

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00342

研究課題名(和文)強いスピン軌道相互作用物質表面でのエッジを利用した非相反伝導現象の研究

研究課題名(英文) Non-Reciprocal Transport at Surface Edges of Strong Spin-Orbit Interaction Materials

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) 36,370,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用の強い物質系で見られるスピン分裂した表面電子状態およびスピン・運動量ロック現象を利用して、円偏光照射によってスピン選択的光励起を起こして非相反スピン偏極光電流を生成することに成功した。また、磁気秩序を導入したトポロジカル絶縁体薄膜において、カイラルスピン構造をもつディラック錐型表面電子状態を反映したトポロジカル異常ホール効果の観測にも成功し、量子異常ホール効果の実現に近づいた。また、それらの磁性トポロジカル絶縁体およびその多層ヘテロ構造やトポロジカル超伝導の候補となる超伝導/トポロジカル(結晶)絶縁体ヘテロ接合構造の薄膜結晶成長に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究のテーマである非相反伝導は、純粋な量子力学的な現象ではなく、ある意味で古典性が付与されることによって引き起こされる現象であり、学術的にも大変興味深く、とくにその実験的研究としては例の少ない研究であるので貴重な例となっている。また、非相反伝導は、電子部品の代表格であるダイオードに見られるように、電子デバイス等への応用上、大変有用な現象でもある。さらに、ダイオードとは違った物理的メカニズムに依っているため、エネルギー散逸の極めて少ない省エネルギー効果が期待できるので、社会的意義も大変大きいテーマである。本研究での実験的観測によって、その端緒が開かれたと考えている。

研究成果の概要(英文)：Using spin-split surface electronic states and spin-momentum locking phenomena observed in materials with strong spin-orbit interaction, we successfully generated non-reciprocal spin-polarized photocurrent through spin-selective photoexcitation by circularly polarized light. Additionally, in topological insulator thin films with introduced magnetic order, we successfully observed the topological anomalous Hall effect, reflecting Dirac cone-shaped surface electronic states with chiral spin structures, bringing us closer to realizing the quantum anomalous Hall effect. Moreover, we successfully achieved thin film crystal growth of these magnetic topological insulators and their multilayer heterostructures, as well as heterojunction structures of superconducting/topological (crystalline) insulators, which are candidates for topological superconductivity.

研究分野：表面物理学

キーワード：非相反伝導 トポロジカル絶縁体 ラシュバ効果 スピン流 スピン運動量ロック現象 フォトガルバニック効果 超伝導

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

非相反伝導を示す代表格であるダイオードでは、ショットキー障壁や  $p-n$  接合によるポテンシャル勾配によって、電流が一方向には流れやすいが反対向きには流れにくくなる。整流作用だけでなく太陽電池や発光ダイオードなどのさまざまな用途に利用されている現状を見れば、非相反伝導現象の重要性は疑う余地もなく極めて大きい。しかし、このような電流の非相反伝導を起こすメカニズムとして、ポテンシャル勾配による空間反転対称性の破れだけでなく、最近では、電子の持つスピンと関連したメカニズムが提唱されている。つまり、空間反転対称性や時間反転対称性の破れに伴い、そこに強いスピン軌道相互作用が加わると、ダイオードと違ってエネルギー散逸を伴わない非相反伝導が起こり得ると理論的に予想され、実験でも観測され始めた。もし、そのような新しい量子機構によって効率的な非相反伝導が実現すれば、ダイオードに代わる、あるいは相補的なデバイスとして大きなインパクトを持つと期待できる。また、電流だけでなく、電荷の流れを伴わない純スピン流の伝導も含め、新しい量子機構に基づく非相反伝導の研究は、基礎物理学としての興味はもちろんのこと、量子デバイスへの応用としても大変興味深いテーマとなる。シュレディンガー方程式自体は非相反現象を示すことがないので、非相反伝導は何らかの古典性が付与されたときに現れる現象であり、学術的にも深遠な意味をもつ。

本研究代表者は、長年にわたって結晶表面・原子層の電子・スピン輸送の研究を行ってきた。特に、分子線エピタキシー (MBE) 成長で作成した表面・原子層試料を空気にさらすことなく超高真空中で「その場」測定することによって、結晶の最表面の表面電子状態伝導や表面電子状態超伝導を世界にさきがけて明らかにした一連の研究成果を生み出してきた。本研究は、これらの実績に基づく研究計画であり、特に最近話題のラッシュバ表面系やトポロジカル絶縁体関連物質での非相反伝導に研究の幅を広げ、他の追従を許さない独自の実験手法・スキルをもってアタックする。

## 2. 研究の目的

結晶表面や界面のように空間反転対称性が破れた系や、磁性秩序によって時間反転対称性が破れた系では、ダイオードのように電流やスピン流が一方向には流れ易く反対方向には流れにくいという非相反伝導現象が起きる。そのメカニズムはダイオードでのポテンシャル勾配とは違い、強いスピン軌道相互作用に起因する新しい量子機構であり、エネルギー散逸を抑制できたり伝導の向きとスピンの向きが関連づけられたりして、基礎物理だけでなく新しい量子デバイスへの応用の研究としても興味深い。本研究では、トポロジカル絶縁体表面やラッシュバ表面系において、特にそのエッジ (端) での伝導に注目して2つの研究を行う。(1) 我々は最近円偏光を試料エッジ近傍に照射すると光電流で非相反伝導成分が生じることを発見したが、波長可変光源を用いて励起プロセスを同定しながら測定し、波長によって異なるメカニズムを解明して高効率非相反伝導の実現を目指す。(2) 磁性トポロジカル表面にできるカイラルエッジ状態での非相反伝導を直接検出した例は無い。それを既存の4探針 STM 型プローバーで探針をエッジに接触させて直接検出する。

円偏光誘起非相反伝導の予備的な成果は、すでに本研究グループが報告しているが、現状では励起光エネルギーを可変にすることができないので、光学励起過程が不明のままである。そこで本研究で、波長可変光源を導入して系統的な測定を行う。また、磁性トポロジカル絶縁体に関しては、フェルミ準位の調節可能な原子層ヘテロ接合系を作成し、表面ディラック電子系のカイラルスピン構造を反映した伝導現象の研究も行う。さらに、トポロジカル絶縁体/超伝導体の良質な接合系をエピタキシャル成長技術によって作成し、トポロジカル超伝導系の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 円偏光による非相反光電流の測定

図1に示すような超高真空分子線エピタキシー (MBE) 装置を改良し [1, 2, 3]、試料を作成した後、そのまま同じ真空槽内で光を照射し、それによる非相反光電流の計測実験を可能とした。つまり、反射高速電子回折 (RHEED) と蒸発源によって、良く構造が既定された原子層結晶や表面超構造を作成し、そのあと試料を測定位置に移動して、ビューポートから真空槽内に導入された光を照射し、それによって発生した光電流を試料の両端のクランプ電極で測定できる。試料に照射する光は大気中で偏向制御できる。すなわち、光源レーザーから出た光を偏光板によっていったん直線偏光にし、その後 1/4 波長板 (QWP) または光弾性変調器 (PEM) によって右回

りまたは左回り円偏光に変換されて真空槽に導入される。光強度をチョッパーで変調することによって光電流をロックイン測定する。また、試料ホルダーを回転させることによって、試料表面に対する光入射角を変えて測定できる。

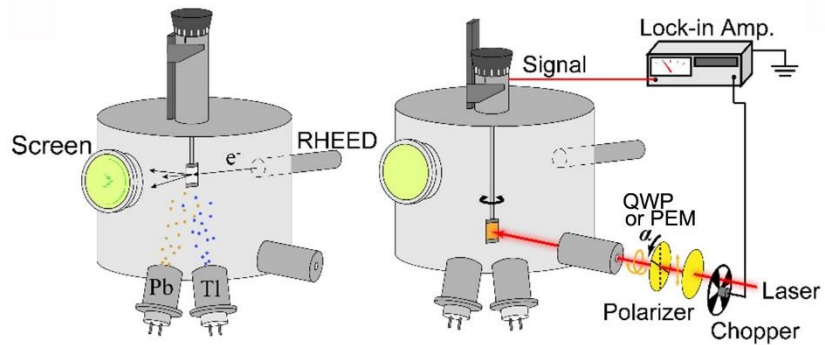


図 1. 超高真空 MBE 槽内での光電流測定装置[1,2,3]

(2) 磁性トポロジカル絶縁体原子層結晶の成長と磁性・伝導測定

トポロジカル絶縁体の代表例である  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  結晶の Bi 原子の一部を Sb で置換した  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  では、Sb の比率  $x$  を変えることによってフェルミ準位を調節することができる。さらに、そこに MnTe を蒸着すると 7 原子層が単位となる強磁性トポロジカル絶縁体結晶  $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$  が成長する。この物質系を用いて多層構造を作成した[4,5]。また、トポロジカル結晶絶縁体である SnTe 原子層の MBE 成長にも成功し、それと磁性体[6]や超伝導体[7]とのヘテロ構造の作成にも成功し、その伝導特性などを研究した。

4. 研究成果

(1) 非相反光電流

図 2 に、(a) トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜結晶 [2, 3] および (b) ラシュバ表面として知られている  $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl,Pb)}$  表面超構造[1]に対して、図 1 の装置で測定した結果を示す。このときに使用した光は波長 1550 nm の赤外線である。QWP の回転角に応じて直線偏光、右回りまたは左回り円偏光が交互に生成でき、その偏光状態は各グラフの上に表示されている。これらのデータで注目すべきことは、右回り円偏光のときと左回り円偏光のときで流れる光電流の値が異なることである。つまり、円偏光は角運動量をもつので、光の進行方向に対する角運動量の正負、つまり光のヘリシティによって励起される光電流が異なることを意味している。これは、トポロジカル絶縁体やラシュバ表面系ではスピン軌道相互作用が強く、スピンの向きによってバンドが分裂している状態であるが、その状態で電子を光励起すると、角運動量保存則によって電子スピンによって選択的に光励起される。しかも、その励起が、運動量空間において原点に対して非対称に起こるので一方方向の光電流が強く流れることになる。円偏光のヘリシティを逆転させると、その励起が運動量空間の原点に対して逆側で強く励起されるので、励起された光電流の流れる向きが逆転することになる。このように、スピン分裂したバンドにおいてスピン選択的に光励起されるために一方方向に強く流れる光電流が生成される。もちろん、光電流には光ヘリシティに依存しない成分も含まれるので、実際の測定される光電流の符号が逆転するまでにはならないが、このデータは円偏光のヘリシティに依存した非相反電流の生成を示している。光入射角度を変化させて同様の測定することによって、ここで見られた現象は、試料のバンドにおけるスピン配列のうち、面内スピン成分が支配的なフォトガルバニック効果であると結論した。

同様のラシュバ表面である  $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl,Sn)}$  表面超構造での光電流の光入射角依存性は、上述のものとは違っていることがわかった。それは、光によって励起されるスピン歳差運動に起因していることも明らかにした (論文投稿準備中)。

(2) 磁性トポロジカル絶縁体でのカイラルスピン構造

図 3 (a) に示すように、トポロジカル絶縁体  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  原子層の上下を強磁性トポロジカル

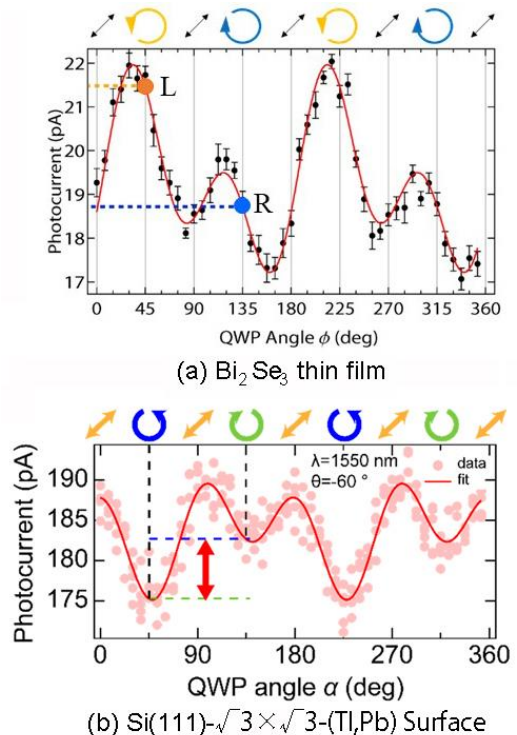


図 2. 光電流の偏光依存性[1,2,3]

絶縁体  $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$  で挟んだサンドイッチ構造を MBE 成長させた。その走査透過電子顕微鏡 (STEM) 像を (b) に示す [4,5]。設計通りにきれいにエピタキシャル成長していることがわかる。この構造の表面ディラック電子系は (a) 上部に示すようにギャップをもったカイラルスピン構造をもつ。この試料のホール効果を測定した結果が (c) に示されている [4,5]。まず、磁場掃引に対して、ホール抵抗がヒステリシスを示すことから異常ホール効果が表れていることがわかる。これは系全体が強磁性体であることを意味する。また、白抜き矢印で示されているように磁化反転時に過剰なホール抵抗が現われる。これは磁気スキルミオンなど非共線的なスピン配列に起因する創発磁場によるトポロジカルホール効果が起こっていることを示している。つまり、今回の試料では、空間反転対称性が破れており、そのためにジャロシンスキー守谷相互作用によって非共線的なスピン配列が磁化反転時に現われることを意味している。これは、カイラルスピン構造をもつ有限質量ディラック錘型の表面電子状態に起因していると考えられる。

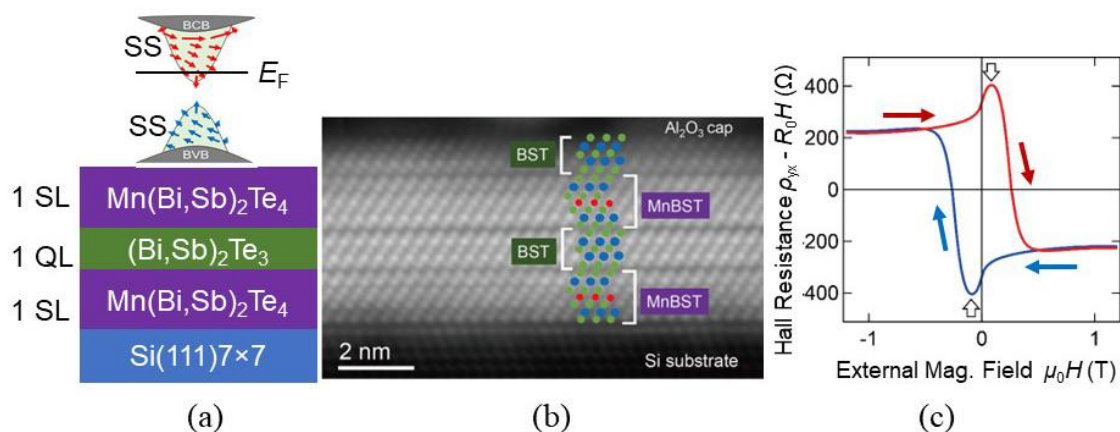


図 3. 磁性トポロジカル絶縁体層とトポロジカル絶縁体層のサンドイッチ構造 [4,5] (a) 構造およびカイラルスピン構造をもつ有限質量ディラック錘型表面電子状態の模式図。(b) 断面の STEM 像。(c) ホール効果測定結果。

本研究で得られた成果をもとに、結晶構造の鏡面对称性に保護されたトポロジカル結晶絶縁体原子層の成長とトポロジカル超伝導の実現、フェルミ準位の微調整による量子異常ホール効果の実現、4 探針 STM 型プローバーによるエッジ状態伝導の直接検出などを目指して現在も研究を拡張している。

#### 参考文献

- [1] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: “Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting”, arXiv:2308.02485 (2023).
- [2] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, S. Hasegawa: “Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”, Phys. Rev. Res. **2**, 023055 (2020).
- [3] D. Fan: “Helicity dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials”, Doctor’s Thesis (University of Tokyo, 2020).
- [4] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa: “Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in an intrinsic ferromagnetic topological insulator sandwich structure”, Nano Letters **22**(3), 881-887 (2022)
- [5] 高城拓也: “真性強磁性トポロジカル絶縁体を用いた原子層薄膜の構造と磁気・電気特性に関する研究”, 博士論文 (東京大学, 2023)
- [6] R. Akiyama, R. Ishikawa, K. Akutsu-Suyama, R. Nakanishi, Y. Tomohiro, K. Watanabe, K. Iida, M. Mitome, S. Hasegawa, S. Kuroda: “Direct probe of ferromagnetic proximity effect at the interface in SnTe/Fe heterostructure by polarized neutron reflectometry”, The Journal of Physical Chemistry Letters **13**, 8228-8235 (2022).
- [7] Y. Guo, “Fabrication of  $\alpha$ -Sn(111)/SnTe(111) heterostructures and exploration of their electronic band structures and electrical transport properties”, Doctor’s Thesis (University of Tokyo, 2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hongrui Huang, Azizur Rahman, Jianlin Wang, Yalin Lu, Ryota Akiyama, Shuji Hasegawa	4. 巻 130
2. 論文標題 Spin-glass-like state induced by Mn-doping into a moderate gap layered semiconductor SnSe <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223903(6pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077612	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takuya Takashiro, Ryota Akiyama, Ivan A. Kibirev, Andrey V. Matetskiy, Ryosuke Nakanishi, Shunsuke Sato, Takuro Fukasawa, Taisuke Sasaki, Haruko Toyama, Kota L. Hiwatari, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin, Toru Hirahara, Shuji Hasegawa	4. 巻 22
2. 論文標題 Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in an intrinsic ferromagnetic topological insulator sandwich structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 881-887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c02952	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama	4. 巻 105
2. 論文標題 Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111)- 3 × 3-(Ti,Pb)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064507 (9pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.064507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Toyama, R. Akiyama, M. Hashizume, S. Ichinokura, T. Iimori, T. Matsui, K. Horii, S. Sato, R. Hobara, Y. Endo, T. Hirahara, F. Komori, S. Hasegawa	4. 巻 16
2. 論文標題 Two-dimensional superconductivity of the Ca-intercalated graphene on SiC: vital role of the interface between monolayer graphene and the substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 3582-3592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.1c11161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司	4. 巻 16
2. 論文標題 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) によるCa挿入2層グラフェン超伝導材料の原子配列解明	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 陽電子科学	6. 最初と最後の頁 2-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fan Di, Hobara Rei, Akiyama Ryota, Hasegawa Shuji	4. 巻 2
2. 論文標題 Inverse spin Hall effect induced by asymmetric illumination of light in topological insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023055(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lau Yong-Chang, Akiyama Ryota, Hirose Hishiro T, Nakanishi Ryosuke, Terashima Taichi, Uji Shinya, Hasegawa Shuji, Hayashi Masamitsu	4. 巻 3
2. 論文標題 Concomitance of superconducting spin-orbit scattering length and normal state spin diffusion length in W on (Bi,Sb) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Materials	6. 最初と最後の頁 034001 ~ 034001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2515-7639/ab7e0c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Huang H, Toyama H, Bondarenko L V, Tupchaya A Y, Gruznev D V, Takayama A, Hobara R, Akiyama R, Zotov A V, Saranin A A, Hasegawa S	4. 巻 33
2. 論文標題 Superconducting proximity effect in a Rashba-type surface state of Pb/Ge(111)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 075007(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab8ffe	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fukui Naoya, Hobara Rei, Takayama Akari, Akiyama Ryota, Hirahara Toru, Hasegawa Shuji	4. 巻 102
2. 論文標題 Scattering of topological surface-state carriers at steps on surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115418(7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.115418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠藤由大、高山あかり、長谷川修司	4. 巻 771
2. 論文標題 全反射高速陽電子回折法を用いたグラフェン超伝導材料の原子配列解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Isotope News (日本アイソトープ協会)	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akiyama Ryota, Ishikawa Ryo, Akutsu-Suyama Kazuhiro, Nakanishi Ryosuke, Tomohiro Yuta, Watanabe Kazumi, Iida Kazuki, Mitome Masanori, Hasegawa Shuji, Kuroda Shinji	4. 巻 13
2. 論文標題 Direct Probe of the Ferromagnetic Proximity Effect at the Interface of SnTe/Fe Heterostructure by Polarized Neutron Reflectometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 8228 ~ 8235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.2c01478	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠山晴子、秋山了太、長谷川修司	4. 巻 57
2. 論文標題 カルシウムのインターカレートにより誘起される特異なグラフェン超伝導	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 593 ~ 606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TAKASHIRO T., AKIYAMA R., KIBIREV I. A., MATETSKIY A. V., NAKANISHI R., SATO S., FUKASAWA T., SASAKI T., TOYAMA H., HIWATARI K. L., ZOTOV A. V., SARANIN A. A., HIRAHARA T., HASEGAWA S.	4. 巻 65
2. 論文標題 Electrical Observation of Soft-magnetic Skyrmions in the Sandwich Structure Including Topological Insulator with Self-assembled Ferromagnetic Atomic Layers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 405 ~ 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.65.405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Yukihiko, Yan Xue, Li Meng, Akiyama Ryota, Brandl Christian, Liu Jefferson Zhe, Hobara Rei, Hasegawa Shuji, Wan Weishi, Novoselov K. S., Tang Wen-Xin	4. 巻 18
2. 論文標題 Dynamic topological domain walls driven by lithium intercalation in graphene	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 1154 ~ 1161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-023-01463-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Kobayashi, Y. Toichi, K. Yaji, Y. Nakata, Y. Yaoita, M. Iwaoka, M. Koga, Y. Zhang, J. Fujii, S. Ono, Y. Sassa, Y. Yoshida, Y. Hasegawa, F. Komori, S. Shin, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa, T. Shishidou, M. Weinert, K. Sakamoto	4. 巻 23
2. 論文標題 Revealing the Hidden Spin-Polarized Bands in a Superconducting TI Bilayer Crystal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7675 ~ 7682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c02387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 AKIYAMA Ryota, TAKASHIRO Takuya, KURODA Shinji, HASEGAWA Shuji	4. 巻 66
2. 論文標題 Concerted Effects of Topological Insulators and Ferromagnetism	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 28 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.66.28	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



〔学会発表〕 計56件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Ryota Akiyama
2. 発表標題 Observation of topological Hall effect in sandwich structures with self-assembled intrinsic topological ferromagnet Mn(Bi,Sb)2Te4
3. 学会等名 Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS) -26 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Takashiro, Ryota Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa
2. 発表標題 Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator
3. 学会等名 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Takashiro, Ryota Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa
2. 発表標題 Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠山晴子
2. 発表標題 Caインターカレート誘起フリースタンディンググラフェンにおける構造と超伝導の相関
3. 学会等名 日本表面真空学会令和3年度(2021年度)関東支部講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川修司
2. 発表標題 量子物質が加速する表面・原子層科学の新展開
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「薄膜・表面物理研究のトレンドと今後の展望」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山 了太
2. 発表標題 Induced effects by introducing ferromagnetism into topological insulators
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季年会領域9シンポジウム " Interdisciplinary surface science researches toward innovative materials and devices " (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川修司
2. 発表標題 物理チャレンジ・物理オリンピックによる中高生へのはたらきかけ ~これまでとこれから~
3. 学会等名 応用物理学会応用物理教育分科会 第31回物理教育に関するシンポジウム『みらいを創る科学技術教育』(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司
2. 発表標題 自己形成型磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 $Mn(Bi_{1-x}Sbx)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sbx)_2Te_3$ における強磁性特性のBi/Sb組成比依存性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司
2. 発表標題 単原子層ラシュバ表面系(Tl,Pb)/Si(111)での円偏光フォトガルバニック効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠山晴子, 秋山了太, 橋爪瑞葵, 一ノ倉聖, 飯盛拓嗣, 松井朋裕, 堀井健太郎, 佐藤瞬亮, 保原麗, 遠藤由大, 福山寛, 平原徹, 小森文夫, 長谷川修司
2. 発表標題 SiC基板上のCaインターカレートグラフェンにおける超伝導
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤瞬亮, 秋山了太, 保原麗, 渡邊和己, 長谷川修司
2. 発表標題 in situ 4 探針電気伝導・トンネル分光法同時測定装置の開発
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山了太
2. 発表標題 トポは端だが役に立つ～表面界面で起こる強磁性・超伝導～
3. 学会等名 日本表面真空学会関東支部セミナー 「表面科学と原子層科学のエッジ」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川修司
2. 発表標題 研究者、このクリエイティブで人間的な職業
3. 学会等名 日本表面真空学会関東支部セミナー 「表面科学と原子層科学のエッジ」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高城拓也、秋山了太、長谷川修司
2. 発表標題 原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体Mn(Bi,Sb)2Te4 を含むヘテロ構造におけるSb/Bi組成比による強磁性特性の変調
3. 学会等名 日本表面真空学会関東支部セミナー 「表面科学と原子層科学のエッジ」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷内息吹、秋山了太、保原麗、長谷川修司
2. 発表標題 巨大ラッシュバ分裂表面超構造における円偏光ヘリシティ依存光電流
3. 学会等名 日本表面真空学会関東支部セミナー 「表面科学と原子層科学のエッジ」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷内息吹、秋山了太、保原麗、長谷川修司
2. 発表標題 巨大ラッシュバ分裂表面超構造における円偏光ヘリシティ依存光電流
3. 学会等名 SPring-8 ユーザー協同体・日本表面真空学会合同ミニコンファレンス NanospecFY2021mini
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤瞬亮, 保原麗, 秋山了太, 渡邊和己, 長谷川修司
2. 発表標題 高磁場・サブケルビン・超高真空 4 探針電気伝導・トンネル分光同時測定装置の開発
3. 学会等名 SPring-8 ユーザー協同体・日本表面真空学会合同ミニコンファレンス NanospecFY2021mini
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司
2. 発表標題 原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体MnSb <sub>2</sub> Te <sub>4</sub> およびそのヘテロ構造の磁気・電気伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山了太, 金田真悟, 大矢忍, 高城拓也, 長谷川修司
2. 発表標題 SrTiO <sub>3</sub> (001)基板上への室温wetting layer成長法による超平坦SnTe(001)薄膜の成長と電気伝導評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 SP. Liu, T. Takashiro, YX. Guo, R. Hobara, R. Akiyama and S. Hasegawa
2. 発表標題 Growth and transport property of copper selenide compound thin films
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 一ノ倉聖, 徳田啓, 福嶋隆司朗, 堀井健太郎, 遠山晴子, 秋山了太, 出田真一郎, 田中清尚, 清水亮太, 一杉太郎, 長谷川修司, 平原徹
2. 発表標題 Caがインターカレートしたグラフェンにおける2重ディラックバンドと層間電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山了太
2. 発表標題 Emergence of correlated surface states in topological Hall effect in the self-assembling magnetic sandwich topological insulator structure
3. 学会等名 The 5th JOINT SYMPOSIUM 2020 between Tsinghua University and The University of Tokyo "Trans scale Materials Science" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruko Toyama, Ryota Akiyama, Rei Hobara, Kota Hiwatari, Shunsuke Sato, Ibuki Taniuchi, Shengpeng Liu, Kentaro Nomura, Shuji Hasegawa
2. 発表標題 Observation of weak antilocalization in Cu <sub>2</sub> Si/Si(111) by in-situ transport measurement
3. 学会等名 Summer School "Design and Synthesis of Quantum Materials" of the IMPRS&MPI-UBS-UTokyo Center (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, H. Toyama, R. Nakanishi, K. Hiwatari, T. Hirahara, T. Fukasawa, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa
2. 発表標題 Electrical observation of magnetic skyrmions in ferromagnetic topological insulator Mn(Bi <sub>1-x</sub> Sbx) <sub>2</sub> Te <sub>4</sub> / (Bi <sub>1-x</sub> Sbx) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> / Mn(Bi <sub>1-x</sub> Sbx) <sub>2</sub> Te <sub>4</sub>
3. 学会等名 Summer School "Design and Synthesis of Quantum Materials" of the IMPRS&MPI-UBS-UTokyo Center (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, 平原徹, 深澤拓朗, V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司
2. 発表標題 磁性 / 非磁性 / 磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造における磁気スキルミオンの電氣的観測
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, 平原徹, 深澤拓朗, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司
2. 発表標題 強磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造Mn(Bi1-xSbx)2Te4/(Bi1-xSbx)2Te3/ Mn(Bi1-xSbx)2Te4/Si(111)のフェルミ準位制御による電気伝導特性変調
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山了太, 渡邊和己, 嶋野武, 友弘雄太, 渡邊拓斗, 石川諒, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司
2. 発表標題 EuS/SnTeヘテロ接合における近接高温強磁性トポロジカル結晶絶縁体界面状態
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鄭帝洪, 秋山了太, V. Jort, 遠藤由大, 渡邊和己, 遠山晴子, 高城拓也, 保原麗, 長谷川修司
2. 発表標題 Ybインターカレートグラフェン/SiCの磁気特性
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuxiao Guo, 秋山了太, 長谷川修司
2. 発表標題 Exploring the structure and transport properties at Sn/SnTe(111) structure
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠山晴子, 秋山了太, 保原麗, 樋渡功太, 佐藤瞬亮, 谷内息吹, Shengpeng Liu, 長谷川修司
2. 発表標題 その場電気伝導測定によるSi(111)表面上Cu <sub>2</sub> Si単原子層における弱反局在の観測
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川修司
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた原子層超伝導の実験的研究
3. 学会等名 NANOSPEC2021 (SPring-8ユーザー協同体 顕微ナノ材料科学研究会 日本表面真空学会合同シンポジウム) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liu Shengpeng, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司, W. X. Zhang, J. Z. Zhang, C. Liu
2. 発表標題 Cu/SiC(0001)上に成長したディラックノーダルライン物質Cu <sub>2</sub> Siの結晶成長とその評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 町田理, 吉村優輝, 中村友謙, 花栗哲郎, 長谷川幸雄, 長谷川修司, 高山あかり
2. 発表標題 超低温走査トンネル分光によるRashba系表面超構造の超伝導状態観察
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Hasegawa
2. 発表標題 Quantum Materials boost quantum technology
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Quantum Materials 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hasegawa
2. 発表標題 Graphene with Intercalation of Foreign Atoms
3. 学会等名 The 3rd IBS Conference on Surface Atomic Wires and The 2nd IBS-RIKEN STM Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hasegawa
2. 発表標題 Quantum materials, their structures, electronic states, and electronic transport
3. 学会等名 MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 R. Akiyama
2 . 発表標題 Superconductivity emergence by atomic intercalation of Ca and Yb into few-layer graphene
3 . 学会等名 TsinghuaU - UTokyo Joint Symposium on Trans-scale Materials Science (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 R. Akiyama, S. Kaneta-takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi and S. Hasegawa
2 . 発表標題 Atomically flat SnTe(001) thin films made by the room temperature wetting layer method and its electrical transport properties
3 . 学会等名 International Conference on Complex Orders in Condensed Matter:aperiodic order, local order, electronic order, hidden order (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa
2 . 発表標題 Circular photogalvanic effect in monolayer surface superstructures with huge Rashba-splitting
3 . 学会等名 International Conference on Complex Orders in Condensed Matter:aperiodic order, local order, electronic order, hidden order (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, J. Jung, R. Hobara, S. Hasegawa
2 . 発表標題 Electronic structure and electronic transport properties of Yb-intercalated epitaxial graphene
3 . 学会等名 International Conference on Complex Orders in Condensed Matter:aperiodic order, local order, electronic order, hidden order (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川修司
2. 発表標題 量子物質表面の構造・電子状態・電子輸送
3. 学会等名 表面界面スペクトロスコープ2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠山晴子, 秋山了太, 一ノ倉聖, 橋爪瑞葵, 飯森拓嗣, 遠藤由大, 保原麗, 松井朋裕, 堀井健太郎, 佐藤瞬亮, 平原徹, 小森文夫, 長谷川修司
2. 発表標題 SiC基板上のCaインターカレートグラフェンが示す2次元超伝導: グラフェンと基板の界面に注目して
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 皆川遼太郎, 秋山了太, 郭宇嘯, 長谷川修司
2. 発表標題 トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_xSn_{1-x}Te$ と磁性層 $Cr_x(Bi_{1-y}Sb_y)_2-xTe_3$ のヘテロ接合の磁性と電気伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司
2. 発表標題 原子層表面超構造(Tl,Sn)/Si(111)における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤瞬亮, 秋山了太, 皆川遼太郎, 宮井雄大, Yogendra Kumar, Amit Kumar, 鄭帝洪, 出田真一郎, 島田賢也, 長谷川修司
2. 発表標題 Ybインターカレートグラフェンの電子構造と電気伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司
2. 発表標題 軽元素修飾したトポロジカル超伝導体Fe(Se,Te)の超伝導転移温度への影響
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇佐見康継, 妹川要, 納富良一, 柿崎弘司, 保原麗, 長谷川修司
2. 発表標題 レーザードーピングによる n 型 4H-SiC の低コンタクト層形成
3. 学会等名 第 84 回応用物理学会秋季講 演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ibuki Taniuchi, Ryota Akiyama, Rei Hobara, Shuji Hasegawa
2. 発表標題 Helicity-dependent photocurrent induced by circularly polarized infrared light at atomic bilayer superstructure Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl, Sn)
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shota Shimizu, Ryota Akiyama, Rei Hobara, Shuji Hasegawa
2. 発表標題 Effect of modifying with light elements on properties of a topological superconductor Fe(Se,Te)
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuxiao Guo, Ryota Akiyama, Takako Konoike, Satoru Ichinokura, Yuya Hattori, Takuya Takashiro, Rei Hobara, Taichi Terashima, Toru Hirahara, Shinya Uji, Shuji Hasegawa
2. 発表標題 Two-dimensional superconductivity in $\text{-Sn(111) / SnTe(111)}$ heterostructures
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukihiro Endo, Xue Yan, Meng Li, *Ryota Akiyama, Christian Brand, Jefferson Zhe Liu, Rei Hobara, Shuji Hasegawa, Weishi Wan, Konstantin Sergeevich, Novoselov, Wen-Xin Tang
2. 発表標題 Topological domain walls induced by lithium intercalation in graphene
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryotaro Minakawa, Ryota Akiyama, Yuxiao Guo, Rei Hobara, Shuji Hasegawa
2. 発表標題 Magnetism and electrical transport properties of heterostructures with topological crystalline insulator $\text{PbxSn1-xTe}$ and magnetic layer $\text{Cr}_x(\text{Bi1-ySby})_2\text{-xTe}_3$
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunsuke Sato, Ryota Akiyama, Ryotaro Minakawa, Yudai Miyai, Yogendra Kumar, Amit Kumar, Jehong Jung, Shinichiro Ideta, Kenya Shimada, Shuji Hasegawa
2. 発表標題 Electronic structure and electrical transport properties of Yb-intercalated epitaxial graphene
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukihiro Endo, Xue Yan, Meng Li, Ryota Akiyama, Christian Brandl, Jefferson Zhe Liu, Rei Hobara, Shuji Hasegawa, Weishi Wan, K. S. Novoselov, and Wen-Xin Tang
2. 発表標題 Graphene with Intercalation of Li Atoms
3. 学会等名 International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices in Winter 2024 (ALC-W 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤瞬亮、秋山了太、鄭帝洪、宮井雄大、Yogendra Kumar, Amit Kumar, 皆川遼太郎、出田真一郎、島田賢也、長谷川修司
2. 発表標題 Ybインターカレートグラフェンにおける超伝導の発現とその原子・電子構造
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Endo, X. Yan, M. Li, R. Akiyama, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov, W.-X. Tang
2. 発表標題 Real-time LEEM observation of Li-intercalation into graphene
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本表面真空学会編、長谷川修司（分担執筆）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 576
3. 書名 図説 表面分析ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

長谷川研究室 <a href="http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/top_j.html">http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/top_j.html</a> 長谷川研究室 <a href="http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/top_e.html">http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/top_e.html</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	秋山 了太  (Akiyama Ryota)  (40633962)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教    (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	Inst Automation and Control Processes			
その他の国・地域 台湾	Academia Sinica, 台湾			
中国	中国科学技術大学	重慶大学		

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	メルボルン大学			