

## 1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として清水翔太が新しくメンバーに加わった。9月にはHUANG Hongruiが、3月には遠山晴子が博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、非相反光伝流などである。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、分子線エビタキシー(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

#### SiC 結晶表面上の単層グラフェンでの Ca インターカレート誘起超伝導

SiC 結晶基板上に成長した2層グラフェンにおいて、その原子層間に Ca 原子をインターカレートすると超伝導が誘起されることを数年前に当研究室から報告している。しかし、グラフェンと SiC 基板との界面まで含めた積層構造や、超伝導に寄与する電子状態については実験による検証が不十分であった。本研究では、SiC 上単層グラフェンにおいても Ca インターカレートを行うと超伝導が発現することを発見した。これまで注目されてこなかったグラフェンと基板との界面が、原子構造および電子状態の両方において超伝導発現に重要な役割を担っていることが明らかになった。さらに、常伝導伝導度に対する超伝導転移温度の振る舞いが、通常自由電子的な金属におけるBCS超伝導とは異なるという興味深い特性が発見された。この特異性は非従来型超伝導を誘起するとされるファンホープ特異点の関与を示唆しており、低温STS観測などにより非従来型超伝導を検証することが今後の課題である。(東京大学物性研究所と東京工業大学との共同研究)

#### 磁性原子が規則配列した強磁性トポロジカル絶縁体における軟磁性的スキルミオンの観測

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)は、表面にトポロジカルに非自明なカイラルスピン電子状態を有するが、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渦状磁気構造が実現される。スキルミオン渦は MnSi 結晶などの強磁性金属に特定の強さの磁場を印加することで形成されるが、FMTI では強磁性金属と違い「トポロジカルに保護された」カイラル電子状態によってスキルミオンが安定的に保たれると予測されている。本研究では、磁性原子 Mn が規則的に配列した自己形成型 FMTI、 $\text{Mn}(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_4$  (略して MnBST) において、特定強度の印加磁場で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)が観測された。さらに、TI結晶内部に Mn 磁性原子を希薄的にドーブした FMTI と比較して、今回観測されたスキルミオンは 1/10 程度の弱い磁場で生成できることがわかった。MnBST は希薄磁性ドーブ系 FMTI と違い、Mn 原子が自己形成によって原子レベルで規則的かつ密に配列しており、そのため Mn 原子どうしの強磁性相互作用が強まったことが原因と考えられる。本研究は弱い磁場で制御可能な「軟磁性的スキルミオン」を FMTI 系で明らかにした最初の例である。(東京工業大学と物質材料研究機構との共同研究)

#### 自己形成型磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$ の Sb/Bi 組成比に依存した強磁性特性

前項の自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体 MnBST は、磁性原子 Mn が規則的に配列した結晶構造をもつため、量子異常ホール効果といった新奇量子物性の観測温度の向上が期待される。一方、非磁性元素 Sb と Bi の組成比を変えることでフェルミ準位が変わるだけでなく磁気特性も変化するなど、この強磁性機構は未解明な点が多い。本研究では、単ユニット層 MnBST の Sb/Bi 組成比に対する電気伝導と磁気特性を調べた。その結果、Sb 比率が高くなるに従ってキュリー温度が単調に増加した。一方、Sb 添加によって面内方向の Mn 原子どうしの距離が単調に小さくなることから、本系の強磁性特性は Sb 置換による磁性層の格子歪など、結晶構造に起因したものと考えられる。

#### 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、一方方向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。本研究では巨大ラッシュバ効果が報告されている Si 基板上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。これは表面バンドが疎な場合に励起電子分布の偏りが大きくなり、その結果 CPGE 電流が増大すると理解できる。また物質表面 1 原子層では光はあたかも真空中と同様に振る舞うという示唆も得られた。

### SrTiO<sub>3</sub> 結晶表面上の FeSe 原子層の構造と超伝導

超伝導体である FeSe は、そのバルク結晶では約 8 K で超伝導転移し、SrTiO<sub>3</sub>(001) 基板上に成長させた単ユニット層の FeSe では最高で 100 K を超える超伝導が報告されている。この超伝導発現には界面からの電荷移動と界面フォノンのデバイ振動数が重要であることが指摘されている。本研究では SrTiO<sub>3</sub>(001) を酸素欠損させた表面超構造  $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ 、 $2 \times 1$ 、 $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$  を作り分けることで電荷移動量を制御し、その上に Fe と Se を共蒸着して FeSe 結晶を作製し、*in situ* 4 探針電気伝導測定を行い超伝導の発現を目指す。現在までに、10 ユニット層厚の FeSe を SrTiO<sub>3</sub>(001)- $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$  表面に作製したところ、90 K 付近でバルクと同様にネマティック転移による電気抵抗異常が見られた。また、20 ~ 40 K の範囲で電気抵抗が絶対温度の 2 乗に比例し、20 K 以下では絶対温度に対して比例した結果が得られた。これらの結果はバルクでも観測されておりフェルミ液体から非フェルミ液体に移り変わったと考えられる。今後は超伝導を発現させた後、SrTiO<sub>3</sub> 基板を水素終端して超伝導転移温度の増強を目指す

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

トポロジカル超伝導に特有なマヨラナゼロモード (MZMs) を探索するため、2 次元超伝導体 (2DSC) とトポロジカル結晶絶縁体 (TCI) の接合系を作成した。その一例として  $\alpha$ -Sn 原子層/SnTe(111) 系を調べている。SnTe(111) 表面上に成長させた  $\alpha$ -Sn 原子層が BKT 転移を示して超伝導に転移することを観測し、この系は 2DSC/TCI であることがわかった。また、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すので、I/II 型イジング超伝導、またはスピン 3 重項をもつ非従来型超伝導である可能性がある。さらに詳細に研究するために、 $\alpha$ -Sn 原子層の高品質化と SnTe のフェルミ準位チューニングを行い、MZMs の検出を目指す。

### Cu<sub>2</sub>Se 原子層の成長構造と電気伝導特性

Cu<sub>2</sub>Se は、巨大な熱電性能を示す物質として知られているが、約 100 以上の高温では Cu イオンが固体中を活発に動き回る超イオン伝導体でもあり、それ以下の温度では、Cu イオンが安定にとどまる位置が複数個所存在し、それに応じてバンド構造が半導体から半金属に変化することも知られている。本研究では、その原子層の成長を試み、その伝導特性を調べた。Si(111) 基板結晶表面を Sn で終端して平坦化した  $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$  表面超構造上では、約 200 以下の基板温度で平坦な Cu<sub>2</sub>Se 原子層が成長することを見出した。その伝導特性を測定したところ、35 K 以下の低温で線形な磁気抵抗効果が、35 ~ 80 K では弱反局在効果が見られ、80 K 以上では古典的な磁気抵抗効果となった。また、35 K 以下ではホール抵抗がほとんどゼロとなったことから、この低温相では線形バンド分散を持つディラック半金属であり、温度上昇とともに半導体に相転移すると考えられる。この相転移は、理論計算で示唆されているように、Cu イオンの位置変化に伴う構造相転移に起因すると考えられるので、今後、X 線回折を用いて構造変化を明らかにして伝導特性との相関を明らかにしたい。

### Mn ドープされた半導体 SnSe<sub>2</sub> におけるスピングラス的な磁気特性

SnSe<sub>2</sub> は 1~2 eV ほどのバンドギャップを持つ半導体であり、その結晶に Mn 原子をドープして磁性を付与し、その特性を調べた。4%-Mn ドープ試料は CVD 法で作製し、その組成と構造を EDX と X 線回折で評価すると、析出物は見られず単結晶となっていることが分かった。SnSe<sub>2</sub> は層状物質であるため、層に対して面直・面内に分けて磁気特性を SQUID で評価した。その結果、臨界温度  $T_c$  が 66 K の強磁性を示し、面内が磁化容易軸であることが分かった。磁場中冷却と零磁場冷却とで、磁化の温度依存性が異なる挙動を示した。これはスピングラス的な特性に由来しており、磁気クラスターが生じていることを示す。低温になるに従いクラスター間（反強磁性的）およびクラスター内（強磁性的）の相互作用がそれぞれ成長し、その共存によってスピングラス的な磁気凍結が起きていると考えられる。（中国科学技術大学との協同研究）

### Yb-インターカレート・グラフェンにおける強磁性

*d, f* 電子軌道を持つ金属原子をグラフェンにインターカレートすると、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る。昨年、本研究室では、6H-SiC(0001) 基板を大気圧 Ar ガス中で通電加熱して得られるグラフェン/SiC 上に、*4f* 電子軌道をもつ常磁性物質の Yb 原子を蒸着してアニールすることにより、金属原子インターカレートグラフェンを作

成し、世界で初めて強磁性 (最大  $T_c=100$  K) を観測した。本研究では、その強磁性の機構を解明するため、作製条件を系統的に変えた Yb インターカレートグラフェンを作製し、それらの伝導特性および SQUID による磁化測定を行った。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傾向が観測された。これはキャリア密度の増加と共に強磁性転移温度が増加する一般的な希薄磁性半導体におけるキャリア誘起強磁性とは真逆の振る舞いであり、単純なキャリア媒介強磁性ではないことが示唆された。

### 1.1.2 表面・原子層ナノ構造の形成

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

結晶の鏡映対称性に保護された表面状態を持つトポロジカル結晶絶縁体 (TCI) は、従来のトポロジカル絶縁体 (TI) とは違って、数原子層の薄さにすると 2 次元トポロジカル絶縁体への転移が予想されるなど、エキゾチックな物性が期待されている。その典型物質 SnTe は層状物質ではないため、薄くて平坦な膜の結晶成長が極めて難しく、島状・迷路状の成長様式を示すことが大きな問題であった。本研究では絶縁性 SrTiO<sub>3</sub>(001) 結晶基板上に室温で微量の SnTe 蒸着を行って wetting layer を形成し、続いて基板温度を昇温させると結晶性が劇的に改善し、平均二乗粗さ RMS が 0.5 nm 程度の極めて平坦で高品質なエピタキシャル薄膜形成が可能であることを発見した。電気伝導評価からは 2 次元弱反局在効果が観測され、トポロジカル表面伝導を観測した。

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 はキャリア濃度が低く、急峻なバンド分散のためにディラック電子系をなし、さらにスピン軌道相互作用が極めて強く、トポロジカル物質の母物質となっているという特徴をもつため、今なお興味が尽きない。Bi 薄膜は量子井戸現象のため、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) 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。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 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タイミング・同一試料で測定可能とするため、本研究室で所有している超高真空 *in situ* 4 端子プローブ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した。プローブ探針で鉛薄膜試料の超伝導ギャップを観測し、磁場印加でギャップが消失することを観測し、このトンネル分光測定から、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できた。また、4 端子プローブのうち、トンネル接合を作らないプローブを直接試料に接触させることでリターンパスを確保し、絶縁性の高い基板上の試料も測定可能になった。今後はプローブ周辺の安定性を高めることによってトンネル分光測定の分解能を向上させ、特に、トポロジカル超伝導体などの非従来型超伝導の候補物質の測定を行う。

超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外線照射装置の開発

円偏光は右/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。本研究室では超高真空装置内で試料を作成し *in situ* 測定するために、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設計し製作している。この設計では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の円偏光が生成でき、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 100~300 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。

SiC 熱分解グラフェンの安定作成手法の構築

グラフェンの作成方法として、気相成長法や剥離法などがあるが、近年では SiC 結晶の熱分解法が用いられることが多く、本研究室でも通電加熱による SiC の熱分解法でグラフェンの生成を行ってきた。しかし、通電加熱は再現性が悪く、また特に絶縁性 SiC を用いることが出来ない。解決すべき課題は最高 1800 まで SiC を加熱する炉の形成と、赤外線を放射しない SiC の温度を正確に測定する手法の確立である。そこで、グラファイトヒーターを搭載した真空炉を製作し真空中およびアルゴン雰囲気中で 2100 まで加熱できることを確認した。また、SiC 裏面に磨り加工とグラファイト塗布を行うことで温度を正確に測れることを見出した。これにより、SiC のドープ量や形状によらずグラフェンを再現性良く作成することが可能となった。

## 面内方向飛行時間 (Lateral-ToF) 型の移動度測定手法の開発

半導体デバイスの高密度化・高速度化に伴い、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い。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た。昨年度測定システムが完成し、各種試料について測定を行ったが、FETによる電界効果移動度の測定との整合性が得られなかった。これはトラップ準位が多く且つ深い場合、移動度が物性値としての意味をなさなくなるからであると考えられる。多結晶シリコンにおける真なる移動度の定義、その特性の評価等を再考する必要がある。

## スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスが期待されている。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、AFMや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たが、微細加工施設の入室制限等で製作が進まなかった。今後は、このプローブを用いて、山梨大学白木研究室においてグラフェン内でのスピン・電子輸送特性の研究を行う予定である。

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) 「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] 佐藤瞬亮, “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”, 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 ショートプレゼンテーション学生賞銅賞, 2022 年 3 月 25 日.

### <報文>

#### (原著論文)

- [2] H. Huang, A. Rahman, J. Wang, Y. Lu, R. Akiyama, S. Hasegawa: *Spin-glass-like state induced by Mn-doping into a moderate gap layered semiconductor SnSe<sub>2</sub>*, Journal of Applied Physics **130**, 223903(6pp) (Dec, 2021).
- [3] 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 an intrinsic ferromagnetic topological insulator sandwich structure*, Nano Letters **22**(3), 881-887 (Jan, 2022).
- [4] T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama: *Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)*, Physical Review B **105**, 064507 (9pp) (Feb, 2022).
- [5] H. Toyama, R. Akiyama, M. Hashizume, S. Ichinokura, T. Iimori, T. Matsui, K. Horii, S. Sato, R. Hobara, Y. Endo, T. Hirahara, F. Komori, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity of the Ca-intercalated graphene on SiC: vital role of the interface between monolayer graphene and the substrate*, ACS Nano **16**(3), 3582-3592 (Feb, 2022).

#### (特許)

- [6] 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, 特願 2022-030143, 出願日 令和 4 年 2 月 28 日.

#### (著書)

- [7] 長谷川修司 (分担執筆): 多探針走査トンネル顕微鏡 (セクション 24.8), in 『図説 表面分析ハンドブック』 (日本表面真空学会編, 朝倉書店, Jun, 2021).

#### (その他)

- [8] 長谷川修司: 国際物理オリンピック 2021 リトアニア大会 オンライン参加, JPhO News Letter **31**, 5-6 (Sep, 2021).
- [9] 長谷川修司: スピン流を測る (理学の謎 第 15 回), 理学部ニュース 9 月号, p. 14 (Sep, 2021).

#### (学位論文)

- [10] HUANG Hongrui: *Doping effects of a layered post-transition metal dichalcogenide tin diselenide* (博士論文).

- [11] 遠山晴子: アルカリ (土類) 金属インターカレートによるグラフェンの電子構造の変調と超伝導特性 (博士論文).
- [12] 佐藤瞬亮: 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とそれによる超伝導体の評価 (修士論文).
- [13] 谷内息吹: スピン軌道相互作用の大きな 2 次元物質における円偏光ヘリシティ依存光電流 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [14] R. Akiyama: *Observation of topological Hall effect in sandwich structures with self-assembled intrinsic topological ferromagnet  $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$* , Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS)-26, 2021 年 12 月 21 日, Online.
- 一般講演
- [15] T. Takashiro, Ryota 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*(poster), International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT 2021), 2021 年 12 月 14 日, online.
- [16] T. Takashiro, Ryota 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*(oral), The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9), 2021 年 12 月 1 日, online.
- (国内会議)
- 招待講演
- [17] 秋山了太: トポは端だが役に立つ ~ 表面界面で起こる強磁性・超伝導 ~, 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」, 2022 年 3 月 30 日, オンライン.
- [18] 長谷川修司: 研究者、このクリエイティブで人間的な職業, 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」2022 年 3 月 29 日, ハイブリッド/小柴ホール.
- [19] 長谷川修司: ナノプローブによる量子物質表面の研究, 日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第 167 委員会 第 100 回研究会「表面物理の最前線とそれを支える SPM 技術」, 2022 年 1 月 14 日, オンライン
- [20] 長谷川修司: 物理チャレンジ・物理オリンピックによる中高生へのはたらきかけ ~ これまでとこれから ~, 応用物理学会応用物理教育分科会 第 31 回物理教育に関するシンポジウム「みらいを創る科学技術教育」, 2021 年 12 月 18 日, オンライン.
- [21] 秋山了太: *Induced effects by introducing ferromagnetism into topological insulators*, 日本物理学会 2021 年秋季年会領域 9 シンポジウム「Interdisciplinary surface science researches toward innovative materials and devices」, 2021 年 9 月 20 日, オンライン
- [22] 長谷川 修司: 量子物質が加速する表面・原子層科学の新展開, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「薄膜・表面物理研究のトレンドと今後の展望」(薄膜・表面物理分科会 50 周年記念シンポジウム), 2021 年 9 月 11 日, オンライン.
- [23] 長谷川 修司: トポロジカル物質とは何か, 第 245 回 JOEM 研究会「トポロジカル絶縁体」(一般社団法人有機エレクトロニクス材料研究会), 2021 年 7 月 15 日(木), オンライン.
- [24] 遠山晴子: *Ca* インターカレート誘起フリースタANDING グラフェンにおける構造と超伝導の相関, 日本表面真空学会令和 3 年度 (2021 年度) 関東支部講演大会, 2021 年 4 月 3 日, オンライン.
- 一般講演
- 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」, 2022 年 3 月 29 日, オンライン.
- [25] 高城拓也、秋山了太、長谷川修司: 原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体  $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$  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 (ポスター).
- [26] 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: 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 (ポスター).
- [27] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: 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 (ポスター).
- [28] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: 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 (口頭), 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, 2022 年 3 月 22 日.
- [29] 佐藤瞬亮, 保原麗, 秋山了太, 渡邊和己, 長谷川修司: 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 (口頭), 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, 2022 年 3 月 22 日 (ショートプレゼンテーション学生賞銅賞受賞).
- 日本物理学会第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15 日-19 日, オンライン.
- [30] 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: Bi 薄膜における強磁場テラヘルツサイクロトロン共鳴 (領域 4, 口頭), 3 月 16 日.

- [31] 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司: 原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体  $\text{MnSb}_2\text{Te}_4$  およびそのヘテロ構造の磁気・電気伝導特性 (領域 4, ポスター), 3月16日.
- [32] 秋山了太, 金田真悟 A, 大矢忍 A, 高城拓也, 長谷川修司:  $\text{SrTiO}_3(001)$  基板上への室温 wetting layer 成長法による超平坦  $\text{SnTe}(001)$  薄膜の成長と電気伝導評価 (領域 4, ポスター), 3月16日.
- [33] SP. Liu, T. Takashiro, YX. Guo, R. Hobara, R. Akiyama and S. Hasegawa: Growth and transport property of copper selenide compound thin films, (領域 9, ポスター), 3月15日
- [34] 一ノ倉聖, 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: Ca 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 (領域 9, 口頭), 3月17日
- 第 13 回低温科学研究センター研究交流会, 2022 年 3 月 9 日, オンライン.
- [35] 佐藤瞬亮, 保原麗, 秋山了太, 渡邊和己, 長谷川修司: 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 (ポスター).
- [36] 鄭帝洪, 秋山了太, 高城拓也, 遠山晴子, 保原麗, 長谷川修司:  $\text{SiC}(0001)$  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 (ポスター).
- [37] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: 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 (ポスター).
- [38] 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司: 原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体  $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$  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 (ポスター).
- 日本物理学会 2021 秋季大会, 2021 年 9 月 20 日-23 日, オンライン.
- [39] 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: Bi 薄膜における超強磁場マイクロトン共鳴 (領域 4・口頭), 9月21日.
- [40] 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司: 自己形成型磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造  $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  における強磁性特性の Bi/Sb 組成比依存性 (領域 4・ポスター), 9月22日.
- [41] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: 単原子層ラッシュバ表面系 (Tl,Pb)/Si(111) での円偏光フォトガルバニック効果 (領域 9・口頭), 9月21日.
- [42] 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: 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 (領域 9・口頭), 9月21日.
- [43] 佐藤瞬亮, 秋山了太, 保原麗, 渡邊和己, 長谷川修司: *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 (領域 9・ポスター), 9月21日.
- [44] 一宮彪彦, 長谷川修司, 他: 物理チャレンジ 2021 報告: 第 2 チャレンジ (実験問題) (領域 13・口頭), 9月23日.
- [45] 杉山忠男, 長谷川修司, 他: 第 21 回アジア物理オリンピック 2021 台湾大会 (オンライン) 報告 (領域 13・口頭), 9月23日.
- [46] 東辻浩夫, 長谷川修司, 他: 第 51 回国際物理オリンピック 2021 (リトアニア, オンライン) 報告 (領域 13・口頭), 9月23日.
- (セミナー)
- [47] 長谷川 修司: 研究と物理オリンピックをもとに考える教育, 東京大学同窓会神奈川銀杏会三火会, 2022 年 3 月 14 日, オンライン.
- [48] 遠山 晴子: Ca インターカレートが創発するグラフェン 2 次元超伝導, 東京工業大学量子物理学・ナノサイエンス第 332 回セミナー, 2022 年 2 月 22 日, オンライン.
- [49] 遠山 晴子: Ca インターカレーションにより誘発されるグラフェンの超伝導, CREST 『2 次元ホウ素未踏マテリアルの創製と機能開拓』セミナー, 2022 年 2 月 8 日, オンライン.
- [50] 長谷川 修司: トポロジカル物質とは何か 表面物理学の観点から, 東大-JSR 協創拠点 CURIE セミナー, 2021 年 4 月 23 日, オンライン.
- (講義等)
- [51] 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), 2021 年度夏学期 (駒場/ハイブリッド).
- [52] 長谷川修司, 秋山了太, 高城拓也 (TA), 清水翔太 (TA): 物理学実験 II (学部 3 年生) 電子回折, 2021 年度冬学期 (本郷).
- (アウトリーチ)
- [53] 長谷川修司: オンラインプレチャレンジ: 物理チャレンジ・オリンピックの紹介と実験レポートの書き方, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2022 年 3 月 21 日, オンライン.
- [54] 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, 2022 年 3 月 19 日, 栃木県立大田原高等学校 (栃木).
- [55] 長谷川修司, 佐藤誠, 原田勲: 物理チャレンジ講習会: 実験レポートの書き方と重力加速度の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2022 年 3 月 17 日, 大阪星光学院中高校 (大阪).
- [56] 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, 2022 年 3 月 12 日, 栃木県立宇都宮女子高等学校 (栃木).
- [57] 長谷川修司, 谷内息吹: 栃木県立宇都宮高等学校 模擬授業と研究室見学, 2021 年 11 月 30 日, オンライン.

# 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
- 2D superconductivity at Ca-intercalated graphene, FeSe atomic layers, and  $\alpha$ -Sn layers
- non-reciprocal photocurrent at a Rashba surface induced by irradiation of circularly polarized light
- Weak anti-localization and linear magnetoresistance effect at Cu<sub>2</sub>Se thin films
- Ferromagnetic states at intercalated graphene and Mn-doped transition-metal dichalcogenide

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

- Epitaxial growth of ultra-flat SnTe 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
- Lateral-ToF system with pulsed laser for carrier mobility measurements

- [1] H. Huang, A. Rahman, J. Wang, Y. Lu, R. Akiyama, S. Hasegawa: *Spin-glass-like state induced by Mn-doping into a moderate gap layered semiconductor SnSe<sub>2</sub>*, Journal of Applied Physics **130**, 223903(6pp) (Dec, 2021).
- [2] 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 an intrinsic ferromagnetic topological insulator sandwich structure*, Nano Letters **22**(3), 881-887 (Jan, 2022).
- [3] T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama: *Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb)*, Physical Review B **105**, 064507 (9pp) (Feb, 2022).
- [4] H. Toyama, R. Akiyama, M. Hashizume, S. Ichinokura, T. Iimori, T. Matsui, K. Horii, S. Sato, R. Hobar, Y. Endo, T. Hirahara, F. Komori, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity of the Ca-intercalated graphene on SiC: vital role of the interface between monolayer graphene and the substrate*, ACS Nano **16**(3), 3582-3592 (Feb, 2022).