

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02108

研究課題名(和文) 超高真空SQUIDによる表面超構造超伝導のマイスナー効果の検出

研究課題名(英文) Detection of Meissner effect of surface-superstructure superconductivity by UHV-SQUID

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(理学部)・教授

研究者番号：00228446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導の実験的定義には電気抵抗ゼロとマイスナー効果の両方が必要である。本研究において、単原子層レベルの超薄膜で超伝導を示す系をいくつか発見したが、それらはすべてゼロ抵抗の検出だけに依っていた。そのため、当研究室で独自開発した超高真空中における「縦磁場型超高真空サブケルビン・マイクロ4端子プローブ装置」を改造して、SQUIDシステムを組み込み、マイスナー効果を検出できるようにした。現在は単原子層のマイスナー効果を検出する感度までには至っていないが、いくつかの原子層超伝導系を発見し、それらが、BCS理論では説明できない非従来型超伝導である可能性も実験的に示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今まで超伝導は3次元バルク結晶で盛んに研究されてきたが、最近になって、結晶表面の1, 2原子だけが示す超伝導「表面超構造超伝導」または「原子層超伝導」が発見され、注目を浴びている。それは空間反転対称性の破れに起因する特異な超伝導物性が期待できるので学術的興味だけでなく超伝導スピントロニクスなどのデバイス応用分野からも関心を集めている。本研究の成果は、原子層超伝導物質系の多様性を広げ、この分野の出発点となる重要なものである。その意味で学術フロンティアを広げるという大きな意義があるのは明らかであるし、超伝導原子層が超省エネデバイス等に利用される基礎研究としても社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The experimental definition of superconductivity is required to show both of zero resistance and Meissner effect. In this study we have found some superconducting ultrathin films having atomic-layer thicknesses, but only by the zero-resistance detection. In order to detect the Meissner effect, we have remodeled our world-unique system of micro-four-point probes at sub-Kelvin under vertical magnetic field in ultrahigh vacuum to combine SQUID system. Although it does not yet have enough sensitivity to detect the Meissner effect of mono-atomic-layer superconductivity, we have found several kinds of atomic-layer superconducting material systems. These showed some signatures for unconventional superconductivity beyond the BCS theory.

研究分野：表面物理学

キーワード：原子層超伝導 マイスナー効果 SQUID その場測定 超高真空

1. 研究開始当初の背景

結晶表面の最上層の原子配列(表面超構造)や電子状態(表面状態)が、結晶内部と異なり、表面物理学の研究対象として多数の研究例があるが、そこでの電気伝導(表面状態伝導)の研究はほとんどなされて来なかった。しかし、申請者らの20年にわたる研究によって表面状態伝導の物理が確立し、最近では、トポロジカル絶縁体表面での伝導、とくに表面スピン流の研究に拡張されつつある。さらに、本研究のテーマである表面超構造超伝導の研究に至った。そのために必要な実験技術として、超高真空と超低温、構造制御・解析技術、伝導の「その場」測定技術などを融合する必要があるが、申請者らは長年かけてそれらの実験技術を培ってきた。

「表面状態」は、1, 2 原子層の究極的な薄さの2次元電子系なので、そこで超伝導が発現するのか疑問視されていたが、我々を含むいくつかのグループの研究によって、超伝導ギャップの出現やゼロ抵抗の観測が実現し、2次元超伝導が起こっていると考えられるようになってきた。2010年に単原子層のインジウムまたは鉛が吸着したシリコン表面超構造において走査トンネル顕微分光(STM/S)の測定によって超伝導ギャップの形成が中国から報告され、さらに、マクロスコピックな距離で超伝導電流が流れてゼロ抵抗を示すことが日本で示され、コヒーレントな超伝導状態が実現していることがわかった。また、磁場による超伝導状態の破壊測定から、臨界磁場がバルクのインジウムや鉛の臨界磁場より著しく大きいことが示された。さらにラシュバ効果によってスピン分裂した表面電子状態での超伝導が我々のグループによって発見されるに及んで、パリティの破れた超伝導状態である可能性が高まってきた。結晶表面は、物質と真空の境界なので空間反転対称性が破れており、そこでの超伝導はパリティの破れた超伝導状態になっていることが期待でき、従来の超伝導と異なる性質(巨大な臨界磁場、スピン偏極した超伝導電流、超伝導パラメータの空間変調など)が予想される

2. 研究の目的

本研究は、このように申請者らが当初から貢献してきた表面超構造超伝導の研究において、いまだ検出されていないマイスナー効果を超高真空中で検出することによって超伝導を確実なものにし、FFLO状態など真に新規な超伝導特性を見出そうとするもので、表面物理学、超伝導物理学、超伝導スピントロニクスなどの分野で異彩を放つ研究となると期待できる。超伝導の厳格な定義には、ゼロ抵抗とマイスナー効果の両方の観測が必要であるが、表面超構造・原子層超伝導では後者が検出されていないのが現状であるので、マイスナー効果の検出は重要である。また、最近、セレン化鉄(FeSe)の単一ユニット層(2原子層)が100 Kを超える高温で超伝導に転移するとの報告も中国からなされており、1, 2 原子層の薄さの2次元超伝導の研究が注目を浴びつつあり、緊急性を要するテーマである。

3. 研究の方法

既存の「縦磁場型超高真空サブケルビン・マイクロ4端子プローブ装置」を改造し、マイスナー効果による反磁性を検出するために超伝導量子干渉計(SQUID)装置を組み込むことによって、電気伝導度の測定と同時に、表面超構造超伝導体のマイスナー効果を超高真空中で「その場」で測定可能とする。

国内・海外共同研究者らと協力して、多元表面超構造を網羅的に探索し、表面超構造超伝導を示す物質系の多様性を増やす。また、磁場印加および温度依存性を詳細に測定することによって、極限2次元超伝導の物理を解明する。そのために、既存の装置である「縦磁場型超高真空サブケルビン・マイクロ4端子プローブ装置」を活用する。

4. 研究成果

「縦磁場型超高真空サブケルビン・マイクロ4端子プローブ-SQUID結合装置」を製作して稼働させ、表面超構造・原子層超伝導のマイスナー効果の検出実験を行っている。現在の感度は単原子層超伝導の検出までに至っていないが、数十原子層厚の超伝導体のマイスナー効果を検出できるようになった。磁場分布のシミュレーションやバックグラウンドの磁束の排除の精度を向上させることによって、測定感度をさらに向上する改良を現在も継続している。この装置は、試料を空気にさらすことなく超高真空中に保持したまま、超伝導反磁性を検出する装置であり、世界的にも類を見ないユニークな実験装置となった。

同時に、表面超構造・原子層超伝導物質系の探索研究を行い、下記のように新たにいくつかの超伝導を示す原子層物質系を発見し、物質系の多様性を拡張した。

Si(111)表面上のタリウム(Tl)と金(Au)の合金単原子層Si(111)- 3×3 -(Tl,Au)がラシュバ効果と超伝導を同時に示すことが我々のグループで発見されていたが(Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (2015))、Ge(111)表面上の 3×3 表面超構造でも発現すること、また、TlとAuの混合比率を変えるとその割合に応じて 3×3 、 3×3 、 4×4 などの各種表面超構造が形成されることを発見した。それらは、臨界温度(T_c)が1 K~3 Kの範囲で超伝導に転移することも発見し、多様な原子層超伝導体が存在することはわかった。臨界温度が異なる理由やスピン分裂の大きさとの関係など、電子状態の解析などから明らかにされるものと期待される。(Applied Surface Science **479**, 679 (2019))

Si(111)表面上に成長させた2原子層のTIが超伝導状態に転移することを発見した(2D Materials **4**, 025020 (2017))。さらに、その原子層に垂直磁場を印加することで絶縁体に転移するが、その過程で、「ボーズ金属」と呼ばれる異常金属相が現れることも発見した(Phys. Rev. B, in press <https://journals.aps.org/prb/accepted/6207dYe2Ie317d55e97412c858ffd030951221470>)。原子層超伝導では2次元性ゆえ揺らぎが大きいため、磁場を垂直に印加すると、ゲージ場の揺らぎと超伝導ボルテックス・反ボルテックスの揺らぎによって、クーパー対波動関数の位相の揺らぎが大きくなってコヒーレンスが失われる。その結果、絶対ゼロ度でも有限の電気抵抗値を持つ。これをボーズ金属という。さらに強磁場を印加すると、クーパー対の波動関数が局在化して絶縁体相となる。クーパー対が形成されているボーズ系でのこのような「金属」は、フェルミ系である常伝導状態での金属とは成因が違う。

Si(111)表面上に単原子層の(Tl+Pb)合金を蒸着してできるSi(111)- 3×3 -(Tl+Pb)表面超構造ではRashba効果による大きくスピン分裂した表面状態で超伝導が起こることを2015年に我々が発見したが、今回はその表面の低温走査トンネル顕微鏡・分光(STM/STS)観測を行い、BCS理論では説明できない現象を発見した。(1)超伝導ギャップを示すSTSスペクトルの形がs波の理論では合わず、ギャップレスな非等方ギャップを仮定すると実験データを再現すること、(2)ボルテックス中心に擬ギャップ的な構造が存在すること、(3)上部臨界磁場を超える高磁場で擬ギャップ的な構造が存在することが明らかとなり、非従来型超伝導である可能性を示唆した。(Phys. Rev. B **98**, 134505 (2018))。

Si(111)表面上にPbを蒸着した場合、3原子層以下の蒸着量ではPb連続膜になっていないにも関わらず、3.5 Kで超伝導に転移した。これは、超伝導Pbアイランドからクーパー対が濡れ層に染み出して超伝導領域がつながり、表面全体がゼロ抵抗状態になったためであることを、STM観察と電気伝導観測結果をつなぐことで明らかにした(J. Phys. Soc. Japan **87**, 113601 (2018))。

遷移金属ダイカルコゲナイドの一種であるNbSe₂の1単位層だけの磁場中電気伝導を超高真空中で測定し、電荷密度波と超伝導転移との関係を明らかにした(npj 2D Materials and Applications **2**, 12 (2018))。

トポロジカル結晶絶縁体であるSnTeのエピタキシャル薄膜表面上にIn原子層を積層させると、Inの超伝導転移温度より高い温度で超伝導に転移することを発見した。これは、InとSnTeの界面に誘起された超伝導であり、トポロジカル超伝導状態である可能性がある。次には、それに特有なマヨラナモードの検出を目指す。

Si(001)表面上に形成されたTIとAuの2原子層が電荷密度波と超伝導転移を起こすことを発見した。磁場印加によって超伝導・絶縁体転移を起こすと、絶縁体状態が電荷密度波相であることを突き止めた(Phys. Rev. B, 投稿中)。

超伝導と並ぶ無散逸伝導を示す量子異常ホール効果状態を比較的高温で実現する候補物質系として、MnTe/BiSbTeヘテロ構造を発見した(Nano Letters **17**, 3493 (2017))。MnTe層の磁性秩序によって、トポロジカル絶縁体であるBiSbTeのデイラック型表面状態にギャップが開くこと、MnTeが室温まで強磁性を示すことを光電子分光法やSQUID測定によって明らかにした。これによって、表面状態に開いたエネルギーギャップは非自明なギャップであるため、カイラルエッジ状態が形成されているはずで、その状態を通る無散逸伝導を直接検出するのが次の目標である。

Caをインターカレーションした2層グラフェンが超伝導を示すことを我々の研究グループが発見していたが(ACS Nano **10**, 2761 (2016))、その原子積層構造はわかっていなかった。全反射高速陽電子回折法の実験によって、Ca原子が2層グラフェンの下のバッファ層との間にインターカレーションされていることを明らかにし、超伝導発現機構の解明に必要な原子積層構造を解明した(Carbon, 投稿中)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

T. Nakamura, A. Takayama, R. Hobara, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, S. Hasegawa: Superconducting single-atomic-layer TI-Pb compounds on Ge(111) and Si(111) surfaces, Applied Surface Science **479**, 679-684 (2019). [DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.02.036] (査読有)

S. Hasegawa: Charge and Spin Transport on Surfaces and Atomic Layers Measured by Multi-Probe Techniques, J. Phys.: Cond. Matt. **31**, 223001 (12pp) (2019) (Topical Review). [DOI: 10.1088/1361-648X/ab0bf] (査読有)

S. Ichinokura, Y. Nakata, K. Sugawara, Y. Endo, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: Vortex-induced quantum metallicity in mono-unit-layer superconductor NbSe₂, Phys. Rev. B, in press (2019). (査読有) [<https://journals.aps.org/prb/accepted/6207dYe2Ie317d55e97412c858ffd030951221470>]

Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: Anisotropic Band Splitting in Monolayer NbSe₂: Implications for Superconductivity and Charge Density Wave, npj 2D Materials and Applications **2**, 12 (6pp) (2018). [DOI: 10.1038/s41699-018-0057-3] (査読有)

R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, and S. Hasegawa:

- Shbunikov-de Haas oscillations of p and n-type topological insulator $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$,
J. Phys.: Cond. Matt. **30**, 265001 (8pp) (2018). [DOI: 10.1088/1361-648X/aac59b] (査読有)
- Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, T. Takahashi, K. Nomura, and S. Hasegawa: Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption,
J. Phys.: Cond. Matt., **30**, 305701 (7pp) (2018). [DOI: 10.1088/1361-648X/aaccc4] (査読有)
- Y. Shiomi, K. T. Yamamoto, R. Nakanishi, T. Nakamura, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa,
 and E. Saitoh: Efficient Edelstein effects in one-atom-layer Tl-Pb compound,
Appl. Phys. Lett., **113**, 052401 (4pp) (2018). [DOI: 10.1063/1.5040546] (査読有)
- T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: Unconventional Superconductivity in the single-atom-layer alloy $\text{Si}(111)-\sqrt{3}\times\sqrt{3}-(\text{Tl}, \text{Pb})$,
Phys. Rev. B **98**, 134505 (2018)(Editors' Suggestion).
 [DOI: 10.1103/PhysRevB.98.134505] (査読有)
- H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama,
 A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: Thickness dependence of surface structure and
 superconductivity in Pb atomic layers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 113601 (5pp) (2018).
 [https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.113601] (査読有)
- 長谷川修司: 表面電子状態 —タム・ショックレー状態からトポロジカル状態—,
固体物理 **53** (11), 565-574 (2018). (査読有)
- R. Akiyama, Y. Takano, Y. Endo, S. Ichinokura, R. Nakanishi, K. Nomura, and S. Hasegawa:
 Berry phase shift from 2π to π in Bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption,
Appl. Phys. Lett. **110**, 233106 (4pp) (2017). [DOI: 10.1063/1.4984958] (査読有)
- T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A.
 Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T.
 Okuda, T. Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov: A large-gap magnetic topological
 heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer,
Nano Letters **17**, 3493-3500 (2017). [DOI:10.1021/acs.nanolett.7b00560] (査読有)
- P. Chen, Woei Wu Pai, Y.-H. Chan, A. Takayama, C.-Z. Xu, A. Karn, S. Hasegawa, M. Y. Chou, S.-K.
 Mo, A.-V. Fedorov, and T.-C. Chiang: Emergence of charge density waves and a pseudogap in
 single-layer TiTe_2 , *Nature Communications* **8**, 516 (2017).
 [DOI: 10.1038/s41467-017-00641-1] (査読有)
- 高橋隆、菅原克明、一ノ倉聖、高山あかり、長谷川修司: 2層グラフェン層間化合物の2次
 元超伝導, *表面科学* **38**, 460-465 (2017). [10.1380/jsssj.38.460] (査読有)
- 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, A. V. Matetskiy, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya,
 D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin:
 In situ 電気伝導測定による Rashba 型表面構造 (Tl, Pb)/Si(111)の超伝導の観測,
表面科学 **37** (8), 363-368 (2016). [DOI: 10.1380/jsssj.37.363] (査読有)
- T. Nakamura, R. Yoshino, R. Hobara, S. Hasegawa, and T. Hirahara: Development of a convenient in
 situ UHV scanning tunneling potentiometry system using a tip holder equipped with current-injection
 probes, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **14**, 216-224 (2016). [DOI:
 10.1380/ejsnt.2016.216] (査読有)

[学会発表] (計 36 件)

- Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo and S. Hasegawa:
 Structure analysis of Ca-intercalated bilayer graphene by total-reflection high-energy positron
 diffraction, 1 and 2DM Conference and Exhibition, 2019 年 1 月 30 日, 東京.
- R. Nakanishi, T. Takashiro, R. Hobara, R. Akiyama, S. Hasegawa, A. V. Matetskiy, A. V. Zotov, A. A.
 Saranin, T. Hirahara, T. Shirasawa, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Kimura, S. V. Ereemeev, and E. V.
 Chulkov: Dissipation-less currents at atomic/Molecular layers, Symposium on Surface and Nano
 Sciences 2019, 2019 年 1 月 16 日, 岩手.
- H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L.V. Bondarenko; A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A. Takayama,
 A.V. Zotov, A.A. Saranin, S. Hasegawa:
 Superconductivity of Pb ultrathin film on Ge(111) surface (Young Scientist Award),
 The 4th Asian School-Conference on Nanostructured Materials, 2018 年 9 月 24 日, Russia.
- S. Hasegawa: Dissipationless currents at atomic layers, The 3rd International Workshop on Charge
 transport with multi-tip STM Techniques, 2018 年 9 月 19 日, Germany. (invited)
- 遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, 高山あかり,
 A.V. Zotov, A.A. Saranin, 長谷川修司: Ge(111) 基板上 Pb の 2次元構造と超伝導特性,
 日本物理学会 2018 秋季大会, 2018 年 9 月 12 日, 京都.
- S. Hasegawa: Atomic-Layer Superconductors and Topological Superconductors,
 The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, 2018 年 8 月 21 日, Korea. (invited)
- S. Hasegawa: Dissipationless currents at atomic layers,
 International Conference on Nanoscience+Technology, 2018 年 7 月 26 日, Czech. (invited)
- R. Akiyama, R. Nakanishi, K. Watanabe, and S. Hasegawa: 2-dimensional superconductivity in SnTe

on Bi/Si(111), New Trend of Topological Insulator 2018, 2018 年 7 月 18 日, Luxembourg.

遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, 高山あかり, 長谷川修司:

その場電気伝導測定による Ge 基板上の Pb 超薄膜における超伝導特性,
日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日, 千葉.

S. Hasegawa: Atomic-Layer Superconductors, The 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, 2017 年 12 月 8 日, USA.(invited)

S. Ichinokura, S. Yoshizawa, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobara, T. Uchihashi, A.V. Zotov, A.A. Saranin and S. Hasegawa:

Superconductivity on Rashba spin splitting surface: Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ (Tl, Pb),

The 8th International Symposium on Surface Science, 2017 年 10 月 24 日, 茨城.

T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa and S. Hasegawa: STM/STS measurements of monatomic layer superconductor; Tl-Pb alloy on Si(111),

The 8th International Symposium on Surface Science, 2017 年 10 月 23 日, 茨城.

H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama and S. Hasegawa:

Superconductivity at SIC phase of Pb/Ge(111) surface studied by in-situ transport measurements,

The 8th International Symposium on Surface Science, 2017 年 10 月 23 日, 茨城.

中村友謙, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司 :
Ge(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ (Tl, Pb) における超伝導転移の in situ 4 端子測定,

日本物理学会 2017 秋季大会, 2017 年 9 月 21 日, 岩手.

高山あかり, 長谷川修司: Rashba 系表面超構造の超伝導,

真空・表面科学合同講演会, 日本表面科学会, 2017 年 8 月 19 日, 神奈川. (招待講演)

S. Hasegawa: Atomic-Layer Superconductors, The 16th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces, 2017 年 7 月 3 日, Germany.(invited)

S. Hasegawa: Monatomic-Layer Superconductors, The 13th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids - DSL2017, 2017 年 6 月 27 日, Austria. (invited)

長谷川修司: 原子層超伝導, 京都大学基礎物理学研究所研究会『超伝導研究の最先端: 多自由度、非平衡、電子相関、トポロジ、人工制御』, 2017 年 6 月 19 日, 京都. (招待講演)

S. Hasegawa: Atomic-Layer Superconductors,

Graphene EU Flagship-Japan Second Workshop, 2017 年 5 月 6 日, Spain.(invited)

長谷川修司: ラッシュバ超伝導, 領域 4, 領域 7, 領域 8, 領域 9 合同シンポジウム『原子層関連物質における 2 次元超伝導現象』,

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪. (招待講演)

- 21 中村友謙, Kim Howon, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 単原子層超伝導体 Si(111)- 3×3 -(Tl, Pb) における非 BCS 的超伝導の観測, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪.

- 22 S. Hasegawa: Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors, APCTP-Quantum Materials Symposium 2017, 2017 年 2 月 22 日, YongPyong Resort, Korea.

- 23 S. Hasegawa: Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors, 中華民国物理年会 Taiwan-AVS Symposium on Frontiers of 2D Materials, 2017 年 1 月 17 日, 台湾. (invited)

- 24 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Matetskiy, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 走査トンネル分光測定による表面超構造 (Tl,Pb)/Si(111) における超伝導の観測, 真空・表面科学合同講演会, 2016 年 12 月 1 日, 愛知.

- 25 S. Hasegawa: Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors, Workshop of ENS-UTokyo, 2016 年 11 月 17 日, France. (invited)

- 26 S. Ichinokura and S. Hasegawa: Superconducting Properties of Tl Double Atomic Layer on Si(111), The 2nd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces and CrsooStrait Symposium on Solid Surfaces, 2016 年 11 月 14 日, Taiwan. (invited)

- 27 長谷川修司: パリティの破れた原子層超伝導, 物性研 短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 2016 年 11 月 1 日, 千葉. (招待講演)

- 28 S. Hasegawa: Superconductivity and Spin Current at Surface States, Workshop at the Research Center Julich on Charge transport at surfaces and nanostructures with multi-probe techniques, 2016 年 9 月 21 日, Germany. (invited)

- 29 一ノ倉聖, Leonid V. Bondarenko, Alexandra Y. Tupchaya, Dimitry V. Gruznev, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin, 秋山了太, 長谷川修司:
Si(111)- 1×1 -Tl 表面上に作製した Tl 単原子層における超伝導,
日本物理学会 2016 秋季大会, 2016 年 9 月 16 日, 石川.

- 30 S. Hasegawa: Symmetry-Broken Monolayer Superconductors
The 10th International Workshop on LEEM/PEEM, 2016 年 9 月 14 日, USA. (invited)

- 31 T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, R. Akiyama, A. A. Saranin, A. V. Zotov, Y. Hasegawa, S. Hasegawa: STS measurements of monatomic-layer superconductor, Tl-Pb compound on Si(111), The 20th International Vacuum Congress, 2016 年 8 月 25 日, Korea.

- 32 S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa:
Superconductivity in Cainterminated Bilayer Graphene,

The 20th International Vacuum Congress, 2016年8月22日.

- 33 S. Hasegawa: Low-Dimensionality, Symmetry Breaking, and Topology on Surfaces, IBS Conference -Surface Atomic Wires-, 2016年8月17日, Korea. (invited)
- 34 秋山了太: 単層2次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と超伝導体との接合による協奏現象の探求, 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募班キックオフミーティング, 2016年6月4日, 京都.
- 35 S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: Superconductivity in Calcium-Intercalated Bilayer Graphene detected by in situ Resistivity Measurements in Ultrahigh Vacuum, The 1st International Conference Graphene and related Materials: Properties and Applications, 2016年5月24日, Italy. (invited)
- 36 一ノ倉聖, 菅原克明, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: 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, 日本表面科学会第1回関東支部講演大会, 2016年4月9日, 東京.

[図書](計1件)

長谷川修司: Part II, 第5章 多探針計測法, in 分子アーキテクトにクス 単分子技術が拓く新たな機能, 日本化学会編、化学同人(2018) PP. 83-89.

[その他]

- ・研究室ホームページ: <http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>
- ・Publons (ResearcherID): <http://www.researcherid.com/rid/F-8059-2010>
- ・Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7401474979>
- ・Google Scholar: <http://scholar.google.co.jp/citations?user=eMopLw4AAAAJ&hl=ja>
- ・KAKEN: <https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000228446/>
- ・Researchmap: <https://researchmap.jp/read0007749>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

無し。

(2) 研究協力者

秋山 了太 AKIYAMA Ryota (東京大学大学院理学系研究科助教)

高山 あかり TAKAYAMA Akari (早稲田大学理工学術院先進理工学部専任講師)

保原 麗 HOBARA, Rei (東京大学大学院理学系研究科研究員)

高橋 隆 TAKAHASHI Takashi (東北大学大学院理学研究科教授)

菅原 克明 SUGAWARA Katsuaki (東北大学大学院理学研究科准教授)

長谷川 幸雄 HASEGAWA Yukio (東京大学物性研究所教授)

Alexander A. Saranin (Institute of Automation and Control, Russian Academy of Science)

Andrey, V. Zotov (Institute of Automation and Control, Russian Academy of Science)

Andrey V. Matetskiy (Institute of Automation and Control, Russian Academy of Science)

一ノ倉 聖 ICHINOKURA Satoru (東京工業大学理学院助教)

中村 友謙 NAKAMURA Tomonori (物質・材料研究機構研究員)

遠藤 由大 ENDO Yoshihiro (東京大学大学院理学系研究科博士課程)

遠山 晴子 TOYAMA Haruko (東京大学大学院理学系研究科博士課程)

HUANG Hongrui (東京大学大学院理学系研究科博士課程)

渡邊 和己 WATANABE Kazumi (東京大学大学院理学系研究科修士課程)

中西 亮介 NAKANISHI Ryosuke (東京大学大学院理学系研究科修士課程)

兵頭 俊夫 HYODO Toshio (高エネルギー加速器研究機構ダイヤモンドフェロー)

望月 出海 MOCHIZUKI Izumi (高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所助教)

深谷 有喜 FUKAYA Yuki (日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター研究主幹)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。