichi, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Development of Ultra-Low Temperature Four tip STM in combination with FIB*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [46] 平原徹: ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導、第30回表面科学学術講演会奨励賞受賞記念講演、2010年11月5日 (大阪大学) .
- [47] 坂本裕介、平原徹、宮崎秀俊、木村真一、長谷川修司: Bi_2Se_3 超薄膜における量子トポロジカル相転移、平成22年度表面科学会放射光表面科学部会シンポジウム、2010年12月10日 (東京工業大学) .
- 一般講演
- [48] 東野剛之、坂本裕介、平原徹、長谷川修司: Bi表面上でのスピン偏極電流の検出、平成22年度東北大学電気通信研究所プロジェクト研究会2010年11月17日 (仙台) .
- [49] 東野剛之、平原徹、長谷川修司: ビスマス超薄膜におけるスピンホール効果の測定、物性科学領域横断研究会、2010年11月13日 (東京) .
- [50] 平原徹、坂本裕介、長谷川修司: Bi_2Se_3 超薄膜における異常輸送、東京大学低温センター成果報告会、2011年3月3日 (東京大学) .
- [51] 東野剛之、平原徹、坂本裕介、長谷川修司: ビスマス表面上のスピン偏極電流の検出、平成22年度東北大学電気通信研究所プロジェクト研究会、2010年11月17日 (仙台) .
- [52] 永村直佳、保原麗、植竹智哉、平原徹、長谷川修司、松田巖、小林功佳: 低温型独立駆動4探針STMによる $Si(111)4 \times 1$ -In 上 Ag 薄膜の輸送特性研究、表

面科学学術講演会、(社)日本表面科学会、2010年11月5日(大阪大)。

- 日本物理学会 2010 秋季大会, 2010 年 9 月 23-26 日 (大阪府立大学)

- [53] 坂本裕介、平原徹、武市泰男、宮崎秀俊、松田巖、木村真一、柿崎明人、長谷川修司: シリコン表面上のトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 超薄膜のスピン分解 ARPES.
- [54] 中村史一, 小林功佳, 長谷川修司, 一宮彪彦, 松田巖: Si 表面 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相の擬ポテンシャルモデルによるエネルギーの安定性と位相シフトの考察.
- [55] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: ビスマス超薄膜におけるスピンホール効果の in situ 測定.
- [56] 並木雅俊, 有山正孝, 北原和夫, 二宮正夫, 長谷川修司, 原田勲, 大島孝吉, 味野道信: 第 41 回国際物理オリンピック日本代表訓練研修: 実験問題.
- [57] 杉山忠男, 江尻有郷, 毛塚博史, 光岡薫, 向田昌志, 長谷川修司, 興治文子, 中屋敷勉, 真梶克彦, 鈴木亨, 田中忠芳, 山田達之輔, 野添嵩, 田中良樹, 谷崎佑弥, 並木雅俊, 浅井吉蔵, 北原和夫, 原田勲: 第 41 回国際物理オリンピック・クロアチア大会報告.

(セミナー)

- [58] T. Hirahara: *Ultrathin films of topological insulators*, Materials Science Division Seminar, Argonne National Laboratory, 2010 年 10 月 11 日 (米国).
- [59] S. Hasegawa: *Investigation of Surface Conductivity of Silicon-Based Nanomaterials*, Institute of Automation and Control Processes, Russian Academy of Science, 2010 年 7 月 23 日 (Vladivostok, Russia).
- [60] 平原徹: ビスマスおよびビスマス系化合物超薄膜における電荷・スピン伝導、東京大学物性研究所放射光セミナー、2010 年 11 月 26 日 (物性研)。
- [61] 長谷川修司: 表面物理学の最前線 トポロジカル絶縁体は本当か、東京大学理学部物理学教室コロキウム、2010 年 4 月 16 日 (本郷)。

(講義等)

- [62] 長谷川修司: 表面の特性基礎, 第 49 回表面科学基礎講座, (社)日本表面科学会, 2010 年 7 月 15 日 (東京大).
- [63] 長谷川修司: 表面科学とナノサイエンス・ナノテクノロジー, 山梨大学工学部電気電子システム工学科 特別講義, 2010 年 11 月 11-12 日 (山梨大).
- [64] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2010 年 8 月 30 日-9 月 1 日 (兵庫県立大)。
- [65] 長谷川修司、平原徹、山田学 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折、2009 年度冬学期 (本郷)。
- [66] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2010 年度夏学期 (本郷)。
- [67] 長谷川修司、溝川貴: 物理実験学 (学部 2 年生講義) 2010 年度冬学期 (駒場)。

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 break down. (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 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 measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Current-induced spin polarization effect in strong spin-orbit-interaction materials. Control of surface electronic states and their conductivity of topological insulators. Anisotropic transport on a quasi-one-dimensional metallic surface.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: Order-disorder phase transition, charge-density-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface superstructures of Si. Quantum-well state in ultra-thin metal films. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states in thin films.

(3) Surface magnetism: Monolayer ferromagnetic surfaces. Diluted magnetic surface states.

(4) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM), micro-four-point probes apparatus at mK under strong magnetic field.

- [1] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobar, T. Eguchi, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *Metallic Transport in a Monatomic Layer of In on a Silicon Surface*, Physical Review Letters **106**, 116802 (Mar, 2011).
- [2] N. Miyata, R. Hobar, H. Narita, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Development of surface magneto-transport measurement with micro-four-point probe method and the measurement of Bi nanofilm on Si(111)*, Japanese Journal of Applied Physics **50**, 036602 (Mar, 2011).
- [3] I. Matsuda, K. Kubo, F. Nakamura, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, H. Narita, Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Electron compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional triangle lattice*, Physical Review B **82**, 165330 (Nov, 2010).
- [4] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Takeichi, H. Miyazaki, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakizaki, and S. Hasegawa: *Anomalous transport in an n-type topological insulator ultrathin Bi₂Se₃ film*, Physical Review B **82**, 155309 (Oct. 2010) (selected as Editors' suggestions).
- [5] H. Morikawa, K. S. Kim, Y. Kitaoka, T. Hirahara, S. Hasegawa and H. W. Yeom: *Conductance transition and interwire ordering of Pb nanowires on Si(557)*, Physical Review B **82**, 045423 (Jul, 2010).
- [6] A. Nishide, Y. Takeichi, T. Okuda, A. A. Taskin, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, A. Kakizaki, Y. Ando, and I. Matsuda: *Spin-polarized surface bands of a three-dimensional topological insulator studied by high-resolution spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy*, New Journal of Physics **12**, 065011 (Jun, 2010).
- [7] Y. Niinuma, Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobar, S. Hasegawa, H. Mizuno, and T. Nagamura: *Development of an UHV-SMOKE system using permanent magnets*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **8**, 298(Jun, 2010).
- [8] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: *Topological metal at the surface of an ultrathin Bi_{1-x}Sb_x alloy film*, Physical Review B **81**, 165422 (Apr, 2010)(selected as Editors' suggestions).
- [9] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: *Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi₂Se₃ films*, Physical Review B **81**, 165432 (Apr, 2010).
- [10] K. He, Y. Takeichi, M. Ogawa, T. Okuda, P. Moras, D. Topwal, A. Harasawa, T. Hirahara, C. Carbone, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Direct spectroscopic evidence of spin-dependent hybridization between Rashba-split surface states and quantum-well states*, Physical Review Letters **104**, 156805 (Apr, 2010).

第1章 2010年度に開講された学部講義概要

1.0.1 物理実験学：長谷川 修司・溝川 貴司

1. X線

- 1.1 X線の発見と現代物理学の誕生
- 1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則
- 1.3 Thomson散乱とCompton散乱
- 1.4 X線回折
- 1.5 X線研究の拡がり

2. 電子

- 2.1 粒子性と波動性
- 2.2 電子回折と顕微鏡
- 2.3 Aharonov-Bohm効果
- 2.4 トンネル効果とSTM

3. 実験環境

- 3.1 低温の生成と低温物理
- 3.2 真空の生成と物理学の発展

3.3 気体分子運動論

4. 単位系と基礎物理定数

- 4.1 単位系の定義
- 4.2 基礎物理定数の測定

5. 実験の基礎と各種の計測法

- 5.1 電気の測定
- 5.2 磁気の測定
- 5.3 放射線の測定
- 5.4 光の測定
- 5.5 回路・コンピューターの利用

6. 誤差論

- 6.1 誤差の分類
- 6.2 誤差伝播の法則
- 6.3 最小二乗法