

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として相谷昌紀と福居直哉が新しくメンバーに加わった。3月には、上田洋一と山田学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。最近では、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、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

モノレイヤー超伝導体

純粋な2次元系の物質は超伝導転移を起こさないというのが理論の示唆するところである。しかし、半導体基板上に形成される金属モノレイヤーにおいては、金属と基板との相互作用により超伝導状態が実現される可能性は十分にあり、実際にSi(111)上の単原子層PbおよびIn($\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Pbやstriped incommensurate(SIC)-Pb, $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面超構造)の走査トンネル分光法観察で超伝導転移を示唆するエネルギーギャップが低温で開くことが報告されていた。また $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Inにおいては、マクロな電極法により電気抵抗ゼロの報告が昨年あった。

そこで本研究では、今年度までに新しく開発した「超高真空高磁場下サブケルビン・マイクロ4端子プローブ装置」を用いて、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Inだけでなく、より T_c の低いと思われるSIC-Pbの超伝導転移や、それらの臨界磁場を含めたより包括的な研究を行った。その結果、図1.1.1に示すように超伝導転移を観測でき、また、サンプルの作成方法によって T_c や臨界磁場が変動すること、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -InとSIC-Pbで絶対零度でのコヒーレンス長は同オーダーであること、また、両者でピン止め力が大きく異なることという結果を得た。今後は、表面原子ステップの影響や、さらに T_c の低い $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Pbの研究、磁性不純物を吸着させたときの超伝導・近藤効果の競合の研究などの余地が残されている。

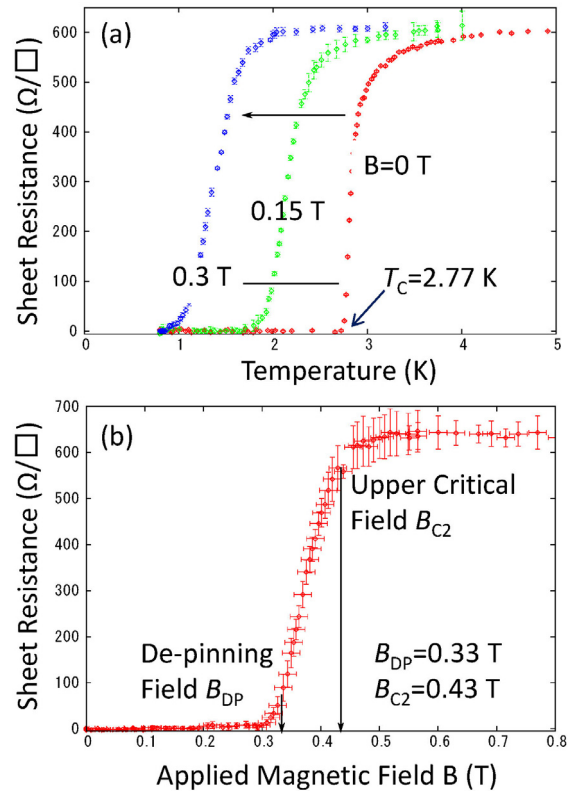


図 1.1.1: インジウム・モノレイヤー超伝導 (Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面構造) (a) 面抵抗の温度依存性と (b) 印加磁場依存性。

Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の検出

Bi(111) 結晶表面ではラシュバ効果によってスピン分裂した表面状態を持つことがスピン分解光電子分光などから報告されている。このような系に電流を流すと電流と表面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、表面系においてこの現象を検出した例はまだない。磁性体を電気伝導測定のプロブとして用いると、プロブの磁化と電流のスピンの向きに依存して電圧の測定値が変化し、4端子法において成り立つ相反定理が破れると考えられる。本研究では、シリコン基板上の成長させた Bi 超薄膜において電気伝導測定を行い、磁性体プロブを用いた時のみに相反定理が実際に破れることを確かめ、電流誘起スピン偏極現象を実験的に検出することに成功した。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。

Bi 超薄膜の微細加工による 1 次元伝導

メゾスコピック物理の分野ではしばしば試料の加工やエッチングを *ex situ* で施される場合が多いが、

表面物理学では表面構造の保護するために大気中での加工が行えないので、微細加工した表面の物性研究は少ない。我々は、一昨年立ち上げた超高真空対応集束イオンビーム (FIB) 装置と 4 探針 STM 複合装置を用いて、厚さ数十原子層の Bi(111) 超薄膜を Si 基板上にエピタキシャル成長した後、in situ で細線状に加工し、その電気伝導度測定を行った。図 1.1.2 には、Bi 細線の電気抵抗の距離依存性の測定結果を示す。抵抗は電圧パッドの間隔に対して線形に増大し、明確な 1 次元性を示している。細線状に加工していない「ベタ膜」の電気抵抗は、探針間隔に依存せず一定値であり、2 次元性を示した。これらの結果により、FIB の照射により Bi が除去された「溝」が電流の漏れを防ぐ障壁となれることを示し、任意の形状をした領域の表面電気伝導の測定が可能であることを意味している。ただし、FIB による表面損傷や加工深さと電気特性との関係はさらに定量的に調べる必要がある。

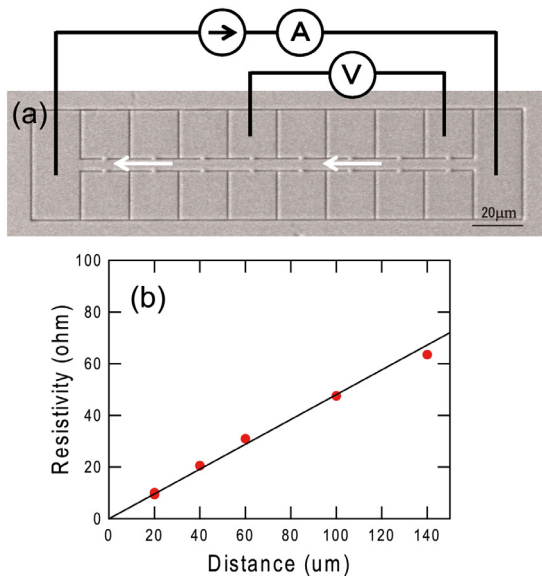


図 1.1.2: (a) FIB によって厚さ数十原子層の Bi(111) エピタキシャル超薄膜上に作成したパターンの SEM 像。黒い線状の部分が FIB 照射で掘った絶縁性の溝。中央に 5 μm 幅の細線が横たわり、複数のパッドが接続されている。(b) 細線の抵抗の長さ依存性。

Si(110)2 \times 5-Au 表面の 1 次元伝導

Si(110)2 \times 5-Au は理想的な擬 1 次元金属的な電子状態をもつことが角度分解光電子分光の測定から知られていた。Si(111)4 \times 1-In、Si(553)-Au、Si(557)-Au など、過去に研究がなされてきた他の擬 1 次元金属系とは異なり、Si(110)2 \times 5-Au は原子鎖間の相関がきわめて弱く、しかも低温においてもパイル

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ことが期待できる。そこで本研究では、4 探針 STM 装置による正方 4 探針法を用いて、金属原子に平行方向と直角報告の伝導度を独立に測定した。石坂-白木法による Si 基板表面の清浄化を行って下地基板の表面空間電荷層の影響を低減させた場合、探針間隔が数十 μm 以上では異方的な 2 次元伝導であるが、それ以下の探針間隔では、金属鎖に平行方向の伝導が 1 次元的になることがわかった。伝導次元の詳細な解析によりフラクタル次元が実現していることがわかった。今後伝導度の温度依存性を測定して伝導のメカニズムを明らかにする予定である。

1.1.2 表面ナノ構造

トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ の超薄膜成長制御と Pb ドープによる電子状態の変化

トポロジカル絶縁体は、絶縁性のバルク結晶の表面上にスピン偏極した金属的な表面電子状態をもつ物質であり、近年大いに注目されている。とくに、その (スピン偏極した) 表面電気伝導を測定することは、スピントロニクス応用としても興味深いテーマとなっている。ところが実際の結晶では欠陥によってバルクが絶縁体ではないため、表面のみの伝導測定のためには、フェルミ準位を制御してバルク内部を絶縁体化する必要がある。本研究では、Pb ドープ、および超薄膜成長時の基板温度制御によるフェルミ準位の制御を試み、角度分解光電子分光法により電子状態の in situ 測定を行った。基板温度が高い場合、Te のサイトが Bi で置換される欠損が増え、フェルミ準位が下がる傾向が見られた。高い基板温度で Pb をドープするとフェルミ準位はわずかに下がったあとに増加する傾向が見られ、電子状態も変化していることがわかった。この変化は Pb, Bi, Te の三元化合物結晶が成長しているためと思われる。低温で Pb をドープするとフェルミ準位が大きく下がり、Bi に対して 14% 以上加えるとフェルミ準位をバルクバンドギャップ内に移動して絶縁体化することがわかった。この場合も電子状態が少し変化しており、三元化合物結晶に構造変化していると思われる。また、in-situ 伝導度測定も行い、フェルミ準位の位置の変化に対応する増減が見られた。(分子研との共同研究)

単一バイレイヤー Bi 超薄膜の作成とその電子状態

単一バイレイヤー Bi は 2 次元トポロジカル絶縁体であると理論的に示されていた。しかしこれは単一の炭素の層であるグラフェンと同じで結晶がとり得る最小の薄さであり、これまでのところ実験的に作製された例はなかった。本研究では 3 次元トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 結晶と Bi が同じ結晶構造でさらに格子定数が 3% しか変わらないことに着目し、Bi₂Te₃(111) 表面上に Bi を成長させた。その結果、確かに Bi が単一バイレイヤーから成長していることが明らかに

なった。その電子状態を角度分解光電子分光で測定したところ、この Bi/ Bi₂Te₃ の系では、Bi₂Te₃(111) 面の電子状態が保たれており、それと Bi 単一バイレイヤーのバンド構造が重なり合っていることが明らかになった。また第一原理計算でもその分散はよく再現された。今後は現在製作中の超高真空低温強磁場型走査トンネル顕微鏡を用いて、この Bi 膜のアイランドの端の状態密度を測定し、エッジ状態の有無を調べる予定である。(ドイツユーリッヒ研、分子研との共同研究)

Bi₂Te₃(111) 結晶表面および、その上に成長させた単一バイレイヤー Bi の原子配列の決定

トポロジカル絶縁体の表面電子状態は光電子分光等で詳細に研究されてきたが、表面の原子配列は調べられていなかった。当研究室では物性研究所高橋研究室と共同で LEED-IV 解析によって、これらトポロジカル絶縁体結晶の表面原子配列を決定した。その結果、Bi₂Te₃(111) 結晶表面には特筆すべき緩和はなかったが、その上に成長させた単一バイレイヤー Bi は、バルク Bi 結晶に比べて表面平行方向に 3.5% 収縮し、垂直方向に 7% 伸展しており、強いひずみが生じていることが分かった。お茶の水女子大小林研究室の第一原理計算により、ひずみの無い単一バイレイヤー Bi のバンドギャップが約 0.1eV であるのに対して、ひずみの生じた単一バイレイヤー Bi では約 0.4eV に広がることも分かり、表面緩和とトポロジカル表面状態とが密接に関連していることを明らかにした。(東大物性研およびお茶ノ水女子大との共同研究)

ひずみによる Bi 超薄膜のトポロジカル相転移

上述のように Bi₂Te₃ 基板上に Bi を単一バイレイヤー (BL) から成長可能であることが分かった。その厚さ 7BL の超薄膜の電子状態を、これまで知られていたバルクの格子定数を持つ Si(111)-7 × 7 表面上の Bi 薄膜と比較したところ、同じ膜厚にも関わらずバンド構造が異なっていることが分かった。この起源を明らかにするために Bi₂Te₃(111) 表面上に成長させた Bi 膜の LEED-IV 構造解析を行ったところ、この薄膜はバルクに比べて面内格子定数が 3% 縮み、面直格子定数が 3% 伸びていることが明らかになった。第一原理計算でも面内格子定数を縮めて Bi スラブのエネルギー最適化を行った結果、面直方向に伸びた構造がエネルギー的に最も安定であることが分かり、計算されたバンド分散は実験結果をよく再現した。さらにこの決定された格子定数を用いて Bi の Z2 トポロジカル数を計算したところ、歪みによって電子状態が変わったことで、本来 trivial なものが topological に相転移することが分かった。そしてその転移による表面状態の分散の変化は実験で測定されたものと一致していた。これまで、trivial な物質にひずみを導入することによってトポロジカル相転移を起こすことができると理論的には示されていた

が、実際に実験的に明らかにしたのは初めてのことである。(東大物性研、お茶の水大学、分子研との共同研究)

1.1.3 新しい装置・手法の開発

超高真空強磁場下サブケルビン・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ったが、最低到達温度は 10K 程度が限界であった。また、最低到達温度 1.8K 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「高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置」の開発を昨年度から進めて来た。本年度はプローブのサンプルへの自動アプローチ機構を実装し、また電流プローブと電圧プローブの組み合わせを変える dual configuration 法を採用し、プローブの破壊や測定値のばらつきをさらに軽減させた。その結果、図 1.1.1 に示すようにモノレイヤー超伝導の電気伝導や臨界磁場を測定することができた。

超高真空低温強磁場下における走査トンネル顕微鏡の開発

表面 Rashba 系のスピン依存伝導現象を観察するためにはナノスケール領域でのスピン依存伝導現象を高精度で測定することが必要になる。そこで新たにスピン依存の電位分布を原子スケールで測定する走査トンネルポテンシオメトリ測定が可能な装置を開発した。この装置は通常の走査トンネル顕微鏡の探針に加えて試料に電流を流すことが可能な二つのプローブを実装している。本年度は装置の設計と建設を行い、超高真空 (10⁻¹¹ Torr) ・極低温 (~ 2.5 K) の極限環境を実現し、グラファイトやシリコンの清浄表面の原子分解能像を得ることに成功した。今後、試料面直に 8T の磁場が印加可能な超伝導磁石を導入し、ポテンシオメトリ測定用回路の作成、スピン偏極探針の開発と合わせて研究を進めていく。

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 「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) 「ピン偏極

走査ポテンショ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)

<受賞等>

- [1] 相谷昌紀、福居直哉 :: 表面科学技術者資格認定 (公益社団法人日本表面科学会、2011年8月)

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluege, and S. Hasegawa: *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*, Phys. Rev. Lett. **107**, 166801 (Oct, 2011).
- [3] M. D 'Angelo, R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, M.G. Silly, F. Sirotti, and I. Matsuda: *Hydrogen-induced surface metallization of SrTiO₃(001)*, Phys. Rev. Lett. **108**, 116802 (Mar, 2012).
- [4] N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobara, 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 **83**, 195305 (May, 2011).
- [5] N. Fukui, T. Hirahara, T. Shirasawa, T. Takahashi, K. Kobayashi, and S. Hasegawa: *Surface Relaxation of Topological Insulators: Influence on the Electronic Structure*, Phys. Rev. B **85**, 115426 (Mar, 2012).
- [6] Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Magnetic anisotropy of Co ultrathin films*, Journal of Applied Physics **110**, 053902 (Sep, 2011).
- [7] Y. Fukaya, I. Matsuda, M. Hashimoto, K. Kubo, T. Hirahara, W. H. Choi, H. W. Yeom, S. Hasegawa, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Atomic structure of two-dimensional binary surface alloy: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructure*, Surface Science **606**, 919 (Feb, 2012).

(総説)

(国内雑誌)

- [8] 長谷川修司、平原徹 : トポロジカル絶縁体は本当か実験から見て , 表面科学 **32**, 216 (Apr, 2011).
- [9] 長谷川修司 : 波と量子, 数理科学 No. 576, pp. 34-40 (Jun, 2011).
- [10] 長谷川修司 : Au 吸着 Si 表面から何を学んだか, 表面科学 **33**, 118 (Mar, 2012).

(著書)

- [11] S. Hasegawa (分担執筆) : *Reflection High-Energy Electron Diffraction in Characterization of Materials*, ed. Elton N. Kaufmann (Wiley 2012), 印刷中.

- [12] 長谷川修司 (分担執筆) : 電子的・電気的特性 (第3章) in 表面物性の基礎 (現代表面科学シリーズ) 日本表面科学会編集 (共立 2012), 印刷中.

(学位論文)

- [13] 上田洋一 : 金原子吸着誘起擬 1 次元金属表面における電子輸送の研究 (修士論文).
- [14] 山田学 : 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発とそれによるモノレイヤー超伝導体の研究 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [15] S. Hasegawa: *Charge/spin injection and penetration into surfaces*, The 29th Barnd Ritchie Workshop, 2011年5月14日 (くにびきメッセ, 松江).
- [16] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures measured by four-tip STM*, International Workshop on Atomic Scale Interconnection Machines, 2011年6月28日 (IMRE, Singapore).
- [17] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures*, 2011 International Workshop on Nanomaterials & Nanodevices, 2011年7月3日、Institute of Physics (CAS, 北京, 中国).
- [18] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures measured by four-tip STM*. 2011 International Workshop on Nanomaterials & Nanodevices, 2011年7月4日 (Xiangtan University, 湖南省, 中国).
- [19] S. Hasegawa: *Surface nanomaterials -Structures and properties-*, Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, 2011年8月22日 (Vladivostok, Russia).
- [20] S. Hasegawa: *Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials*, The 11th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-11), 2011年10月4日 (St. Petersburg, Russia).
- [21] T. Hirahara : *Ultrathin films of topological insulators*, The 15th International Conference on Thin Films, 2011年10月8日 (Kyoto, Japan).
- [22] S. Hasegawa: *Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials*, AVS 58th International Symposium & Exhibition, 2011年10月31日 (Nashville, USA).
- [23] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials*, The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011年12月14日 (船堀, 東京).

- [24] T. Hirahara : *Ultrathin films of topological insulators*, The first SRC Winter Workshop on Topological Matter, 2012 年 1 月 30 日 (Phoenix Park, Korea).

一般講演

- [25] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In situ measurements of current induced spin polarization in ultrathin bismuth films, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13), 2011 年 7 月 4 日 (Prague, Czech Republic).
- [26] T. Hirahara, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, Y. Takeichi, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakaizaki, S. Hasegawa: *Ultrathin Films of Topological Insulators*, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI13), 2011 年 7 月 4 日 (Prague, Czech Republic).
- [27] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa: *Monolayer superconductivity measured by a UHV sub-Kelvin micro-four-point-probe system under high magnetic field*, Symposium on Surface and Nano Science (SSNS) 2012, 2012 年 1 月 10 日 (雫石, Japan).
- [28] T. Hirahara : *Ultrathin films of topological insulators*, Symposium on Surface and Nano Science (SSNS) 2012, 2012 年 1 月 11 日 (雫石, Japan).
- [29] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluegel, and S. Hasegawa : *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*, APS March meeting, 2012 年 2 月 (Boston, USA).

• The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011 年 12 月 11-15 日 (船堀, 東京)

- [30] S. Hasegawa : *Introductory Talk at Topical Session " Spins at Surfaces "*.
- [31] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluegel, and S. Hasegawa : *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*.
- [32] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In situ measurements of current induced spin polarization in ultrathin bismuth films.
- [33] N. Fukui, R. Hobara, T. Tono, T. Uetake, Y. Ueda, N. Nagamura, T. Hirahara, T. Nagamura, S. Hasegawa : *Development of the low-temperature independently-driven four-tip STM with Focused Ion Beam for in-situ microfabrication on surfaces*.
- [34] M. Aitani, T. Hirahara, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa : Fermi level control and conductivity measurements of Pb-doped topological insulator Bi₂Te₃ ultrathin films.

- [35] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Development of a micro-four-point-probe conductivity measurement system at sub-kelvin under high magnetic field*.

(国内会議)

招待講演

- [36] 長谷川修司: ナノワールドのイメージング, 日本物理学会平成 23 年度科学セミナー「イメージングの科学」, 2011 年 7 月 26 日 (東京大学).
- [37] 長谷川修司: 地震波から電子波まで 波の基本と最先端科学, (社)日本表面科学会中部支部主催 / (社)応用物理学会東海支部 市民講座「やさしい表面科学」波・振動と表面科学 - ミクロな電子波からマクロな地震波まで -, 2011 年 7 月 30 日 (名古屋工業大学).
- [38] 平原徹: 非磁性体表面の磁性現象, 物性若手夏の学校分科会 2011 年 8 月 3 日 (ホテルエパー富士).
- [39] 平原徹: ラッシュバ・トポロジカル表面系の輸送特性, 日本物理学会 2011 年秋季大会シンポジウム「多彩な表面系における電子輸送現象」, 2011 年 9 月 24 日 (富山大学).
- [40] 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, UVSOR ユーザーミーティング, 2011 年 11 月 18 日 (岡崎コンファレンスセンター).
- [41] 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, 第 31 回表面科学学術講演会, 2011 年 12 月 16 日 (船堀, 東京).
- [42] 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, 東京大学物性研究所短期研究会「トポロジカル絶縁体の表面電子状態」, 2012 年 2 月 24 日 (東大物性研).

一般講演

- [43] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川 修司: モノレイヤー超伝導の検出 In/Si(111), 平成 23 年度通研共同プロジェクト研究「ナノスケールのゆらぎ・電子相関制御に基づく新規ナノデバイス」, 2011 年 10 月 21 日 (秋保, 仙台).
- [44] 福居直哉, 保原麗, 東野剛之, 植竹智哉, 上田洋一, 永村直佳, 平原徹, 長村俊彦, 長谷川修司: *FIB* 複合型低温独立駆動 4 探針 *STM* の開発, 第 31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 14 日 (船堀, 東京).
- [45] 相谷昌紀, 平原徹, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 木村真一, 長谷川修司: トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 超薄膜への Pb ドープによるフェルミ準位制御と電気伝導度測定, 第 31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 15 日 (船堀, 東京).
- [46] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: ビスマス超薄膜の表面状態における電流誘起スピン偏極の測定, 表面科学学術講演会, 2010 年 12 月 16 日 (船堀, 東京).
- [47] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発, 第

- 31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 16 日 (船堀, 東京).
- 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 23-26 日 (富山大学)
 - [48] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: ビスマス超薄膜の表面状態における電流誘起スピン偏極の測定.
 - [49] 平原徹, G. Bihlamayer, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 木村真一, S. Bluegel, 長谷川修司: 三次元トポロジカル絶縁体上への二次元量子スピンホール相単一 Bi バレイヤーの成長.
 - [50] 福居直哉, 保原麗, 東野剛之, 植竹智哉, 上田洋一, 永村直佳, 平原徹, 長村俊彦, 長谷川修司: FIB 複合型低温独立駆動 4 探針 STM の開発.
 - [51] 植竹智哉, 平原徹, 永村直佳, 上田洋一, 保原麗, 長谷川修司: Si(111)-4 × 1-In 表面の異方的表面電気伝導度の温度依存性.
 - [52] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発.
 - [53] 上田洋一, 平原徹, 植竹智哉, 最首祐樹, 長谷川修司: 擬 1 次元金属表面 Si(110)-2 × 5-Au 表面の STM 観察及び電気伝導測定
 - [54] 並木雅俊, 有山正孝, 北原和夫, 二宮正夫, 原田勲, 長谷川修司: 第 7 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2011 全体報告
 - 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日 (関西学院大学).
 - [55] 平原徹, 福居直哉, 白澤徹郎, 山田学, 相谷昌紀, 宮崎秀俊, 松波雅治, 木村真一, 高橋敏男, 小林功佳, 長谷川修司: Bi₂Te₃ 上の Bi 超薄膜の電子状態と表面構造解析.
 - [56] 福居直哉, 平原徹, 白澤徹郎, 高橋敏男, 小林功佳, 長谷川修司: Bi₂Te₃ 超薄膜および 1 BL Bi の LEED-IV 構造解析.
 - [57] 相谷昌紀, 平原徹, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 松波雅治, 木村真一, 長谷川修司: Pb ドープによるトポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 超薄膜の電子状態制御と電気伝導度.
 - [58] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: In, Pb モノレイヤー超伝導体の超伝導転移および臨界磁場測定. (セミナー)
 - [59] 平原徹: *Spin-orbit coupling effects at surfaces*, 名古屋大学工学研究科物性基礎工学研究グループセミナー, 2011 年 6 月 6 日 (名古屋大学).
 - [60] S. Hasegawa: *Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials*, CNMS DISCOVERY Seminar Series, 2011 年 10 月 28 日 (Oak Ridge National Laboratory, TN, USA).
 - [61] S. Hasegawa: *Charge and Spin Transports at Surfaces of Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials*, Physics Colloquium at Department of Physics, 2011 年 11 月 22 日 (復旦大学, 上海, 中国).
 - [62] S. Hasegawa: *Charge and Spin Transports at Surfaces of Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials*, Physics Colloquium at Department of Physics, 2011 年 11 月 23 日 (上海交通大学, 上海, 中国).
 - [63] 長谷川修司: 表面物理の最近の進展 ナノサイエンス・スピントロニクスへ, 日立基礎研究所セミナー, 2011 年 12 月 5 日 (鳩山, 埼玉).
 - [64] 長谷川修司: 見えないものを見る ナノワールドを観る, 平成 23 年度理学部名誉教授の会, 2011 年 12 月 9 日 (小柴ホール). (講義等)
 - [65] 平原徹: 非磁性体表面の磁性現象, 東京工業大学総合理工学研究科材料物理学専攻材料物理学特別講義第四, 2011 年 6 月 1 日 (東京工業大学).
 - [66] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2011 年 8 月 29 日-31 日 (兵庫県立大学).
 - [67] 長谷川修司, 平原徹, 相谷昌紀 (TA), 福居直哉 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2011 年度冬学期 (本郷).
 - [68] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2011 年度夏学期 (本郷).
 - [69] 長谷川修司, 小森文夫: 物性物理学特論 (学部 4 年生講義)・表面物理学 (大学院共通講義) 2011 年度冬学期 (本郷).

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: Monolayer superconductivity. 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: 2D topological materials. Doping into topological insulators. Topological phase transition. 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. Kondo effect and RKKY interaction in surface states.

(4) Construction of new apparatuses: Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling microscope. Micro-four-point probes apparatus at mK under strong magnetic field.

- [1] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluege, and S. Hasegawa: *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*, Phys. Rev. Lett. **107**, 166801 (Oct, 2011).
- [2] M. D 'Angelo, R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, M.G. Silly, F. Sirotti, and I. Matsuda: *Hydrogen-induced surface metallization of SrTiO₃(001)*, Phys. Rev. Lett. **108**, 116802 (Mar, 2012).
- [3] N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobara, 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 **83**, 195305 (May, 2011).
- [4] N. Fukui, T. Hirahara, T. Shirasawa, T. Takahashi, K. Kobayashi, and S. Hasegawa: *Surface Relaxation of Topological Insulators: Influence on the Electronic Structure*, Phys. Rev. B **85**, 115426 (Mar, 2012).
- [5] Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Magnetic anisotropy of Co ultrathin films*, Journal of Applied Physics **110**, 053902 (Sep, 2011).
- [6] Y. Fukaya, I. Matsuda, M. Hashimoto, K. Kubo, T. Hirahara, W. H. Choi, H. W. Yeom, S. Hasegawa, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Atomic structure of two-dimensional binary surface alloy: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructure*, Surface Science **606**, 919 (Feb, 2012).

第I部

2011年度 物理学教室全般に関する報告

第1章 2011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、

1. 概論 ナノサイエンス・ナノテクと表面
2. 表面構造
 - 2.1 表面超構造と相転移
 - 2.2 回折法
 - 2.3 顕微鏡法
 - 2.4 動的過程
3. 表面電子状態
 - 3.1 表面電子状態・トポロジカル表面状態
 - 3.2 (逆)光電子分光法
 - 3.3 トンネル分光法
 - 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定
 - 3.5 時間分解測定
4. 走査トンネル顕微鏡
 - 4.1 走査トンネル顕微鏡の原理
 - 4.2 表面原子構造観察
 - 4.3 局所電子状態測定
 - 4.4 表面バンドの観測
 - 4.5 表面電子定在波
 - 4.6 原子マニピュレーション
5. 表面電子輸送
 - 5.1 表面空間電荷層の2次元電子系
 - 5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系
 - 5.3 表面スピン輸送
6. 表面超薄膜磁性
 - 6.1 磁気モーメントと相転移
 - 6.2 強磁性超薄膜
 - 6.3 表面ナノ強磁性体
 - 6.4 スピンダイナミクス