

1.1 長谷川研究室

9月にはGUO Yuxiaoが博士課程を修了し、中国に帰国して就職した。3月には皆川遼太郎が修士課程を修了し、指導教員の定年までの年限制限のため中辻研究室に移籍して博士課程に進学した。

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、非相反光電流などの研究である。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

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

$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ (略してPST) は、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であり、(111)面は $\bar{\Gamma}$ 点に1個、 \bar{M} 点に3個の計4つのDirac錐がある。この性質により $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ (略してBST) などの Z_2 型トポロジカル絶縁体(TI)で観測されている量子異常ホール効果(QAHE)よりもチャンネル数の大きい量子化抵抗値の実現が理論的に予測されているが、まだ観測には至っていない。本研究で Z_2 型TIでQAHE観測温度が向上した事例に倣い、CrをBST層に変調ドーブした層でPST層を挟むサンドイッチ構造試料作製し、QAHE観測を目指した。これまでRHEEDとXRDにより狙い通りの試料が作製できていることを確認し、SQUIDにより強磁性が発現していることも確認できた。またQAHEを目指す上で重要なバルク絶縁性が最も向上するPb/Sn比と膜厚を明らかにした。今後、より低温におけるホール効果測定やゲート電圧の印加によりフェルミ準位を精緻調整することで初の多チャネルQAHE観測を目指す。

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の観測

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を持つ電子がそれぞれ逆方向に偏向さ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てスピン注入することでスピン流を簡便に発生させ、それを電氣的に検出す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 $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Tl,Sn})$ 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、試料の右端と左端で非相反光電流の流れる方向が反転する光電流が観測され、光誘起逆スピンホール効果(PISHE)を示唆した。しかし、円偏光を斜め入射するとこの光電流が増大し、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。この現象の解釈は困難を極めたが、円偏光フォンドラッグ効果(CPDE)の原理を参考にしてスピン軌道相互作用による歳差運動でスピンの面内・面直変換というモデルを立てることで説明できた。今後はバンド分散の条件に加え、原子層物質内でのスピンの動きについて調査していく。

トポロジカル超伝導体の水素修飾の影響

トポロジカル超伝導体は、物質の表面や端に現れるマヨラナ粒子を持つ新しい量子状態を伴う超伝導である。その代表的な候補物質として $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ と Pb/TlBiSe_2 が知られているが、超伝導転移温度 T_C はそれぞれ3.8 Kと10 Kとまだ低い。一方、最近トポロジカル超伝導体として報告されている $\text{Fe}(\text{Se,Te})$ は、最も高い超伝導転移温度 ~ 14 Kを持つ。また、これはファンデルワールス物質であるため、表面への吸着以外に、層間へ原子や分子のインターカレーションも期待される。我々は、 $\text{Fe}(\text{Se,Te})$ 結晶を真空中で劈開し、水素やアルカリ金属で修飾することにより、デバイ周波数とキャリア密度を増加させ、 T_C を向上させた。独立駆動4探針プローバーにより電気抵抗を超高真空中でその場測定したところ、水素曝露により T_C は10.2 Kから12.3 Kに上昇した。我々は、条件を最適化することにより、 T_C のさらなる向上を目指している。今後は水素以外の元素修飾による変化を見ることでキャリア密度とデバイ振動数への影響を分離したい。(低温科学研究センターとの共同研究)

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 上での α -Sn 原子層の成長と超伝導の発現

バルク結晶の α -Snは超伝導体ではないが、数原子層厚の超薄膜にすると $\text{PbTe}(111)$ 上で超伝導になると報告されていた。我々はこれを受けて、同じ結晶系で格子定数だけ若干異なるトポロジカル結晶絶縁体SnTeに注目し、この表面上に数原子層の α -Snができればトポロジカル超伝導の候補になると考え研究

を行った。まず低温で SnTe の上に Sn を蒸着し、その後アニールをすることで平坦な単結晶の数層 α -Sn が成長できることを見出した。さらに、 α -Sn の層数が 3 を超えるとパウリ限界を超える 2 次元超伝導となることを発見し、その磁場角度依存性から 2 次元性を持つことが分かった。また 3 層厚ではこのバンドは ARPES から確認でき、面内臨界磁場の温度依存性は KLB 理論で説明され、スピン軌道散乱の強い超伝導であることも分かった。また本系はトポロジカル結晶絶縁体と超伝導の接合系となっており、両者のバンドは混成しているため、マヨラナ粒子の発現が期待されるトポロジカル超伝導が実現できる可能性がある。(物質・材料研究機構との共同研究)

Yb インターカレートグラフェンの超伝導と強磁性の発現

グラフェン層間に金属原子をインターカレートすると積層構造および電子構造が大きく変化し、様々な物性を変調できる。Yb 原子をインターカレートしたグラフェンにおいて強磁性が観測されたことを既に当研究室から発表しているが、この系では超伝導の発現も理論的に予測されていた。

SiC 基板上に作製したグラフェンを加熱しながら Yb 原子を蒸着することで Yb をグラフェン層間にインターカレートすることができ、挿入された Yb 原子がグラフェンに対して $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の周期に配列することを電子回折によって確認した。さらにこの試料に対して超高真空中 *in situ* で電気伝導測定を行ったところ、オンセットの転移温度が 1.6 K の超伝導を観測することに成功した。また、磁場印加によって、Berezinskii-Kosterlitz 転移を確認した。

一方、Yb インターカレートグラフェンの異常ホール効果を *ex situ* で測定した結果、キュリー温度が約 100 K の強磁性を示すことも示されていたが、その原因を探るため、放射光施設 SPring-8 において内殻光電子分光法および光電子回折法の測定を行ったところ、Yb²⁺ のほかに Yb³⁺ の成分が確認され、Yb³⁺ の開殻状態によって強磁性が発現している可能性が示唆された。(奈良先端大学との共同研究)

高濃度ドーパ表面層の電気伝導特性の解析

パワーデバイスの素材として有用なワイドギャップ半導体が近年注目されている。特に SiC は大型単結晶の作成が容易になったこともあり、ダイオードやトランジスタなどドーピングの単純な半導体としては利用がすすんでいる。IC などより高度なデバイス作成のためには、部分的なドーピングや濃度勾配のあるドーピングなど、複雑なドーピングが必要となるが、SiC は化合物半導体ということもあり、現状では困難である。

ギガフォトン株式会社はレーザー技術を用いて SiC 表面近傍に大量の窒素をドーピングすることに成功したが、ドーパントとしての特性は不明であった。

我々は、このレーザードーパ SiC の表面近傍の詳細なキャリア輸送特性の測定・解析を行った。高濃度にドーパされた窒素からのキャリアは縮退半導体となるほど高濃度になっており、表面近傍は金属的になっていた。また、キャリアの伝導度は想定よりも 10 倍以上低く、移動度が低下していることが示唆された。(ギガフォトン株式会社との共同研究)

ホウ化水素フレークの電気伝導測定

我々はホウ化水素 (HB) シートの電気伝導性に注目し、伝導測定を試みている。HB シートは MgB₂ から Mg を水素置換して合成するので、大きさ数 μm 程度の微小なフレークとなる。このため、通常のプローバや伝導測定装置では測定できない。当研究室が保有する 4 探針プローバをもちいることで、この微小なフレークの電気伝導測定が可能となった。本年度はフレークの最適な滴下条件を探し、伝導性を示すフレークが存在することを確認した。来年度はフレークの多探針測定を行い、さらに極低温まで冷却することでその伝導メカニズムや超伝導性を検証する。(物性研究所との共同研究)

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による BiSb 薄膜結晶の物性研究

Bi は固体物理学の発展と共にあったほどに研究の歴史の長い物質であるが、今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜は内部の伝導電子の閉じ込め効果によって量子井戸現象を示し、膜厚によりバンド構造が半金属・半導体転移を起こすことが報告された。また、その表面電子状態は、ラシュバ効果によってスピン分裂していることを当研究室で示した。また Sb との合金化によってバンド構造が複雑に変化し、トポロジカル絶縁体にも転移することが知られている。そこで、Si(111) 面に成長した Bi_{1-x}Sb_x(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バンド構造の変化を明らかにする研究を行っている。昨年度の分光実験では Bi 単結晶膜では初めてとなる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が得られた。現在ではさらに膜厚、Sb 置換量を細かく振った試料群を作成し終え、膜厚・Sb 置換による価電子帯・伝導帯の重なりの変化を追っている。(物質・材料研究機構との共同研究)

1.1.2 新しい装置・手法の開発

サブケルビン・マイクロ 4 端子伝導装置でのショット雑音の測定

本研究室ではこれまでにサブケルビンまで冷却可能な超高真空マイクロ 4 端子伝導測定装置によ

てさまざまな2次元系の超伝導を発見してきたが、近年注目される非従来型超伝導を観察・解明するには伝導測定だけでは不十分である。そこで、伝導測定と同時にトンネル分光測定、さらにはショット雑音を測定することでキャリアの詳細を測定できる装置にするべく、装置の大幅改造を始めている。本年度はショット雑音測定のために必要な事項を洗い出し、その製作および部品の発注を開始した。具体的には内部除振機構の追加、マイクロ4端子ホルダーの改良、移送機構改良を製作した。来年度は、ショット雑音測定用「ライデンアンプ」を設置して装置全体の組み立てを行い、トンネル分光測定およびショット雑音測定を実現する予定である。

スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術分野であるスピントロニクスの研究が盛んであるが、現在は、微細加工技術によって基板上にスピン流の生成回路や測定回路を作りこむ手法が主流である。しかし、この手法では微細加工で作成できる試料しか測定できず、トポロジカル絶縁体など特異なスピン伝導特性を持つことが期待される試料を測定することが困難な場合も多い。このため、本研究室では、原子間力顕微鏡 AFM や走査トンネル顕微鏡 STM、多端子プローバーに搭載でき、任意の場所でスピン流の生成・測定ができるスピン注入プローブの開発を行ってきた。本年度は、去年に引き続きスピン圧を直接測定できるプローブの製作を行っている。空間分解能とスピン分解能を両立する素子としてグラフェンが候補にあり、微細加工に耐えるグラフェン素子の製作を行った。

超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外光照射系の開発

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、光を真空装置内に導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パーと光学系を製作し、既存のチャンパーに接続した。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、2~9 μm 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光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ッシュバ効果の典型的なエネルギー分裂幅である 100~300 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が、光学系チャンパー内の真空度が不十分なので、その改善に努めている。2024 年度内には本

装置を稼働させて実験する予定である。

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) 「4 探針プローブでの量子ショット雑音測定によるボーズ金属の直接検出」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 科研費 学術変革領域研究 (A) 「軽元素添加によって実現する界面超伝導の転移温度高温化」(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」(代表 保原麗)

<受賞>

- [1] 谷内 息吹; *Helicity-dependent photocurrent induced by circularly polarized infrared light at atomic bilayer superstructure $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Tl}, \text{Sn})$* , 2023 年日本表面真空学会学術講演会講演奨励賞スチューデント部門, 2023 年 12 月 8 日.
- [2] 谷内 息吹; 原子層表面超構造 $(\text{Tl}, \text{Sn})/\text{Si}(111)$ における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流, 日本物理学会第 78 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 4), 2023 年 10 月 27 日.
- [3] 佐藤 瞬亮; 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, 日本物理学会第 78 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 9), 2023 年 9 月 17 日.
- [4] 長谷川 修司; 超高真空中 4 探針電気伝導計測法の開発と表面・ナノ電子輸送研究, 応用物理学会第 17 回 (2023 年度) フェロー表彰, 2023 年 5 月 11 日.
- [5] 谷内 息吹; 巨大ラッシュバ効果表面超構造合金における円偏光フォトガルバニック効果, 日本表面真空学会関東支部 2023 年度学術講演大会講演優秀賞, 2023 年 4 月 14 日.

<報文>

(原著論文)

- [6] 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 topological domain walls driven by lithium intercalation in graphene*, Nature Nanotechnology **18**, 1154-1161 (Jul, 2023).
- [7] 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: *Revealing the hidden spin-polarized bands in a superconducting Tl bilayer crystal*, Nano Letters **23** (16), 7675-7682 (Aug, 2023).

- [8] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobarra, and S. Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, under review (<https://arxiv.org/abs/2308.02485>).

(総説)

- [9] S. Hasegawa: *Surface and Interface Physics Driven by Quantum Materials*, APEX Review, under review.

(国内雑誌)

- [10] 秋山了太: 室温ウェットニング層形成法による原子層レベルで平坦な SnTe(001) 薄膜の成長とその電気伝導測定談話室 (受賞者紹介), 表面と真空 **66** (8), 496 (Aug, 2023).
- [11] 高城拓也: 強磁性トポロジカル絶縁体を用いた超薄膜における新奇磁気構造の発見 (談話室: 新博士登場), 表面と真空 **67** (3), 132 (Mar, 2024).

(その他)

- [12] 長谷川修司: 全国物理コンテスト「物理チャレンジ」から国際物理オリンピックへ, じっしょう理科資料 **93**, 20-23 (実教出版, April, 2023).
- [13] 長谷川修司: 物理学会のほどよいサイズは? 会長就任にあたり, 日本物理学会誌 **78** (4), 177, 巻頭言 (April, 2023).
- [14] 長谷川修司: ベテラン会員諸氏, 大会では英語で一般講演をしよう!, 日本物理学会誌 **79** (1), 1, 巻頭言 (Jan, 2024).
- [15] 長谷川修司: 基礎講座: 今聞こう、魅力的な予算申請の執筆方法, 応用物理、印刷中 (Jul, 2024).

(学位論文)

- [16] GUO Yuxiao: *Fabrication of α -Sn(111)/SnTe(111) heterostructures and exploration of their electronic band structures and electrical transport properties* (博士論文).
- [17] 皆川遼太郎: トポロジカル結晶絶縁体 $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ ベースの磁性ヘテロ接合における構造・電気伝導・磁気特性 (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [18] S. Hasegawa: *Quantum materials, their structures, electronic states, and electronic transport*, MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 物性研 (柏), 2023 年 12 月 13 日.
- [19] R. Akiyama: *Superconductivity emergence by atomic intercalation of Ca and Yb into few-layer graphene*, The 9th TsinghuaU - UTokyo Joint Symposium on Trans-scale Materials Science, (Nov. 9, 2023). Hongo, University of Tokyo, 2023 年 11 月 9 日.

- [20] S. Hasegawa: *Graphene with Intercalation of Foreign Atoms*, The 3rd IBS Conference on Surface Atomic Wires and The 2nd IBS-RIKEN STM Workshop, Gyeongju (Korea), 2023 年 8 月 23 日.

- [21] S. Hasegawa: *Quantum Materials boost quantum technology* (Plenary), International Workshop on Advanced Quantum Materials 2023, Aix-Marseille University, Marseille (France), 2023 年 6 月 7 日.

一般講演

- [22] Y. Endo, X. Yan, M. Li, R. Akiyama, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobarra, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov, and W.-X. Tang: *Graphene with Intercalation of Li Atoms*, International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices in Winter 2024 (ALC-W 2024), Furano (Japan), 2024 年 1 月 19 日.

- [23] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobarra, S. Hasegawa: *Effect on superconducting transition temperature of topological superconductor $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ modified with light elements*, MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 物性研 (柏), 2023 年 12 月 12 日.

- [24] S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, Y. Miyai, Y. Kumar, A. Kumar, J. Jehong, S. Ideta, K. Shimada, S. Hasegawa: *Emergence of superconductivity in few-layer Yb-intercalated graphene*, MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 物性研 (柏), 2023 年 12 月 12 日.

- [25] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobarra, S. Hasegawa: *Circular photogalvanic effect in monolayer surface superstructures with huge Rashba-splitting*, International Conference on Complex Orders in Condensed Matter: Aperiodic order, local order, electronic order, hidden order, Evian (France), 2023 年 9 月 29 日.

- [26] S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, J. Jung, R. Hobarra, S. Hasegawa: *Electronic structure and electronic transport properties of Yb-intercalated epitaxial graphen*, International Conference on Complex Orders in Condensed Matter: Aperiodic order, local order, electronic order, hidden order, Evian (France), 2023 年 9 月 28 日.

- [27] R. Akiyama, S. Kaneta-Takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi and S. Hasegawa: *Atomically flat SnTe(001) thin films made by the room temperature wetting layer method and its electrical transport properties*, International Conference on Complex Orders in Condensed Matter: Aperiodic order, local order, electronic order, hidden order, Evian (France), 2023 年 9 月 27 日.

(国内会議)

招待講演

- [28] 長谷川修司: 量子物質表面の構造・電子状態・電子輸送, 表面界面スペクトロスコーピー 2023, 物性研究所 (柏), 2023 年 12 月 21 日.

一般講演

- [29] 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: *Real-time LEEM observation of Li-intercalation into graphene*(領域 9), 日本物理学会春季大会(オンライン), 2024年3月19日.
- [30] 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: *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*(領域 4), 日本物理学会 2024 年春季大会(オンライン), 2024年3月18日.
- [31] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 上園優, 大塚匠, 渡辺孝夫, 長谷川修司: *トポロジカル超伝導体 $Fe(Se, Te)$ 薄片への軽元素修飾による影響, 超秩序構造科学第 7 回成果報告会, 岡山大学 50 周年記念館(ハイブリッド), 2024年3月4日.*
- [32] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *トポロジカル超伝導 $Fe(Se, Te)$ 劈開薄片への軽元素修飾による影響*, 第 15 回低温科学研究センター交流会, 武田先端知ビル(東京大学), 2024年2月16日.
- [33] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *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*, 第 15 回低温科学研究センター研究交流会, 武田先端知ビル(東京大学), 2024年2月16日.
- [34] 谷内息吹: *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, 表面界面スペクトロスコピー 2023*, 物性研究所(柏), 2023年12月20日.
- [35] 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: *Yb インターカレートグラフェンにおける超伝導の発現, 表面界面スペクトロスコピー 2023*, 物性研究所(柏), 2023年12月20日.
- [36] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *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, ISSP ワークショップ「表面界面スペクトロスコピー 2023」*, 東京大学物性研究所, 2023年12月20日.
- [37] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *トポロジカル超伝導 $Fe(Se, Te)$ 劈開薄片への軽元素修飾による影響*, ISSP ワークショップ, 東京大学物性研究所, 2023年12月20日.
- [38] 長谷川修司: *グラフェンインターカレーションによる物性発現*, 令和 5 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会『量子物質の制御と機能開拓およびそのデバイス応用』, 奥州秋保温泉(仙台市), 2023年10月27日.
- [39] 宇佐見康継, 妹川要, 納富良一, 柿崎弘司, 保原麗, 長谷川修司: *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*, 第 84 回応用物理学会秋季講演会, 熊本城ホール, 2023年9月21日.
- [40] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Helicity-dependent photocurrent induced by circularly polarized infrared light at atomic bilayer superstructure $Si(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Tl, Sn)$* , 11月2日.
- [41] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Effect of modifying with light elements on properties of a topological superconductor $Fe(Se, Te)$* , 10月31日.
- [42] Y. Guo, R. Akiyama, T. Konoike, S. Ichinokura, Y. Hattori, T. Takashiro, R. Hobara, T. Terashima, T. Hirahara, S. Uji, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity in $\alpha-Sn(111)/SnTe(111)$ heterostructures*, 10月31日.
- [43] Y. Endo, X. Yan, M. Li, R. Akiyama, C.n Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov, W.-X. Tang: *Topological domain walls induced by lithium intercalation in graphene*, 10月31日.
- [44] R. Minakawa, R. Akiyama, Y. Guo, R. Hobara, S. Hasegawa: *Magnetism and electrical transport properties of heterostructures with topological crystalline insulator $Pb_xSn_{1-x}Te$ and magnetic layer $Cr_x(Bi_{1-y}Sb_y)_{2-x}Te_3$* , 10月31日.
- [45] S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, Y. Miyai, Y. Kumar, A. Kumar, J. Jung, S. Ideta, K. Shimada, S. Hasegawa: *Electronic structure and electrical transport properties of Yb-intercalated epitaxial graphene*, 11月1日.
- 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月 16 日 ~19 日, 東北大学.
- [46] 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: *SiC 基板上的 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*(領域 4), 9月16日.
- [47] 皆川遼太郎, 秋山了太, 郭宇嘯, 長谷川修司: *トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_xSn_{1-x}Te$ と磁性層 $Cr_x(Bi_{1-y}Sb_y)_{2-x}Te_3$ のヘテロ接合の磁性と電気伝導特性*(領域 4), 9月16日.
- [48] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *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*(領域 4), 9月19日.
- [49] 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: *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*(領域 9), 9月16日.
- [50] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *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*(領域 9), 9月16日.
- [51] 末元徹, 五十嵐美樹, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 右近修治, 海老崎崎, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 小池洋二, 小林一人, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 佐々田博之, 真梶克彦, 鈴木功, 武士敬一, 西野友年, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 眞砂卓史, 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 2023 報告 : 第 2 チャレンジ実験問題 (領域 13), 9 月 17 日.
- [52] 松本益明, 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, 柴橋博資, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 並木雅俊, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 斎藤輝文, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 長谷川修司, 光岡薫, 竹中涼: アジア物理オリンピック 2023 モンゴル大会報告 (領域 13), 9 月 17 日.
- [53] 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, 柴橋博資, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 並木雅俊, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 斎藤輝文, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 長谷川修司, 松本益明, 光岡薫, 吉見光祐: 国際物理オリンピック 2023 日本大会報告 (領域 13), 9 月 17 日.
- [54] 谷内息吹, 秋山了太, 保原例, 長谷川修司: 巨大ラッシュバ効果表面超構造合金における円偏光フォトガルバニック効果, 日本表面真空学会関東支部 2023 年度学術講演大会 (オンライン), 2023 年 4 月 14 日.
- [55] 清水翔太, 秋山了太, 保原例, 長谷川修司: 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, 日本表面真空学会関東支部 2023 年度学術講演大会 (オンライン), 2023 年 4 月 14 日.
- (セミナー)
- [56] 秋山了太: 電気を通すか、通さないか、それが問題だ, 第 36 回 東京大学理学部 公開講演会「理学が拓く世界」, 小柴ホール (東京大学), 2024 年 3 月 8 日.
- [57] 秋山了太: グラフェンへの原子インターカレーションが引き起こす物理, 2023 年度駒場物性セミナー, 東京大学総合文化研究科物理部会, 東京大学駒場キャンパス (ハイブリッド), 2024 年 1 月 26 日.
- (講義等)
- [58] 長谷川修司: 結晶化学特論, 青山学院大学 機能物質創成コース集中講義, 青山学院大学淵野辺キャンパス (東京), 2023 年 5 月 20, 27 日.
- [59] 長谷川修司: 固体物理 II (学部 4 年生), 2023 年度 S セメスター (本郷).
- [60] 長谷川修司, 秋山了太, 佐藤瞬亮 (TA), 谷内息吹 (TA), 清水翔太 (TA): 物理学実験 II (学部 3 年生) 電子回折, 2023 年度 A セメスター (本郷).
- (アウトリーチ)
- [61] 長谷川修司, 谷内息吹: 東大の研究室をのぞいてみよう: 物性物理学、とくに表面物理学の紹介と実験室見学, 理学部 1 号館, 2024 年 3 月 25 日.
- [62] 長谷川修司: 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, 栃木県立大田原高等学校 (栃木), 2024 年 3 月 3 日.
- [63] 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), 2024 年 2 月 3 日.
- [64] 長谷川修司, 佐藤瞬亮, 清水翔太: 中国清華大学物理学 学部学生見学, 理学部 1 号館, 2024 年 1 月 29 日.
- [65] 研究室総出: 栃木県立宇都宮高等学校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 11 月 28 日.
- [66] 研究室総出: サクラサイエンス研究室訪問 (インドの学部学生), 理学部 1 号館, 2023 年 9 月 28 日.
- [67] 研究室総出: 福井県立敦賀高校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 9 月 28 日.
- [68] 研究室総出: 茨城県立土浦第一高校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 8 月 4 日.
- [69] 研究室総出: 神奈川県立湘南高校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 8 月 3 日.
- [70] 研究室総出: 明秀学園日立高校 模擬授業と研究室見学・懇談, 理学部 1 号館, 2023 年 5 月 17 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:

- Anomalous Hall effect at sandwich structures consisted of magnetic topological insulators and topological crystalline insulator
- 2D superconductivity at α -Sn layers on a topological crystalline insulator
- Non-reciprocal photocurrent at Rashba surfaces induced by irradiation of circularly polarized light
- Ferromagnetism and superconductivity at Yb-intercalated graphene
- Conductivity of highly N-doped surface layer on SiC crystal

(2) New methods:

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling spectroscopy and quantum Shot noise measurements
- Development of probes for spin injection and spin detection
- Fabrication of a UHV-MBE system with polarization-controlled mid-infrared irradiation

- [1] 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 topological domain walls driven by lithium intercalation in graphene*, Nature Nanotechnology **18**, 1154-1161 (Jul, 2023).
- [2] 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*, Nano Letters **23** (16), 7675-7682 (Aug, 2023).
- [3] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, under review (<https://arxiv.org/abs/2308.02485>).

第1章 2023年度に開講された学部講義概要

1.0.1 固体物理 II：長谷川修司

1. 物性物理学とノーベル賞

- 1.1. 超伝導・超流動のノーベル賞
- 1.2. 半導体のノーベル賞
- 1.3. 低次元系・トポロジカル系のノーベル賞

2. 格子振動と比熱

- 2.1. 格子振動とフォノン
 - ・ 1次元結晶での格子振動
 - ・ 3次元結晶での格子振動
 - ・ 光学フォノンと音響フォノン
 - ・ 格子振動の量子化とフォノン分光
- 2.2. 比熱
 - ・ Dulong-Petit の法則
 - ・ 格子比熱 Einstein モデルと Debye モデル
 - ・ 電子比熱 ・ 熱膨張
- 2.3. 熱伝導
 - ・ 熱伝導率 ・ 熱電効果
 - ・ Wiedemann-Franz の法則

3. 超伝導

- 3.1. 超伝導の発見と現象論
 - ・ 完全導体とマイスナー効果
 - ・ London 方程式 ・ その他の実験事実
 - ・ Ginzburg-Landau 理論

3.2. ミクロな理論

- ・ 電子格子相互作用 ・ Cooper 対の形成
- ・ BCS 理論 ・ 臨界電流と臨界磁場
- ・ BCS 規程状態とマイスナー効果

3.3. 超伝導の物性

- ・ 磁束の量子化 ・ 第1種・第2種超伝導体
- ・ Josephson 効果

4. スピンと磁性

4.1. スピン

- ・ 実験事実 ・ Dirac 方程式とスピン
- ・ 電子の磁気モーメント

4.2. 磁性

- ・ 原子・イオンの磁性
- ・ 自由電子ガスの磁性 ・ 交換操作
- ・ 自由電子間の交換相互作用
- ・ 強磁性のバンドモデル
- ・ 自発磁化の温度変化 ・ 局在スピンモデル

4.3. 対称性

- ・ 対称性の破れとスピン分裂
- ・ スピン軌道相互作用
- ・ ラシュバ効果 ・ トポロジカル絶縁体