

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として佐藤瞬亮と谷内息吹が新しくメンバーに加わった。9月にはFAN Diが博士課程を、3月末には樋渡功太が修士課程を修了して就職した。

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、ラシュバ超伝導、原子層超伝導、偏光誘起非相対称光伝導などである。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法によるナノマテリアルの作成と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/界面での電子・スピン輸送

強磁性トポロジカル絶縁体のサンドイッチ構造におけるスキルミオンによるトポロジカルホール効果

強磁性(FM)が付与されたトポロジカル絶縁体(TI)(強磁性トポロジカル絶縁体:FMTI)の表面ではトポロジカルに非自明なカイラルスピン電子状態が実現されるが、この表面状態と磁化が coupling することによりスキルミオンと呼ばれるFM秩序とは異なった渦状磁気構造が形成される。FMTIでのスキルミオンの報告例は、多くは磁性元素をTI内部にドーブさせた系であるが、デバイス応用の観点では結晶性を崩さずにTI内部に規則的に磁化が配列した系でのスキルミオン観測が求められる。本研究では、非磁性TIである(Bi,Sb)₂Te₃(BST)と磁性原子が規則的に配列したFMTIであるMn(Bi,Sb)₂Te₄(MnBST)のサンドイッチ構造MnBST/BST/MnBSTを分子線エピタキシー法により作製し、Bi/Sb組成比によってフェルミ準位を適切に制御することによりスキルミオン由来のホール抵抗の増大(トポロジカルホール効果)をPPMSによる*ex situ*電気伝導測定によって観測した。さらに物質材料研究機構との共同研究によりサンドイッチ構造の非磁性TIの膜厚依存性を評価することで、スキルミオン安定化には特定の膜厚、つまり上下のFMTI間の距離が重要であることが分かった。本結果は、規則的に磁性原子が配列したFMTI系でのスキルミオンの存在を初めて系統的に明らかにした結果である。(物質材料研究機構との共同研究)

Bi₂Se₃における非対称光照射による非相対称電流

トポロジカル絶縁体におけるヘリカルスピン構造を用いて、スピン流と電流の非相対称流を作り出す研究が近年盛んに行われている。その多くが円偏光ガルバニック効果(CPGE)を用いたものである。我々は、トポロジカル絶縁体であるBi₂Se₃に対して円偏光の遠赤外光(波長1550nm)を照射して生じる光電流の偏光依存性を観測した。すると垂直入射でも円偏光依存電流が観測され、これはCPGEでは説明できないことが明らかとなった。また試料端への光照射でその現象が顕著に増大することが分かった。これは試料端において生じるスピンの励起と逆スピンホール効果によって生じる渦電流の非対称性に起因すると考えられ、試料端だけではなく構造が非対称であっても生じうる普遍的な非相対称電流である。本研究は光を照射して円偏光を変化させるだけで逆スピンホール効果を生じうることを明らかにし、将来のフォトリクススピンデバイスへの応用可能性を示した。

超伝導/トポロジカル結晶絶縁体ヘテロ構造の伝導

トポロジカル結晶絶縁体の表面状態を超伝導にすると発生すると期待されるマヨラナ準粒子のゼロエネルギー状態(マヨラナゼロモード)を探索するため、s波超伝導体であるSnとトポロジカル結晶絶縁体であるSnTeのヘテロ構造を分子線エピタキシー法で作成し、伝導特性をPPMS装置で*ex situ*測定した。RHEED観察によって、SnTe(111)表面上ではSnは7原子層厚までα-Snの形で成長し、超伝導転移を示さないが、それより厚くなるとβ-Snとなり、2K程度で超伝導転移を起こした。今後、この超伝導特性を明らかにするため、4端子プローブによるトンネル分光測定を行い、さらにSnTeをPb_{1-x}Sn_xTeに拡張してPb/Sn組成比を変えると起こるトポロジカル転移の影響を明らかにする。

SnSe₂での弱反局在

非遷移金属のダイカルコゲナイドであるSnSe₂は、バルク結晶ではトリピアルな結晶であるが、原子層の極薄膜では基板の影響や対称性の破れのため、超伝導転移やCDW転移など興味深い相転移を示すことが知られている。本研究では、Si(111)基板表面上に約10ユニット層厚のSnSe₂を成長させ、Al₂O₃キャップ層を付けてPPMS装置による*ex situ*伝導測定を行った結果、弱反局在を示すことを見出した。これは、この物質のバルク結晶では顕著でなかったスピン軌道相互作用が原子層薄膜で増強されることに起因すると考えられる。

Cu-ドーピング SnSe₂ 超薄膜の磁性と伝導

SnSe₂ の原子層超薄膜は超伝導転移を起こし、それに4%程度のCuをドーピングすると反強磁性を示すことが理論的に示されている。反強磁性は高温超伝導に関係が深いので、本研究では Sn_{1-x}Cu_xSe₂ の原子層を Si(111) 基板上に作成して、その伝導特性を調べている。分子線エピタキシー法によって成長させるとユニット層ごとに層状成長することが RHEED 観察から明らかとなった。また、伝導測定からトポロジカルホール効果とみられる現象を見出した。さらに、液体イオンゲート法を利用してフェルミ準位を調整しながら PPMS 装置で *ex situ* で伝導特性を測定した結果、4 K 近傍から超伝導らしき抵抗の急激な減少を示した。今後、ドーピングレベルと転移温度の関連を系統的に調べる計画である。

Cu₂Si 単ユニット原子層での弱反局在

電子波の量子干渉効果である弱反局在効果 (WAL) は、3次元トポロジカル絶縁体やディラック半金属、ワイル半金属などで観測される興味深い物理現象である。Cu₂Si 単ユニット層は2次元ディラックノーダルライン (DNL) 物質であることが理論計算および ARPES 観測から示されていることから、WAL の観測が期待されている。本研究では半導体 Si(111) 基板上に Cu₂Si 単原子層を作製し、超高真空中でその場 (*in situ*) 電気伝導測定した結果、面直磁場の増加に伴って伝導度が減少するという WAL に特有の振る舞いが観測された。温度 15 K 以下では WAL の理論式によるフィッティングが可能であり、伝導チャネル数や電子コヒーレンス長が昇温により減少することが示された。また、DNL が消失したと思われる試料では WAL が観測されなかったことから、DNL 由来の WAL である可能性が示唆された。今後は理論計算により DNL の電気伝導への寄与を明らかにし、WAL 発現のメカニズムを解明したい。

SiC 上グラフェンにおける Ca インターカレート誘起超伝導

炭素原子による2次元物質グラフェンが2層重なる場合、その層間に原子や分子を挿入 (インターカレート) することで超伝導を誘起させることができる。これまで Ca インターカレート2層グラフェンではインターレイヤーバンドによる超伝導とされていたが、他の電子構造由来の可能性を排除できていなかった。さらに積層構造についても新たな事実が明らかになり、正確な積層構造モデルに基づいた超伝導の議論が求められている。本研究では、試料作成過程での積層構造・電子状態・電気伝導特性を系統的に調査した。作製過程で SiC 基板と強く結合しているバッファ C 層が遊離されて擬フリースタンディンググラフェン層となること、それによって単層グラフェンが2層となり、その層間にインターカレート誘起超伝導が発現することが示された。Ca が

グラフェン表面に吸着しているだけでは超伝導にならないこと、Li 原子のインターカレートでも超伝導にはならないことを明らかにし、超伝導の起源となる電子状態についても考察を深めた。今後は超伝導エネルギーギャップの直接観測や、理論計算による構造モデルの検証および超伝導発現機構の解明に取り組む。(東京大学物性研究所、東京工業大学との共同研究)

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,f 電子軌道を持つ金属原子をグラフェン層間に挿入すると、金属原子とグラフェンの π -軌道との相互作用が生じ、強磁性が発現されることが理論的に示唆されている。昨年、本研究室では 4f 電子軌道をもつ常磁性の Yb を 6H-SiC(0001) 基板を Ar 大気中で通電加熱して得られるグラフェン/SiC 上に蒸着・加熱処理すると明瞭な異常ホール効果を観測することに成功した。本研究では、Yb による強磁性を確かめるため、Yb を SiC 上グラフェンにインターカレートさせた試料を系統的に作製し、それらの電気伝導・ホール測定・SQUID での磁化測定を行った。その結果、Yb インターカレート SiC 上グラフェンのほぼすべての試料において保磁力をもつヒステリシスループが再現され、最高で 101 K の T_c が確認された。これは金属原子をインターカレートさせたグラフェンにおいて強磁性を観測した初の成果である。一方、グラフェンを作成しない SiC 結晶表面上に Yb を蒸着した試料の SQUID 測定結果では強磁性のヒステリシスが観測されなかった。よって、グラフェンのキャリアが強磁性の発現に寄与している可能性が確認された。

1.1.2 表面・原子層ナノ構造

トポロジカル結晶絶縁体 Pb_{1-x}Sn_xTe:Sb のバンド構造

トポロジカル結晶絶縁体である Pb_{1-x}Sn_xTe は、特に $x > 0.4$ の場合 *p* 型となり ARPES によるバンド構造の観測が困難であると知られている。そこで我々は Sb を 1% ドーピングすることで電子を注入しフェルミ準位を調整し表面バンドが観測できるように試みた。 $\bar{\Gamma}$ と \bar{M} 点においてディラックコーンが存在すると予想されているが、前者では表面状態が現れず、後者では明瞭に観測された。 $\bar{\Gamma}$ 点で消失した理由としては、Sb ドーピングによる表面電位によって対称性が破れ、表面状態が変調を受けてディラック点にギャップが開いたことによると考えられる。また $\bar{\Gamma}$ 点では代わりに価電子帯の顕著なラシュバ分裂が観測され、興味深いことに Sn/Pb 組成比を増大させるに従ってラシュバパラメーターが増加することを見出し、SnTe:Sb は PbTe:Sb に比べ 2 倍以上の値となった。これは有効質量の変化に起因すると考えられる。

SiC 表面上での Cu_2Si 単ユニット層の成長

Si(111) 表面上に成長した Cu_2Si 単ユニット層は 2 次元ディラックノーダルライン (DNL) 物質であるが、その DNL はフェルミ準位 (E_F) より 0.5 eV 程度上に位置する。一方、バルクの Cu(111) 単結晶表面上に成長した Cu_2Si 単ユニット層の DNL は E_F より 0.5 eV 程度下に位置する。そこで DNL のエネルギー位置を制御するために、Cu(111) 超薄膜を SiC(0001) 基板結晶表面上に成長させ、その上に Si を蒸着して Cu_2Si 単ユニット層を作成することを試みた。SiC(0001)- 3×3 表面構造上でもっとも平坦な Cu(111) 膜が成長すること、その上に Si を蒸着すると Cu_2Si 単ユニット層に対応する $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造が形成されること、さらに Si を蒸着すると 3×3 表面構造になることを RHEED および STM 観測によって明らかにした。しかし、今のところ平坦な Cu(111) 連続膜は 15 原子層厚程度以上で形成されるので、Cu 膜の電気伝導が支配的となり Cu_2Si 単ユニット層の伝導特性を検出するまでに至っていない。(上海交通大学との共同研究)

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による Bi 結晶の物性研究

ピスマス Bi はキャリア濃度が極めて低い半金属であり、スピン軌道相互作用も極めて強く、様々な量子現象を示すために、研究の歴史が長いにもかかわらず今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜は量子井戸状態となるため、膜厚によりバンド構造が半金属的-半導体的に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はある。そこで、Si(111) 面に成長した Bi(111) 結晶薄膜でのテラヘルツ光・強磁場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有効質量の膜厚依存性を明らかにする実験を行っている。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なので、今後は Sb ドープ系での有効質量やキャリアの変化などを明らかにしていく。(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* 電気伝導・エネルギー分光同時測定装置の開発

超伝導の非従来性を検証する際、超伝導ギャップの大きさやその対称性といった情報が得られるトンネル分光は有力な方法である。当研究室では超高真空 *in situ* 4 端子電気伝導測定を行って超伝導試料に関する研究を進めてきたが、同時に超伝導ギャップ

の形状などを調べることは出来なかった。また、電気伝導と別にトンネル分光測定が行われることは多くあったが、同一試料・同一箇所において測定が行われた例は報告されていない。そこで、*in situ* での電気伝導測定と同時にトンネル分光測定もできるようにすることを目指し、既存の極低温超高真空マイクロ 4 端子電気伝導測定装置の改良を行っている。これが実現すれば大気暴露や試料間の差異の影響を完全に除いた上で多角的に超伝導試料の物性を調べることができるようになり、確度の高い情報が得られると期待される。本年度は回路の改良および測定用プログラムの作製を行い、ノイズを軽減するために装置への配線を見直す作業を進めてきた。今後は In/SnTe 接合系などトポロジカル超伝導体の候補物質の測定を行い、その非従来性の検証を行っていきたい。

超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外線照射装置の開発

電子スピンを利用するスピントロニクスでは光と物質の相互作用を利用する。円偏光は物質中の電子をスピン選択的に励起することができるので、トポロジカル物質でのスピン運動量ロッキングのために、円偏光を用いた非相反伝導現象の研究が近年注目されている。本研究室では超高真空装置内で試料を作成し、その場 (*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のビューポートにより円偏光は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パーと光学系を設計し、製作に取り掛かっている。また、トポロジカルエッジ状態への高効率なスピン注入には高輝度 (高エテンデュ) 光源が必要であり、中赤外から赤色のレーザーが最適であることが判明した。必要な部品を揃え、各々の動作確認と微調整を行っている。この設計では $2 \sim 18 \mu\text{m}$ と広い波長範囲での中赤外光に対応した円偏光・直線偏光が生成できるので、様々な励起エネルギーに応じた円偏光誘起電流・スピン流が測定できると期待できる。

Lateral-ToF 法による移動度の評価方法の開発

半導体デバイスの高密度化・高速化に伴い、表面・界面を伴う微細構造における移動度の向上は重要な課題となっている。とくに、フラッシュメモリ等の高度に集積されるデバイスでチャンネル材料として用いられる多結晶シリコンは代替が利かない素材であるにも関わらず移動度が低く、デバイス開発においてボトルネックとなっている。多結晶シリコンの移動度向上のために、パルスレーザーを用いた面内方向飛行時間 (Lateral-ToF) 型の移動度測定手法の開発と検証を行っている。本年度には測定システムの製作と検証を行い、ToF 移動度と FET 移動度のある程度の一致を確認した。今後は各種試料について測定を行い、薄膜多結晶シリコンの移動度低下の要因を探りたい。

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) 「スピン輸送現象の実空間その場観察手法の開発」(代表 保原麗)

<受賞>

- [1] 遠山晴子：“フリースタンディング 2 層グラフェンにおける Ca インターカレート誘起超伝導”，東京大学低温科学研究センター第 12 回研究交流会 ベスト・ポスター・アワード，2021 年 3 月 11 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Di Fan, Rei Hobara, Ryota Akiyama, and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator Bi_2Se_3* , *Physical Review Research* **2**, 023055 (Apr, 2020).
- [3] Y. C. Lau, R. Akiyama, H. Hirose, R. Nakanishi, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa, M. Hayashi: *Concomitance of superconducting spin-orbit scattering length and normal state spin diffusion length in W on $(Bi,Sb)_2Te_3$* , *Journal of Physics: Materials* **3**, 034001 (Apr, 2020).
- [4] H. Huang, H. Toyama, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobar, R. Akiyama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconducting proximity effect in a Rashba-type surface state of $Pb/Ge(111)$* , *Superconductor Science and Technology* **33**, 075007(8pp) (Jun, 2020).
- [5] N. Fukui, R. Hobar, A. Takayama, R. Akiyama, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Scattering of topological surface-state carriers at steps on surfaces*, *Physical Review* **B** 102, 115418 (Sep, 2020),

(国内雑誌)

- [6] 遠藤由大、高山あかり、長谷川修司：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, *Isotope News* (日本アイソトープ協会) No. 771, pp. 15-18 (Oct, 2020).
- [7] 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：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, *陽電子科学* **16**, 11-17 (Jan, 2021) (日本陽電子科学会)

(著書)

- [8] 長谷川修司：トポロジカル物質とは何か 最新・物質科学入門，講談社ブルーバックス (Jan, 2021)

(その他)

- [9] 長谷川修司：公益社団法人の発足にあたり，公益社団法人物理オリンピック日本委員会ホームページ (Apr, 2020) (<http://www.jpoh.jp/jpho/20200401-ChairRemarkatKoekiShadan.pdf>)
- [10] 長谷川修司：考える実験 国際物理オリンピック 2006 の実験問題，*日本物理学会誌* **75** (9), 576-579 (Sep, 2020).
- [11] 長谷川修司、東辻浩夫：ヨーロッパ物理オリンピック 2020 オンライン大会に参加，*大学の物理教育* **26** (3), 128-132 (Nov, 2020).
- [12] 長谷川修司：長谷川修司：巻頭言：男女共同、ダイバーシティ、コロナ禍、表面と真空 **64**(3), 109 (Mar, 2021).

(学位論文)

- [13] FAN Di: *Helicity dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials* (博士論文).
- [14] 樋渡功太: 表面界物質の作成と物性 (修士論文).
- [15] 鄭 帝洪: *SiC 上 Yb 修飾エピタキシャルグラフェンにおける強磁性の発現とその特性* (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [16] R. Akiyama: *Emergence of correlated surface states in topological Hall effect in the self-assembling magnetic sandwich topological insulator structure*, The 5th Joint Symposium 2020 between Tsinghua University and The University of Tokyo "Trans-scale Materials Science", 2020 年 12 月 22 日, Online.

一般講演

- [17] Haruko Toyama, Ryota Akiyama, Rei Hobar, Kota Hiwatari, Shunsuke Sato, Ibuki Taniuchi, Shengpeng Liu, Kentaro Nomura, Shuji Hasegawa: *Observation of weak antilocalization in $Cu_2Si/Si(111)$ by in-situ transport measurement*, Summer School "Design and Synthesis of Quantum Materials" of the IMPRS & MPI-UBS-UTokyo Center, 2020 年 9 月 28 日, Online.
- [18] 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: *Electrical observation of magnetic skyrmions in ferromagnetic topological insulator $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3/Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$* , Summer School "Design and Synthesis of Quantum Materials" of the IMPRS & MPI-UBS-UTokyo Center, 2020 年 9 月 28 日, Online.

(国内会議)

招待講演

- [19] 長谷川 修司：空間反転対称性の破れた原子層超伝導の実験的研究, 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), 2021年3月11日, オンライン.
- [20] 長谷川修司：コロナ禍における国際物理オリンピック派遣のための日本代表選手の選抜および育成, (シンポジウム新型コロナ禍中の物理教育・人材育成), 応用物理学会春季学術講演会, 2021年3月19日, オンライン.

一般講演

- [21] 高城 拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 中西亮介, 佐藤瞬亮, 平原徹, 深澤拓朗, 佐々木泰祐, 宝野和博, 遠山晴子, 樋渡功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川 修司：自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体を含むサンドイッチ構造におけるスキルミオンの電氣的観測, 第12回低温科学研究センター研究交流会, 2021年3月11日, オンライン.
- [22] 遠山 晴子, 秋山了太, 佐藤瞬亮, 遠藤由大, 保原麗, 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：フリースタANDING 2 層グラフェンにおける Ca インターカレート誘起超伝導 (ベスト・ポスター・アワード), 第12回低温科学研究センター研究交流会, 2021年3月11日, オンライン.
- [23] Liu Shengpeng, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司, W. X. Zhang, J. Z. Zhang, C. Liu : $Cu/SiC(0001)$ 上に成長したディラックノーダルライン物質 Cu_2Si の結晶成長とその評価, 日本物理学会第76回年次大会, 2021年3月14日, オンライン.
- [24] 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：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, 日本物理学会第76回年次大会, 2021年3月15日, オンライン.
- [25] 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, V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司：磁性/非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, 2020年日本表面真空学会学術講演会, 2020年11月20日, オンライン.
- [26] 長谷川修司, 岸澤眞一, 佐藤誠, 植田毅, 一宮彪彦, 味野道信, 物理チャレンジ実行委員会各部会：大きく変わった物理チャレンジ2020, 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 2020年9月10日, オンライン.
- [27] 松本 益明, 中屋敷 勉, 東辻 浩夫, 栗原 進, 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, 波田野 彰, 吉岡 大二郎, 真梶 克彦, 安藤 静敏, 毛塚 博史, 近藤 泰洋, 呉屋 博, 佐藤 誠, 鈴木 功, 並木 雅俊, 長谷川 修司, 橋 拓豊, 福澤 昂汰, 吉田 智治, 小宮山 智浩, 中江 優介, 渡辺 明大, 石井 敬直, 氏野 道統, 大倉 拓真, 岸本 竜太, 喜田 輪, 永 壮真, 西 幸太郎, 松下 謙太郎,

吉見 光祐, 北原 和夫：第51回国際物理オリンピック (IPhO)2020 および第4回ヨーロッパ物理オリンピック (EuPhO)2020 に向けた研修報告, 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 2020年9月10日, オンライン.

- 日本物理学会 2020 秋季大会, 2020年9月8日-11日 (オンライン)

- [28] 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：強磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3/Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/Si(111)$ のフェルミ準位制御による電気伝導特性変調, 9月9日 (9aD1-3).
- [29] 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： $EuS/SnTe$ 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, 9月9日 (9aD1-4).
- [30] 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： Yb インターカレートグラフェン/ SiC の磁気特性, 9月11日 (11pD1-11).
- [31] 樋渡功太, 秋山了太, 谷内息吹, 宮内恵太, 保原麗, 長谷川修司： Ca, Li 修飾された原子層青リンの電気伝導特性, 9月11日 (PSJ-1).
- [32] Yuxiao Guo, 秋山了太, 長谷川修司： *Exploring the structure and transport properties at $Sn/SnTe(111)$ structure*, 9月11日 (PSJ-7).
- [33] 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： その場電気伝導測定による $Si(111)$ 表面上 Cu_2Si 単原子層における弱反局在の観測, 9月11日 (PSJ-11).
- [34] 中屋敷勉, 東辻浩夫, 栗原進, 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, 波田野彰, 吉岡大二郎, 松本益明, 真梶克彦, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 呉屋博, 佐藤誠, 鈴木功, 並木雅俊, 長谷川修司, 橋拓豊, 福澤昂汰, 吉田智治, 小宮山智浩, 中江優介, 渡辺明大, 石井敬直, 氏野道統, 大倉拓真, 岸本竜太, 喜田輪, 永 壮真, 西幸太郎, 松下謙太郎, 吉見光祐, 北原和夫：第51回国際物理オリンピック 2020 に向けての研修報告, 9月11日 (11pN1-4).

(セミナー)

- [35] 長谷川修司：(公社)日本表面科学会と(一社)日本真空学会の合併により(公社)日本表面真空学会を設立するまで, (公社)日本工学会 第5回事務研究会, 2020年9月15日, オンライン.

(講義等)

- [36] 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), 2020年度夏学期(オンライン).
- [37] 長谷川修司, 秋山了太, 高城拓也 (TA), 佐藤瞬亮 (TA), 谷内息吹 (TA)：物理学実験II (学部3年生) 電子回折, 2020年度冬学期(本郷).

(アウトリーチ)

- [38] 北原和夫、長谷川修司、西口大貴、村下湧音: 公開講座「東京理科大学 坊ちゃん講座」 科学オリンピックに参加しよう: 物理オリンピックに始まる大飛躍!, 2020年9月19日, 東京理科大学(オンライン講座).
- [39] 長谷川修司、増子寛: 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2020年11月7日, 花園中学・高等学校(京都).
- [40] 長谷川修司: 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2021年2月27日, 栃木県立宇都宮女子高等学校(栃木); 2021年3月20日, 栃木県立大田原高等学校(栃木).

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 electronic/spin transports:

- Anomalous Hall effect and topological Hall effect due to skyrmions at interfaces/heterostructures between topological insulators and ferromagnetic materials
- 2D superconductivity at monolayer alloy metallic surface superstructures and by proximity effect
- Weak anti-localization at a two-dimensional Dirac nodal line system and non-transition-metal dichalcogenide atomic layers
- Spin injection by circularly polarized light irradiation on topological insulators
- Superconducting Graphene and ferromagnetic Graphene with metal intercalation

(2) Surface phases and atomic-layer materials:

- Epitaxial growth of Dirac nodal line material Cu_2Si atomic layers and topological crystalline insulators

(3) New methods:

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling-spectroscopy capability
- Fabrication of a UHV system with polarization-controlled mid-infrared irradiation
- Lateral-ToF system with pulsed laser for carrier mobility measurements

- [1] Di Fan , Rei Hobara, Ryota Akiyama , and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator Bi_2Se_3* , Physical Review Research **2**, 023055 (Apr, 2020).
- [2] Y. C. Lau, R. Akiyama, H. Hirose, R. Nakanishi, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa, M. Hayashi: *Concomitance of superconducting spin-orbit scattering length and normal state spin diffusion length in W on $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$* , Journal of Physics: Materials **3**, 034001 (Apr, 2020).
- [3] H. Huang, H. Toyama, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobara, R. Akiyama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconducting proximity effect in a Rashba-type surface state of $\text{Pb}/\text{Ge}(111)$* , Superconductor Science and Technology **33**, 075007(8pp) (Jun, 2020).
- [4] N. Fukui, R. Hobara, A. Takayama, R. Akiyama, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Scattering of topological surface-state carriers at steps on surfaces*, Physical Review **B** 102, 115418 (Sep, 2020),