

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05963

研究課題名(和文) スピン偏極STMによる強磁性/反強磁性ヘテロ構造の原子スケール交換結合特性評価

研究課題名(英文) Atomic scale characterizations of the exchange coupling in ferromagnetic/antiferromagnetic heterostructures by spin-polarized STM

研究代表者

宮町 俊生 (MIYAMACHI, Toshio)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：10437361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では磁性超薄膜ヘテロ構造における界面電子・磁気結合状態の微視的メカニズムを理解することを目的に、Cu(001)単結晶基板上の反強磁性/強磁性 Mn/Fe超薄膜ヘテロ構造のスピン偏極STM観察とXAS/XMCD測定を行った。結果、Mn/Fe超薄膜ヘテロ構造はMn超薄膜積層の増大に伴いスピン再配列転移を起こし、容易磁化方向が面直方向から面内方向に変化することがXAS/XMCD測定より明らかとなった。さらに、Fe超薄膜のスピン再配列転移の起源がMn超薄膜とのヘテロ接合界面における磁気結合に由来することをスピン偏極STM観察によるMn超薄膜の原子スケール表面磁気構造観察から示すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スピン偏極STMにXAS/XMCD測定を相補的に組み合わせた研究手法を用いて反強磁性/強磁性 Mn/Fe超薄膜ヘテロ構造の界面形成過程における磁気特性の逐次変化を原子スケールで明らかにした。さらに、界面磁気結合状態を決定する原子構造と電子状態の役割を個別に分離して理解することに成功した。本研究成果により磁性超薄膜ヘテロ構造の界面磁気特性を飛躍的に向上させ、磁気ヘッドに代表されるヘテロ接合デバイスのさらなる低消費電力化や高密度化につながることを期待できる。

研究成果の概要(英文)：We performed spin-polarized STM and XAS/XMCD measurements for antiferromagnetic/ferromagnetic Mn/Fe thin film heterostructures grown on Cu(001). The purpose of this work was to elucidate microscopic origins of electronic and magnetic properties at the heterointerface. We observed the spin reorientation transition of the Fe layer in Mn/Fe thin film heterostructures from out-of-plane direction to in-plane direction with increasing the thickness of the Mn layer. Atomically-resolved STM observations in the process of the heterointerface formation revealed the structural transition from the disordered alloy to the ordered alloy at the heterointerface as the origin of the transition. Furthermore, with the help of atomic-scale observations of surface magnetic structures of the Mn layer by spin-polarized STM, we successfully demonstrated that the change in the easy magnetization direction of the Fe layer is originated from the magnetic coupling with the Mn layer at the heterointerface.

研究分野：ナノ磁性

キーワード：スピン偏極STM XAS/XMCD 磁性超薄膜ヘテロ構造 スピン再配列転移 表面・界面

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクへの情報の書き込みや、記録された情報の読み出しには磁気センサー（磁気ヘッド）が用いられている。磁気記録のさらなる高密度化のためには磁気ヘッドの小型化・高性能化が必要不可欠であり、磁気ヘッドを構成する反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の強固で安定な界面磁気結合状態をいかに実現するかが鍵となる。近年の薄膜形成技術の発展により、高精度に界面制御された反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の作製が可能になったが、実験的に得られる磁気結合エネルギーは理想界面の場合と比較して未だ2桁程度も小さく、磁気結合エネルギーを向上させることが長年の課題となっている。磁気結合エネルギー低下の原因として、ヘテロ接合界面における原子スケールでの構造や電子・磁気状態の空間的乱れが挙げられるが、高い空間分解能で接合界面の原子構造と磁気結合状態を直接観測できる実験手法の欠如からその詳細は殆どわかっていなかった。

研究代表者はこれまでに原子分解能で試料の構造と電子・磁気状態の直接観察が可能なスピン偏極トンネル顕微鏡 (STM) と元素選択的に試料の平均的な電子・磁気状態が議論可能な放射光 X 線吸収分光/X 線磁気円二色性 (XAS/XMCD) 測定を相補的に組み合わせ、マイクロとマクロを繋ぐ表面・界面磁性研究を行ってきた (Nat. Commun. 2012, Nature 2013, PRL 2016 他)。そこで、上記の背景や申請者のこれまでの研究成果を踏まえ、本研究では反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の界面における構造と電子・磁気状態の空間的乱れが磁気結合状態に与える影響をスピン偏極 STM により原子分解能で解明し、得られたマイクロな磁気特性がデバイスの性能に直結するマクロな磁気特性にどのように反映されるかを XAS/XMCD 測定で検証することによって磁気結合エネルギー低下の問題を根本的に解決できると考えた。

2. 研究の目的

本研究は銅単結晶 Cu(001) 基板上の強磁性 Fe 超薄膜に反強磁性 Mn 超薄膜を積層して作製した反強磁性/強磁性 Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の表面と界面における構造と電子・磁気状態をスピン偏極 STM と XAS/XMCD 測定を用いてマイクロ・マクロの両視点から相補的に解明することを目的とする (図 1)。そのためまず、下地となる Cu(001) 基板上の強磁性 Fe 超薄膜表面の STM 観察を行い、その構造を原子スケールで明らかにする。次に、強磁性 Fe 超薄膜上に反強磁性 Mn 超薄膜を積層し、Mn/Fe ヘテロ接合界面の構造や Mn 超薄膜の成長過程を調べる。Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の構造制御法の確立後、XAS/XMCD 測定を行い、Mn 超薄膜積層に伴う埋もれた Fe 超薄膜の電子・磁気状態を、元素選択的かつ定量的に評価してヘテロ接合界面における磁気結合状態を明らかにする。並行して Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造のスピン偏極 STM 観察を行い、Fe 超薄膜との磁気結合が Mn 超薄膜の表面磁気構造に及ぼす影響を原子スケールで解明する。最終的に、ヘテロ接合界面における磁気結合によって Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造に新たに発現する新奇な電子・磁気状態を「表面・接合界面・埋もれた界面」の観点化から包括的に理解し、反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の磁気特性向上のための普遍的な知見を得ることを目指す。

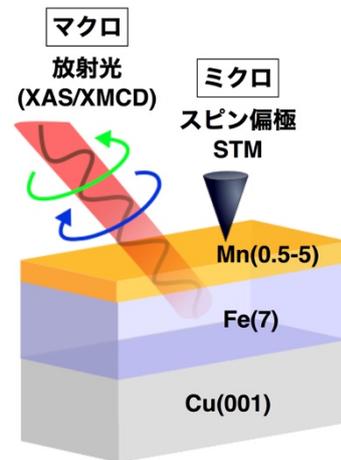


図 1 : Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造

3. 研究の方法

(1) 試料作製

反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の強磁性層として約 7 原子層の鉄を Cu(001) 基板上に超高真空中で室温蒸着し、fcc 構造をもつ Fe 超薄膜を作製した。強磁性 fcc Fe 超薄膜の磁気状態は表面格子定数の変化に非常に敏感であることから、反強磁性層とのヘテロ接合界面形成による磁気状態の変化を調べるのに適した系である。反強磁性層には膜厚が 0.5-5.0 層の Mn 超薄膜を積層して Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造を作製した (図 1)。

(2) XAS/XMCD 測定

XAS/XMCD 測定は極低温・強磁場環境下での測定が可能かつ超高真空中での試料作成ができる UVSOR BL4B の装置を用いて全電子収量法にて行った (試料温度 80 K、印加磁場 0-5 T)。磁気モーメントを元素選択的に定量評価可能な XMCD の特性を活かし、Mn 超薄膜積層数増大に伴う埋もれた Fe 超薄膜の磁気異方性や磁化曲線の変化を調べた。

(2) スピン偏極 STM 観察

スピン偏極 STM 観察は超高真空、低温 (液体窒素温度) 環境下で行う。参照資料であるバルク Fe 単結晶上に成長した Mn 超薄膜のスピン偏極 STM 観察の結果との比較により、Fe 超薄膜との磁気結合が Mn 超薄膜の表面磁気構造に及ぼす影響を原子分解能で明らかにする。スピン偏極 STM 磁性探針には XAS/XMCD 測定の結果を考慮して面内磁化に敏感な強磁性 Fe 探針を使用する。

4. 研究成果

(1) 強磁性 fcc Fe 薄膜の構造安定性

Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の強磁性層である Cu(001) 基板上の膜厚約 7 原子層の fcc Fe 超薄膜の表面構造および電子状態を STM 原子分解能観察により調べた。結果、原子ステップ近傍 (領域 α) ではステップ端からの歪み緩和が効果的に働き、Fe 超薄膜の fcc 構造は維持されていた。一方、原子ステップから遠い領域 (領域 β) では格子歪みの影響で fcc 構造の他に bcc 構造や表面再配列構造が観測された (図 2)。得られた結果より、fcc Fe 超薄膜の構造安定性を高めるための原子ステップ密度の重要性が示された。

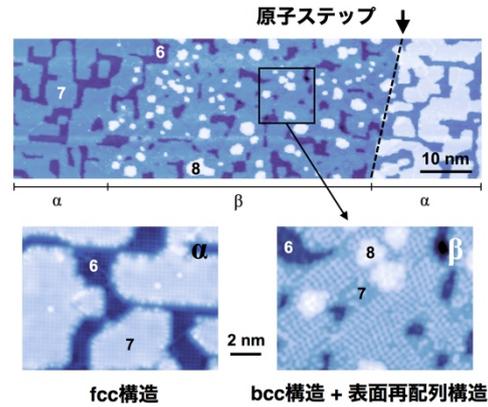


図 2 : Cu(001)基板上のfcc Fe超薄膜の表面構造

(2) Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の原子スケール界面磁気結合状態

①XAS/XMCD 測定

fcc Fe 超薄膜の構造制御法を確立後、Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の XAS/XMCD 測定を行い、マクロな電子・磁気状態の解明に取り組んだ。Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造は、超高真空中で Cu(001) 基板上に約 7 原子層の Fe を室温蒸着して作製した fcc Fe 超薄膜 (強磁性層) に 0.5-5.0 層の Mn 超薄膜 (反強磁性層) を室温で積層して作製した。埋もれた強磁性 fcc Fe 超薄膜の XAS/XMCD 測定の結果、残留磁場下でより大きな XMCD シグナルが面直配置で観測され、先行研究同様に面直容易磁化を確認した。しかし、Mn 超薄膜の積層数が増大するにつれて Fe 超薄膜の面直 XMCD シグナルは徐々に減少し、容易磁化方向が面内方向に変化するスピンの再配列転移を起こすことが磁化曲線の Mn 超薄膜積層数依存性より明らかになった (図 3)。しかし、Mn 超薄膜の積層数が増大するにつれて Fe 超薄膜の面直 XMCD シグナルは徐々に減少し、容易磁化方向が面内方向に変化するスピンの再配列転移を起こすことが磁化曲線の Mn 超薄膜積層数依存性より明らかになった (図 3)。さらに、Mn 超薄膜の積層数が 3.0 層に達するまで面内磁気異方性の著しい増大も観測された。

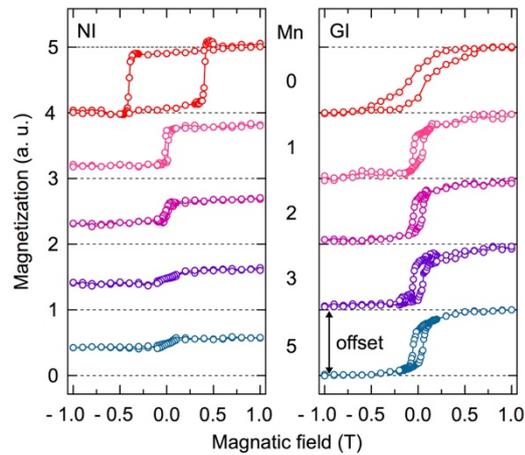


図 3 : 面直(NI)および面内(GI)配置における埋もれた Fe 超薄膜の磁化曲線の Mn 積層数依存性

Fe 超薄膜の XAS/XMCD 測定の結果を理解するため、Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造界面の STM 原子分解能観察を行った。結果、ヘテロ接合界面における Fe 原子と Mn 原子が混じり合って界面合金化し、さらに、その組成や構造が Mn 超薄膜の積層数の増大に伴い FeMn 不規則合金から FeMn 規則合金へと動的に変化していくことがわかった (図 4)。STM 分光測定や第一原理計算の結果も併せて、観測された Fe 超薄膜のスピンの再配列転移は、合金形成に伴うヘテロ接合界面の格子定数の変化や電子混成に由来することが明らかになった。

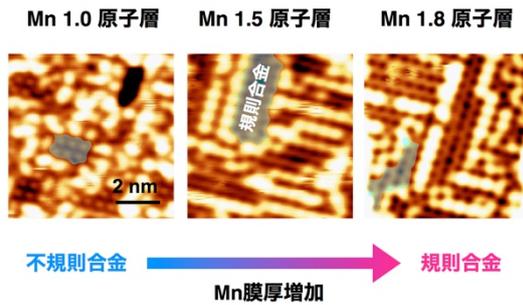


図 4 : Mn/Fe超薄膜ヘテロ構造界面のMn積層数依存性

②スピン偏極 STM 観察

XAS/XMCD 測定により、Fe 超薄膜は Mn 超薄膜の積層によってスピンの再配列転移を起こすことがわかった。そのマイクロな起源を解明するため、反強磁性層である Mn 超薄膜のスピン偏極 STM 観察を行った。Fe 超薄膜の磁化方向はスピンの再配列転移によって面直方向から面内方向に変化することが明らかになったため、Mn 超薄膜の磁化方向も Fe 超薄膜との磁気結合を介して面内方向であると考えられる。そこで、面内磁化に敏感な強磁性 Fe 探針をスピン偏極 STM 磁性探針として使用した。結果、Mn 超薄膜は面内磁化を示し、1 層毎に磁化方向が反転する層状反強磁性を示すことがわかった。さらに、参照資料であるバルク Fe 単結晶上に成長した Mn 超薄膜の表面磁気構造と比べて、磁区サイズや磁壁幅の減少等、層状反強磁性磁気構造に原子スケールでの変化が観測された。Mn 超薄膜表面磁気構造について得られた結果は、面内磁気異方性が増大した Fe 超薄膜との磁気結合を考慮することによって理解でき、XAS/XMCD 測定とスピン偏極 STM 観察を組み合わせた包括的な表面・界面磁性研究の重要性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件 : 全て査読有)

1. “Electronic and magnetic properties of the Fe₂N monolayer film tuned by substrate symmetry”, T. Hattori, **T. Miyamachi**, T. Yokoyama, and F. Komori, *J. Phys. : Condens. Matter* **31** 255001 (2019).
DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab0fbc>
2. “Fabrication of Li₀-FeNi by pulsed-laser deposition”, M. Saito, H. Ito, Y. Suzuki, M. Mizuguchi, T. Koganezawa, **T. Miyamachi**, F. Komori, K. Takanashi, and M. Kotsugi, *Appl. Phys. Lett.* **114** 072404 (2019).
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5087041>
3. “Dynamic Interface Formation in Magnetic Thin Film Heterostructures”, S. Nakashima, **T. Miyamachi**, Y. Tatetsu, Y. Takahashi, Y. Takagi, Y. Gohda, T. Yokoyama, and F. Komori, *Adv. Funct. Mater.* **29** 1804594 (2019).
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201804594>
4. “Lattice distortion of square iron nitride monolayers induced by changing symmetry of substrate”, T. Hattori, T. Iimori, **T. Miyamachi**, and F. Komori, *Phys. Rev. Materials* **2** 044003 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.044003>
5. “Triangular lattice atomic layer of Sn (1×1) at graphene/SiC (0001) interface”, S. Hayashi, A. Visikovskiy, T. Kajiwara, T. Iimori, T. Shirasawa, K. Nakastuji, **T. Miyamachi**, S. Nakashima, K. Yaji, K. Mase, F. Komori, and S. Tanaka, *Appl. Phys. Express* **11** 015202 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.7567/APEX.11.015202>
6. “Evidence for in-gap surface states on the single phase SmB₆(001) surface”
T. Miyamachi, S. Suga, M. Ellguth, C. Tusche, C.M. Schneider, F. Iga, and F. Komori, *Sci. Rep.* **7** 12837 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12887-2>
7. “Modulation of Electron-Phonon Coupling in One-Dimensionally Nanorippled Graphene on a Macrofacet of 6H-SiC”, K. Ienaga, T. Iimori, K. Yaji, **T. Miyamachi**, S. Nakashima, Y. Takahashi, K. Fukuma, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, K. Mase, K. Nakastuji, S. Tanaka, and F. Komori, *Nano Lett.* **17** 3527-3532 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00606>
8. “Enhanced periodic modulation of electronic states in a hexagonal iron-nitride monolayer on Cu (001) via interfacial interaction”, K. Ienaga, **T. Miyamachi**, Y. Takahashi, N. Kawamura, and F. Komori, *Phys. Rev. B* **96** 085439 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.085439>
9. “Thickness-dependent electronic and magnetic properties of γ' -Fe₄N atomic layers on Cu(001)”, Y. Takahashi, **T. Miyamachi**, S. Nakashima, N. Kawamura, Y. Takagi, M. Uozumi, V.N. Antonov, T. Yokoyama, A. Ernst, and F. Komori, *Phys. Rev. B* **95** 224417 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.224417>
10. “Spin crossover in Fe(phen)₂(NCS)₂ complexes on metallic surfaces”, M. Gruber, **T. Miyamachi**, V. Davesne, M. Bowen, S. Boukari, W. Wulfhekel, M. Alouani, and E. Beaurepaire, *J. Chem. Phys.* **146** 092312 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4973511>
11. “Epitaxially stabilized iron thin films via effective strain relief from steps”, **T. Miyamachi**, S. Nakashima, S. Kim, N. Kawamura, Y. Tatetsu, Y. Gohda, S. Tsuneyuki, and F. Komori, *Phys. Rev. B* **94**, 045439 (2016).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.045439>
12. “Effects of Pb Intercalation on the Structural and Electronic Properties of Epitaxial Graphene on SiC”, Y. Ayhan, J. Onoda, T. Iimori, K. Niki, **T. Miyamachi**, M. Abe, S. Mizuno, S. Tanaka, F. Komori, and Y. Sugimoto, *Small* **12**, 3882 (2016).
DOI: <https://doi.org/10.1002/smll.201670142>

〔学会発表〕（計 38 件の内、主要なものを記載する）

1. 宮町俊生, 岩田孝太, 飯盛拓嗣, 大坪嘉之, 木村真一, 伊賀文俊, 小森文夫: 「 YbB_{12} (001) 単一表面の軌道敏感 STM 観察」, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).
2. 岩田孝太, 宮町俊生, 南谷英美, 小森文夫: 「Cu (001) に吸着した Co 単原子の近藤効果の Cu 格子の圧縮による変化」, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).
3. 服部卓磨, 飯盛拓嗣, 宮町俊生, 小森文夫: 「Cu (111) 基板上の三角格子窒化鉄薄膜の構造と電子状態」, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).
4. 川口海周, 高橋優樹, 服部卓磨, 宮町俊生, 飯盛拓嗣, 小坂谷貴典, 横山利彦, 小嗣真人, 小森文夫: 「窒素吸着 Cu (001) 面上の FeNi 原子層成長とその磁性」 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).
5. 服部卓磨, 宮町俊生, 飯盛拓嗣, 高木康多, 上村洋平, 横山利彦, 小森文夫: 「対称性の違いによる窒化鉄単原子層膜の局所電子状態と磁性の変化」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018).
6. 岩田孝太, 宮町俊生, 南谷英美, 小森文夫: 「STM による近藤効果の測定を通じた格子歪みの評価」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018).
7. 川口海周, 高橋優樹, 服部卓磨, 宮町俊生, 小嗣真人, 小森文夫: 「窒素吸着 Cu (001) 表面上での FeNi 原子層成長の蒸着時温度依存性」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018).
8. 宮町俊生, 中島 脩平, 高木 康多, 横山 利彦, 小森 文夫: 「スピン偏極 STM と X 線磁気円二色性測定による Mn/Fe 磁性超薄膜ヘテロ構造の原子スケール表面・界面磁性研究」, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 (2018).
9. T. Miyamachi, S. Nakashima, Y. Takagi, T. Yokoyama, and F. Komori: “Connecting surface and interface magnetism of Mn/Fe thin film heterostructures at the atomic scale”, ICN+T2018, (2018).
10. 中島脩平, 宮町俊生, 高木康多, 横山利彦, 小森文夫: 「基板対称性の違いによる窒化鉄単原子層膜の電子・磁気状態の変化」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018).
11. 服部卓磨, 宮町俊生, 中島脩平, 高木康多, 横山利彦, 小森文夫: 「基板対称性の違いによる窒化鉄単原子層膜の電子・磁気状態の変化」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018).
12. 岩田孝太, 宮町俊生, 小森文夫: 「窒化鉄磁性薄膜上に吸着した Co 単原子の STM/STS 測定」,
13. 川口海周, 村上舜太, 服部卓磨, 宮町俊生, 小嗣真人, 小森文夫: 「窒素吸着 Cu (001) 表面上での FeNi 原子層成長の STM 観察」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018).
14. 服部卓磨, 飯盛拓嗣, 宮町俊生, 小森文夫: 「局所格子ひずみによる窒化鉄単原子層膜の電子状態変化」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).
15. 中島脩平, 宮町俊生, 服部卓磨, 高木康多, 横山利彦, 小森文夫: 「界面制御された Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の構造と磁性」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).
16. 宮町俊生, 高橋文雄, 中島脩平, 高木康多, 魚住まどか, 横山利彦, 小森文夫: 「磁性ナノクラスターと磁気結合した窒化鉄単原子層膜の電子・磁気状態」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).
17. Toshio Miyamachi, “Atomic scale surface magnetism of monatomic-layer iron nitride studied by scanning tunneling microscopy and synchrotron-based techniques”, 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICROSCOPY AND SPECTROSCOPY (INTREM2017) (2017).
18. 宮町俊生: 「Connecting micro electronic and magnetic properties to macro magnetism on the atomic scale」, 科学研究費 基盤 A 研究会 「酸化物薄膜界面の異方的磁性とスピン-軌道結合現象の多自由度放射光分光」 (2017).
19. 宮町俊生: 「放射光・走査トンネル顕微鏡計測技術の融合による原子スケール物性評価」, SPring-8 におけるスペクトロスコープの将来検討会 (2017).
20. 宮町俊生: 「走査トンネル顕微鏡と放射光分光で探る窒化鉄単原子層の原子スケール電子・磁気状態」, 関西ナノスピン変換科学若手ワークショップ (2017).
21. 宮町俊生, 大坪嘉之, 萩原健太, 木村真一, 伊賀文俊, 小森文夫: 「 YbB_{12} 清浄表面の低温 STM 観察」, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017).

22. 高橋文雄, 宮町俊生, 中島脩平, 高木康多, 魚住まどか, 横山利彦, Antonov Victor, Ernst Arthur, 小森文夫:「鉄窒化物原子層膜における層数に依存した電子・磁気構造」, 日本物理学会 第72回年次大会 (2017).
23. 宮町俊生, 高橋文雄, 中島脩平, 高木康多, 魚住まどか, Victor Antonov, Arthur Ernst, 横山利彦, 小森文夫:「ナノ構造化した窒化鉄単原子層の電子・磁気状態」, 日本物理学会 第72回年次大会 (2017).
24. 服部卓磨, 飯盛拓嗣, 宮町俊生, 小森文夫:「Cu(111)面上の窒化鉄単原子層膜の構造と組成」, 日本物理学会 第72回年次大会 (2017).
25. 山田正理, 家永紘一郎, 高橋文雄, 宮町俊生, 小森文夫:「Cu(001)面上の六方構造単原子鉄窒化膜:Cu(001)下地との整合性」, 日本物理学会 第72回年次大会 (2017).
26. 中島脩平, 宮町俊生, 小森文夫:「走査トンネル顕微鏡による Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造表面のバイアス電圧依存構造変化」, 日本物理学会 第72回年次大会 (2017).
27. 宮町俊生, 高橋文雄, 中島脩平, Antonov Victor, 高木康多, 魚住まどか, 横山利彦, Ernst Arthur, 小森文夫:「走査トンネル顕微鏡と放射光による窒化鉄単原子層膜の原子スケール表面磁性研究」, 第77回応用物理学会秋季学術講演会 (2016).
28. 高橋文雄, 宮町俊生, 中島脩平, Antonov Victor, 高木康多, 魚住まどか, 横山利彦, Ernst Arthur, 小森文夫:「鉄窒化物単原子層膜のマクロな強磁性に原子欠陥が与える影響」, 日本物理学会 2016年秋季大会 (2016).
29. 中島脩平, 高橋文雄, 河村紀一, 宮町俊生, 小森文夫:「Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の原子構造と電子・磁気状態」, 日本物理学会 2016年秋季大会 (2016).
30. 落合順也, 富田正樹, 齊藤真博, 鈴木雄太, 保井晃, 大河内拓雄, 宮町俊生, 小森文夫, 小嗣真人:「単原子交互積層した FeCo 薄膜の磁気特性解析」, 日本物理学会 2016年秋季大会 (2016).
31. 河村紀一, 中島脩平, 宮町俊生, 小森文夫:「Fe/Cu(001)基板上の Mn 超薄膜の磁気光学測定」, 日本物理学会 2016年秋季大会 (2016).
32. 服部卓磨, 宮町俊生, 小森文夫:「Cu(111)面上の窒化鉄単原子膜の形成過程と構造」, 日本物理学会 2016年秋季大会 (2016).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ: <https://komori.issp.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。