

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05453

研究課題名(和文) 走査プローブ顕微鏡による空間反転対称性の破れた表面超伝導体の特異な物性解明

研究課題名(英文) Elucidating the peculiar properties of inversion-symmetry-broken surface superconductors with scanning tunneling microscopy

研究代表者

平原 徹 (Hirahara, Toru)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：30451818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではSrTiO₃(001)基板(STO)の表面超構造と、その上に成長させた単一ユニットセルFeSeの超伝導特性の関係を走査トンネル顕微鏡/分光測定を用いて調べた。反射高速電子回折観察を行いながらSTO基板の加熱温度を変化させることで、STOの表面超構造を2×1と2×2に作り分けることに成功した。さらにこの表面超構造が、上に成長させたFeSeを介して観察できることがわかり、超伝導ギャップの大きさが超構造に依存している(2×1上では10-15 meVで、2×2では15-17.5 meV)ことを世界で初めて観測した。この起源はSTO基板の終端面に関連していると思われる。

研究成果の概要(英文)：We report the relationship between the surface superstructure of SrTiO₃(001) (STO) substrate and superconducting properties of single unit cell (1 UC) FeSe films using scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/STS). Under reflection high-energy-electron diffraction (RHEED) observation, we controlled the periodicity of the STO surface to 2×1 and 2×2 by changing the annealing temperature and grew high-quality FeSe films. We found that the substrate periodicity can be imaged through the 1 UC FeSe from high-resolution STM observations and obtained clear evidence that the superconducting gap size depends on the surface periodicity (10-15 meV on 2×1 and 15-17.5 meV on 2×2) for the first time. The results are discussed in terms of the surface termination of the STO substrate.

研究分野：表面・ナノ物性

キーワード：超伝導 走査トンネル顕微鏡 ラッシュバ効果

1. 研究開始当初の背景

通常、超伝導を示す物質を薄膜化すると超伝導転移温度(T_c)は下がり、数原子層レベルの厚さの二次元系になれば超伝導を示さなくなる。これは低次元系においてはゆらぎが大きくなり、秩序だった状態になるのを嫌うためである。しかし、2012年に鉄系超伝導体 FeSe でバルクの T_c が 8 K であるのに対し、SrTiO₃(001)(STO)上に形成された Se-Fe-Se の単一ユニットセル FeSe(1UC FeSe)が原子3層という薄さに関わらず、 T_c が 60 K 以上であるという報告がなされた。それ以来、このバルクよりもはるかに高い T_c の起源を探索する様々な研究が行われ、STO と FeSe の界面が重要であると言われている。具体的には、STO 基板から FeSe への電子ドープ、さらには STO 表面の格子との FeSe の電子との強い電子格子相互作用などである。しかしこの系に関して報告されている転移温度は 40~109 K とばらついていることもあり、はっきりとした結論は出ていない。この理由の一つは、STO(001)の表面超構造をきちんと制御した研究が行われていないためである推測される。さらにこのような基板の効果が顕著であれば、1UC FeSe は系全体として空間反転対称性が破れており、その影響が超伝導特性に発現してもよいはずである。しかし、そのような報告はなされていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、

- (1) STO(001)基板の表面超構造を制御して 1UC FeSe を作製し、超伝導特性が表面超構造に依存するかを測定することで、高い T_c の起源を探る
- (2) 1UC FeSe/STO において空間反転対称性の破れた超伝導体の特徴を捉えるの 2 つを目的とした。

3. 研究の方法

実験はすべて超高真空中で動作する走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて行われた。まず、STO 基板を加熱によって清浄化した後、反射高速電子回折(RHEED)観察下で Fe と Se を 1:4 の比で基板に蒸着し、1UC FeSe を作製した。膜厚は RHEED のスポットの強度振動を調べることで精密に制御可能である。そしてこのようにして作製した試料を大気にさらすことなく、その場で STM 観察して薄膜の形状を確認した。また高分解能測定を行うことで原子レベルの構造も知ることができた。さらに走査トンネル分光(STS)測定で電子状態密度を計測し、フェルミ準位でのギャップの存在を確認することで超伝導の発現を検証した。STM/STS 測定はすべて 5 K で行われた。

4. 研究成果

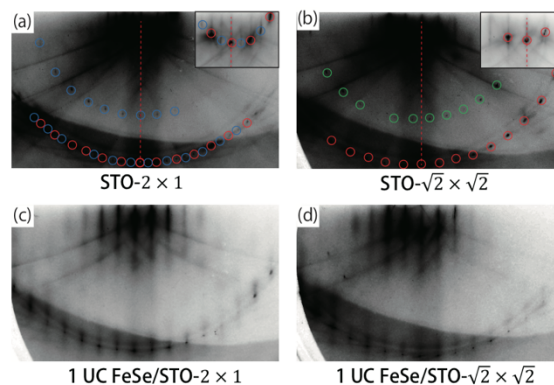


図 1 (a,b) STO(001)表面の 2×1 および $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 超構造。挿入図および $1/2$ ラウエゾーンに違いが現れる。(c, d) (a), (b)それぞれの上に 1UC FeSe を成長させたときの RHEED パターン。

まず、STO(001)基板の表面超構造を加熱温度によって制御し、RHEED を用いて確認した。図 1 に示すように 950°C で加熱すると 2×1 構造(a)、 700°C で加熱すると $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 構造(b)が出現することが分かった。両者の違いは認識しづらいが、第ゼロラウエゾーンにおける $\times 2$ スポットの有無や、 $1/2$ ラウエゾーンのスポット位置の違いに現れている。それぞれの表面上に 1UC FeSe を成長させたが、RHEED パターンに大きな差はなかった(図 1(c), (d))。

上記のようにして作製した 1UC FeSe の STM/STS 観察を行った。図 2(a)が 2×1 上の単層 FeSe であるが、平坦な薄膜が形成されたことが明確にわかる。しかし、この試料は薄膜成長後、 500°C で 5 分加熱した状態では超伝導を示さなかった。また膜は平らであったが、高分解能 STM 像においても乱れた像しか観測されなかった。その後、この試料を 500°C で 1 時間加熱して STM 測定されたのが、図 2(b)である。平らな膜ではあるが、よく見ると明るい領域 (Bright region) と暗い領域 (Dark region) の 2 つの種類があることが分かる。さらに高分解能測定により原子像を得たのが、図 2(c)と(d)である。実空間像でも分かるが、フーリエ変換(挿入図)をとると明確に(c)では 1×1 周期が、(d)では 2×1 周期が見られた(青四角が 2×1 、黒四角が 1×1 の周期である)。FeSe 自身の周期は 1×1 であるが、FeSe と STO の結合が強いために STO の電子状態が反映され、FeSe を介して下地の基板の周期性が見えると説明できる。そして超伝導ギャップを測定すると、場所によって多少ばらつきがあるものの、図 2(e)や(f)のように 12-15meV の超伝導ギャップが観測された。このように高分解能の STM/STS を駆使することで、基板の表面超構造と 1UC FeSe の超伝導ギャップの大きさを明確に対応づけて測定することに成功した。また 1 時間の加熱の効果に関しては、FeSe 蒸着中に界面に着いた余剰な Se 原子が飛んだことが先行研究で報告されており、今回も同じことが起こったと推測される。

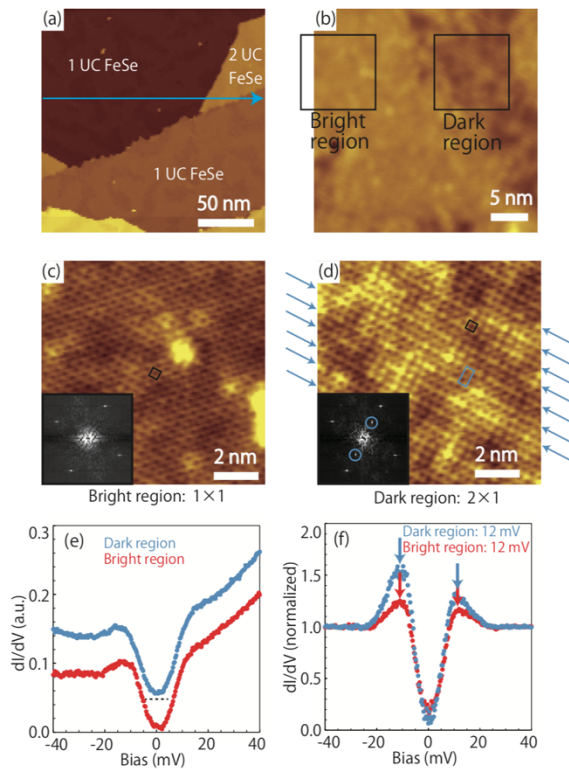


図 2 (a, b) STO(001)- 2×1 上の FeSe の広域 STM 像($200\times 200\text{ nm}^2$)(a)、および 1UC FeSe の拡大図($30\times 30\text{ nm}^2$)(b)。(c, d) (b)の Bright と Dark region における原子分解能 STM 像。挿入図のフーリエ変換に明確に示されているように、それぞれ 1×1 (c)および 2×1 (d)周期が観測された。(e) Bright と Dark region における高分解能 STS 曲線。超伝導ギャップと準粒子ピークが観測された。(f) 定量的解析のため、(e)を規格化したもの。

一方、 $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 表面上の単層 FeSe 上では、 500°C で5分加熱した時点で原子分解能が得られ、超伝導ギャップが観測できた。これは 2×1 上の場合と違い、余剰な Se が界面につかなかったからと想像される。また、図 3(a)の広域の STM 像を詳しくみると、 2×1 上では見られなかった 0.2 nm 高さの異なるドメインを発見した (図 3(b))。そして、原子像観察により、通常の領域(Domain A)では期待通りの基板表面の $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 周期が観測されたが (図 3(c))、この 0.2 nm 高いドメイン(Domain B)上では 2×1 の周期が見られた (図 3(d))。これはやはり下地の STO 表面の周期性を反映している。さらに STS 測定により、Domain A と Domain B での超伝導特性が異なっていることが明らかになった(図 3(e))。具体的には、超伝導ギャップの大きさが Domain A では 15 meV であったのに対し、Domain B では 10 meV であった。さらに Domain B ではフェルミエネルギーの状態密度も完全にゼロにならなかった。測定されたギャップ値には少しばらつきがあり、Domain A では $15\text{--}17.5\text{ meV}$ 、Domain B では $10\text{--}12.5\text{ meV}$ と分かった。

以上の結果より、STO(001) 2×1 表面に作製

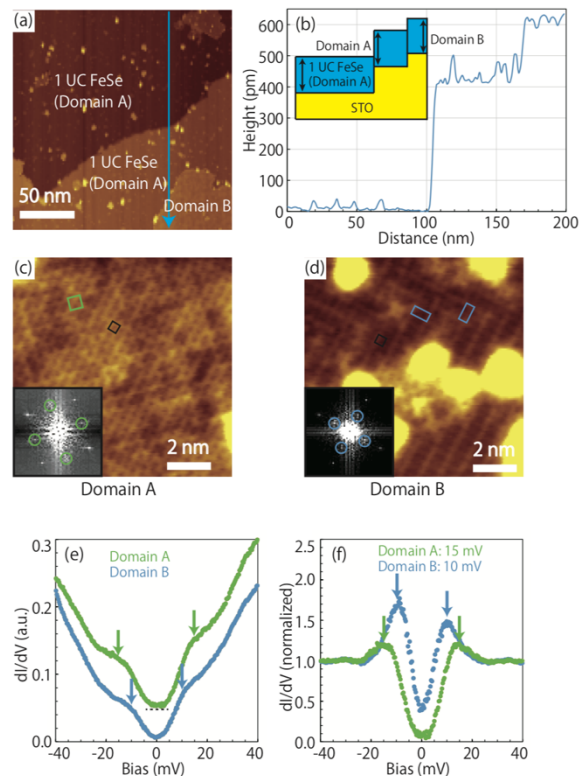


図 3 (a) STO(001)- $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 上の FeSe の広域 STM 像($200\times 200\text{ nm}^2$)(a)、および青い線に沿ったラインプロファイル(b)。2 種類の 1UC FeSe (Domain A と B)が観測された。(c, d) Domain A と B における原子分解能 STM 像。挿入図のフーリエ変換に明確に示されているように、それぞれ $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ (c)および 2×1 (d)周期が観測された。(e) Domain A と B における高分解能 STS 曲線。超伝導ギャップと準粒子ピークが観測された。(f) 定量的解析のため、(e)を規格化したもの。

した FeSe よりも $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 表面に作製した場合の方が、超伝導ギャップが大きいことが明らかになった。さらに同じ試料上では 2×1 構造の方が $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 構造よりも 0.2 nm 高さが高いことが分かった。これは STO 基板の終端面の違いに関係している可能性がある。 0.2 nm は STO(001)基板のステップ 1 つ分の高さ 0.4 nm の半分に相当する高さであり、通常ドメインに対して TiO_2 面あるいは SrO 面が一つ分余計についていることが想像され、次の二つのシナリオが考えられる。第一のシナリオは $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ 表面が単層 TiO_2 終端で、 2×1 表面が 2 層 TiO_2 終端というものである。理論計算によって、単層 TiO_2 面よりも 2 層 TiO_2 面の方がキャリアを多くドーピングすることが示されているので、 2×1 面からのドーピング量はオーバードープ領域なのかもしれない。第二のシナリオは $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ が SrO 終端で、 2×1 表面が TiO_2 終端であるというものである。この場合も TiO_2 終端の方がキャリアドーピングが多いので、 2×1 上ではやはりオーバードープ領域なのであろう。実際には表面超構造によってフォノン分散は当然変わっているはずなので、その情報をキャリアドーピング量と合わせることで表面超構造

による単層 FeSe のギャップサイズの違いや高い転移温度の起源を議論することが可能となる。

本研究をまとめると、STO(001)基板の表面超構造を 2×1 、 $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ と制御して単層 FeSe 薄膜を作製し、その超伝導特性を調べた。まず、FeSe 薄膜作製時の余剰 Se の入り方が両者の場合で明確に異なっていた。さらに、FeSe 薄膜の STM 像で下地の周期性を反映したものの観測に成功し、これを利用して超伝導ギャップの STO 基板表面超構造の依存性を明確に測定できた。下地が 2×1 の場合は 10-15 meV、 $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ の場合はこれよりも大きく 15-17.5 meV であった。これは FeSe 薄膜の超伝導特性が表面超構造によって異なっていることを示した最初の報告であり、今後 $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$ や $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ などの酸素欠陥濃度が異なる表面を用いることで、STO 基板上の単層 FeSe の高い転移温度の起源を探求することができると思われる。

一方反転対称性の破れた超伝導体の特徴は残念ながら得られなかった。今後磁場印加による超伝導特性の変化を測定することでこの点にも着目してさらに研究を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

1. T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, "Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi-Level Position of Ultrathin Bi Films", 査読有, Physical Review Letters **115**, 106803 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.106803>.
2. A. V. Matetskiy, I. A. Kibirev, T. Hirahara, S. Hasegawa, A. V. Zotov, and A. A. Saranin, "Direct observation of a gap opening in topological interface states of MnSe/Bi₂Se₃ heterostructure", 査読有, Applied Physics Letters **107**, 091604 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4930151>.
3. T. T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinokura, T. Hirahara, and S. Hasegawa, "Target element dependent spin-orbit coupling in polarized 4He⁺ ion scattering", 査読有, Nuc. Inst. Meth. B **354**, 163 (2015). DOI: [10.1016/j.nimb.2014.11.055](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.11.055).
4. T. Hirahara, "The Rashba and quantum size effects in ultrathin Bi films", 査読有, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **201**, 98 (2015) [invited review article].
5. 一ノ倉聖、平原徹、酒井治、長谷川修司、鈴木拓, "ピスマス表面におけるスピン依存イオン散乱", 査読有, 表面科学 **36**, 408 (2015).
6. Tomonori Nakamura, Ryo Yoshino, Rei Hobara, Shuji Hasegawa, and Toru Hirahara, "Development of a Convenient in situ UHV Scanning Tunneling Potentiometry System Using a Tip Holder Equipped with Current-Injection Wires", 査読有, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **14**, 216 (2016). <https://doi.org/10.1380/ejsnt.2016.216>
7. Yuma Okuyama, Yuya Sugiyama, Shin-ichiro Ideta, Kiyohisa Tanaka, and Toru Hirahara, "Growth and atomic structure of tellurium thin films grown on Bi₂Te₃", 査読有, Applied Surface Science, **398** 125 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.196>
8. T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S.-I. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T. Yokoyama, S.-I. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov, "Large-Gap Magnetic Topological Heterostructure Formed by Subsurface Incorporation of a Ferromagnetic Layer", 査読有, Nano Letters **17**, 3493 (2017). DOI: [10.1021/acs.nanolett.7b00560](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00560)
9. Y. Sugiyama, C. Bernard, Y. Okuyama, S.-I. Ideta, K. Tanaka, T. Greber, and T. Hirahara, "Flattening and manipulation of the electronic structure of h-BN/Rh(111) nanomesh upon Sn intercalation", 査読有, Surface Science **672-673**, 33 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susc.2018.03.007>
10. T. Hirahara and S. Hasegawa, "Comment on "Quantum transport in the surface states of epitaxial Bi(111) thin films"", 査読有, Physical Review B **97**, 207401 (2018). DOI: [10.1103/PhysRevB.97.207401](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.207401)

[学会発表] (計 41 件)

1. 平原徹, "近接効果によるトポロジカル表面状態の制御", 第一回 HiSOR スピン物性研究会~高輝度光源を活かしたスピン分解光電子分光研究の展望~(招待講演), 2018年3月, 広島大学.
2. 秋山健太、田中友晃、芳野諒、平原徹, "SrTiO₃ 基板上の単層 FeSe の超伝導特性の基板表面超構造依存性", 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018年3月, 東京理科大学.
3. 横山喜一、奥山裕磨、宮本幸治、奥田太一、田中清尚、平原徹, "Mn と Te を蒸着した Bi₂Te₃ の電子構造とその温度依存性", 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018年3月, 東京理科大学.
4. T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y.

- Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T. Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov, "Large-Gap Magnetic Topological Heterostructure Formed by Subsurface Incorporation of a Ferromagnetic Layer", Bulk edge correspondence (BEC) 2018, 2018年1月, Tsukuba (Japan).
5. 平原徹, "トポロジカル絶縁体表面に埋め込まれた強磁性層", 第8回 真空・表面科学若手研究会, 2017年10月, 筑波大学.
 6. 奥山裕磨, S. V. Ereemeev, 中西亮介, 秋山了太, 白澤徹郎, 角田一樹, 宮本幸治, 奥田太一, 出田真一郎, 田中清尚, 高木康多, 横山利彦, E. V. Chulkov, 長谷川修司, 平原徹, "磁性絶縁体/トポロジカル絶縁体超薄膜ヘテロ構造の電子状態と磁化特性", UVSOR シンポジウム 2017, 2017年10月, 岡崎.
 7. 横山喜一, 奥山裕磨, 宮本幸治, 奥田太一, 田中清尚, 平原徹, "Mn と Te を蒸着した Bi₂Te₃ の電子構造とその温度依存性", UVSOR シンポジウム 2017, 2017年10月, 岡崎.
 8. 田中友晃, 芳野諒, 秋山健太, 平原徹, "SrTiO₃ 基板上的単一ユニットセル FeSe の超伝導特性:表面超構造依存性", 第8回 真空・表面科学若手研究会, 2017年10月, 筑波大学.
 9. 奥山裕磨, S. V. Ereemeev, 中西亮介, 秋山了太, 白澤徹郎, 角田一樹, 宮本幸治, 奥田太一, 出田真一郎, 田中清尚, 高木康多, 横山利彦, E. V. Chulkov, 長谷川修司, 平原徹, "磁性絶縁体/トポロジカル絶縁体超薄膜ヘテロ構造の電子状態と磁化特性", 第8回 真空・表面科学若手研究会, 2017年10月, 筑波大学.
 10. 横山喜一, 奥山裕磨, 宮本幸治, 奥田太一, 田中清尚, 平原徹, "Mn と Te を蒸着した Bi₂Te₃ の電子構造とその温度依存性", 第8回 真空・表面科学若手研究会, 2017年10月, 筑波大学.
 11. T. Tanaka, R. Yoshino, K. Akiyama and T. Hirahara, "Local Superconducting Properties of Single-Unit-Cell FeSe Films on SrTiO₃", 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), 2017年10月, Tsukuba (Japan).
 12. Y. Okuyama, S. V. Ereemeev, R. Nakanishi, R. Akiyama, T. Shirasawa, Y. Sugiyama, K. Sumida, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ideta, K. Tanaka, E. V. Chulkov, S. Hasegawa, and T. Hirahara, "Heterostructure of a topological insulator/magnetic insulator ultrathin film", 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), 2017年10月, Tsukuba (Japan).
 13. 田中友晃, 芳野諒, 秋山健太, 平原徹, "SrTiO₃ 基板上的単一ユニットセル FeSe の局所的な超伝導特性", 日本物理学会 2017年秋季大会, 2017年9月, 岩手大学.
 14. 杉山裕弥, 奥山裕磨, C. Bernard, 出田真一郎, 田中清尚, T. Greber, 平原徹, "h-BN/Rh(111)への Sn, Ge インターカレーションによる平坦化", 日本物理学会 2017年秋季大会, 2017年9月, 岩手大学.
 15. 奥山裕磨, 石川遼, 黒田真司, 平原徹, "トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ接合の電子状態:膜厚依存性", 日本物理学会 2017年秋季大会, 2017年9月, 岩手大学.
 16. 平原徹, "自己組織化によって形成された磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合", 物性研短期研究会「光で見る・操る 電子物性科学の最前線~強相関, トポロジー, 低次元, ダイナミクス~, 2017年6月, 東京大学物性研究所.
 17. T. Hirahara, "Inducing magnetism in topological insulators by self organized incorporation of a ferromagnetic layer", Physics at the borderline between 1D and 2D, 2017年3月, Bad Honnef (Germany).
 18. 田中友晃, 芳野諒, 平原徹, "SrTiO₃ 基板上の単一ユニットセル FeSe の電子状態:表面超構造依存性", 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月, 大阪大学.
 19. 奥山裕磨, S. V. Ereemeev, 白澤徹郎, 杉山裕弥, 角田一樹, 宮本幸治, 奥田太一, 出田真一郎, 田中清尚, E. V. Chulkov, 平原徹, "トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ接合 I: 結晶構造と電子状態", 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月, 大阪大学.
 20. 中西亮介, 秋山了太, 奥山裕磨, 高木康多, S. V. Ereemeev, E. V. Chulkov, 横山利彦, 長谷川修司, 平原徹, "トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ接合 II:磁化特性", 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月, 大阪大学.
 21. T. Hirahara, "Dirac Electrons in Condensed Matter Physics", IOP Publishing Young Researchers' Meeting: Frontiers in Fundamental and Applied Physics, 2017年2月, Tokyo (Japan).
 22. T. Tanaka, R. Yoshino, and T. Hirahara, "Local Superconducting Properties of a Single Unit-Cell FeSe Thin Film on SrTiO₃", IOP Publishing Young Researchers' Meeting: Frontiers in Fundamental and Applied Physics, 2017年2月, Tokyo (Japan).
 23. Y. Okuyama, S. V. Ereemeev, R. Nakanishi, R. Akiyama, T. Shirasawa, Y. Sugiyama, K. Sumida, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ideta, K. Tanaka, E. V. Chulkov, S. Hasegawa, and T. Hirahara, "Heterostructure of a topological insulator/magnetic insulator ultrathin film", IOP Publishing Young Researchers' Meeting: Frontiers in Fundamental and Applied Physics, 2017年2月, Tokyo (Japan).
 24. 平原徹, "ビスマス系超薄膜・ヘテロ接合の電子構造とスピン物性", 日本磁気学

- 会第 62 回スピエレクトロニクス専門研究会, 2017 年 1 月, 京都大学.
25. Toru Hirahara, “The Rashba and quantum size effects in ultrathin Bi films”, AVS 63rd International Symposium & Exhibition, 2016 年 11 月, Nashville (USA).
 26. 平原徹, “表面・ナノ薄膜の電子物性と原子構造:新奇ディラック電子創出に向けて”, 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻セミナー, 2016 年 11 月, 大阪大学.
 27. 田中友晃, 芳野諒, 平原徹, “単一ユニットセル FeSe の構造と電子状態:STM/STS 観察”, 日本表面科学会関東支部 第 4 回関東支部セミナー, 2016 年 10 月, 東京大学.
 28. 田中友晃, 芳野諒, 平原徹, “単一ユニットセル FeSe の構造と電子状態:STM/STS 観察”, 物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 2016 年 10 月, 東京大学物性研究所.
 29. 平原徹, “トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ構造:磁化によるディラックコーン変調に向けて”, 物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 2016 年 10 月, 東京大学物性研究所.
 30. 田中友晃, 芳野諒, 平原徹, “単一ユニットセル FeSe の構造と電子状態:STM/STS 観察”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.
 31. 芳野諒, 田中友晃, 平原徹, “RHEED と STM による SrTiO₃ 上の 1UC-FeSe の成長過程と構造評価”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.
 32. 杉山裕弥, 奥山裕磨, 出田真一郎, 田中清尚, C. Bernard, T. Greber, 平原徹, “h-BN 上へのスタネンの作製と評価”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.
 33. 奥山裕磨, 杉山裕弥, 出田真一郎, 田中清尚, 平原徹, “Bi₂Te₃ 基板上における Te 単結晶薄膜の作成と電子状態測定”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.
 34. 奥山裕磨, 杉山裕弥, 平原徹, “Bi₂Te₃ 基板上の Te 薄膜の成長と電子状態”, 日本表面科学会第 1 回関東支部講演大会, 2016 年 4 月, 東京大学.
 35. 田中友晃, 芳野諒, 平原徹, “SrTiO₃ 基板上の FeSe 薄膜の作成と構造評価”, 日本表面科学会第 1 回関東支部講演大会, 2016 年 4 月, 東京大学.
 36. 平原徹, 白井皓寅, 羽尻哲也, 松波雅治, 田中清尚, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳, “ビスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証 II”, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.
 37. Yuma Okuyama, Yuya Sugiyama, and Toru Hirahara, “Growth and Electronic Structure of a Tellurium Thin Film on Bi₂Te₃”, The 20th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2016 年 3 月, Hiroshima (Japan).
 38. 平原徹, “ビスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証”, 第一回 ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, 2016 年 1 月, 東京.
 39. T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, K. Kobayashi, and S. Hasegawa, “Surface and Bulk States of Ultrathin Bi films: Electronic Structure and Transport Properties”, 15th International Conference on the Formation of Semiconductor interfaces, 2015 年 11 月, Hiroshima (Japan).
 40. 平原徹, 白井皓寅, 羽尻哲也, 松波雅治, 田中清尚, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳, “ビスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証”, UVSOR シンポジウム, 2015 年 11 月, 岡崎.
 41. 平原徹, “表面・界面でのスピン軌道相互作用:ビスマス系化合物を中心に”, 第七回 神楽坂 凝縮系理論勉強会, 2015 年 8 月, 東京.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
平原 徹 (HIRAHARA, Toru)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号: 30451818
 - (4) 研究協力者
田中 友晃 (TANAKA, Tomoaki)
芳野 諒 (YOSHINO, Ryo)
秋山 健太 (AKIYAMA, Kenta)