

## 1.1 長谷川研究室

3月に佐藤瞬亮、谷内息吹、鄭帝洪が博士課程を修了しそれぞれ企業に就職した。

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、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、試料を空気にと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

#### Si(111) 表面上の (Tl,X) (X=Pb, Sn) 原子層合金における表面構造と電気伝導

Tl, Sn, Pbは単体で超伝導を示す物質であり、これらで構成される単原子層合金 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,X) (X=Pb, Sn) は金属的な表面状態を持つことが既に報告されている。Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb) は低温で超伝導となることを我々が過去に報告したが、類似系である Si(111)-(Tl,X) (X=Pb, Sn) で他の表面超構造を探索し、電気伝導測定を行った。1原子層の Tl を Si(111) 上に成膜した Si(111)-1 $\times$ 1-Tl 表面上に Sn や Pb を蒸着すると、蒸着量に応じて様々な表面超構造が現れることが新たに明らかになった。また、その周期構造は長周期なものが多かった。低温での電気伝導特性は絶縁体的な表面超構造が多かったが、下地の Tl 原子層を 2 原子層にすると、表面超構造は保ったまま電気伝導特性としては Tl 層のものを反映し金属的になることが明らかとなった。Tl 表面系は複雑な表面超構造を多く形成することがわかったため、今後はそれぞれの表面超構造の電子状態や原子配列を明らかにして原子層超伝導系の多様性を広げる。

#### Si(111) 表面上の (Tl,Sn) 原子層合金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表面では、バンドのスピン縮退が解け、また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 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Sn) を作成し、超高真空 *in situ* で円偏光を照射して非相反光電流を測定した。その結果、試料右端と左端に光照射すると、生じる非相反光電流の符号が反転した。これは、光誘起逆スピンホール効果(PISHE)のような現象といえる。さらに、円偏光を斜め入射にすると非相反光電流が増加したので、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。これは従来知られていた PISHE の振る舞いと違うために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。これは spin-FET や D'yakonov-Perel' スピン緩和機構と類似した原理で説明される現象であり、スピン軌道相互作用による有効磁場中での電子スピンの動きをより普遍的に理解する一助となる。

#### Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn 構造の超伝導探求と新規構造

Si(111) 表面上にスズ(Sn)を1/3原子層だけ吸着させて形成される Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn は、単位胞内の電子数が奇数個であるにも関わらず、絶縁体的な電子状態をとることが知られており、モット絶縁体だと言われている。一方、ボロン(B)を高濃度ドーブした Si 基板を複数回フラッシュ加熱すると B 原子が基板表面に偏析し Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B の表面超構造が生じる。ここに 1/3 原子層の Sn を積層すると Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn ができ、ハイドーブ Si 基板から電子が表面状態にドーブされ、高温超伝導に似た非従来型超伝導が生じることが走査トンネル分光(STS)観測によって報告された。しかし超伝導に必須のゼロ抵抗については未だ観測されておらず、電気伝導の観点からの研究が待たれている。そこで我々は、同構造を作製して超高真空中で *in situ* 電気伝導測定を行った。基板の抵抗率が 1m $\Omega$  cm 程度のハイドーブ縮退 Si(111) 基板を使用した結果では、未だゼロ抵抗を実現するには至っていないが、基板のフラッシュ加熱時に B の基板表面への偏析により生じる Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B のあとに、さらなるフラッシュ加熱の反復で別な新規超構造が出現することを見出した。今後は、表面偏析 B 濃度を変化させて系統的に測定を行い、さらにこの新規超構造の性質と、Sn を蒸着したときの超構造や超伝導の出現の可否も明らかにしていきたい。

## トポロジカル超伝導体の水素修飾の影響

鉄系超伝導体は単純な機構ではないことが知られており、軌道揺らぎや磁気揺らぎなどを起源とする超伝導発現機構も提案されている。中でも FeSe はファンデルワールス層状物質であり、表面への吸着や層間に原子や分子をインターカレーション (IC) できる。そのため水素のような軽元素を FeSe に IC できれば、キャリア濃度とデバイ周波数を増大させられる可能性がある。実際に FeSe では、溶液 IC 法によりバルク試料に水素を IC することで、超伝導転移温度  $T_C$  が 8 K から 44 K に上昇することが報告された。そこで我々は、超高真空下で FeSe 薄片をテープで劈開した後、 $10^{-5}$  Torr 程度の水素雰囲気下でクラックした水素原子を照射し、*in situ* 独立四探針電気伝導測定装置を用いて電気伝導測定を行った。その結果、オンセット超伝導転移温度  $T_C$  は水素修飾により 7.1 K から 12.3 K に増加した。今後は水素修飾した FeSe のキャリア密度の変化を解明し、超伝導特性との関連を明らかにする予定である。(低温科学研究センターとの共同研究)

## $\alpha$ -Sn/SnTe における非従来型超伝導

$s$  波超伝導とトポロジカル絶縁体を接合させると、トポロジカル超伝導であるカイラル  $p$  波超伝導が界面に発現することが理論的に予想されており、トポロジカル超伝導を実現する有力な方法として注目されている。今回、 $\alpha$ -Sn をトポロジカル結晶絶縁体 SnTe の上に MBE によって成長させてヘテロ接合を作製すると、 $\alpha$ -Sn が 3 原子層以上の膜厚の場合に超伝導となることを見出した。この超伝導はスピン軌道相互作用による散乱が大きく、KLB モデルで説明されることがわかった。また  $\alpha$ -Sn が 3,4 原子層の場合に面内臨界磁場がパウリ限界を超えることがわかり、BCS 機構の枠組みで理解できるものではないことが示唆された。そして角度分解光電子分光からは、 $\alpha$ -Sn が 4 原子層のときに超伝導に寄与するバンドが 2 つになる 2 バンド超伝導となることが示された。2 バンド超伝導は超伝導ギャップが複数存在し、比熱、トンネルスペクトル、熱伝導率などが通常と異なる温度依存性を示す可能性があり、さらにバンド間相互作用によって超伝導を増強・抑制したりできる可能性、異なるバンドで異なる位相を持てば時間反転対称性の破れや  $s^{\pm}$  波超伝導などが起こる可能性、各バンドの Chern 数や Berry 位相が異なれば、マヨラナ準粒子の実現可能性がある、などの興味深い物性が期待される。今回の構造でマヨラナ準粒子が現れれば、多値のマヨラナモードを持つことも予想され、従来の系にない展開も期待される。(物質・材料研究機構との共同研究)

## $R0^{\circ}$ グラフェンの製作

グラフェンは単原子層の炭素シートで、優れた電気伝導性、熱伝導性、機械的強度を兼ね備えており、

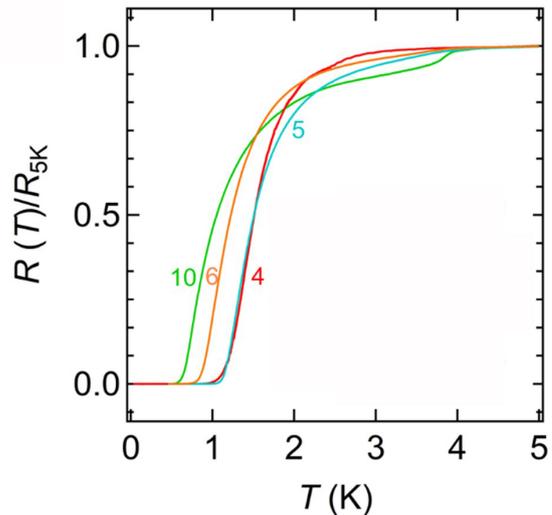


図 1.1.1:  $\alpha$ -Sn/SnTe(111) における超伝導. 各曲線の数字は  $\alpha$ -Sn の原子層数。

基礎物理学の理解を深めるだけでなく、エレクトロニクス、エネルギー貯蔵、センサーなど多様な応用展開が期待されている。なかでも SiC 結晶の熱分解法によるグラフェン形成によってエピタキシャルグラフェンを作成可能であり、既存の半導体技術との親和性が良いため注目されている。SiC 熱分解法によるグラフェン形成において、加熱時にヒーター構造物として pBN を用いると通常のグラフェン ( $R30^{\circ}$ ) と 30 度方位の異なる  $R0^{\circ}$  グラフェンができることを発見した。各種条件で作成を試みたところ、処理中の蒸気に含まれるホウ素が  $R0^{\circ}$  グラフェンの形成に寄与していることが判明した。さらに、 $R0^{\circ}$  グラフェン形成時に加熱温度をあげることで、反射高速電子回折において 12 回対称の回折パターンを示す構造ができることも判明した。これは準結晶において見られるパターンであり、 $R0^{\circ}$  グラフェンと  $R30^{\circ}$  グラフェンが積層した準結晶 2 層グラフェンが形成されたと推測している。

## Yb インターカレートグラフェンの電子状態と超伝導

グラフェン層間に異種原子をインターカレートすることで、超伝導や強磁性など物性を大きく変調できることをこれまで我々は示してきた。特に最近、Yb 原子をインターカレートすると超伝導になることを発見しているが、インターカレーションプロセスに時間がかかることが問題であった。そこでより迅速にインターカレーションが進むように、Li 原子を用いるとインターカレート時間を大幅に短縮することに成功した。また超伝導の仕組みについて角度分解光電子分光法を用いて解析を行い、ファンホッフ特異点 (vHs) と呼ばれるグラフェンに特有のフラットバンド様のバンドが M 点付近のフェルミ準位近傍に現れて超伝導に関与していることがわかった。この特異点が超伝導に関与すると、理論的には、非従来型超

伝導が現れると予測されていることもあり、その検証のため、走査トンネル顕微鏡を用いてエネルギー分光を行って超伝導ギャップの形を観測することを目指している。(奈良先端大学との共同研究)

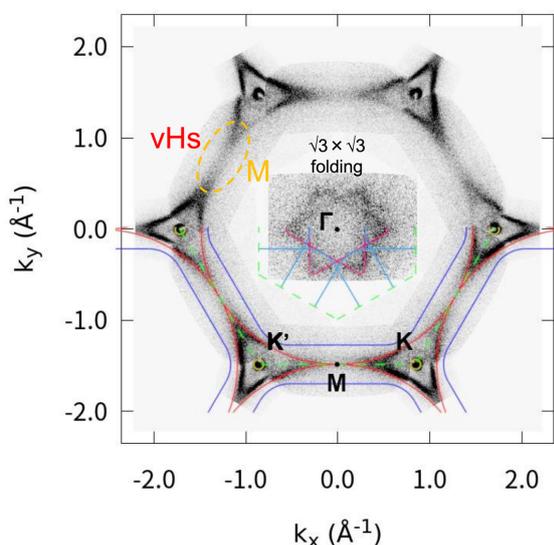


図 1.1.2: 光電子分光法によって測定された Yb インターカレートグラフェンのフェルミ面マッピング。

### 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

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、今なお興味尽きない物質である。Bi 薄膜の表面電子状態は、ラシュバ効果によってスピン分裂しており、またバルクバンドは量子井戸現象を示して、膜厚を薄くするとバンド構造が半金属的から半導体的に転移することを当研究室で報告してきた。また Sb 置換によってもバンド構造が複雑に変化し、トポロジカル絶縁体に転移することが知られている。よって、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  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  (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測定により、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遷を明らかにした。過去の我々の分光実験では Bi 単結晶膜厚で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。現在ではさらに膜厚や Sb 置換量などのパラメータを変え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)

### 低抵抗材料の開発に必要となる微細加工や測定技術等の研究

半導体微細加工技術の進展とともに、細線化にともなって配線の高抵抗化が問題となっている。これは界面や粒界の反射などから配線材料の抵抗率が大きくなってしまい、発熱や低効率化などが起きる現象で、ゲート長が数 nm となる現代のデバイスでは非常に大きい問題である。我々の研究室では、JSR 株式会社と共同で、この高抵抗化を根本的に抑える物質の探索を行っている。トポロジカル物質では表面や界面に伝導チャンネルを持つため、理論上は微細化するほど抵抗率が下がるはずであり、実現すれば半導体デバイスにおいて大きな影響を持つ。本年は、低抵抗材料候補として CoSn を選び、薄膜製造と物性測定を行った。スパッタ法で成膜した多結晶性 CoSn 薄膜では既存の配線材料を超える性能は得られなかったが、エピタキシャル成長させた CoSn では超微細 (サブ nm オーダー) の領域では既存の材料を超える性能を示す可能性があることが示された。(JSR 株式会社との共同研究)

#### 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マイクロ 4 端子伝導測定装置によってさまざまな 2 次元超伝導を発見してきたが、近年注目される非従来型の超伝導を観察・解明するには伝導測定だけでは不十分であった。そこで、伝導測定と同時にトンネル分光測定、さらにはトンネル電流の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、装置の大幅改良を行っている。本年度は昨年に引き続き、ショット雑音測定のために装置の改造と検証を行った。端子ホルダーが物理的に固着する問題があり、改良のため様々な形状を試したが、セラミックと金属の勘合をさけ、強度の高い金属のかみ合わせによる結合を採用することとし、改造と性能検証を進めている。

##### 超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外光照射系の開発

電子のスピンを物質中に注入するため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、物質中の電子をスピン選択的に励起することができ、円偏光を用いた手法は近年盛り上がりを見せている。当研究室では超高真空装置内で試料を作成し、その場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って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メイン真空装置へと接続するための作動排気型サブチャンバーと光学系を制作し既存のチャンバーにこれを増設した。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 $\mu\text{m}$  と広い波長範囲の中赤外光の円偏光が生成・導入でき、それによる円偏光誘起電流が測定できるシステムを製作した。この波長域は、トポロジカル絶縁体のバルクバンド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注入が期待できる。

## スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスの研究が盛んに行われている現在、微細加工技術によって基板上にスピン流の生成・測定回路を作りこむ手法が主流であるが、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できない。このため、本研究室では、原子間力顕微鏡や走査トンネル顕微鏡、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・検出プローブの開発を行ってきた。グラフェン素子を利用したプローブ作成の検討を続けているが、本年度にはその作成条件のチューニングを行った。グラフェンは濡れ性が低く、レジスト膜やスパッタ膜の形成条件が狭いため、最適条件を探して微細加工に進む予定である。

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 基盤研究 (B) 「希土類原子のインターカレーションで開拓するグラフェン強相関物理」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「トポロジカル結晶絶縁体の高品質超平坦薄膜で創製する新奇スピンドバイス」(代表 秋山了太)
- ・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)

### <受賞>

- [1] 清水 翔太; トポロジカル超伝導体  $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$  薄片への軽元素修飾による影響, 日本物理学会第 79 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 9), 2024 年 10 月 26 日.

### <報文>

(原著論文)

- [2] Ibuki Taniuchi, Ryota Akiyama, Rei Hobara, and Shuji Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, ACS Nano **19**, 3147-3154 (Jan, 2025).

(総説)

- [3] S. Hasegawa: *Surface and Interface Physics Driven by Quantum Materials*, Applied Physics Express **17**, 050101 (pp.20) (Jun, 2024).
- [4] S. Hasegawa: *Surface and Edge States of Quantum Materials*, Coshare Science **03**, 01 (Feb, 2025).

(国内雑誌)

- [5] 遠藤由大, 秋山了太, 長谷川修司: *SiC 基板上のグラフェンへのインターカレーション過程での積層構造変化*, まてりあ (日本金属学会会報) **63** (12), 829-835 (Dec, 2024)

(その他)

- [6] 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 **93** (7), 424-428 (Jul, 2024).
- [7] 長谷川修司: *JPS Anniversary Years 2025-2027* が開幕! (巻頭言), 日本物理学会誌 **80** (1), 1-1 (Jan, 2025).
- [8] 長谷川修司: 留学経験のない研究者からの留学のすすめ, 表面と真空 **68** (2), 112-114 (Feb, 2025).
- [9] 長谷川修司: 今年は国際量子科学技術年です, Isotope News (日本アイソトープ協会), No. 797, 巻頭言 P. 1-1 (Feb, 2025)
- [10] 長谷川修司: 量子力学が人間の本质に切りこんでいく (特別インタビュー「), Newton 2月号 『量子力学 100 年』 特集号 p.58-59 (Feb, 2025)

(学位論文)

- [11] 谷内息吹: 様々な表面超構造を形成する  $\text{Si}(111)$  上の原子層合金における光応答と電気伝導の研究 (博士論文).
- [12] 佐藤瞬亮: 金属原子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特性 (博士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [13] S. Hasegawa: *Quantum materials boost quantum technology* (Plenary), Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan 2025, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung (Taiwan), 2025 年 1 月 14 日.
- [14] S. Hasegawa: *Dynamical Intercalation Processes in Graphene and Physical Properties*, The 15th International Symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices 2024 (ALC '24), Kunibiki Messe, Matsue, Shimane (Japan), 2024 年 11 月 21 日.

一般講演

- [15] R. Akiyama: *Quantum Nano-System Based on Advanced Fabrication and Measurements*, Symposium on Selected Topics in Science and Technology, Institute for Advanced Study Technical University of Munich (Munich, Germany), 2025 年 2 月 12.

- [16] R. Akiyama, S. Sato, Y. Miyai, Y. Hashimoto, J. Jung, R. Hobara, Y. Kumar, A. Kumar, S. Shimizu, R. Minakawa, Y. Yamamoto, H. Tomita, T. Tadamura, T. Moriki, Y. Yamada, S. Ideta, K. Shimada, T. Matsushita, and S. Hasegawa: *Superconductivity in Yb-intercalated Few-layer Graphene*, Symposium on Hyper-Ordered Structure Sciences in London, Japan House London, London (UK), 2025 年 1 月 30 日.
- [17] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, T. Fujii, T. Watanabe, S. Hasegawa: *Effect of Hydrogen Modification on Superconductor FeSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> thin flakes*, Symposium on Hyper-Ordered Structure Sciences in London, Japan House London (UK), 2025 年 1 月 29 日.
- [18] S. Sato, J. Jung, R. Akiyama, R. Hobara, T. Matsushita, S. Hasegawa: *Superconductivity and Magnetism at Yb-Intercalated Graphene*, International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices in Winter 2025 (ALCW 2025), Furano (Japan), 2025 年 1 月 24 日.
- [19] R. Akiyama, S. Sato, Y. Miyai, Y. Hashimoto, J. Jung, R. Hobara, A. Kumar, Y. Kumar, S. Shimizu, R. Minakawa, Y. Yamamoto, H. Tomita, T. Tadamura, T. Moriki, Y. Yamada, S. Ideta, K. Shimada, T. Matsushita, S. Hasegawa: *Superconductivity in Yb-intercalated Few-layer Graphene*, The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10), Kita-Kyushu (Japan), 2024 年 10 月 24 日.
- [20] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, T. Fujii, Y. Uezono, T. Otsuka, T. Watanabe, S. Hasegawa: *Effect of Hydrogen Modification on Topological Superconductor Fe(Se,Te) thin flakes*, The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10), Kita-Kyushu (Japan), 2024 年 10 月 21 日.
- [21] R. Akiyama, S. Sato, Y. Miyai, Y. Hashimoto, J. Jung, Y. Kumar, A. Kumar, S. Shimizu, R. Minakawa, Y. Yamamoto, H. Tomita, T. Tadamura, T. Moriki, Y. Yamada, S. Ideta, K. Shimada, T. Matsushita, and S. Hasegawa: *Superconductivity and ferromagnetism in Yb-intercalated few-layer graphene*, International Workshop on Hyperordered Structures and Quantum Materials (Saskatchewan University, Saskatchewan, Canada), 2024 年 7 月 8 日.
- (国内会議)
- 招待講演
- [22] 秋山了太: グラフェンへの *4f* 電子系 Yb のインターカレートによる超伝導の発現とその特性, 共催シンポジウム『超秩序構造が拓く材料科学—“Disorder in Order”と“Order within Disorder”の物理—』, 日本物理学会第 79 回年次大会 (北海道大学), 2024 年 9 月 17 日.
- [23] 秋山了太: 低速電子顕微鏡によるグラフェンへの *Li* インターカレーションの動的観察, 日本顕微鏡学会第 80 回学術講演会 (幕張メッセ国際会議場), 2024 年 6 月 5 日.
- 一般講演
- [24] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 渡辺孝夫, 長谷川修司: 超伝導体 *FeSe* 薄片への水素修飾による電子・原子構造の変化, 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン), 2025 年 3 月 18 日.
- [25] 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: 30 度回転したエピタキシャルグラフェンの作成法, 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン), 2025 年 3 月 18 日.
- [26] 秋山了太: 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, 学術変革領域「超秩序構造科学」第 9 回報告会 (名古屋工業大学, 名古屋), 2025 年 3 月 8 日.
- [27] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 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物性変調, 第 16 回低温科学研究センター研究交流会 (東京大学本郷キャンパス), 2025 年 2 月 17 日.
- [28] 清水翔太, 佐藤瞬亮, 秋山了太, 宮井雄大, 橋本由介, 鄭帝洪, 保原麗, Yogendra Kumar, Amit Kumar, 皆川遼太郎, 山本裕太, 富田広人, 多田村充, 盛喜琢也, 山田侑矢, 出田真一郎, 島田賢也, 松下智裕, 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・電子構造第 18 回 物性科学領域横断研究会 (神戸大学六甲台キャンパス) 2024 年 11 月 26 日.
- [29] Ryota Akiyama: *Exploration of an ultra-sensitive NV quantum sensor through precise atomic-scale surface control*, PRESTO meeting on Quantum Cooperation between Materials and Information (Osaka), 2024 年 10 月 29 日.
- [30] 秋山了太: Yb インターカレートグラフェンの原子位置とその物性, 学術変革領域「超秩序構造科学」第 9 回報告会 (東北大学, 仙台), 2024 年 9 月 24 日.
- [31] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 上菌優, 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, 超秩序構造化学第 8 回成果報告会, 東北大学片平キャンパス, 2024 年 9 月 24 日.
- 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日.
- [32] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 上菌優, 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 (領域 9), 9 月 16 日.
- [33] 今中康貴, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司: *BiSb* 薄膜における強磁場サイクロトロン共鳴 (領域 4), 9 月 16 日.
- [34] Y. Guo, R. Akiyama, T. Konoike, S. Ichinokura, Y. Hattori, T. Takashiro, R. Hobara, T. Terashima, T. Hirahara, S. Uji, and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity in  $\alpha$ -Sn(111) layer grown on SnTe(111)*(領域 9), 9 月 16 日.

- [35] 東辻浩夫, 松本益明, 中西秀, 柴橋博資, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 加藤岳生, 金子朋史, 栗原進, 杉山忠男, 田中忠芳, 並木雅俊, 中屋敷勉, 鈴木功, 安藤静敏, 毛塚博史, 齋藤輝文, 佐藤杉弥, 佐藤誠, 真梶克彦, 末元徹, 長谷川修司, 藤井賢一, 光岡薫, ヨーロッパ物理オリンピック (*EuPhO2024*) ジョージア大会参加報告 (領域 13), 9月16日.
- [36] 松本益明, 東辻浩夫, 加藤岳生, 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, 齋藤輝文, 佐藤杉弥, 藤井賢一, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 長谷川修司, 光岡薫: アジア物理オリンピック 2024 マレーシア大会報告 (領域 13), 9月16日.
- [37] 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, 海老崎功, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤眞一, 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, 吉澤雅幸, 吉村勇治: 物理チャレンジ 2024 報告 2: 第 2 チャレンジ実験問題 (領域 13), 9月16日.

(講義等)

- [38] 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), 2024年5月18, 25日.
- [39] 長谷川修司: 固体物理 II (学部4年生), 2024年度 S セメスター (本郷).
- [40] 長谷川修司: 物理学ゼミナール: トポロジカル物質入門 (学部3年生), 2024年度 S セメスター (本郷).
- [41] 長谷川修司, 秋山了太, 清水翔太 (TA), 鄭帝洪 (TA): 物理学実験 II (学部3年生) 電子回折, 2024年度 A セメスター (本郷).

(アウトリーチ)

- [42] 長谷川修司: プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介+第1チャレンジ演習+大気圧の測定実験, 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), 2025年3月22日.
- [43] 長谷川修司: 物理チャレンジと物理オリンピックの紹介, 物理オリンピック日本委員会シンポジウム (東京理科大学神楽坂キャンパスハイブリッド), 2025年3月20日.
- [44] 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) —物理チャレンジ紹介+第1チャレンジ演習+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), 2025年2月22日.
- [45] 長谷川修司: プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介+第1チャレンジ演習+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, 三重県立桑名高等学校 (三重), 2025年2月1日.
- [46] 長谷川修司, 谷内息吹: La Trobe 大学+国立シンガポール大学学部生の見学, 理学部1号館 B101室, 2025年1月30日.

- [47] 長谷川修司: 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 206室・B101室, 2024年12月3日.
- [48] 長谷川修司: オンラインプレチャレンジ: 踏み出そう、はじめの一步; 物理オリンピックの紹介, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ (オンライン), 2024年11月10日.
- [49] 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 206室・B101室, 2024年7月29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  $\alpha$ -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] Ibuki Taniuchi, Ryota Akiyama, Rei Hobara, and Shuji Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, ACS Nano **19**, 3147-3154 (Jan, 2025).
- [2] Shuji Hasegawa: *Surface and Interface Physics Driven by Quantum Materials*, Applied Physics Express **17**, 050101 (pp.20) (Jun, 2024).
- [3] Shuji Hasegawa: *Surface and Edge States of Quantum Materials*, Coshare Science **03**, 01 (Feb, 2025).

## 第I部

# 2024年度 物理学教室全般に関する報告

# 第1章 2024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. 半導体

- 2.1. バンド分散とバンドギャップ
- 2.2. 真性半導体と不純物半導体
- 2.3.  $pn$  接合とトランジスタ

### 3. 格子振動と比熱

- 3.1. 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
- 3.2. 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
- 3.3. 熱伝導
  - ・ 熱伝導率 ・ 熱電効果
  - ・ Wiedemann-Franz の法則

### 4. 超伝導

- 4.1. 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
- 4.2. 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 規格状態とマイスナー効果
- 4.3. 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

### 5. スピンと磁性

- 5.1. 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
- 5.2. 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
- 5.3. 対称性
  - ・ 対称性の破れとスピン分裂
  - ・ スピン軌道相互作用
  - ・ ラッシュバ効果 ・ トポロジカル絶縁体