

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02616

研究課題名(和文)トポロジカル絶縁体・強磁性体接合の磁性機構解明と、高温量子異常ホール効果への展開

研究課題名(英文)Elucidation of interface magnetism in topological insulator/ferromagnetic material and development for high-temperature quantum anomalous Hall effect

研究代表者

秋山 了太(Akiyama, Ryota)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：40633962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トポロジカル絶縁体に強磁性を導入して強磁性トポロジカル絶縁体を作り、量子ホール効果やスキルミオンなどの新奇量子状態を誘起すること、そしてその観測温度を向上させる手がかりを得ることを目的としている。成果としては、 $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$ という真性強磁性トポロジカル絶縁体を用いた、 $Mn(Bi,Sb)_2Te_4/(Bi,Sb)_2Te_3/Mn(Bi,Sb)_2Te_4$ というサンドイッチ構造を初めて作製し、真性強磁性トポロジカル絶縁体では初めてスキルミオンを観測することに成功した。また、 $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$ の強磁性層の層内・層間の相互作用について系統的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、真性強磁性トポロジカル絶縁体は規則的に磁性元素が並んだ構造をしており、ランダムドープに比べて強磁性相互作用が強くサンドイッチにすると軟磁性的になり、弱磁場でスキルミオンの制御が可能であることで、スキルミオンの制御性が向上した。またサンドイッチ構造では“具”の部分である $(Bi,Sb)_2Te_3$ の厚みを変化させると、 $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$ の層間距離が変化し、それによって磁気カップリングやトポロジカル表面状態の混成具合を制御できることは、特筆に値する。また社会的には、これらの新奇な性質を利用してスキルミオン磁気メモリなど書き換え可能な次世代デバイスへと応用できると期待されることである。

研究成果の概要(英文)：The aim of this work is to introduce ferromagnetism into topological insulators to create ferromagnetic topological insulators, to induce novel quantum states such as quantum Hall effects and skyrmions, and to provide clues to improve their observed temperatures. As an achievement, the sandwich structure  $Mn(Bi,Sb)_2Te_4/(Bi,Sb)_2Te_3/Mn(Bi,Sb)_2Te_4$  was fabricated for the first time using an intrinsic ferromagnetic topological insulator called  $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$ , and skyrmions were successfully observed for the first time in an intrinsic ferromagnetic topological insulator. The intra- and interlayer interactions of the ferromagnetic layers of  $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$  were also systematically clarified.

研究分野：低次元ナノ量子物理学

キーワード：スキルミオン 原子層物質 トポロジカル絶縁体 磁性 カルコゲナイド ファンデルワールス物質  
ディラック錐

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

トポロジカル絶縁体(TI)の表面状態と強磁性との関係については、量子異常ホール効果発現に向けた研究は盛んな一方で、具体的にどのように強磁性が影響するのかについては、基礎学理のみならずスピントロニクスなどへ応用する上でも重要な見地であるにも関わらず、未解明な部分が多い。その中、我々はトポロジカル結晶絶縁体(TCI)SnTe を用いた EuS(111)/SnTe(111)接合において強磁性の性質を検証したところ、バルク EuS のキュリー温度を大幅に越えた室温付近での界面磁化の増大が見られた。これはその前にマサチューセッツ工科大学の Moodera らのグループによって報告[1]されていた EuS/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> での結果と類似しており非常に興味深い。

また、原子層物質(Bi,Sb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (BST)をベースとして強磁性化した Mn(Bi,Sb)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> (MBST)は真性強磁性トポロジカル絶縁体として知られ、これは BST 中に Mn が単原子層となって自己形成するものでそれまで報告されていたランダムドープによる強磁性トポロジカル絶縁体に比べ、well-defined な結晶であり、また強磁性の性質も良好なことから世界中で熱心に研究が進められていた。しかし、それを用いたヘテロ構造での磁性など不明な点は多く解明が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、トポロジカル表面状態と強磁性の相互作用について単結晶の EuS/SnTe や MBST/BST や MBST/BST/MBST などのヘテロ構造やサンドイッチ構造の薄膜を分子線エピタキシー法(MBE)によって作製し、磁性を電気伝導や磁化測定、そして偏極中性子反射率法(PNR)などによって解析し、明らかにしていく。

### 3. 研究の方法

#### PNR による EuS/SnTe 界面で生じる磁性の調査

PNR 法ではスピン偏極した中性子を物質に入射し、その反射率を「磁性体のスピンが中性子と平行」のときと「磁性体のスピンが中性子と反平行」の2つについて測定し、その入射波数依存性を、立てた構造モデルによってフィッティングを行い、膜厚や散乱長密度(SLD)などの構造のパラメータを決定することで、深さ方向の原子構造・磁気構造の同定を行える。また磁化測定は SQUID によって温度・磁場依存性を測定する。結晶構造解析は X 線回折(XRD)によって行った。

#### MBST/BST および MBST/BST/MBST における磁性の調査

これらの接合構造においては、電気伝導によるホール効果測定で、異常ホール効果が観測でき、それからキュリー温度や保磁力の評価が可能である。また SQUID による磁化測定、XRD による結晶構造測定、透過型電子顕微鏡(TEM)による観察も併せて行った。

### 4. 研究成果

#### PNR による EuS/SnTe 界面で生じる磁性の調査

EuS はバルクでは 17K のキュリー温度をもつ強磁性絶縁体である。これとトポロジカル絶縁体の Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> を接合すると、昇温に従って減少した面直磁化が再び室温付近で復活し、これはトポロジカル表面状態に EuS の界面磁化が染み込んで、それが室温付近でも残存しているためだとい

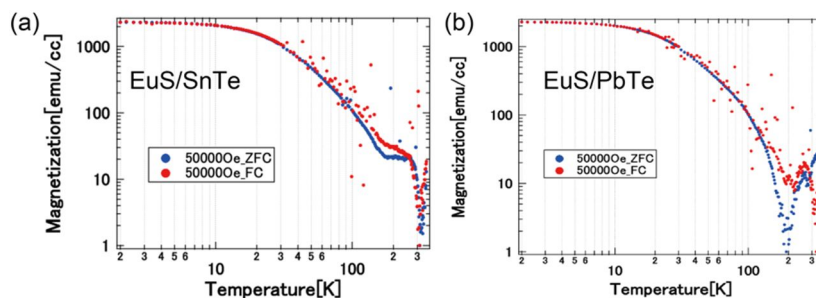


図 1: (a) EuS/SnTe と(b) EuS/PbTe の接合を含む試料での面直磁化の温度依存性。

う報告があった。我々はこれを受けて、ではトポロジカル結晶絶縁体 SnTe を EuS に接合した場合にどうなるだろうかとすることを調査することにした。また、PbTe は 6.31Å の SnTe と近い格子定数 6.46Å を持ちトポロジカル絶縁体ではなく、同じ結晶構造であるため比較対照用として最適である。そして、スピン軌道相互作用がこれらより小さい BaF<sub>2</sub> も同様の結晶構造と格子定数 6.20Å をもつため、これについても EuS を堆積して界面を作り比較した。SnTe, PbTe はおよそ 500 nm の膜厚を、EuS はバルク部が支配的になると解析が困難になるためと、良い結晶性を保つには 5 nm 程度以下であることが必要であるため、その膜厚を目標とした。BaF<sub>2</sub> については基板を使用した。

EuS/SnTe と EuS/PbTe の面直磁化の温度依存性を図 1 に示す。いずれも温度に違いはあるものの 200 K 前後まで磁化は温度上昇とともに単調減少をした後に 300 K 付近にかけて再度上昇をしている。これは奇妙な振る舞いであり、EuS/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> のときにも同様の振る舞いが観測されているが、単純な強磁性では無いことが予想される。また今回、PbTe との接合においてもこの傾向

が初めて見られたことから、この 300 K 付近での磁化のリバイバルは EuS との界面で生じるトポロジカル絶縁体の表面状態がもつ磁化由来ではない可能性が高いと分かった。ではスピン軌道相互作用由来であろうか。しかし重要なことに、同様に BaF<sub>2</sub> でもこの傾向があることが分かった。BaF<sub>2</sub> は必ずしも軽い物質ではないが、バンドのラシュバ分裂などは報告されておらず基本的にはスピン軌道相互作用は SnTe や PbTe よりも小さいと考えられる。従って、単純にスピン軌道相互作用由来の振る舞いでも無いことが推測される。

そこで、PNR によって深さ方向の磁化分布を確かめることにした。PNR では、中性子反射で面直方向の運動量遷移をもつため面内スピン成分を感知でき、深さ方向に Å 程度の分解能でプローブすることのできる手段で、我々は Fe/SnTe のヘテロ接合において、Fe 側からの Fe 原子の拡散によらない SnTe 表面への磁気の染み出しを観測した [2]。同様の解析によって、EuS 接合についても調査を行った。図 2 に 3.8 K での EuS/SnTe, EuS/PbTe, EuS/BaF<sub>2</sub> における面内磁場 1 T 下の PNR の波数依存性を、中性子と平行の磁性体中のスピンによる反射率は  $R^+$  として、中性子と反平行の磁性体中のスピンによる反射率は  $R^-$  としてプロットしている。いずれも弱いながらも振動し、両者は一致していないことが分かる。磁気散乱長密度は磁気プロファイルに相当するが、それは  $(R^+ - R^-)/2$  で表される。つまり、 $R^+$  と  $R^-$  の両者が一致しない場合には面内強磁性を示す。そして重要なのは、300 K 付近でも弱いながらもこの両者の乖離がすべての試料で有意差を持って見られたことである。このことから、昇温に従って磁化がリバイバルすることは再現性があり、さらに EuS との接合相手がトポロジカル絶縁体でなくても生じるということが分かった。

では何が可能性として考えられるかということだが、一つには EuS 薄膜自体がキャント磁性などノンコリニアな磁性を持ち、温度とともに磁化の角度が変化することでのような磁化が捉えられた可能性が考えられる。この場合は下地によらずに同様の磁化特性となることが予想され、今回の SQUID や PNR での測定ではそれと矛盾しない。また、EuS についてはそれ自身が重い物質で、ある程度大きなスピン軌道相互作用を持ち、また薄膜化することでバルクとは違う磁化特性を持つ可能性があることから、その可能性は残ると考えられる。従って今後は、なるべく軽量元素でできた下地に対して EuS を積層する、EuS の膜厚を変化させたときの振る舞いをみるなどで、原因を特定していく必要がある。

### MBST/BST および MBST/BST/MBST における磁性の調査

BST 上に MBST を積層してヘテロ構造を作ると、強磁性となることは分かっている。その磁性はそれほど強くはないが、MBST/BST/MBST とサンドイッチ構造にしたときには、図 3 のように顕著に残留磁化・保磁力が増大する。これは MnBST 層間の相互作用が存在するからだと考えられる。また Mn(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> (MnBST) における Sb 組成  $x$  を変化させてサンドイッチ構造のキュリー温度を見たものが図 4 である。興味深いことに、キュリー温度は Sb 組成が増すにつれて単調に増加している。これには 2 つの可能性が考えられ、一つはキャリア密度の増加、もう一つは格子定数の減少である。まずキャリア密度依存性であるが、イオン液体を試料に載せてトップゲートとして、ホール抵抗のゲート電圧依存性を測定したのが図 4(a) である。これから分かるように、正常ホール効果による高磁場での直線の傾きは変化しているものの、保磁力や飽和磁化は殆どゲート電圧の影響を受けていないことが分かる。これは、キャリア密度は変化するが、強磁性はそれに影響を受けていないことを示す。一方で、Sb 組成を増加させると図 4(b) のように面内格子定数が小さくなることから分かった。そしてキュリー温度はそのとき図 4(c) のように高くなっていく。つまり格子定数が小さくなるとキュリー温度が高くなる傾向が見てとれ、実際、

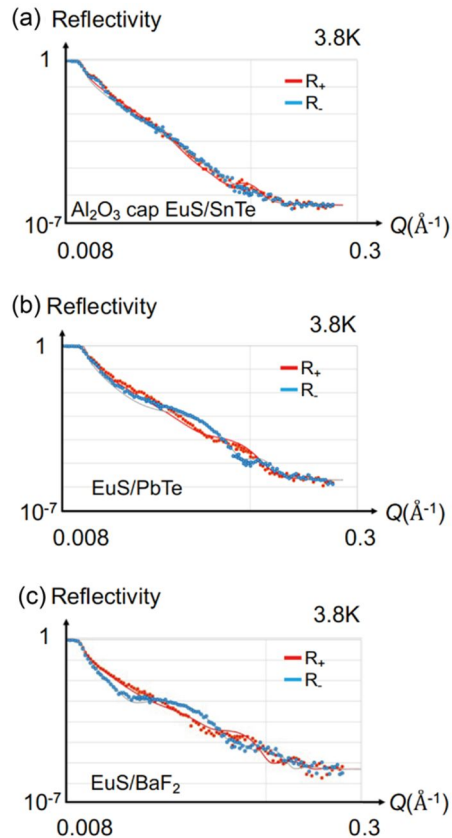


図 2 : 温度 3.8 K、磁場 1 T 下における (a) EuS/SnTe、(b) EuS/PbTe、(c) EuS/BaF<sub>2</sub> における PNR の波数依存性。

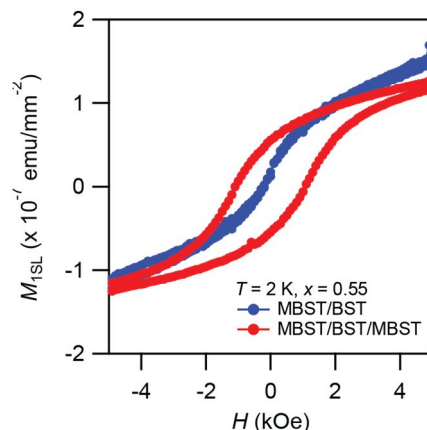


図 3 : 2 K における、ヘテロ構造 MBST/BST とサンドイッチ構造 MBST/BST/MBST のときの異常ホール効果。なお MBST の Bi/Sb 組成は Mn(Bi<sub>0.4</sub>Sb<sub>0.6</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> である。

キュリー温度が高くなる傾向が見てとれ、実際、



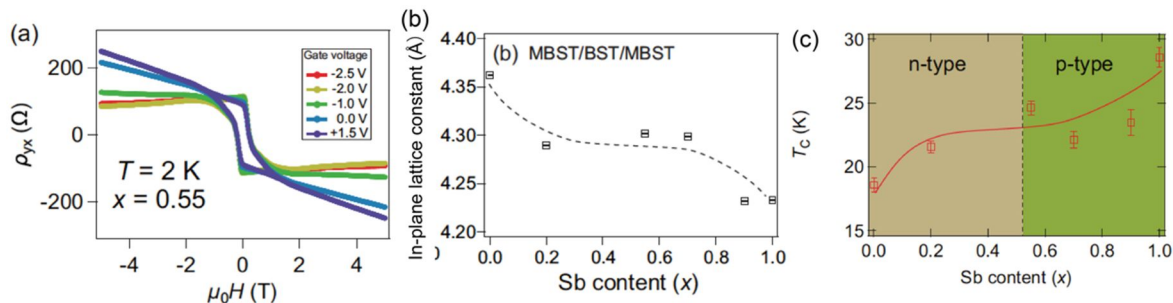


図 4 : MBST/BST/MBST サンドイッチ構造における、(a) 2 K でのホール抵抗のゲート電圧依存性、(b) 面内格子定数の Sb 組成依存性、(c) キュリー温度の Sb 組成依存性。

面内の Mn 原子間の距離とキュリー温度をプロットすると図 5 のようになる。このことから、Bi の Sb 置換によるキュリー温度上昇の効果は面内格子定数の縮小によって引き起こされていると言える。

さて、ここからスキルミオンの成果について記述する。MBST では  $x$  を変化させるとフェルミ準位が変化するため、MnBST/BST/MnBST のサンドイッチ構造で、 $x$  を変えながらホール効果を測定すると  $x \sim 0.55$  付近で電荷中性点を迎える。トポロジカル表面状態由来のディラックコーンのディラック点には強磁性摂動によってギャップが開き、そのギャップ近傍はカイラルエッジバンドが生じているが、 $x \sim 0.55$  付近でここにフェルミ準位が調整されると分かった。このときに図 6 のようにホール抵抗を測定すると、白抜き矢印のようなコブ形状を持つ磁気ループを示すトポロジカルホール効果が観測された。トポロジカルホール効果は、スキルミオンという磁気渦が生じているときに、その渦が持つ有効磁場によってホール抵抗が誘起されるというもので、過去にもいくつか報告はされている[3-5]。しかし、真性強磁性トポロジカル絶縁体においては報告がなかったため、これが初めての測定となった[6]。MBST は Mn が自己形成的に規則的に並んで単原子層を形成しており、このおかげで Dzyaloshinskii–Moriya (DM) 相互作用よりも強磁性相互作用が強く軟磁性的になっているため、このスキルミオンは従来のスキルミオンの 1/10 程度の磁場である 1000 Oe ほどで生成することが可能であると分かった。このスキルミオンはトポロジカル表面状態由来のスキルミオンなので状態が頑健であると期待され、将来的にはスキルミオン磁気メモリなどへの応用も期待される。

このように、強磁性とトポロジカル絶縁体表面状態の関わりについていくつかの単結晶ヘテロ接合を作製し検証を行った。強磁性体と、トポロジカルに trivial な半導体との接合では決して現れないような新奇現象が次々と現れることを今回明らかにした。更に今後も研究を深めて現象の発掘と応用の道筋を見つけていきたい。

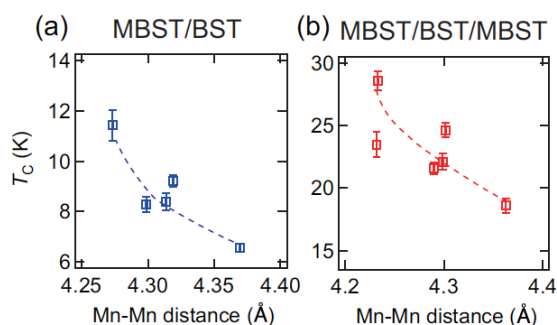


図 5 : (a) MBST/BST のヘテロ構造、(b) MBST/BST/MBST のサンドイッチ構造におけるキュリー温度と Mn 原子間距離の関係。

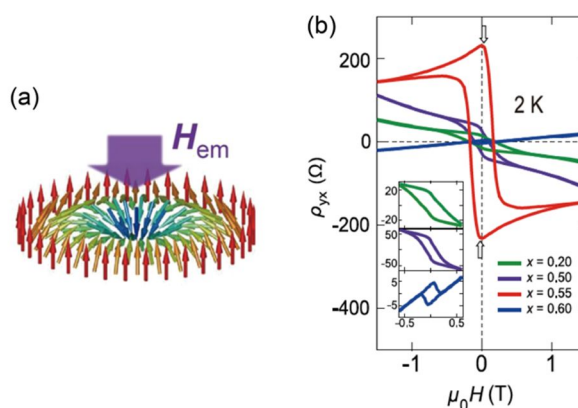


図 6 : (a) スキルミオンの模式図。小さな矢印は磁化で、大きな紫の矢印はスキルミオンによる創発磁場。(b) 2 K でのトポロジカルホール効果の様子。Sb 組成  $x$  が 0.55 になると現れる。

- [1] F. Katmis *et al.*, Nature **533**, 513 (2016).
- [2] R. Akiyama *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **13**, 8228 (2022).
- [3] J. Jiang *et al.*, Nature Mater. **19**, 732 (2020).
- [4] K. Yasuda, *et al.*, Nature Phys. **12**, 555 (2016).
- [5] L. Chang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 176809 (2017).
- [6] T. Takashiro *et al.*, Nano Letters **22**, 881 (2022).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

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 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 Toyama Haruko, Akiyama Ryota, Ichinokura Satoru, Hashizume Mizuki, Iimori Takushi, Endo Yukihiko, Hobara Rei, Matsui Tomohiro, Horii Kentaro, Sato Shunsuke, Hirahara Toru, Komori Fumio, Hasegawa Shuji	4. 巻 16
2. 論文標題 Two-Dimensional Superconductivity of 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 Takashiro Takuya, Akiyama Ryota, Kibirev Ivan A., Matetskiy Andrey V., Nakanishi Ryosuke, Sato Shunsuke, Fukasawa Takuro, Sasaki Taisuke, Toyama Haruko, Hiwatari Kota L., Zotov Andrey V., Saranin Alexander A., Hirahara Toru, Hasegawa Shuji	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 Huang Hongrui, Rahman Azizur, Wang Jianlin, Lu Yalin, Akiyama Ryota, Hasegawa Shuji	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 ~ 223903
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 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 -

1. 著者名 Huang Hongrui, Rahman Azizur, Wang Jianlin, Lu Yalin, Akiyama Ryota, Hasegawa Shuji	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 ~ 223903
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 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 -

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 -

〔学会発表〕 計34件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Ryota Akiyama
2. 発表標題 Superconductivity emergence by atomic intercalation of Ca and Yb into few-layer graphene
3. 学会等名 The University of Tokyo The 9th JOINT SYMPOSIUM 2023 Trans scale Materials Science (Physics and Materials) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠山晴子, 秋山了太, 佐藤瞬亮, 遠藤由大, 保原麗, 松井朋裕, 福山寛, 堀井健太郎, 橋爪瑞葵, 一ノ倉聖, 平原徹, 飯盛拓嗣, 小森文夫, 長谷川修司
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 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 今中康貴, Yang Zhuo, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司, 小濱芳允, 松田康弘
2. 発表標題 Bi薄膜における超強磁場サイクロトロン共鳴
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Ryota Akiyama
2. 発表標題 Induced effects by introducing ferromagnetism into topological insulators
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 オンライン開催 (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 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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
4. 発表年 2022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 表面科学と原子層科学のエッジ 日本表面真空学会 オンライン開催 (招待講演)
4. 発表年 2022年

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) <sub>2</sub> Te <sub>4</sub>
3. 学会等名 Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS) -26 (招待講演)
4. 発表年 2021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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠山晴子, 秋山了太, 佐藤瞬亮, 遠藤由大, 保原麗, 松井朋裕, 福山寛, 堀井健太郎, 橋爪瑞葵, 一ノ倉聖, 平原徹, 飯盛拓嗣, 小森文夫, 長谷川修司
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 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 今中康貴, Yang Zhuo, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司, 小濱芳允, 松田康弘
2. 発表標題 Bi薄膜における超強磁場サイクロトロン共鳴
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 <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> における強磁性特性のBi/Sb組成比依存性
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Akiyama
2. 発表標題 Induced effects by introducing ferromagnetism into topological insulators
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 オンライン開催(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 原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体 $Mn(Bi_{1-x}Sbx)_2Te_4$ 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 第13回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鄭帝洪, 秋山了太, 高城拓也, 遠山晴子, 保原麗, 長谷川修司
2. 発表標題 SiC(0001)上エピタキシャルグラフェンへのYbインターカレーションによる強磁性の発現
3. 学会等名 第13回低温科学研究センター研究交流会
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 Si基板上巨大ラッシュバ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 第13回低温科学研究センター研究交流会
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 第13回低温科学研究センター研究交流会
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今中康貴, Yang Zhuo, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司, 小濱芳允, 松田康弘, 竹端寛治
2. 発表標題 Bi薄膜における強磁場テラヘルツサイクロトロン共鳴
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 日本物理学会秋季年会 オンライン開催
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 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 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 遠山晴子, 秋山了太, 一ノ倉聖, 橋爪瑞葵, 飯盛拓嗣, 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 基板上グラフェンにおけるCa インターカレート誘起超伝導
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」
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 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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 岩塩型構造を持つ化合物の単結晶薄膜及びその製造方法	発明者 秋山了太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2022 - 030143	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 岩塩型構造を持つ化合物の単結晶薄膜及びその製造方法	発明者 秋山了太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2022 - 030143	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 岩塩型構造を持つ化合物の単結晶薄膜及びその製造方法	発明者 秋山了太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/7032	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Researchmap  
<https://researchmap.jp/rakiyama>  
研究室  
<http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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	IACP		