

## 1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として樋渡功太と鄭帝洪が新しくメンバーに加わった。3月末には遠藤由大が博士課程を、渡邊和己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)絶縁体結晶の表面状態、超伝導グラフェン、ラッシュバ超伝導、原子層超伝導などである。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、分子線エビ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 表面での電子・スピン輸送

#### In/SnTe 接合における界面超伝導

*s* 波超伝導体とトポロジカル絶縁体との接合では、近接効果によってトポロジカル表面状態に超伝導が誘起され、カイラル *p* 波超伝導状態が実現すると期待されている。本研究ではトポロジカル結晶絶縁体である SnTe の薄膜上に *s* 波超伝導体である In を蒸着した系について、その超伝導特性の In 蒸着量依存性を超高真空中 *in-situ* 電気伝導測定によって調べた。その結果、抵抗の温度依存性において In 蒸着量 3 ML 以上の系で超伝導転移が観測された。10 ML 以上の系では二段階の転移が観測され、二種類の超伝導相の存在が示唆された。一方は、その臨界磁場が小さいことから In アイランドによる超伝導と考えられる。もう一方の起源は明らかではないが、超伝導近接効果によって SnTe 層に誘起された超伝導である可能性が考えられる。今後、トポロジカル超伝導の検証を行う必要がある。

#### Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Sn,Tl) における Rashba 超伝導

スピン分裂した表面バンドが2次元超伝導を担うと、従来の BSC 理論によって説明できないような、スピン3重項クーパー対成分を含む新奇な超伝導(トポロジカル超伝導の一種)が理論的に予測されている。共同研究グループの研究により、半導体 Si 表面

に Sn と Tl を蒸着した Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Sn,Tl) 表面超構造が新たに発見され、さらに Rashba 型の金属的な表面スピン分裂が観測されたことから Rashba 超伝導が期待される。そこで本系を当研究室で再現し、その場4端子電気伝導測定を行ったところ、約 4 K で表面超伝導に由来すると思われる抵抗値のドロップが観測された。今後はゼロ抵抗の実現を目指して試料の質を向上を試み、超伝導が非従来型であることを裏付ける物性測定につなげていきたい。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

#### トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Se の異方的表面電気伝導

最近、トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Se の (100) 表面上の原子ステップに1次元トポロジカル状態が存在することが発見され、高次トポロジカル状態と解釈されている。そこで、この1次元トポロジカル状態の表面電気伝導への影響を、超高真空中の正方4探針プローブ法で測定した。Pb<sub>0.67</sub>Sn<sub>0.33</sub>Se の *n* 型単結晶を超高真空中で室温でへき開して (001) 面を出し、ステップ列に平行方向および垂直方向の抵抗、 $R_{//}$  と  $R_{\perp}$  を測定した。室温から冷却するにしたがって  $R_{\perp}$  が  $R_{//}$  より著しく増大した。この結晶の立方晶の結晶構造からは、この異方的な伝導度は説明できず、表面ステップが伝導キャリアに対して障壁になっていることに起因していると言える。今後、Sn の濃度を制御することによってフェルミ準位をチューニングし、トポロジカル表面状態での伝導を感度良く検出して1次元トポロジカル状態の伝導を捉えたい。(ポーランド科学アカデミーとの共同研究)

#### Yb 修飾グラフェンにおける異常ホール効果

*d, f* 電子軌道を持つ金属原子をグラフェンに導入すると、金属原子とグラフェンの軌道との相互作用により、グラフェンに強磁性が発現されることが理論的に示唆されていたが、実験的には実証されていなかった。本研究では、6H-SiC(0001) 基板を Ar 大気中で通電加熱して得られる単層・数層グラフェン/SiC の表面に、常磁性である Yb 原子を MBE 法にて室温蒸着させた試料、さらにそれを室温蒸着後アニールによってインターカレートを狙った試料を作製し電気伝導の *ex situ* 測定を行った。その結果、すべての試料において明瞭な異常ホール効果を示すヒステリシスループが観測された。また、Yb の蒸着量によってキュリー温度が変化した。Yb が強いスピン軌道相互作用をもつことから、Yb 修飾グラフェンにおける量子異常ホール効果発現の可能性が期待できる。

## 磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造での異常ホール効果

トポロジカル絶縁体 (TI) と強磁性 (FM) 体の界面では、トポロジカル表面状態で時間反転対称性が破れるため、エネルギー無散逸なカイラルエッジ状態 (量子異常ホール状態) や FM 秩序とは異なった渦状の磁気構造 (磁気スキルミオン状態) が実現可能である。これら 2 つの状態が共存するかを検証するために、当研究室では FMTI/TI/FMTI サンドイッチ構造である  $\text{Mn}(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_4/(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_3/\text{Mn}(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_4$  を分子線エピタキシー法で作製し、その電気伝導特性を物性測定システム (PPMS) によって磁気抵抗およびホール抵抗を *ex situ* 測定した。その結果、量子異常ホール効果観測には至っていないが、磁気スキルミオン由来と思われるホール抵抗の増強の観測に成功した。今後はバルクの影響をさらに抑制するために液体イオンゲートによるフェルミ準位の制御を行い、量子異常ホール状態と磁気スキルミオン状態の遷移の観測を目指す。

## 非対称光照射による逆スピンホール効果

これまでの我々の研究によって、円偏光をトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の端付近に照射すると、偏光方向に依存した光電流成分が発生することを見出し、逆スピンホール効果 (ISHE) によって説明できることを示した。また、有限要素法によるシミュレーションによっても非対称光照射誘起 ISHE が再現された。しかし、トポロジカル表面状態とバルク状態の寄与の区別など詳細なメカニズムは不明のままである。そこで、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜上に Bi 膜を蒸着し、円偏光依存光電流の Bi 膜厚依存性を測定した。その結果、Bi 膜厚依存性が見られず、14 原子層の Bi 膜でも円偏光依存光電流が観測された。これは、トポロジカル表面状態が  $\text{Bi}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$  界面に存在し続けるためであり、それが光電流の発生に主に寄与していると考えられる。

## SiC 上 Ca インターカレート単層グラフェンの超伝導

超伝導を発現することが報告されている SiC 上の Ca インターカレート 2 層グラフェンの構造解析を行った結果、グラフェン層とバッファー層 (SiC 基板と結合をもつ炭素原子層) の間に Ca 原子がインターカレートしていることが明らかとなった [Y. Endo *et al.*, Carbon 157, 857 (2020).]. この結果から SiC 上の単層グラフェンにおいても Ca 原子がインターカレートし、単層グラフェンで初となる超伝導の発現が期待される。そこで Ca 原子を SiC 上単層グラフェンにインターカレートする試料作製プロセスを確立した結果、インターカレートした Ca 原子により形成される  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  超周期構造を示す反射高速電子回折パターンが観察された。さらに、その試料を大気曝露することなく超高真空中で *in-situ* 電気伝導測定

を行った結果、約 4 K で超伝導転移によるゼロ抵抗が観測された。本結果はディラック電子をもつ SiC 上単層グラフェン化合物で初めて超伝導発現を明確に示した結果である。

## 鉄系超伝導原子層の成長

$\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  は鉄系超伝導体の一種であり、Se と Te の濃度比率を変えると超伝導特性やバンドトポロジーを制御することができる。また、グラフェンやチタン酸ストロンチウム表面上に形成された  $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  薄膜が超伝導を示すことが分光学的に示されている。我々は 2 つの方法で  $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  薄膜を作成した。まず、トポロジカル絶縁体である  $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Te}_{3-x}$  薄膜上に Fe 原子を蒸着した後アニールすると、3 つの異なる方位のドメインをもつ  $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  層が  $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Te}_{3-x}$  表面上に形成されていることを反射高速電子回折 (RHEED) による解析からわかった。もう一つの方法として、グラフェン上に Fe、Se、Te を同時蒸着すると、c 軸周りに回転したドメインをもつ繊維構造の  $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  薄膜が成長することが RHEED からわかった。2 つの方法で作成した薄膜上に保護膜としてアルミナを蒸着して PPMS で *ex situ* 測定した結果、両者の電気抵抗の温度依存性が極めて似ていたが、2 K まで超伝導を確認できなかった。その理由を探るにはドメイン構造や歪みの影響を調べる必要がある。

## 原子層青リンのエピタキシャル成長と電気伝導特性

リンは 2 次元層状物質でワイドギャップ半導体であるが、Li 等のアルカリ金属を 2 層青リン間にインターカレートさせることで約 20 K で 2 次元超伝導体に転移することが理論的に予測されている。先行研究では単結晶 Au 上に青リンの結晶成長が行われ、電気伝導には適していなかったが、本研究では SiC(0001) 上の Au(111) 薄膜上に成長することに成功した。今後は試料作製条件をより最適化して超高真空中での *in situ* 極低温電気伝導測定を中心に行う。

### 1.1.2 表面・原子層ナノ構造

#### Mn ドープ $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}_2$ の強磁性

ファンデルワールス (vdW) 層状物質は、容易にヘテロ構造を作ることができ、また超伝導や電荷密度波現象など興味深い物性を示すことから最近盛んに研究されている。その一種である  $\text{SnSe}_2$  は、約 1.2 eV のバンドギャップをもつ vdW 半導体である。また、Mn 原子をドーピングすると強磁性を発現することが理論的に示されていた。我々は化学気相輸送法によって Mn を 3% ドーピングした  $\text{Sn}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Se}_2$  単結晶を作成した。SQUID 測定によって転移温度が 65 K の希薄磁性半導体であることを確認した。独自の計算によって、磁性は Mn 原子の d 軌道由来であ

ることがわかった。次に、強磁性転移温度の Mn 濃度依存性を調べる。(中国科学技術大学との共同研究)

### EuS/SnTe 接合における強磁性近接効果

強磁性体 EuS とトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  とのヘテロ接合において、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  に磁性が滲みだす現象が知られているが、その起源の詳細は明らかになっていない。本研究では磁化の滲み出し(磁気近接効果)とトポロジカル表面状態の有無との関係を明らかにする目的で、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe とトリピアル絶縁体 PbTe それぞれについて EuS とのヘテロ接合を作製し、その磁気特性を調べた。SQUID による磁化測定では、EuS/SnTe においては 100 K-300 K において面直磁化が増強する振る舞いが見られた。これは先行研究の EuS/ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  における振る舞いと酷似しており、EuS/SnTe の界面磁化によるものと考えられる。一方で EuS/PbTe ではそのような振る舞いは観測されなかった。さらに、J-PARC の BL17 写楽において偏極中性子反射率 (PNR) 測定を行ったところ、PNR データは EuS/SnTe においては磁気滲み出しが存在するモデルと整合的であるが、EuS/PbTe では磁気滲み出しが小さいことがわかった。以上の結果は、強磁性体/トポロジカル絶縁体界面における磁気滲み出しの発現にトポロジカル表面状態の存在が寄与していることを示唆している。これはトポロジカル表面状態で時間反転対称性を破っているため、今後、電気伝導測定において量子異常ホール効果の観測などを目指す。(筑波大学と総合科学研究機構との共同研究)

### Fe/SnTe 接合における強磁性近接効果

トポロジカル表面に強磁性を導入すると、エネルギー無散逸流であるカイラルエッジ電流を生じる量子異常ホール効果やアクシオン状態などの興味深い量子現象が期待される。トポロジカル結晶絶縁体は磁化方向によって Dirac ギャップの大きさを制御できるなどの興味深い物性を持つと理論的に予想されているが、その実証は未だなされていない。量子異常ホール効果を実現するにはトポロジカル絶縁体の結晶性を崩さずに均一に強磁性を導入することが求められており、その方法の一つとしてヘテロ接合における近接効果による強磁性導入が挙げられる。本研究では、トポロジカル結晶 SnTe 薄膜表面上に Fe 原子層を成長させ、その磁気特性を SQUID 測定し、面直磁気異方性を持つことが分かった。さらに X 線結晶構造評価によって、異相の析出はなく界面でのラフネスはとても小さいと分かった。そこで J-PARC の BL17 写楽において偏極中性子反射率法によって強磁性の深さ方向の分布を解析した結果、Fe 層から SnTe 層へ約 3 nm の強磁性相互作用の滲み出しがあることがわかった。ただ、Fe は金属であるため、量子異常ホール効果などの観測のためには強磁性絶縁体との接合が望ましく、SnTe と格子マッチングの良い材料の探索が必要である。(筑波大学と総合科学研

究機構との共同研究)

### Ge(111) 上の (Pb,Bi) 表面合金層

超伝導ギャップが非自明なトポロジエを持つトポロジカル超伝導は、そのエッジや渦系中に発現すると言われるマヨラナ粒子のトポロジカル量子コンピュータへの応用などが期待され、精力的に研究されている。先行研究の理論予測によると、トポロジカル超伝導を 2 次元で実現する系として、Ge 基板上に成長した Pb と Bi の表面合金層が候補に挙げられたが、その作製例や実験報告はこれまでなかった。本研究では試料作製条件を細かく振ることで (Pb,Bi)/Ge(111) の構造相図を作製し、今回新たに発見された  $2 \times 2$  および  $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ -(Pb,Bi) 表面超構造を安定して作製することに成功した。角度分解光電子分光測定により金属的なバンドが観測され、その場電気伝導測定からは空間電荷層が主な伝導を担っていることが分かった。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

## 1.1.3 新しい装置・手法の開発

### 超高真空 SQUID の開発

超伝導に特異な物性は完全伝導性(電気抵抗ゼロ)と完全反磁性の二つがあり、その二つの測定をもって正式に超伝導と認定される。長年、当研究室では表面の電気伝導を超高真空 *in situ* 測定してきており、表面数原子層の超伝導と思われる電気抵抗の特異な減少を発見しているが、その磁化率は測定することができなかった。交流磁場を用いることで間接的に反磁性を確認している研究はあるが、直接的に完全反磁性を確認した研究は未だ存在しない。そこで、超高真空中の試料の電気伝導と同時に磁化率を *in situ* 測定することで表面の超伝導転移の詳細を調べることを目指し、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。本年度はピックアップコイルの設計と磁場オフセット機構の調整を見直し、ダイナミックレンジの拡張およびフラックスジャンプの防止対策を行った。今後は完全反磁性へ相転移する際の磁場の反転の確認を行う予定である。

### スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスでは、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、汎用性や迅速性に欠ける。本研究では、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プローブの開発を行ってきた。本年度は、スピン圧を直接測定できるプローブの設計を行い製作に取りかかっている。空間分解能とスピン分

解能がトレードオフとなっているため、新たな機構や物質を模索している。また、このプローブを用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べく、山梨大学白木研と共同で装置の改良を行っている。今後は本研究室に既存の独立駆動型 4 探針 STM および山梨大学白木研にある独立駆動型 4 探針 STM においてプローブの実証を行う予定である。(山梨大学との共同研究)

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 二国間交流事業共同研究 (ロシア) 「極低温での表面 2 次元物質」(代表 長谷川修司)
- ・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] 鄭 帝洪: “Yb 蒸着されたグラフェン/SiC における強磁性の発現”、日本物理学会領域 9 第 6 回学生優秀発表賞 (日本物理学会 2019 秋季大会), 2019 年 9 月。

#### <報文>

##### (原著論文)

- [2] S. Ichinokura, Y. Nakata, K. Sugawara, Y. Endo, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Vortex-induced quantum metallicity in mono-unit-layer superconductor NbSe<sub>2</sub>*, Phys. Rev. B **99**, 220501(R) (Jun, 2019).
- [3] N. V. Denisov, A. V. Matetskiy, A. N. Mihalyuk, S. V. Ereemeev, S. Hasegawa, A. V. Zotov, and A. A. Saranin: *Superconductor-insulator transition in an anisotropic two-dimensional electron gas assisted by one-dimensional Friedel oscillations: (Tl, Au)/Si(100)-c(2 × 2)*, Phys. Rev. B **100**, 155412 (Oct, 2019).
- [4] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo, S. Hasegawa: *Structure of Superconducting Ca-intercalated Bilayer Graphene/SiC studied using Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction*, Carbon **157**, 857-862 (Jan, 2020).
- [5] Y. Takeuchi, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Ichinokura, R. Yukawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Two-dimensional conducting layer on SrTiO<sub>3</sub> surface induced by hydrogenation*, Phys. Rev. B **101**, 085422 (Feb, 2020).
- [6] Di Fan, Rei Hobara, Ryota Akiyama, and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>*, Phys. Rev. Res. **2**, 023055 (Apr, 2020).

- [7] Y. C. Lau, R. Akiyama, H. Hirose, R. Nakanishi, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa, M. Hayashi: *Co-mittance of superconducting spin-orbit scattering length and normal state spin diffusion length in W on (Bi,Sb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, Journal of Physics: Materials **3**, 034001 (May, 2020).
- [8] 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 Pb/Ge(111)*, Superconductor Science and Technology, accepted (cond-mat arXiv:1910.03760).
- [9] Ryota Akiyama, Ryo Ishikawa, Kazuhiro Akutsu, Ryosuke Nakanishi, Yuta Tomohiro, Kazumi Watanabe, Kazuki Iida, Masanori Mitome, Shuji Hasegawa, Shinji Kuroda: *Direct probe of ferromagnetic proximity effect at the interface in Fe/SnTe heterostructure by polarized neutron reflectometry*, cond-mat arXiv:1910.10540 (Oct, 2019).

##### (国内雑誌)

- [10] 一ノ倉聖、長谷川修司: 超高真空中での電気伝導測定による原子層物質の超伝導の研究, 固体物理 **54**(6), 279-290 (Jun, 2019).
- [11] 高山あかり、長谷川修司: 超高真空中の“その場”電気伝導測定で探る原子層超伝導, 材料表面 **4**(3), 87-96 (Sep, 2019).

##### (その他)

- [12] 長谷川修司, 会誌編集委員会: 「平成の飛跡」の企画について, 日本物理学会誌 **74** (5), 目次 (May, 2019).
- [13] 長谷川修司: 14 回目の IPHO 日本代表団の派遣, JPhO News Letters No. 24 (Jul, 2019).

##### (学位論文)

- [14] 遠藤由大: SiC 上グラフェンへの金属原子インターカレーションによる構造変化と超伝導発現 (博士論文).
- [15] Liu Shengpeng: *Transport Properties of FeSe Thin Films on SrTiO<sub>3</sub>* (修士論文).
- [16] 高城拓也: 室温強磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合における量子異常ホール効果の探索 (修士論文).
- [17] 渡邊和己: 強磁性・超伝導とトポロジカル結晶絶縁体との協奏現象の探求 (修士論文).

#### <学術講演>

##### (国際会議)

##### 招待講演

- [18] R. Akiyama: *Structural and magnetic effects on surface states in topological (crystalline) insulators*, New Trends in Topological Insulators 2019, 広島, 2019 年 7 月 15 日.

- [19] S. Hasegawa: *Towards high-temperature quantum anomalous Hall effect*, IBS Conference on Surface Atomic Wires 2019, 2019年8月27日, Pohang (Korea).
- [20] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSOM 27), 2019年12月5日, 修善寺.
- [21] S. Hasegawa: *Graphene Intercalation*, The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2019), 2019年12月12日, Jeju, Korea.
- 一般講演
- [22] S. Hasegawa: *Conductivity measurements by micro-four-point probes*, The 1st Meeting of Core-to-Core Program on Coordination Nanosheets, 2019年5月10日, 東京大学.
- [23] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, H. Toyama, K. Hiwatari, R. Nakanishi, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Fabrication and Evaluation of High TC Ferromagnetic/Topological Insulator Heterojunction MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, New Trends in Topological Insulators 2019, 広島, 2019年7月15日.
- [24] Y. Guo, R. Hobara, R. Akiyama, H. Toyama, G. Mazur, T. Dietl and S. Hasegawa: *Anisotropic electrical conductance on a (001) surface of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Se*, The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSOM 27), 2019年12月7日, 修善寺.
- [25] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Hasegawa: *Non-reciprocal photocurrent induced by illumination of circularly polarized light onto topological insulators*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2020, 2020年1月23日, 雫石(岩手).
- (国内会議)
- 招待講演
- [26] 長谷川修司: 研究者、このクリエイティブで人間的な職業, 日本学校保健学会第66回学術大会, 2019年12月1日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京).
- 一般講演
- [27] 遠山晴子, 中村友謙, 田中宏明, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, 保原麗, 秋山了太, A.V. Zotov, A.A. Saranin, 長谷川修司: 半導体基板上の2次元(Pb,Au)層の構造と物性, 日本表面真空学会2019年度関東支部学術講演大会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2019年4月13日.
- [28] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> の作製とその評価, 日本表面真空学会2019年度関東支部学術講演大会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2019年4月13日.
- [29] 渡邊和己, 中西亮介, 秋山了太, 福居直哉, 豊田良順, 西原寛, 長谷川修司: In/SnTe/Bi(111) 構造における二次元超伝導の観測, 日本表面真空学会2019年度関東支部学術講演大会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2019年4月13日.
- 日本物理学会 2019 秋季大会, 2019年9月10日-13日(岐阜大学)
- [30] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: 室温強磁性トポロジカル絶縁体 MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> の電気伝導特性, 9月11日.
- [31] 秋山了太, 佐藤瞬亮, 遠藤由大, 長谷川修司: SiC(0001)上に成長した青リンの構造と伝導特性, 9月10日.
- [32] 渡邊和己, 友弘雄太, 嶋野武, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田真司, 長谷川修司: 偏極中性子反射率法を用いた EuS/SnTe および EuS/PbTe ヘテロ界面における磁化の測定, 9月10日.
- [33] 遠藤由大, 鄭帝洪, 秋山了太, 長谷川修司: K 修飾された Ca インターカレートグラフェン/SiC の輸送特性, 9月10日.
- [34] 鄭帝洪, フェルバケルヨルト, 遠藤由大, 秋山了太, 長谷川修司: Yb 蒸着されたグラフェン/SiC における強磁性の発現, 9月10日.
- [35] 長谷川修司, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 大塚洋一, 井通暁, 海老崎功, 右近修治, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史 I, 小牧研一郎 J, 近藤泰洋 K, 櫻井一充 G, 下田正 L, 真梶克彦, 末元徹, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 林壮一, 深津晋, 松本益明 S, 松本悠, 味野道信: 物理チャレンジ 2019 報告: II. 第2チャレンジ実験問題, 9月13日.
- [36] 松本益明, 中屋敷勉, 杉山忠男, 東辻浩夫, 金子朋史, 真梶克彦, 高橋拓豊, 荒船次郎, 上杉智子, 大原仁, 興治文子, 加藤岳生, 栗原進, 田中忠芳, 波田野彰, 吉田弘幸, 江尻有郷, 毛塚博史, 吳屋博, 近藤泰洋, 佐藤誠, 鈴木功, 並木雅俊, 長谷川修司, 光岡薫, 高羽悠樹, 福澤昂汰, 吉田智治, 小宮山智浩, 中江優介, 渡邊明大, 北原和夫: 第50回国際物理オリンピック報告, 9月13日.
- 日本表面真空学会 2019 年学術講演会, 2019年10月28日-30日(つくば国際会議場)
- [37] 遠山晴子, Huang Hongrui, 中村友謙, Bondarenko Leonid, Tupchaya Alexandra, Gruznev Dimitry, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, Zotov Andrey, Saranin Alexander, 長谷川修司: Ge(111) 基板上の2次元 Pb の表面構造および超伝導, 10月28日.
- [38] Guo Yuxiao, 保原麗, 秋山了太, 遠山晴子, 長谷川修司: *Anisotropic electrical conductance on a (001) surface of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Se*, 10月28日.
- [39] 秋山了太, 宮内恵太, 遠藤由大, 佐藤瞬亮, 保原麗, 長谷川修司: SiC(0001)上に成長した原子層単結晶青リンの特性, 10月28日.
- [40] 遠藤由大, 鄭帝洪, 秋山了太, 長谷川修司: K 修飾された Ca インターカレートグラフェン/SiC による超伝導, 10月28日.

- [41] 渡邊和己, 友弘雄太, 嶋野武, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司: 偏極中性子反射率法による強磁性体/トポロジカル結晶絶縁体ヘテロ界面における磁化の深さ依存性の測定, 10月28日.
- [42] 鄭帝洪, フェルバケルヨルト, 遠藤由大, 秋山了太, 長谷川修司: SiC 基板上 Yb 蒸着グラフェンにおける強磁性の発現, 10月29日.
- [43] 高城拓也, 秋山了太, Kibirev Ivan, Matetskiy Andrey, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, Zotov Andrey, Saranin Alexandre, 長谷川修司: 室温強磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合  $MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$  の電気伝導特性評価, 10月30日.
- 日本物理学会 第75回年次大会, 2020年3月16日-19日 (名古屋大学, 東山キャンパス) (中止のため、講演概要提出による発表)
- [44] 鄭帝洪, V. Jort, 遠藤由大, 渡邊和己, 遠山晴子, 高城拓也, 保原麗, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 秋山了太, 長谷川修司: Yb 吸着グラフェン/SiCの磁性, 3月17日.
- [45] Hongrui Huang, 秋山了太, 長谷川修司: Si(111) と SiC(0001) とグラフェンに成長した層状 SnSe2 の輸送特性, 3月17日.
- [46] 郭宇嘯, 秋山了太, 保原麗, 遠山晴子, Grzegorz Mazur A, Tomasz Dietl A, 長谷川修司: トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Se(001) 表面における異方的な電気伝導特性, 3月17日.
- [47] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev A, B, A. V. Matetskiy A, B, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, A. V. Zotov A, B, A. A. Saranin A, B, 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  $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3/Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/Si(111)$  の電気伝導特性, 3月17日.
- [48] ファン デイ, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司:  $Bi_2Se_3$  上への Bi 蒸着による偏光誘起光電流の変調, 3月17日.
- (セミナー)
- [49] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors and Topological Insulators*, National Synchrotron Laboratory, 中国科学技術大学 2019年4月3日.
- (講義等)
- [50] 長谷川 修司: 未来を拓くナノサイエンス ノーベル賞は遠くない, 早稲田大学基幹理工学部『理工文化論』, 2019年6月8日, 早稲田大学 (西早稲田).
- [51] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「歴史を変えた物理」(学部1年生), 2019年度夏学期(駒場).
- [52] 長谷川修司, 秋山了太, 遠山晴子 (TA), HUANG Hongrui (TA), 樋渡 功太 (TA), 鄭 帝洪 (TA): 物理学実験 II (学部3年生) 電子回折, 2019年度冬学期(本郷).

(アウトリーチ)

- [53] 長谷川修司: 物理チャレンジから始まる主体的な学び・生き方, 岡山物理コンテスト2019 サイエンス講演会(岡山県教育委員会), 2019年10月19日, 岡山大学.
- [54] 長谷川修司: 私たちの生活を支えるナノサイエンス, (公財)加藤山崎教育基金 軽井沢教室, 2019年8月5日, 軽井沢.
- [55] 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, 2019年6月9日, 茨城県立水戸第一高等学校(茨城): 2019年12月18日, 大阪星光学院中学高校(大阪): 2020年2月1日, 栃木県立宇都宮女子高等学校(栃木).
- [56] オープンキャンパス研究室公開「表面的でない表面物理学」, 2019年8月8日, 理学部1号館B101号室(東京大学)
- [57] 模擬授業および研究室見学受入神奈川県立湘南高等学校, 2019年8月8日: 茨城県立竹園高等学校, 2019年8月8日: 茨城県立土浦第一高等学校, 2019年8月9日: 群馬県立前橋高等学校, 2019年11月12日: 栃木県立宇都宮高等学校, 2019年12月3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 breakdown, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Electronic/spin/mass transports including superconductivity, (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 insulators, 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:**

- Interface superconductivity at topological crystalline insulator/trivial semimetal junction
- Anomalous Hall effect at interface between topological insulator and ferromagnetic insulator
- 2D superconductivity at monolayer alloy metallic surface superstructures and by proximity effect
- Spin injection by circularly polarized light irradiation on topological insulators
- Superconducting Graphene with intercalation
- CDW and transport at transition metal dichalcogenides

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

- Epitaxial growth of blue Phosphor atomic layers
- Structure dynamics of Ca-intercalated bilayer graphene observed by low-energy-electron microscopy

**(3) New methods:**

- Fabrication of UHV-SQUID system to detect Meissner effect of atomic-layer superconductors
- Fabrication of a pure-spin-current injection/detection probe

- [1] S. Ichinokura, Y. Nakata, K. Sugawara, Y. Endo, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Vortex-induced quantum metallicity in mono-unit-layer superconductor NbSe<sub>2</sub>*, Phys. Rev. B **99**, 220501(R) (Jun, 2019).
- [2] N. V. Denisov, A. V. Matetskiy, A. N. Mihalyuk, S. V. Ereemeev, S. Hasegawa, A. V. Zotov, and A. A. Saranin: *Superconductor-insulator transition in an anisotropic two-dimensional electron gas assisted by one-dimensional Friedel oscillations: (Tl, Au)/Si(100)-c(2 × 2)*, Phys. Rev. B **100**, 155412 (Oct, 2019).
- [3] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo, S. Hasegawa: *Structure of Superconducting Ca-intercalated Bilayer Graphene/SiC studied using Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction*, Carbon **157**, 857-862 (Jan, 2020).
- [4] Y. Takeuchi, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Ichinokura, R. Yukawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Two-dimensional conducting layer on SrTiO<sub>3</sub> surface induced by hydrogenation*, Phys. Rev. B **101**, 085422 (Feb, 2020).
- [5] Di Fan, Rei Hobara, Ryota Akiyama, and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>*, Phys. Rev. Res. **2**, 023055 (Apr, 2020).
- [6] 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)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, Journal of Physics: Materials **3**, 034001 (May, 2020).
- [7] 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 Pb/Ge(111)*, Superconductor Science and Technology, accepted (cond-mat arXiv:1910.03760).

# 第1章 2019年度に開講された学部講義概要

## 1.0.1 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通) : 長谷川修司, 小森文夫

固体物理の知識を前提にして、固体表面の物理を、基礎概念から最新のトピックスを交えて解説する。

原理、表面原子構造観察、局所電子状態・表面バンドの観測、準粒子干渉、表面電子定在波、原子マニピュレーション、スピン分解測定、非弾性トンネル

### 1. 概論

表面科学とは、歴史、ナノサイエンス・ナノテクと表面

### 5. 表面電子輸送

表面空間電荷層の2次元電子系、表面電子バンドの2、1次元電子系、表面スピン輸送、純スピン流、原子層超伝導

### 2. 表面構造

表面超構造と相転移、回折法、顕微鏡法、動的過程

### 6. 電子ダイナミクス

時間分解光電子分光、高次高調波、鏡像状態、電子散乱、電子格子相互作用、電子励起相転移

### 3. 表面電子状態

表面電子状態・トポロジカル表面状態、バンド分散・原子結合状態測定法((逆)光電子分光法、トンネル分光法、スピン分解光電子分光)、線形バンド分散、スピン軌道相互作用、ラッシュバ効果、スピン軌道エンタングルメント

### 7. 表面超薄膜磁性

磁気モーメントと相転移、強磁性超薄膜、磁気円二色性、スピン再配向転移、表面ナノ強磁性体、スピンドイナミクス

### 4. 走査プローブ顕微鏡