

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02109

研究課題名(和文) 強磁性共鳴励起により生成されたスピンの原子スケールイメージング

研究課題名(英文) Atomic-scale imaging of spin current generated by the ferromagnetic resonance excitation

研究代表者

長谷川 幸雄 (HASEGAWA, YUKIO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：80252493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：スピン偏極走査トンネル顕微鏡および探針磁化制御技術を確立し、原子レベルの空間分解能でのスピン分析が可能にし、さらに超高真空かつ低温下で動作する走査トンネルポテンシオメトリの開発および動作確認を行い、表面構造に起因する欠陥構造に対する電気抵抗を実測することができた。また、超高真空低温STM装置内にマイクロ波を導入し、照射の有無によって磁気コントラストが変化する様子を捉えることに成功し、強磁性共鳴を局所検出の可能性を示唆する結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子一つ一つのスピン・磁化情報や、表面での単一の欠陥構造に起因する電気抵抗を微視的に検出することはこれまでに無い技術であり、その観測は学術的意義が高いと言える。また本研究でその可能性が示唆されたナノサイズ磁性アイランド構造における強磁性共鳴の検出も、その磁気的なダイナミクスを明らかにする上で重要であり、これまでのスピン偏極走査トンネル顕微鏡による静的なスピン・磁化情報と合わせて、強力な磁気分析ツールとなりうる可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)：Spin-polarized scanning tunneling microscopy and tip magnetization control technique were established to enable spin analysis with atomic-level spatial resolution, and the scanning tunneling potentiometry was successfully operates in an ultrahigh vacuum and at low temperatures, and the electrical resistance associated to individual defects on the surface was measured. By introducing microwaves into the ultra-high vacuum and low-temperature STM apparatus, we also succeeded in capturing the change in magnetic contrast with and without microwave irradiation, suggesting the possibility of local detection of ferromagnetic resonance.

研究分野：表面科学・ナノサイエンス

キーワード：走査トンネル顕微鏡 スピン偏極走査トンネル顕微鏡 ポテンシオメトリ 強磁性共鳴 スピン波

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子の持つスピンの自由度を情報伝達に生かすスピントロニクス of 根幹をなす物理概念の一つとして、スピン流がある。これは、同量のアップスピンとダウンスピンが逆向きに運動し、スピン角運動量は流れるが正味の電流は流れない状態である。無散逸伝送の可能性から新奇の高効率デバイスの駆動源として注目されている。

スピン流の検出は、磁性体へ流入させた際に生じるスピン方向に依存した電気抵抗を検出する方法や、Pt などスピン緩和が強い系に流入させることで生じる逆スピンホール効果を利用する方法などが知られている。スピン流は非磁性体内部でのスピン緩和プロセスにより減衰し、その及ぶ範囲は、せいぜい $1\mu\text{m}$ 程度と極めて短いので、スピン流検出用の電極作成は電子ビームリソグラフィーにより行われ、減衰長を測定するには電極の位置を変えた試料をいくつか作成し、その強度変化を見るしかない。そこで、本研究では、STM 探針を検出電極としてナノスケールでの局所的なスピン流検出を実現し、実空間観察によりその拡散・緩和過程を解明できればとの期待がある。

しかしながら、スピン流生成によるアップスピンとダウンスピン間の化学ポテンシャルの差は μV オーダーと極めて小さいことから、スピン偏極度は極めて小さく、スピン偏極 STM 等で使用される磁性探針を用いたとしても、スピン流由来の信号をトンネル電流の差として検出することは極めて困難である。そこで、本研究では、我々がこれまで開発を進めてきた走査ポテンショメトリの技術を導入し、 μV オーダーでの電位分解能でスピン分解化学ポテンシャルの空間分布を精密に測定することにより、スピン流の強度分布を2次元的にナノスケールの空間分解能で観察することを目指した。

2. 研究の目的

次世代のデバイスコンセプトとして注目されるスピントロニクスにおいて重要な役割を担う「スピン流」の分布を、走査トンネル顕微鏡 (STM) の技術を駆使して実空間で可視化する顕微鏡手法を実現する。さらにその実空間観察機能を生かして、スピン流緩和プロセスのナノスケール・原子スケールでの解明を目的とする。強磁性共鳴を利用したスピンポンピングにより、磁性体から非磁性基板上にスピン流を誘起させ、スピン偏極探針によるポテンショメトリにより、スピン流生成に伴うスピン依存化学ポテンシャル分布をナノスケールの空間分解能で視覚化する。実空間観察により、スピン流の拡散や緩和過程に関する知見を得、原子レベルでのスピン流制御・最適化に向けての指針を与えることを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、非磁性基板上に作製された磁性アイランド構造を強磁性共鳴させ、スピンポンピングによりスピン流を生成させたのち、その強度分布を磁性探針による走査ポテンショメトリ手法により実空間観察する。走査ポテンショメトリ (STP) は、通常の STM によるトポグラフ像と同時に、試料のフェルミ準位/電気化学ポテンシャルを測定し、イメージングする手法である。化学ポテンシャル測定は、探針試料間でトンネル電流が流れない条件、すなわちゼロ点にバランスさせた状態で行うことから、その計測精度は極めて高く、 μV での精度での測定が可能である。このような測定により、スピン流の拡散過程やその緩和過程に対する微視的な情報が得られると期待される。

上記の観測を実現する上に於いては、まず、信頼性の高いスピン偏極 STM 装置の開発とその主要要素である磁性探針の作成方法を確立させる必要がある。また、走査トンネルポテンショメトリ (STP) を原子スケールでの空間分解能で超高真空かつ低温での測定も必要不可欠な要素と言える。更には、強磁性共鳴を励起させるための高周波導入を超高真空・低温 STM に対して行う必要がある。本研究では、これらの要素技術の開発を一つずつ確実に実現させ、その上でこれらを融合させることによって、最終的な目的を実現している。

4. 研究成果

(1) スピン偏極走査トンネル顕微鏡 (SP-STM) 手法の確立

走査トンネル顕微鏡 (STM) における探針を磁性材料とし、スピン依存トンネル現象を利用して、試料の磁化・スピン情報を得ようとするスピン偏極走査トンネル顕微鏡 (SP-STM) は、STM 開発当初よりその可能性を指摘されていたものの、技術的な課題から実現することが困難であり、今なお原子スケールでの SP-STM 研究は限られた研究グループに於いてのみ進められているのが現状である。本研究では、スピン偏極探針を用いて走査トンネルポテンショメトリを行う必要があることから、その基本となる SP-STM の技術的不確定要素を可能な限り排除し測定手法として確立させる必要がある。そのことを目的として、本研究では、反強磁性かつらせん磁気構造を持つことが知られている W 基板上的 Mn₂ 原子薄膜層での SP-STM 観察を試み、我々の SP-STM 装置を用いて原子スケールの空間分解能でスピン偏極信号の検出が可能であることを例示した。

W(110) 清浄表面を作成ののち、Mn 原子層を2層積んだ系を作成し、その表面での SP-STM 像観察を行った。この系ではフェルミ準位近傍での電子状態がスピン偏極していることが先行研究により知られており、その状態をマッピングすることによって、系の探針磁化方向成分の分布を原子スケールでの空間分解能でイメージングしている。図1の左の像が、そのようにして得られ

た高空間分解能 SP-STM 像であり、表面の Mn 原子一つ一つに対して、その磁化方向を反映したコントラストが得られている。

この表面の磁気構造は、図 1 右のモデルにあるように、[100] 方向（図中上向き）に進むに伴い、スピンの向きが円錐面に沿うようらせん状に回転しており、その回転周期は 10 原子ほどである様子が見てとれる。また、[100] 方向の隣り合う原子列間では逆向きのスピン配列となっている。

一方、左の SP-STM 像では、ほぼ上向きの探針磁化方向を反映して、らせん磁性構造のうち上向きの領域が明るくコントラストされている（2本の横方向に明るいストライプがそれに相当）。また、探針磁化方向が若干[1-10]方向に傾いていることから、[100]方向の隣り合う原子列間でも若干のコントラストの差が見てとれる。これらの結果から、我々の研究室で開発を進めてきた SP-STM 装置を用いて、原子スケールの空間分解能で個々の原子に対するスピン情報が得られることを検証することができた①。

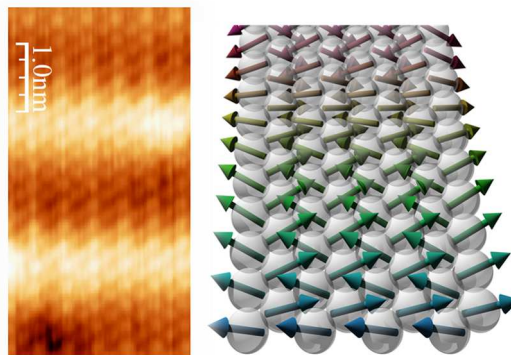


図 1 W 基板上の Mn 2 原子層でのスピン偏極 STM 像 (左) とその構造モデル (右)。

本研究では、更に、この SP-STM 装置において外部磁場方向を変え探針の磁化方向を制御しても安定に動作することを確認すべく、図 2 に示すような測定も行っている。この系では磁化の向きが周期的に変化していることから、探針の向きを変えることによってそれに平行な成分を持つ領域がコントラストされ、らせんの巻き方に応じて、明るいコントラストのストライプ構造がシフトする。図 2 での測定では、ストライプが右方向にずれており、この結果からこのらせんの巻き方が右巻きであると決定できた。

このらせん構造の巻き方は、試料上の場所を変えても、あるいは別の試料を用いても常に同じであることが確認され、この系では磁気カイラリティを持つことが判明している。カイラリティを有することは、このらせん磁気構造の向き安定化には、スピン軌道相互作用由来のジャロシンスキー・守谷相互作用に起因することを示しており、重元素である W 基板を介した相互作用が本質的であると結論されている①②。

また、本研究では、磁性探針の安定性、特に外部磁場による磁化方向の制御に対しても、安定に原子レベルでの SP-STM 像が得られるかについても十分な検討を行い、比較的作製の容易な Fe や Ni などの磁性探針でも、適切な系を選択することにより、十分な分解能で探針磁化を制御した上での SP-STM 観測が行われることを明らかにしている③。

これらの成果に関しては、関連する国際的科学雑誌に論文を掲載するとともに、解説記事としても紹介し④⑤、その成果の発信に努めている。特に文献④は、成果のユニークさやその確立された測定手法の安定性などが高く評価され、日本表面真空学会において第 15 回（平成 30 年度）会誌賞を受賞している。

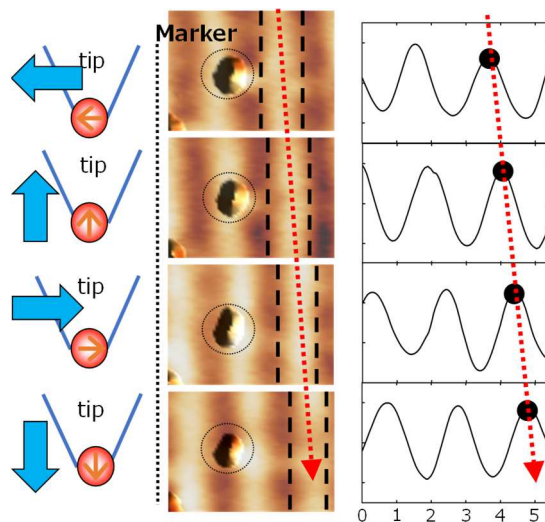


図 2 探針の磁化方向制御によるらせん回転方向の決定

(2) 超高真空低温走査トンネルポテンシオメトリ (STP) 法の確立

スピン流計測においては、化学ポテンシャルを正確にナノスケールの空間分解能で計測することが可能な走査トンネルポテンシオメトリ (STP) を、超高真空かつ低温環境において動作させる必要がある。

本研究では、STP 機能を既存の超高真空低温 STM 装置に導入し、その動作確認を行った。図 3 は超高真空下でのデモンストレーションであり、超高真空下においてのみ安定に存在する Si (111) 7×7 清浄表面上での STP 結

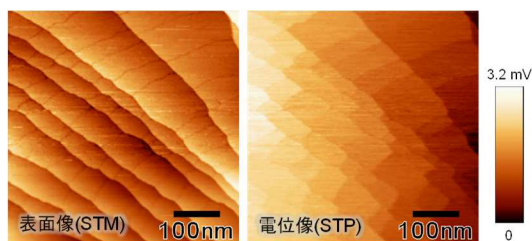


図 3 超高真空下で測定された Si(111)7×7 表面での STM 像(左)と STP 像(右)。電流は図の左から右方向に流している。

果である。左がSTM像であり、右は同時に測定されたSTP像であり、測定時には電流を図中左側から右側に流している。STP像を見ると、左から右へ徐々にポテンシャルが下がっているが、途中、表面上のステップや7×7構造由来の位相境界においてポテンシャルの段差が見受けられ、同領域が電気抵抗となっていることが見てとれる。STP像中のテラス部分でのポテンシャル勾配やステップ・位相境界でのポテンシャル段差を計測することにより、それぞれの電気抵抗の値を実測したところ、同系ではステップの電気抵抗が存外に大きいことが判明し、実質、同表面でのマクロな電気抵抗は、ステップ密度すなわち基板の傾きに依存することが判明した。これまで同表面での電気伝導測定ではかなりのバラつきがあることが知られていたが、今回の我々の微視的な電気伝導測定によって、このバラつきはそれぞれの試料の傾斜角の揺らぎに起因するものであると結論することができた⑥。

また、超高真空低温においても動作することを確認している。図4は超高真空低温下での金薄膜上でのSTP測定結果である。電流印加(図中左から右)時には測定温度は19Kに上昇しているが、精度の良いSTM像観察およびポテンシャル分布測定が行われていることを示している。電位像で見られる段差は、その場所での電気抵抗の存在を示しており、詳細に見ると抵抗の位置が金粒子間の境界部分に相当していることが見てとれる。

測定温度を変えてのポテンシャル測定も行っており、これも詳細な解析から粒子間のホッピング伝導など同薄膜での電気伝導メカニズムに関する情報を引き出すことも可能である。

(3) 超高真空 STM 装置内への高周波(Radio Frequency; RF)の導入

スピン波発生機構として、基板上に載せたナノサイズの強磁性体のスピンを磁気共鳴させることによって、スピン流をその周囲にポンピングすることを想定している。そのためには、現有の超高真空低温 STM 装置内の試料表面上へのマイクロ波を導入する必要がある。このため、マイクロ波対応の同軸ケーブルを超高真空装置内に導入し、探針を通して試料表面上に照射されるように設定した。図6でも示されるように、照射時においてもSTMあるいはSP-STMとしての性能が低下せず、それらの機能が保持されることを確認している。

実際、マイクロ波を照射すると、図5にあるように、試料探針間に高周波電界が生じ、実効的に試料バイアス電圧が変調され、トンネル分光スペクトルがその強度に応じて変化する。この変化から試料に到達するマイクロ波強度を評価することができた。

スピン共鳴信号を検出するためには印加磁場を固定しマイクロ波周波数を掃引するが、試料までのマイクロ波伝達に周波数依存性があるので、一定強度のマイクロ波出射では実際に試料に到達する強度に変動が生じることになる。このため、図5のスペクトル形状変化からあらかじめ伝達率を測定し、それに逆比例した出力をさせることで、試料での照射強度を一定に保つ。さらに微弱な信号を捉えるために、マイクロ波強度を変調させ、さらにトンネル伝導度測定のための変調周波数との差周波数により検波することにも成功している。

図6は、Cu基板上でのCoアイランド構造のマイクロ化(RF)照射下でのSP-STM測定の結果

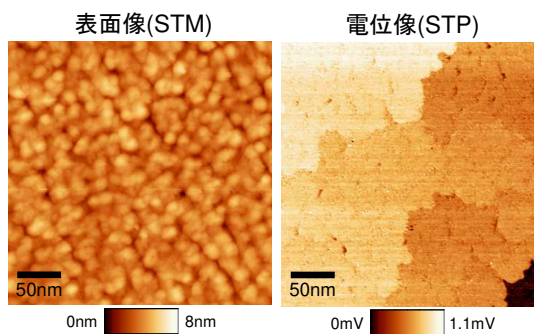


図4 19Kにおける金薄膜でのSTP測定。電流は図の左から右方向に流している。

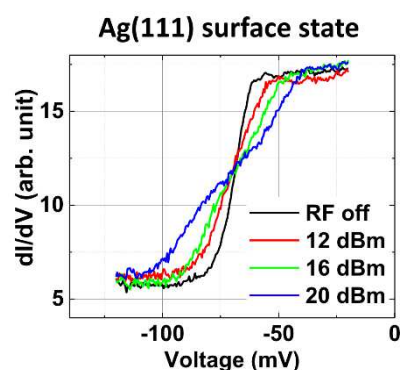


図5 マイクロ波導入によるトンネル分光スペクトルの変調 (8GHz, Ag(111)表面準位のバンド底部分を測定)

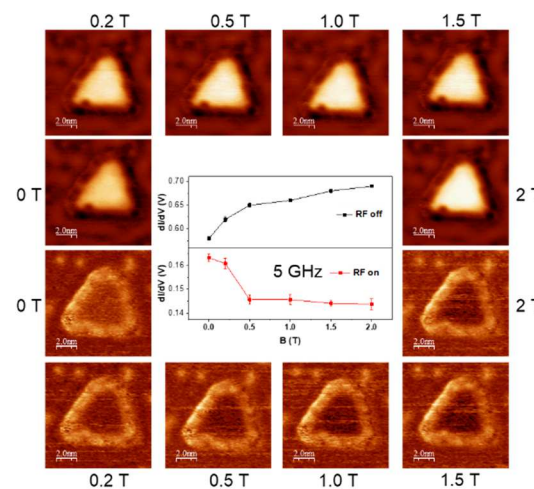


図6 Cu(111)基板上のCoアイランド構造のSP-STM像。上段・下段はそれぞれ高周波(RF)照射無・有で測定したもので、面直磁場を0Tから2Tまで徐々に上げている。

である。この測定結果から RF 照射が SP-STM のスピンコントラスト強度に対して影響を与えていることを示している。現在、更なる解析を進めており、これが強磁性共鳴に由来する現象であることの検証を進めている段階である。このように、超高真空・低温下における STM 試料上に RF 照射を実現することに成功しており、さらにそれに導入後においても STM あるいは SP-STM の性能が落ちていないことが確かめられた。

<参考文献>

- ① Masahiro Haze, Yasuo Yoshida, and Yukio Hasegawa, Phys. Rev. B 95, 060415(R) 1-5 (2017),
- ② Masahiro Haze, Yasuo Yoshida and Yukio Hasegawa, Scientific Reports, 7, 13269 1-5 (2017).
- ③ Masahiro Haze, Hung-Hsiang Yang, Kanta Asakawa, Nobuyuki Watanabe, Ryosuke Yamamoto, Yasuo Yoshida, and Yukio Hasegawa, Review of Scientific Instruments 90, 013704 1-5 (2019);
- ④ 吉田靖雄, 土師将裕, 長谷川幸雄、表面科学 38, 508-513 (2017)
- ⑤ Yukio Hasegawa, Masahiro Haze, Yasuo Yoshida, Nanoscale Magnetic Imaging, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (Elsevier, 2018)
- ⑥ Masayuki Hamada and Yukio Hasegawa, Phys. Rev. B 99, 125402 1-5 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakamura T., Kim H., Ichinokura S., Takayama A., Zotov A. V., Saranin A. A., Hasegawa Y., Hasegawa S.	4. 巻 98
2. 論文標題 Unconventional superconductivity in the single-atom-layer alloy Si(111) 3×3 (Ti,Pb)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134505 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.98.134505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 HASEGAWA Yukio	4. 巻 61
2. 論文標題 Future in Research Explored by Probe Microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 609 ~ 610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1380/vss.61.609	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HASEGAWA Yukio	4. 巻 61
2. 論文標題 Purpose of SPM Special Issue; "Frontier in Nano Science by Scanning Probe Microscopy"	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 630 ~ 631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1380/vss.61.630	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 長谷川幸雄	4. 巻 53
2. 論文標題 走査プローブ顕微鏡による物性研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 575-585
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haze Masahiro, Yang Hung-Hsiang, Asakawa Kanta, Watanabe Nobuyuki, Yamamoto Ryosuke, Yoshida Yasuo, Hasegawa Yukio	4. 巻 90
2. 論文標題 Bulk ferromagnetic tips for spin-polarized scanning tunneling microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013704 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5063759	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamada Masayuki, Hasegawa Yukio	4. 巻 99
2. 論文標題 Role of one-dimensional defects in the electrical transport through Si(111)7×7 surface states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125402 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.125402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asakawa Kanta, Oguro Fumikazu, Yoshida Yasuo, Sakai Hideaki, Hanasaki Noriaki, Hasegawa Yukio	4. 巻 58
2. 論文標題 Defect-induced electronic structures on SnSe surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11A06 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab147d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yang Hung-Hsiang, Lee Chi-Cheng, Yoshida Yasuo, Ikhlas Muhammad, Tomita Takahiro, Nugroho Agustinus, Ozaki Taisuke, Nakatsuji Satoru, Hasegawa Yukio	4. 巻 9
2. 論文標題 Scanning tunneling microscopy on cleaved Mn ₃ Sn(0001) surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9677 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41598-019-45958-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 吉田靖雄、Howon Kim、Chi-Cheng Lee、長谷川幸雄	4. 巻 54
2. 論文標題 走査トンネル顕微鏡による起動秩序の直接観察：物質表面に現れる新たな秩序	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 19-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Howon, Yoshida Yasuo, Lee Chi-Cheng, Chang Tay-Rong, Jeng Horng-Tay, Lin Hsin, Haga Yoshinori, Fisk Zachary, Hasegawa Yukio	4. 巻 3
2. 論文標題 Atomic-scale visualization of surface-assisted orbital order	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaa0362 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aao0362	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Haze Masahiro, Yoshida Yasuo, Hasegawa Yukio	4. 巻 7
2. 論文標題 Experimental verification of the rotational type of chiral spin spiral structures by spin-polarized scanning tunneling microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13269 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-13329-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wakasugi Shinsaku, Kurokawa Shu, Kim Howon, Hasegawa Yukio, Sakai Akira	4. 巻 121
2. 論文標題 Break voltage of Au single-atom contacts formed by junction closure	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 244304 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4990948	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haze Masahiro, Yoshida Yasuo, Hasegawa Yukio	4. 巻 95
2. 論文標題 Role of the substrate in the formation of chiral magnetic structures driven by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060415(R) 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.060415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Feng Baojie, Sugino Osamu, Liu Ro-Ya, Zhang Jin, Yukawa Ryu, Kawamura Mitsuaki, Imori Takushi, Kim Howon, Hasegawa Yukio, Li Hui, Chen Lan, Wu Kehui, Kumigashira Hiroshi, Komori Fumio, Chiang Tai-Chang, Meng Sheng, Matsuda Iwao	4. 巻 118
2. 論文標題 Dirac Fermions in Borophene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 096401 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.096401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Haze Masahiro, Yoshida Yasuo, Hasegawa Yukio	4. 巻 95
2. 論文標題 Role of the substrate in the formation of chiral magnetic structures driven by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060415(R) 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.060415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Howon, Lin Shi-Zeng, Graf Matthias J., Miyata Yoshinori, Nagai Yuki, Kato Takeo, Hasegawa Yukio	4. 巻 117
2. 論文標題 Electrical Conductivity through a Single Atomic Step Measured with the Proximity-Induced Superconducting Pair Correlation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 116802 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.116802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakanishi-Ohno Yoshinori, Haze Masahiro, Yoshida Yasuo, Hukushima Koji, Hasegawa Yukio, Okada Masato	4. 巻 85
2. 論文標題 Compressed Sensing in Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy for Observation of Quasi-Particle Interference	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 093702 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.093702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Howon, Hasegawa Yukio	4. 巻 55
2. 論文標題 Spatial variation in local work function as an origin of moire contrast in scanning tunneling microscopy images of Pb thin films/Si(111)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 08NA03 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.55.08NA03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Howon, Miyata Yoshinori, Hasegawa Yukio	4. 巻 29
2. 論文標題 Superconducting proximity effect on a Rashba-split Pb/Ge(111)- 3 × 3 surface	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 084006 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0953-2048/29/8/084006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Shunji, Yoshida Yasuo, Imada Hiroshi, Kim Yousoo, Hasegawa Yukio	4. 巻 93
2. 論文標題 Direct visualization of surface phase of oxygen molecules physisorbed on Ag(111) surface: A two-dimensional quantum spin system	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 081408(R) 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.93.081408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Howon, Hasegawa Yukio	4. 巻 93
2. 論文標題 Insensitivity of atomic point contact conductance to a moire structure	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075409 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.93.075409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計23件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Conductance through point contacts formed in atomic precision
3. 学会等名 International Conference on Low-dimensional Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田靖雄
2. 発表標題 Dzyaloshinskii-Moriya相互作用によるMn超薄膜のカイラル磁性
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 real-space Observation of Surface-assisted Orbital Order by Scanning Tunneling Microscopy
3. 学会等名 International Conference on Multi-Condensate Superconductivity and Superfluidity in Solids and Ultra-cold Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川幸雄
2. 発表標題 プローブ顕微鏡による局所物性評価
3. 学会等名 分子研研究会「有機デバイスを用いた量子状態制御の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Gap-dependent imaging in scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 The 2018 International Conference on Nanoscience + Technology (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, Yasuo Yoshida, and Howon Kim
2. 発表標題 Real-space observation of surface orbital order by STM
3. 学会等名 International Workshop: New Developments in STM on Surfaces of Functional Materials (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, Yasuo Yoshida, and Howon Kim
2. 発表標題 Real-space observation of surface orbital order by scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces & Cross-Strait Symposium on Solid Surfaces (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Yoshida, H. Kim, C.-C. Lee, T.-R. Chang, H.-T. Jeng, H. Lin, Y. Haga, Z. Fisk and Y. Hasegawa
2. 発表標題 Surface-induced orbital ordering in a strongly-correlated superconductor revealed by gap-dependent scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Roles of structural defects on vortices in atomically-thin superconductors
3. 学会等名 Vortex 2019 conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, Yasuo Yoshida, and Howon Kim
2. 発表標題 Real-space observation of surface orbital order by scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 The 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Surface states superconductivity by scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 Nano- And Ultrafast Surface Sciences (NUSS) Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川幸雄
2. 発表標題 走査トンネル顕微鏡に探る表面電子状態
3. 学会等名 2019 年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Superconductivity at Surfaces Studied by Scanning Tunneling Microscopy
3. 学会等名 47th Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-47) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Superconductivity at Surfaces studied by Scanning Tunneling Microscopy
3. 学会等名 2020 Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Conductance through point contacts formed in atomic precision
3. 学会等名 International Conference on Low-dimensional Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, and Howon Kim
2. 発表標題 Superconducting proximity effects with 2D metallic layers and ferromagnetic materials
3. 学会等名 CECAM Workshops "Superconductivity in atomically thin materials and heterostructures" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Site-specific superconducting atomic contacts studied by scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 American Vacuum Society (AVS) 64th International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, and Howon Kim
2. 発表標題 Nano-scale superconducting contacts investigated by cryogenic scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 Advanced scanning probe microscopy (ASPM) 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川幸雄
2. 発表標題 走査トンネル顕微鏡によるスピン・超伝導特性のナノスケール計測
3. 学会等名 分子研コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, Howon Kim
2. 発表標題 Nano-scale superconducting contacts studied by scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 20th International Vacuum Congress (IVC-20) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Hasegawa, H. Kim, and Y. Miyata
2. 発表標題 Surface and Step Conductance Characterized by Superconducting Proximity Effect
3. 学会等名 The 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Howon Kim, 長谷川幸雄
2. 発表標題 Pb/Si(111)上に観察されるモアレ構造の点接触電気伝導計測による起源解明
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masahiro Haze, Yasuo Yoshida, and Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Experimental verification of the rotational sense of Mn thin films on W(110)
3. 学会等名 6th Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy International Conference (SPSTM2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

