

## 1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として皆川遼太郎が新しくメンバーに加わった。9月には Liu Shengpeng が博士課程を修了して中国に帰国して就職した。3月には高城拓也が博士課程を修了してオーストリアに博士研究員として渡航した。

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。おもに半導体や金属、トポロジカル絶縁体結晶表面上に形成される種々の表面超構造や原子層、多層膜(超格子)構造、ヘテロ接合界面などを利用し、原子尺度の低次元電子系に固有な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、機能特性として利用することをめざしている。最近の主な話題は、トポロジカル(結晶)絶縁体結晶の表面電子状態、超伝導グラフェン、ラシユバ超伝導、原子層超伝導、非相反光電流などである。このようなナノマテリアルを様々な実験手法を用いて多角的に研究を行っている。とくに、分子線エピタキシー(MBE)法によってナノマテリアルを作成し、試料を空気にさらすことなく物性測定を超高真空中で「その場 *in situ*」で行うことが本研究室の実験手法の特徴であり、そのための新しい手法・装置の開発・改良も並行して行っている。以下に、本年度の成果を述べる。

### 1.1.1 表面/界面での輸送・磁性特性

#### 真性強磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$ 原子層薄膜における層内・層間磁気相互作用

真性強磁性トポロジカル絶縁体  $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$  (MBST) は、磁性元素 Mn 原子が規則的にシート状配列した結晶構造を持つ層状物質であり、Mn 原子どうしの磁気的相互作用が強いので量子異常ホール効果の観測温度向上が期待されている。本研究では、トポロジカル絶縁体  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$  (BST) 薄膜の片面に MBST を1ユニット層だけ接合させた MBST/BST ヘテロ接合構造と、BST の両面にそれぞれ1ユニット層ずつ MBST を接合させた MBST/BST/MBST サンドイッチ構造の原子層薄膜試料を作製し、それらの結晶構造や電気伝導特性、磁気特性を系統的に調べた。それによって、MBST の層内・層間磁気相互作用のメカニズムの解明を試みた。まず層内磁気相互作用については、Sb 添加量を増やすことで格子定数が縮むので MBST 層内の Mn-Mn 距離を小さくできる特長を活かして、キュリー温度の Sb 添加量依存性を調べた。その結果、Sb を添加して Mn-Mn 距離を小さくするほどキュリー温度が上昇することが分かった。一方、ゲート電圧によってキャリア密度を変化させても磁気特性がほとんど変わらなかったことから、キャリアに依存せずに Mn 原子どうしの接近に伴い強磁性が安定化する層内磁気相互作用が働いていることを明らかにした。一方、層間磁気

相互作用については、MBST/BST ヘテロ接合構造と MBST/BST/MBST サンドイッチ構造のキュリー温度を比較することで、そのメカニズムを検証した。その結果、後者のサンドイッチ構造のキュリー温度の方が前者より3倍以上に高いことが分かり、層間磁気相互作用は強磁性的であることを明らかにした。本結果は、MBST が3ユニット層以上の多層構造では層間磁気相互作用が反強磁性的であるという先行研究の結果と異なる。つまり、サンドイッチ構造のように2層の MBST が積層すると層間磁気相互作用が強磁性的に働き、3層以上に層数を増やすと反強磁性の効果が大きくなることを示唆している。

#### トポロジカル結晶絶縁体 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ を用いた多チャネル量子異常ホール効果の観測

結晶の鏡映対称性に保護された表面状態を有するトポロジカル結晶絶縁体(TCI)は、第一ブリルアンゾーンに複数のディラック錐を有する新奇な物質である。TCIである  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  (PST) に強磁性を付与することにより、ディラック点にギャップが開き、その中にフェルミ準位を調整することにより、チャーン数の大きい量子異常ホール効果(QAHE)が実現すると予測されている。フェルミ準位の位置やギャップの大きさは Pb/Sn 組成比を変化させることで調整可能あり、実際、物理パラメータ測定システム(PPMS)装置による電気伝導測定を通してキャリアの種類や密度変化とおよその電荷中性点を求めた。本研究では、TCIの結晶性を損なわずに磁性を付与するため、 $Z_2$ 型トポロジカル絶縁体(TI)の量子異常ホール効果(QAHE)観測成功の事例に倣い、PST層にCr原子をデルタドープした  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5})_2\text{Te}_3$ 層で上下から挟むサンドイッチ構造を採用している。RHEEDパターンからエピタキシャル結晶成長に成長功したことを確認した。今後、Pb/Sn組成比やCrのドープ量、膜厚など複数のパラメータを変化させた試料を作製し、電気伝導測定と検証を通じて多チャネル量子異常ホール効果観測を目指す。

#### Si(111)表面上の(Tl,Pb)単原子層における円偏光誘起非相反電流

スピン分裂した電子系に円偏光を照射すると、波数空間上での電子分布に偏りが生じ、一方に流れる電流が生成される(円偏光フォトガルバニック効果(CPGE))。従来の報告では *ex situ*測定が多く、また光応答が極めて小さいことから、単原子層・表面超構造物質におけるCPGE観測はできないと考えられていた。本研究では巨大ラシユバ効果が報告されているSi基板の単原子層物質である(Tl,Pb)/Si(111)を作成し、超高真空中 *in situ*で円偏光の照射によって誘起された光電流を観測した。TlとPbの蒸着量を制御して表面超構造を  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  や  $4 \times 4$  周期の単原子層合金を作って測定した結果、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の場合に非相反光電流が最大化することが明らかになった。この非相反光電流の大小関係はラシユバパラメータ

のそれと定性的に一致しており、スピン分裂が大きいほどにCPGEが強くなるという直観に合致する振る舞いが確認された。また物質表面1原子層では物質の誘電率は真空中と同様に振る舞うという示唆も得られた。

### Si(111) 表面上の (Tl,Sn) 2 原子層における円偏光誘起非相反電流

スピン軌道相互作用が強い物質では、バンドのスピン縮退が解けたり、スピンホール効果でアップスピンとダウンスピンが逆方向に流れるといった現象が見られる。こういった物質に円偏光を照射しスピン注入することでスピン流を簡便に発生させる試みがなされている。本研究では2原子層表面超構造物質である (Tl,Sn)/Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  を作成し、超高真空 *in situ* で円偏光を照射し非相反光電流を測定した。その結果、試料右端と左端で非相反光電流の符号が反転する光誘起逆スピンホール効果 (PISHE) のような現象が観測され、上述の (Tl,Pb) のCPGEケースとは全く異なる振る舞いをみせた。さらにこれは、円偏光を斜め入射にすると増幅されることもわかり、面直スピンにより生じるPISHEの直観的な描像と反する振る舞いを見せた。この振る舞いはスピン軌道相互作用による歳差運動でスピンの面内一面直変換が生じている可能性があり、現在は他の物質で同様な振る舞いを見られないか探索しているところである。バンド分散の情報に加え、スピンの歳差運動からも原子層物質でのスピンの動きについて調査していく。

### SrTiO<sub>3</sub> 結晶表面の SEM 電子線照射下での電気伝導測定

SrTiO<sub>3</sub> (STO) は、バンドギャップ 3.2 eV をもつ透明酸化物絶縁体である。STO(001) 面は、熱処理により酸素欠損が生じて電子ドーピングされ、欠損量順に  $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ ,  $2 \times \sqrt{5} \times \sqrt{5}$  の表面超構造をとり、表面ドナー準位の存在も指摘されているが、表面の電気伝導特性は不明であった。そこで本研究では、non-doped STO(001) 基板表面において  $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$  表面超構造をバッファードフッ酸 (BHF) エッチングとアニールに処理によって形成し、探針制御用走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて超高真空中 *in situ* 4 探針電気伝導測定を行った。その結果、SEM の電子線ドーピングを一定にしない場合は抵抗値にばらつきが認められ一方、ドーピングを一定にすると抵抗値は安定し、探針間隔に依らない2次元伝導が観測された。これはSEMの電子線によりSTOの表面ドナー準位からキャリアが励起され導電性が増大した可能性を示している。今後はより基板表面から酸素欠損した表面超構造でも同様の実験をし、電子線照射が電気伝導に与える影響を調べる。

### トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 上での $\alpha$ -Sn 原子層の成長と超伝導

多重マヨラナゼロモード (MZM) や非従来型超伝導を探索するため、2次元超伝導体 (2DSC) /トポロジカル結晶絶縁体 (TCI) ヘテロ接合系を研究している。その一例として TCI である SnTe(111) 層上に  $\alpha$ -Sn 原子層を成長させたヘテロ接合系を調べている。 $\alpha$ -Sn 原子層が BKT 転移を示して約 4 K で超伝導に転移したので、この系は 2DSC/TCI であり、多重 MZM 探索に適していることがわかった。この系を超伝導臨界温度  $T_C$  の 5% までの超低温まで磁気伝導特性を調べた。面内臨界磁場がパウリ極限を超える非常に大きな値を示し、それはスピン軌道散乱効果によって説明されると考えられる。面直臨界磁場の温度依存性が異常な振る舞いを示すこともわかり、それは、多バンド超伝導理論で説明できると考えられる。また、汎関数密度法による電子状態計算も行い、超伝導状態を示す試料ではいずれもバンド反転が起こっていることがわかった。さらに、 $\alpha$ -Sn 原子層の  $T_C$  が下地の SnTe(111) 層の膜厚に依存することもわかり、その原因を追究するために現在光電子分光法でバンド構造の観測を行っている。

### SiC 上の Yb インターカレートグラフェンにおける強磁性の発現

*d* 電子や *f* 電子軌道を持つ金属原子をグラフェンに添加すると、金属原子とグラフェンの  $\pi$ -軌道との交換相互作用が生じ、強磁性が発現されることが理論的に示唆されていた。本研究室では *4f* 電子軌道を持ち常磁性バルク体である Yb を、グラフェン/SiC 上蒸着しアニールしてインターカレートさせると、金属原子修飾グラフェンにおいて最大 107 K に臨界温度を持つ強磁性を観測することに成功している。本研究では、その強磁性の発現機構の解明のため、作製条件を系統的変えた Yb インターカレートグラフェンを作製し、それらのホール・電気伝導測定を行った。その結果、キャリア密度が低いほど強磁性転移温度が高くなるという、従来の3次元のキャリア媒介希薄磁性半導体とは異なる傾向が観測され、Yb インターカレートグラフェンが単純なキャリア媒介強磁性ではないことが示唆された。また、 $1.2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\Omega$  という高い電子移動度を持ちながらも、強磁性によりグラフェンのディラックコーンにバンドギャップが生じている可能性がある。今後はより詳細な電子状態と磁気構造の解明とともに、量子異常ホール効果などの新奇物性の開拓を目指す。

#### 1.1.2 表面・原子層ナノ構造の形成

##### 室温 wetting layer 成長法による超平坦薄膜の成長

昨年度、成長温度や表面処理の工夫を行い、SrTiO<sub>3</sub> 基板上に世界記録的に平坦な SnTe 薄膜を MBE 法によって作る成長技術を開発したが、それに続いて、

PbTe においても同様の手法で平坦薄膜を作製することができたことを反射高速電子回折によって確認した。このことから、SrTiO<sub>3</sub> 基板上への成長において、SnTe に限らずより広範に (Pb,Sn)Te に用いることができる手法であると考えられる。なお本結果を踏まえて、SnTe において昨年度出願していた国内特許に PbTe の製造法を加え、今年度国際特許出願を行った。

### テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による Bi 薄膜結晶の物性研究

Bi は、固体物理学の発展と常に共にあったほどに研究の歴史の古い物質であるが、今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜は量子井戸現象を示すため、膜厚によりバンド構造が半金属-半導体転移することが報告されており、それぞれのバンド構造での輸送特性の違いなど詳細に解明すべき点がある。そこで、Si(111) 面に成長した Bi(111) 単結晶薄膜での強磁場・テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴により、各バンド構造でのキャリアの正確な有効質量や膜厚によるバンド構造の変化を明らかにする。分光実験では当該膜厚では初めて明瞭な吸収が観測され、磁場依存するエネルギーバンドの重なりを示唆する結果も得られた。現在はさらに膜厚を細かく振った試料を用意し、膜厚による価電子帯・伝導帯の重なりの変化を追っている。また、Bi は Sb ドープによりトポロジカル物質への転移やフェルミ面の調整が可能であるので、今後は Sb ドープ系での有効質量やキャリアの変化なども明らかにしていく。(物質・材料研究機構との共同研究)

### 1.1.3 新しい装置・手法の開発

#### 超高真空中 *in situ* 4 探針電気伝導・トンネル分光同時測定装置の開発

物質表面や薄膜の超伝導を調べるとき、電気伝導とトンネル分光を超高真空中で同一タイミング・同一試料で測定できると、より本質的な物理現象の理解につながる。そこで、本研究室で所有している超高真空 *in situ* 4 端子電気伝導測定装置を改良し、トンネル分光測定機構を追加することによって同一試料上で両方の測定を行うことを可能にした。STM 探針での鉛薄膜試料の超伝導ギャップの測定により、3.2 K において約 0.5 meV の分解能が実現していることが確認されている。分解能が制限されている主な要因は、振動によって安定したトンネル接合を維持することが難しいことである。そこで、今後は内部除振機構の導入によってプローブ周辺の安定性を高め、トンネル分光測定の分解能を改善する。その上で同一の超伝導試料に対する *in situ* 電気伝導測定・トンネル分光測定を行い、おもに原子層超伝導体に対するでの多角的な測定を行っていく。さらに、トンネル電流のショット雑音を測定すればトンネルする電

子が通常の電子であるのかクーパー対を組んだものであるのか知ることができる。2次元超伝導体においては揺らぎの影響からクーパー対を組んでいるものの波動関数の位相コヒーレンスが壊れているためにゼロ抵抗にならない、ボーズ金属と呼ばれる量子金属相が実現しようと言われており、探針付近に低温で動作する高周波アンプを導入することでショット雑音の測定を可能にし、ボーズ金属の実験的証拠を得ることを目指していく。

#### 超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外線照射装置の開発

電子のスピンを利用するスピントロニクスに光を用いる手法がある。円偏光はスピン角運動量を持つため、円偏光の右/左回りに応じて物質中の電子をスピンの向きに応じて選択的に励起することができるので、円偏光を用いた手法は近年盛り上がりを見せている。本研究室では超高真空装置内で試料を作成し、*in situ* 測定する手法を取っているが、光を真空装置内に注入する際にビューポートにより円偏光が僅かに歪んでしまう。そこで円偏光生成機構を、ビューポートを介さず真空装置へと接続するためのチャンバーと光学系を制作し既存のチャンバーに接続した。この設計により研究室に既存のレーザー波長 635 nm、1550 nm に加えて、2 $\mu$ m ~ 9  $\mu$ m と広い波長範囲での中赤外光に対応した円偏光が生成でき、様々な励起エネルギーに応じた円偏光誘起電流が測定できると期待できる。この波長域は、トポロジカル絶縁体のバルクギャップやラシュバ効果の典型的なエネルギー分裂幅である 100 meV ~ 300 meV をカバーしており、エネルギー分裂幅に対応した波長での高効率なスピン生成が期待できる。現在は組み立てと動作確認がほぼ完了した段階であり、2023 年度内には本装置が稼働し始める予定である。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。

- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (A) 「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」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (B) 「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」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「水素修飾で実現する高転移温度を持つ原子層超伝導体」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「グラフェンを用いたスピン圧検出プローブとそれを用いたスピン実空間観察手法の開発」(代表 保原麗)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「スピン輸送現象の実空間その場観察手法の開発研究課題」(代表 保原麗)

#### <受賞>

- [1] 遠山晴子 (2021 年度卒業生): 原子層 2次元構造における超伝導の特性解明, 2022 年度日本表面真空学会 女性研究者賞 (若手女性研究者優秀賞) 2022 年 9 月 26 日.

- [2] 秋山了太: *Growth of atomically flat SnTe(001) thin films using the room temperature wetting layer method and its electrical transport measurements*, 2022年度日本表面真空学会学術講演会 講演奨励賞 (若手研究者部門), 2023年1月25日.
- [3] 秋山了太: 高品質トポロジカル絶縁体薄膜の開発と次世代高速動作スピンドバイスへの応用 (電気・電子), 第63回 (2022年度) 公益財団法人UBE学術振興財団学術奨励賞, 2023年3月30日.

<報文>

(原著論文)

- [4] 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 (Aug, 2022).
- [5] Y. Endo, M. Li, R. Akiyama, X. Yan, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov and W.-X. Tang: *Dynamic observation of topological domain walls motion driven by Lithium intercalation in epitaxial graphene on SiC*, under review.
- [6] 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. Sakamoo: *Revealing the hidden spin-polarized bands in a superconducting Tl bilayer crystal*, under review.

(特許)

- [7] 秋山了太: 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, 国際特願 PCT/JP2023/7032, 出願日 2023年2月27日.

(国内雑誌)

- [8] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 中西亮介, 佐藤瞬亮, 深澤拓朗, 佐々木泰祐, 遠山晴子, 樋渡功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 平原徹, 長谷川修司: 自己形成型強磁性原子層を持つトポロジカル絶縁体によるサンドイッチ構造での軟磁性的スキルミオンの電氣的観測, 表面と真空 **65**(9), 405-410 (Sep, 2022). (Editor's Choice)
- [9] 遠山晴子, 秋山了太, 長谷川修司: 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, 固体物理 **57**(10), 593-606 (Oct. 2022).
- [10] 秋山了太, 高城拓也, 黒田真司, 長谷川修司: ポロジカル絶縁体と強磁性の協奏効果表面と真空 **66**(1), 28-33 (Jan, 2023). (Editor's choice)

(その他)

- [11] 秋山了太, 長谷川修司: Ca原子を挿入したグラフェンで新規な超伝導への進化をとらえる, 理学部ニュース 2022年7月号 p.4 (Jul, 2022).

- [12] 長谷川修司: *IPhO2022* ベラルーシ大会の中止と代替スイス大会の開催, JPhO News Letter **34**, p. 8 (Jul, 2022).
- [13] 遠山晴子: 原子層二次元構造における超伝導の特性解明 (受賞者紹介), 表面と真空 **66**(1), 60 (Jan, 2023).
- [14] 長谷川修司 (制作監修): JST 研究倫理教育映像教材『倫理の空白』(准教授編・若手学生編), 科学技術振興機構報研究公正ポータル, Youtube, 2022年5月11日.

(学位論文)

- [15] LIU Shengpeng: *Growth and physical properties of cuprous selenide thin films* (博士論文).
- [16] 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).
- [17] 清水翔太: *SrTiO<sub>3</sub> 基板上 FeSe 薄膜の構造と電気伝導特性の評価* (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [18] S. Hasegawa: *Two-Dimensional Atomic-Layer Materials*, The 14th International Symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices '22 (ALC'22), Kankoku Shiriyokan, Okinawa (Japan), 2022年10月19日.
- [19] S. Hasegawa: *Two-Dimensional Atomic-Layer Materials*, The Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2022), Vladivostok (online), 2022年4月25日.

一般講演

- [20] S. Sato, R. Hobara, R. Akiyama, K. Watanabe, S. Hasegawa: *Development of the Simultaneous Measurement System of Four-Point-Probe Electrical Transport and Tunneling Spectroscopy*, The 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022年11月10日.
- [21] R. Akiyama, S. Kaneta-Takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi, T. Takashiro, S. Hasegawa, *Growth of atomically flat topological crystalline insulator SnTe(001) thin films using the room temperature wetting layer method and its electrical transport measurements*, The 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022年11月9日.
- [22] 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 a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator*, The 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022年11月8日.
- [23] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Circular photogalvanic effect in surface superstructures on Si(111) with huge Rashba-splittings*, The 2nd international symposium on trans-scale quantum science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022年11月8日.
- [24] . Guo, R. Akiyama, T. Konoike, Y. Hattori, T. Takashiro, R. Hobara, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity in  $\alpha$ -Sn/SnTe(111) heterostructure*. The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022年9月12日.
- [25] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Circular photogalvanic effect at surface superstructures on Si(111) with huge Rashba-splittings*, The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022年9月12日.
- [26] R. Akiyama, S. Kaneta-Takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi, T. Takashiro, S. Hasegawa, *Growth of atomically flat SnTe(001) thin films using the room temperature wetting layer method and its electrical transport measurements*, The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022年9月14日.(2022年度日本表面真空学会 学術講演会 講演奨励賞(若手研究者部門) )
- [27] S. Sato, R. Hobara, R. Akiyama, K. Watanabe, S. Hasegawa : *Development of the simultaneous measurement system of four-point-probe electrical transport and tunneling spectroscopy*, The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022年9月14日.
- [28] 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 a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator*, The 92nd IUVESTA workshop & The 4th Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄) , 2022年9月19日
- (国内会議)
- 招待講演
- [29] 高城拓也, 真性強磁性トポロジカル絶縁体を含む原子層サンドイッチ構造におけるスキルミオンの電気的観測, 量子物理学・ナノサイエンス第85回特別セミナー, 東京工業大学, 2023年3月10日.
- [30] 長谷川修司: 物質を解明して役立てる物理学 ー日本人研究者たちの寄与ー, 国際純粋・応用物理学連合100周年記念オンライン講演会 『日本の物理学研究ー過去・現在・未来ー』, 2022年10月1日.
- [31] 長谷川 修司: 薄膜・表面物理のための磁性・スピントロニクス入門, 応用物理学会薄膜・表面物理分科会第50回 薄膜・表面物理セミナー 『二次元磁性体研究の最前線』, ハイブリッド/東京理科大森戸記念館, 2022年7月22日(金).
- 一般講演
- [32] 清水翔太, 保原麗, 秋山了太, 堀内皓斗, 金田真悟, 大矢忍, 長谷川修司: 探針制御用走査電子顕微鏡を備えた *in situ* 4探針電気伝導測定装置による  $SrTiO_3$  表面上の原子層構造の測定, 第14回低温科学研究センター研究交流会, 理学部1号館中央棟2階小柴ホール, 2023年2月16日.
- [33] 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司, 自己形成型真性トポロジカル強磁性体  $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$  における面内・面内磁気相互作用の  $Sb/Bi$  比率依存性, 日本物理学会 2022年秋季大会, 東京工業大学, 2022年9月14日.
- [34] 川村康文, 五十嵐美樹, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 海老崎功, 右近修治, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 岸澤真一, 毛塚博史, 小池洋二, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 佐々田博之, 柴崎幸貴, 真梶克彦, 末元徹, 鈴木功, 武士敬一, 西野友年, 長谷川修司, 林壮一, 松本益明, 松本悠, 三木一司, 水谷紫苑, 味野道信, 山崎詩郎, 吉村勇治: 物理チャレンジ 2022 報告⑧- 実験問題部会, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022年9月13日.
- [35] 東辻浩夫, 栗原進, 吉岡大二郎, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 金子朋史, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 並木雅俊, 長谷川修司, 松本益明, 光岡薫, 吉見光祐: 第22回アジア物理オリンピック 2022(インド, オンライン) 報告, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022年9月13日.
- [36] 東辻浩夫, 栗原進, 吉岡大二郎, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 金子朋史, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 並木雅俊, 長谷川修司, 松本益明, 光岡薫: 第52回国際物理オリンピック 2022(スイス, オンライン) 報告, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022年9月13日.
- (セミナー)
- [37] 長谷川 修司: トポロジカル物質とは何か ー表面物理学の観点からー, 東京大学生産技術研究所福谷研究室セミナー, 2022年11月30日.
- [38] 長谷川修司: 20世紀が半導体の世紀なら、21世紀はトポロジカル物質の世紀である, シュレディンガーの水曜日 (WirelessWire News) (オンライン), 2022年7月6日.
- (講義等)

- [39] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「歴史を変えた(る)物理」(学部1年生), 2022年度夏学期(駒場).
- [40] 長谷川修司, 秋山了太, 佐藤瞬亮(TA), 谷内息吹(TA), 皆川遼太郎(TA): 物理学実験II(学部3年生)電子回折, 2022年度冬学期(本郷).

(アウトリーチ)

- [41] 研究室総出: 東大の研究室をのぞいてみようー物性物理学、とくに表面物理学の紹介と実験室見学ー, 理学部1号館, 2023年3月27日.
- [42] 長谷川修司: プレチャレンジ: 実験レポートの書き方と大気圧測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 栃木県立大田原高等学校(栃木), 2022年3月21日.
- [43] 長谷川修司: 物理チャレンジ対策講座(女子プレチャレンジ): 実験レポートの書き方とLED特性の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 栃木県立宇都宮女子高等学校(栃木), 2022年1月28日.
- [44] 長谷川修司: サイエンス講演会: 発光ダイオードの実験で光の性質を探ろう, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 岡山県立岡山操山高等学校(岡山), 2023年2月3日.
- [45] 研究室総出: La Trobe 大学+国立シンガポール大学 学部生の研究室見学, 理学部1号館, 2023年2月1日.
- [46] 研究室総出: 茨城県緑岡高等学校 SSH 事業大学研究室訪問, 理学部1号館, 2022年10月26日.
- [47] 長谷川修司: 鳥取県立米子東高等学校「科学を創造する人財育成事業」科学実験, 鳥取県立米子東高等学校(鳥取), 2022年10月15日.
- [48] 長谷川修司: 栃木県高等学校教育研究会理科部会物理分科会夏季研修会, 栃木県立宇都宮高等学校(栃木), 2022年9月25日.
- [49] 研究室総出: 茨城県立土浦第一高等学校 模擬授業と研究室見学, 理学部1号館, 2022年8月1日.

# 1 Hasegawa Group

**Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics**

**Members: Shuji HASEGAWA and Ryota AKIYAMA**

Surfaces/interfaces of materials and atomic-layer materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breaking, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Charge/spin/mass transports including superconductivity and spin current, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) spin states and spintronics, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces of metals, semiconductors, topological materials, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films including atomic-layer materials such as graphene and transition metal dichalcogenides. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy (SEM), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy (PES), *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical effects apparatuses. Main results in this year are as follows.

**(1) Surface transport and magnetism:**

- soft-magnetic skyrmions at interfaces/heterostructures at ferromagnetic topological insulators and magnetic interaction therein.
- 2D superconductivity at  $\alpha$ -Sn layers on a topological crystalline insulator
- non-reciprocal photocurrent at Rashba surfaces induced by irradiation of circularly polarized light
- surface transport of SrTiO<sub>3</sub> influenced by electron beam irradiation
- Ferromagnetic states at Yb-intercalated graphene

**(2) Surface phases and atomic-layer materials:**

- Epitaxial growth of ultra-flat SnTe and PbTe films on SrTiO<sub>3</sub>(001)

**(3) New methods:**

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling-spectroscopy capability
- Fabrication of a UHV-MBE system with polarization-controlled mid-infrared irradiation

- [1] 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 (Aug, 2022).