

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25246025

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Studies on Electronic and Spin Transport at Topological Surfaces and Edge States

研究代表者

長谷川 修司 (Hasegawa, Shuji)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00228446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用の強い物質表面での輸送現象に関する本研究によって下記の成果をあげることができた。(1)トポロジカル絶縁体の表面状態での後方散乱の抑制効果の直接検出。(2)ラシュバ型スピン分裂した表面電子状態でのフォトガルバニック効果(円偏光照射によるスピン偏極電流の誘起)の検出。(3)近接磁場によるトポロジカル表面状態でのエネルギーギャップ形成の実証。(4)トポロジカル絶縁体超薄膜でのスピホール効果の検出。(5)ラシュバ型スピン分裂した表面電子状態での超伝導の発見。(6)Caをインターカレートした2層グラフェンでの超伝導の発見。

研究成果の概要(英文)：The present research on transport phenomena at surfaces of strong spin-orbit coupling materials has provided the following results. (1) Direct detection of suppression of back scattering of surface-state carriers on topological insulators. (2) Detection of photogalvanic effect (spin-polarized current induced by irradiation of circularly polarized light) at Rashba-type spin-split surface states. (3) Detection of energy-gap opening in a topological Dirac-cone type state by proximity effect of magnetic material. (4) Detection of spin Hall effect at ultrathin films of topological insulators. (5) Discovery of superconductivity at Rashba-type spin-split surface states. (6) Discovery of superconductivity at Ca-intercalated double-layer graphene.

研究分野：表面物理学

キーワード：トポロジカル絶縁体 ラシュバ効果 スピン偏極電流 スピン流 ラシュバ超伝導 フォトガルバニック効果 スピホール効果 スピン軌道相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質群が最近盛んに研究されている。それは、物質内部では強いスピン軌道相互作用による有効磁場によって電子が局在化して絶縁体状態になっているが、その端(エッジ)では金属的チャンネルができています。この概念を3次元物質に拡張したものが3次元トポロジカル絶縁体であり、その表面には非磁性物質であるにもかかわらずスピン分裂した金属的な表面電子状態が存在する。それは、1930年代から知られている従来のショックレー型表面状態・タム型表面状態とは全く異なる新概念なので、表面物理のみならず物性物理学の新しいテーマとして盛んに研究されている。特に、スピン向きと運動量の向きが一定の関係にあるので、後方散乱が抑制されたり、電流がスピン偏極するなど、特異な伝導特性を示すことが理論的に予想されている。

## 2. 研究の目的

今まで研究代表者らが15年以上にわたって研究してきた「表面状態伝導」の研究をトポロジカル絶縁体物質に適用し、理論的に予想されている特異な電子輸送およびスピン伝導現象を直接検出することである。具体的には、後方散乱の抑制およびスピンホール効果による純スピン流、あるいはスピン偏極電流が表面状態を流れていることを直接的に検出する。

## 3. 研究の方法

4探針走査トンネル顕微鏡(STM)を用い、トポロジカル物質およびそれに密接に関連するラシュバ分裂方表面状態の電気伝導を感度良く測定する。4本の探針のうち1本を磁性探針にして、スピン偏極電流の注入およびスピン圧の検出を行い、スピン偏極表面電流の検出を行う。また、超高真空中で試料を「その場」微細加工して4探針STM計測することによって、スピン流の検出実験も行う。

## 4. 研究成果

(1) トポロジカル絶縁体表面における原子ステップでの表面キャリアの後方散乱の抑制の実証：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)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。その効果を表面状態電気伝導の測定によって、直接的に示した。微傾斜基板上に成長させた $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ や $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 薄膜を用い、原子ステップを横切るときの電気抵抗を測定し、ステップでの電子波動関数の透過率が、非トポロジカル物質に比べて高いことがわかった。しかし、フェルミ面にワーピング現象がある物質では透過率が減少することも見出した。

(2) スピン分裂表面状態での Photogalvanic 効果の発見：ラシュバ型表面をもつ物質やト

ポロジカル絶縁体などのスピン分裂した表面状態での「スピン・運動量ロッキング」効果を利用して、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に成功した。試料として $\text{Bi}(111)$ 超薄膜および $1/3$ 原子層の $\text{Bi}$ が吸着した $\text{Ag}$ 超薄膜 $\text{Ag}(111)$ を用いた。右向き円偏光と左向き円偏光で、試料両端に生じる光起電力の大きさが異なることから上述の発見を結論した。

(3) トポロジカル絶縁体への近接磁場効果の解明：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研究した。反強磁性絶縁体 $\text{MnSe}$ をトポロジカル絶縁体である $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ や $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 上に成長させると、ディラックコーン状のトポロジカル表面状態のディラック点にエネルギーギャップが開くことを光電子分光法によって発見した。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。これは、ヘテロ接合界面では $\text{Mn}$ と $\text{Bi}$ が結合して新たな磁性合金相構造が形成されているためと解釈でき、実際、電子回折によって、その原子積層構造を明らかにした。

(4) トポロジカル絶縁体超薄膜でのスピンホール効果の検出：、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 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バーシステムで行われた。H型構造は、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。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は架橋部の幅と長さに依存する。実測値はスピンホール効果を考慮するとよく再現されることがわかった。このデータ解析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) $=0.032$ とスピン拡散長 $=230\text{ nm}$ が得られた。この値は白金などと同程度に大きい。またスピン拡散長は先行研究と矛盾しない値になっている。

(5) シリコン基板上でのタリウム・鉛原子層表面超構造 $\text{Si}(111)-3\times 3-(\text{Tl}+\text{Pb})$ での超伝導の発見：この表面超構造は $\text{Tl}$ が1原子層、 $\text{Pb}$ が $1/3$ 原子層から構成されるが、これを超高真空中で作成して極低温で電気抵抗を測定したところ、 $2.25\text{ K}$ で超伝導に転移することを発見した。その温度対抵抗曲線は2次元の熱ゆらぎ理論による計算値とよく一致した。また電流電圧特性曲線の非線形性から2次元系超伝導が示すBKT転移が起こっていることが示された。この表面の光電子分光の先行研究から、この表面状態はラシュバ分裂していることがわかっているため、対称性の破れた超伝導系である可能性が高い。

(6)  $\text{Ca}$ をインターカレートした2層グラフェンでの超伝導の発見：東北大学から試料提供

を受けた2層グラフェンに、超高真空中でCaをインターカレートし、その場で極低温で電気抵抗を測定したところ、2 Kで超伝導に転移することを発見した。不均一系のように、転移がやや緩慢であるが、ゼロ抵抗を示した。この系の光電子分光法の先行研究から、層間状態が超伝導転移しているといえる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計17件)

- (1) S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa; Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene, ACS Nano **10**, 2761-2765 (2016) 査読有 DOI: 10.1021/acsnano.5b07848.
- (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, Physical Review Letters **115**, 106803-1 ~ 5 (2015) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.106803.
- (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), Physical Review Letters **115**, 147003-1 ~ 5 (2015) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.147003.
- (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/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> heterostructure, Applied Physics Letters **107**, 091604-1 ~ 4 (2015) 査読有 DOI: 10.1063/1.4930151
- (5) 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**, 408-411 (2015) 査読有 DOI: 10.1380/jsssj.36.408.
- (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, Physical Review Letters **113**, 206802-1 ~ 5 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.206802.
- (7) T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa, and T. Takahashi; Structure and transport properties of Ca-doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> films, Physical Review B **89**, 195311-1 ~ 6 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.89.195311
- (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, Physical Review B **89**, 241403(R) (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.89.241403.
- (9) N. Fukui, R. Hobar, T. Hirahara, Y. Miyatake, H. Mizuno, T. Sasaki, T. Nagamura, and S. Hasegawa; e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **12**, 423 ~ 430 (2014) 査読有 DOI: 10.1380/ejssnt.2014.423.
- (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, Journal of The American Chemical Society **136**, 14357 ~ 14360 (2014). 査読有 DOI: dx.doi.org/10.1021/ja507619d.
- (11) 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**, 1003 ~ 1009 (2014) 査読有 DOI: 10.1080/10420150.2014.977284.
- (12) 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**, 104 ~ 111 (2014) 査読有 DOI: 10.1380/jsssj.36.104.
- (13) N. Nagamura, R. Hobar, T. Uetake, T. Hirahara, M. Ogawa, T. Okuda, K. He, P. Moras, P. M. Sheverdyaeva, C. Carbone, K. Kobayashi, I. Matsuda, and S. Hasegawa; Physical Review B **89**, 125415-1 ~ 5 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.89.125415.
- (14) M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa; Magnetotransport measurements of a superconducting surface state of In- and Pb-induced structures on Si(111), Physical Review Letters **110**, 237001-1 ~ 5 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.237001.
- (15) 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 Journal of Physics **15**, 105018-1 ~ 14 (2013) 査読有 DOI: 10.1088/1367-2630/15/10/105018.
- (16) 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, Japanese Journal of Applied Physics **52**, 110112-1 ~ 8 (2013) 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.52.110112.
- (17) P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Rizado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasegawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay; Applied Physics Letters **102**, 163106-1 ~ 3 (2013) 査読有 DOI: 10.1063/1.4802782.

〔学会発表〕(計 36 件)

- (1) S. Hasegawa; Atomic-Layer Superconductors, International Symposium on Two-Dimensional Layered Materials and Art, 2016 年 03 月 24 日, Marseille (France).
- (2) 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, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 03 月 22 日, 東北学院大学(宮城県・仙台市).
- (3) 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;  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  における量子振動および量子コヒーレント輸送の観測, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 03 月 22 日, 東北学院大学(宮城県・仙台市).
- (4) 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, ヒルトンニセコビレッジホテル(北海道・ニセコ町).
- (5) 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ョ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 1 日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市).
- (6) 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 25 日, くにびきメッセ(島根県・松江市).
- (7) 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  $\text{MnX}/\text{Bi}_2\text{X}_3$  ( $\text{X}=\text{Se}, \text{Te}$ ) 薄膜の輸送特性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 09 月 17 日, 関西大学(大阪府・吹田市).
- (8) 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, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 09 月 16 日, 関西大学(大阪府・吹田市).
- (9) S. Hasegawa; Charge/Spin Transport at Surfaces, The 7th International Conference on Scanning Probe Spectroscopy and Related Methods, 2015 年 06 月 23 日, Poznan (Poland).
- (10) S. Hasegawa; Surface transport below 1 K, International Workshop on LEED and Related Techniques, 2015 年 05 月 28 日, Hannover (Germany).
- (11) 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 04 月 25 日, 名古屋工業大学(愛知県・名古屋市).
- (12) 高山あかり; 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シュバ効果の研究, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学(東京都・新宿区).
- (13) S. Hasegawa; Spin-split surface states and electronic/spin transport therein, The 11th Surface Nanoscience Workshop, 2015 年 02 月 14 日, Pyeong Chang, Korea.
- (14) S. Hasegawa, Takeshi Tono, Naoya Fukui, Toru Hirahara, Rei Hobara, Akari Takayama; Spin Current at Surfaces of Strong Spin-Orbit Coupling Materials, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces, 2014 年 12 月 08 日, Hawaii (USA).
- (15) S. Hasegawa; Spins Transport at Crystal Surfaces, The 2nd International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures, 2014 年 11 月 28 日, 日本科学未来館(東京都・江東区).
- (16) N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa; The electric conduction anisotropy of topological insulator thin films,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  grown on a vicinal substrate, The 7th International Symposium on Surface Science, 2014 年 11 月 05 日, くにびきメッセ(島根県・松江市).
- (17) Takeshi Tono, Naoya Fukui, Toru Hirahara, Rei Hobara, S. Hasegawa; Spin Current at Surfaces, Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, 2014 年 9 月 30 日, Vladivostok (Russia).
- (18) 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, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 09 月 08 日, 中部大学(愛知県・春日井市).
- (19) 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司; 微斜面  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の異方的電気伝導, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 09 月 08 日, 中部大学(愛知県・春日井市).
- (20) 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 03 月 27 日, 東海大学(神奈川県・平塚市).
- (21) 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  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  のスピンホール効果測定, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 27 日, 東海大学(神奈川県・平塚市).
- (22) 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 薄膜のラシュバ効果による光誘起電圧の円二色性, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2014 年 03 月 21 日, 早稲田大学(東京都・新宿区).
- (23) 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, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2014 年

- 03月21日, 早稲田大学(東京都・新宿区).
- (24) 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03月19日, 東京大学(東京都・文京区).
- (25) T. Hirahara; Ultrathin topological materials, The 8th Japanese-French Frontiers of Sciences Symposium, 2014年01月28日, Metz (France).
- (26) T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobar, 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01月14日, 新富良野プリンスホテル(北海道・富良野市).
- (27) S. Hasegawa; Spin at Crystal Surfaces, Workshop on Quantum Materials at Max Planck Institute, 2013年12月08日, Stuttgart (Germany).
- (28) S. Hasegawa; Spin Splitting and Spin Transport at Surface States of Non-Magnetic Materials with Strong Spin-Orbit Coupling, NSFC-JSPS seminar on magnetic surface and films, 2013年10月22日, Shanghai (China).
- (29) 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09月11日, Paris (France).
- (30) 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), 2013年08月21日, Vladivostok (Russia).
- (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トラnsport, 日本磁気学会第191回研究会/第45回スピントラnsport専門研究会, 2013年07月09日, 中央大学(東京都・千代田区).
- (32) 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07月04日, Gyeongju (Korea).
- (33) M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobar, and S. Hasegawa; Surface-State Superconductivity, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年07月04日, Gyeongju (Korea).
- (34) T. Hirahara; Topological Quantum Phase Transitions in Ultrathin Films, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年

07月02日, Gyeongju (Korea).

- (35) 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06月05日, Bad Honnef (Germany).
- (36) S. Hasegawa; Surface Nanomaterials for Electronics and Spintronics, Nanomeeting 2013, 2013年05月27日, Minsk (Belarus).

〔図書〕(計2件)

- (1) S. Hasegawa 他; In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist, World Scientific, 2013, pp. 250.
- (2) 長谷川修司 他; 問題と解説で学ぶ表面科学, 共立 2013, pp. 250.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp>  
受賞

- (1) 2016年4月 一ノ倉 聖: 表面科学会 第1回関東支部講演大会 講演奨励賞 (公益社団法人日本表面科学会)「その場4端子電気伝導測定によるSiC上2層グラフェンの輸送特性」
- (2) 2016年4月 遠藤 由大: 表面科学会 第1回関東支部講演大会 学生講演奨励賞 (公益社団法人日本表面科学会)「カルシウムをインターカレートした2層グラフェンにおける超伝導」
- (3) 2016年3月 一ノ倉 聖: 平成27年度理学系研究科 研究奨励賞 (東京大学大学院理学系研究科) 博士論文「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」
- (4) 2015年3月 高山あかり: 社団法人日本物理学会 若手奨励賞(領域9)「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」
- (5) 2015年2月 高山あかり: 第7回(2014年度)井上リサーチアワード「多探針STMを用いた1次元Rashba効果およびトポロジカルエッジ状態の研究」
- (6) 2014年11月 一ノ倉聖: 公益社団法人日本表面科学会 平成26年度講演奨励賞(学生部門)「Bi表面におけるスピン依存イオン散乱」
- (7) 2014年11月 高山あかり: 公益社団法人日本表面科学会 平成26年度講演奨励賞(新進研究者部門)「Bi薄膜におけるエッジ構造のスピン分解ARPES」
- (8) 2014年11月 一ノ倉聖: Travel Award at The

7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7) 「 Electron-spin dependent  $4\text{He}^+$  ion scattering on epitaxially-grown Bi surfaces 」

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

長谷川 修司 (HASEGAWA, Shuji)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：00228446

### (2)研究分担者

高山 あかり (TAKAYAMA, Akari)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：70722338

秋山 了太 (AKIYAMA, Ryota)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：40633962

平原 徹 (HIRAHARA, Toru)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：30451818

### (3)連携研究者

### (4)研究協力者

Alexander Saranin  
Institute of Automation and Control  
Processes、教授 (ロシア科学アカデミー)

保原 麗 (HOBARA, Rei)  
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員  
研究者番号：30568176