

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(A) (一般)
研究期間：2017～2019
課題番号：17H01061
研究課題名(和文) 強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡の超高感度化とナノ磁性体の磁気相互作用の解明

研究課題名(英文) sensitivity enhancement and magnetic interaction for nanomagnetic materials for magnetic resonance force microscopy using ferromagnetic resonance

研究代表者
李 艶君 (Li, Yan Jun)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50379137
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡を駆使して、反強磁性体の酸化ニッケル表面上において原子スケールの交換相互作用を測定し、表面の磁気構造が磁気相互作用にどのように影響するかを解明することを目的とした。まず、磁気交換力顕微鏡の超高感度化と超高分解能化を実現した。具体的には、まず、交換力を最も高感度に測定するための観察条件を実験的に解明した。次に、カンチレバーの周波数シフトに含まれる変調成分から交換力と交換エネルギーを導出する方法を開発した。さらに、表面の磁気構造が交換相互作用にどのように影響するかを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ナノスケールの磁気相互作用に関する学問分野は、世界的にみても未開拓の学問分野であり、学術的な研究課題の宝庫である。本研究により、「ナノ磁性体の物理」という学問分野が開拓されると期待される。ナノ磁性体に関する知見は、ほとんど明らかにされていないナノスケールのスピン状態に関する貴重な知見を提供すると期待される。このような知見は、スピンの制御を利用する量子演算デバイスなどの発明に繋がる可能性が高く、スピントロニクス発展に大きく寄与できる。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study were to investigate the atomic-scale exchange interaction on the antiferromagnetic nickel oxide surface by using a magnetic exchange force microscope using ferromagnetic resonance. First, we realized ultra-high sensitivity and ultra-high resolution of the magnetic exchange force microscope. Specifically, first, we experimentally elucidated the observation conditions for measuring exchange force with the highest sensitivity. Next, we have developed a method to derive the exchange force and exchange energy from the modulation component contained in the frequency shift of the cantilever. Furthermore, we elucidated how the magnetic structure of the surface affects the exchange interaction.

研究分野：表面科学

キーワード：走査型プローブ顕微鏡 磁気共鳴

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノ磁性体の物性解明は、センサー、デバイスへの応用に際して極めて重要である。原子数個から数十個からなるナノ磁性体は、強い量子サイズ効果を示し、閉じ込められた電子のエネルギー状態とスピン状態は、バルク材料のものとは全く異なる。磁性体の物性は、電子のスピンの持つ磁気モーメントによって大きく影響を受ける。従って、新しい機能を有するナノ磁性体を思い通りに設計するには、スピン間の交換相互作用の理解が本質的に重要である。

交換相互作用を原子スケールで直接測定できる革新的な手法として、磁気交換力顕微鏡が注目されている(図1)。この顕微鏡は、原子分解能で表面観察できる非接触原子間力顕微鏡の探針として磁性体探針を用い、磁性体探針・磁性体試料間に働く交換力を検出する。ここで、交換力とは、探針先端の電子軌道と試料表面の電子軌道の重なりにより生じる力(化学結合力)の一種であり、スピン配置が並行(同じ向き)と反平行(逆向き)の場合の力の差となる(図1)。磁気交換力顕微鏡を用いて原子分解能で反強磁性体表面のスピンを観察できることが2007年にドイツのグループにより実証された。しかし、得られた画像は、交換力だけでなく、スピンに関係しない化学結合力や静電気力も重畳したものである。

申請者らは、これまで原子分解能の原子間力顕微鏡に関する先駆的な研究を推進し、力学的に原子種同定ができることや原子を操作できることなどを解明してきた。最近、申請者らは、磁気交換力顕微鏡において、交換力だけを分離測定する方法として強磁性共鳴を利用するという着想に至った(図2)。すなわち、強磁性体をコートした探針に変調されたマイクロ波を照射し、探針の磁化状態を強磁性共鳴により変調し、探針・試料間相互作用力の変調成分を抽出することにより、交換力を分離測定するという考えである(図3)。実際、磁性体として鉄白金(FePt)をコートした探針に変調したマイクロ波を照射し、強磁性共鳴によりその磁化状態を変調できることを確認した。また、試料として反強磁性体のイオン結晶である酸化ニッケル(NiO)表面を取り上げ、表面に反平行に配列する磁性原子を原子分解能で分離観察することに成功した。

2. 研究の目的

本研究は、『強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡を駆使して、反強磁性体の酸化ニッケル表面上において原子スケールの交換相互作用を測定し、表面の磁気構造が磁気相互作用にどのように影響するかを解明すること』を目的とする。

具体的研究課題は、以下の2点である。

- 1) ナノ磁性体の交換相互作用を解析するための交換力分光法を開発する。
- 2) 表面の磁気構造が交換相互作用にどのように影響するかを解明する。

3. 研究の方法

平成29年度は、まず、磁気交換力顕微鏡の超高感度化と超高分解能化を実現する。具体的には、まず、交換力を最も高感度に測定するための観察条件を実験的に解明する。次に、カンチレバーの周波数シフトに含まれる変調成分から交換力と交換エネルギーを導出する方法を開発する。さらに、カンチレバーの小振幅動作と高周波化、変位検出計の高感度化を実現する。平成30年度以降は、まず、原子操作技術を用いて構成原子数の明らかなナノ構造体を絶縁体表面に構築する。次に、試料表面の3次元的な交換エネルギー分布を導出できる分光法を開発する。さらに、1次元・2次元・3次元のナノ磁性体における磁気交換相互作用を解明する。最後に、ナノ磁性体を構成する個々の原子間の交換相互作用について検討する。

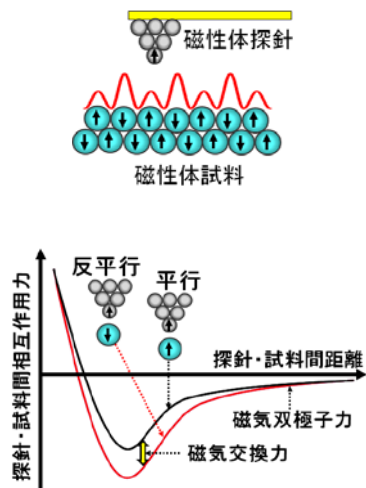


図1 磁気交換力顕微鏡

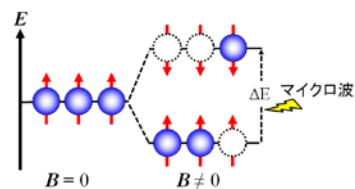


図2 強磁性共鳴の原理(強磁性体では、有効磁場 B が存在)

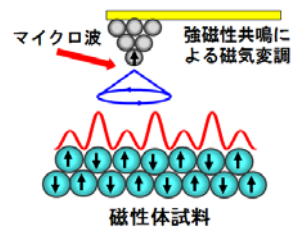


図3 強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡

4. 研究成果

磁性体試料表面として、NiO(001)表面を用いて、磁性体試料表面のスピンを原子レベルで測定できるかどうかを検証した。図4に示すように、NiOの結晶構造は、NaCl型構造であり、格子間隔は0.419 nmである。NiOでは、Ni原子とNi原子の間にO原子が入ることにより、超交換相互作用が働く。そのため、NiOは、反強磁性を示すことになる。(001)表面では、Ni原子のspin方向は、

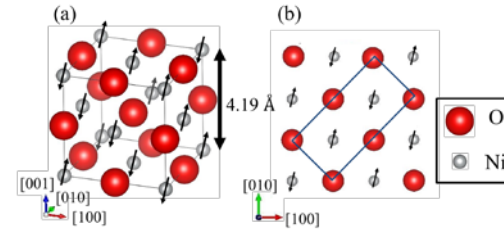


図4 NiOの(a)結晶構造と(b)(001)表面

[110]方向に対して面直上向きと面直下向きで交互に変化するため、spin構造は、 2×1 構造となる。なお、この面では、磁性探針の磁化方向とNi原子の磁化方法は平行あるいは反平行関係になるため、磁気交換力を検出しやすくなると考えられる。

図は、強磁性共鳴を用いた磁気交換力顕微鏡を用いてNiO(001)表面を測定した結果である。図5(a)および5(d)は、それぞれ、凹凸像とその断面図である。4回対称の輝点が現れており、また、その輝点間隔が約0.4 nmであることがわかる。この輝点間隔は、NiO(001)表面の格子間隔とほぼ一致し、表面のNi原子あるいはO原子が画像化されたと考えられる。これまでの交換力磁気交換力の画像化機構に関する理論的検討より、輝点がO原子に対応し、暗点がNi原子に対応することが判明している。なお、図5(a)の画像では、NiO(001)表面のspin構造である 2×1 構造は、観察されなかった。この結果は、凹凸像では、磁性体探針とNiO(001)表面との間の非磁性的な化学的相互作用が主に画像化されていることを示している。

図5(b)および5(c)は、それぞれ、磁気交換力の強度像と位相像である。また、図5(e)および5(f)は、それぞれ図5(b)と5(c)の赤線における断面図である。これらの画像から分かるように、間隔が約0.4 nmの周期的な輝点が現れている。特に、図5(g)の位相像のフーリエ変換画像では、NiO(001)表面の結晶構造である 1×1 構造を表す4回対称の輝点以外に、 2×1 構造を表す輝点が表れているのがわかる。この輝点は試料のspin構造である 2×1 構造と一致している。これらの結果は、強磁性共鳴を用いて、原子分解能で表面のspin情報を取得できていることを示している。

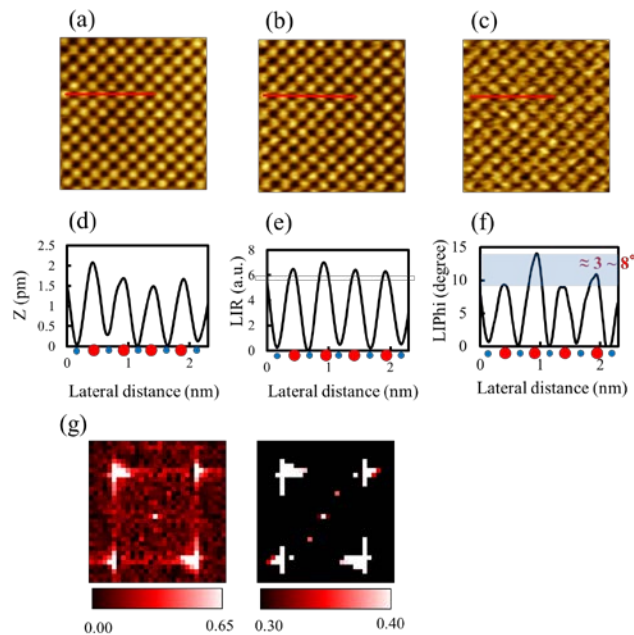


図5 NiO(001)表面の(a)凹凸像、(b)磁気交換力の強度像、(c)磁気交換力の位相像。(d)(e)(f)各画像の断面図。(g)磁気交換力の位相像(c)のフーリエ変換像。走査範囲：4 nm × 4 nm。

理由としては、Ni原子上では、Ni原子からの強い磁気相互作用により探針先端のspinが不安定化したのに対し、O原子上では強い磁気相互作用が働かなかったため探針先端のspinが不安定にならなかったからだと考えられる。

図5(f)の位相像より、O原子間の位相の差は、 3° から 5° であった。このときの測定の標準誤差は $\pm 0.3^\circ$ であり、観測された位相差は十分大きいといえる。このような位相差が現れた原因として2つの可能性がある。1つ目は、今回の実験が室温下であったため、磁性探針先端のspinの熱揺らぎが起きてしまい、正しく極性が測定できなかった可能性がある。2つ目は、磁性探針先端のspin方向と試料のspin方向が完全に平行・反平行の状態になっておらず、極性を正確に測ることができなかった可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Yuuki Adachi, Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Remotely Controlling the Charge State of Oxygen Adatoms on Rutile TiO ₂ (110) Surface using Atomic Force Microscopy | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Part C | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.0c03117 | 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 Yuuki Adachi, Huan Fei Wen, Quanzhen Zhang, Masato Miyazaki, Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Elucidating Charge State of an Au Nanocluster on Oxidized/Reduced Rutile TiO ₂ (110) Surfaces using non-contact atomic force microscopy and Kelvin probe force microscopy | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Royal Society of Chemistry, Nanoscale Advances | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/c9na00776h | 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 H. F. Wen, Q. Zhang, Y. Adachi, M. Miyazaki, Y. Sugawara, Y. J. Li | 4. 巻 505 |
| 2. 論文標題 Contrast inversion of O adatom on rutile TiO ₂ (110)-(1×1) surface by atomic force microscopy imaging | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Applied Surface Science | 6. 最初と最後の頁 144623-144627 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apsusc.2019.144623 | 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 Q. Zhang, H. F. Wen, Y. Adachi, M. Miyazaki, Y. Sugawara, R. Xu, Z. H. Cheng, Y. J. Li | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Electrical Engineering of the Oxygen Adatom and Vacancy on Rutile TiO ₂ (110) by Atomic Force Microscopy at 78 K | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 28852-28858 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.9b10304 | 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 Q. Zhang, H. F. Wen, Y. Adachi, M. Miyazaki, Y. Sugawara, R. Xu, Z. H. Cheng, Y. J. Li | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Characterization and Reversible Migration of Subsurface Hydrogen on Rutile TiO ₂ (110) by Atomic Force Microscopy at 78 K | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 22595-22602 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b05744 | 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 M. Miyazaki, H. F. Wen, Q. Zhang, Y. Adachi, J. Brndiar, I. Stich, Y. J. Li and Y. Sugawara | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Imaging the surface potential at the steps on the rutile TiO ₂ (110) surface by Kelvin probe force microscopy | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Beilstein Journal of Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 1228-1236 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3762/bjnano.10.122 | 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 Y. Adachi, H. F. Wen, Q. Zhang, M. Miyazaki, Y. Sugawara, L. Kantorovich, I. Stich, Y. J. Li | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Tip-Induced Control of Charge and Molecular Bonding of Oxygen Atoms on the Rutile TiO ₂ (111) Surface with Atomic Force Microscopy | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ACS nano | 6. 最初と最後の頁 6917-6924 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b01792 | 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 Robert Turansky, K. Palots, Jan Brndiar, Yanjun Li, Yasuhiro Sugawara, and Ivan Stich | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Subatomic-scale resolution with SPM: Co adatom on p(2×1)Cu(110):0 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 95703-95707 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/aaf6dc | 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 H. F. Wen, M. Miyazaki, Q. Zhang, Y. Adachi, Y. J. Li, Y. Sugawara | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 Direct observation of atomic step edges on rutile TiO ₂ (110)-(1×1) surface using atomic force microscopy | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Phys. Chem. Chem. Phys. | 6. 最初と最後の頁 28331-28337 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8cp06156d | 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 Q. Zhang, Y. J. Li, H. F. Wen, Y. Adachi, Y. Sugawara, R. Xu, Z. H. Cheng, J. Brndiar, L. Kantorovich, and I. Stich | 4. 巻 140 |
| 2. 論文標題 Measurement and Manipulation of the Charge State of Adsorbed Oxygen Adatom on Rutile TiO ₂ (110)-1×1 Surface by nc-AFM and KPFM | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc. | 6. 最初と最後の頁 15668-15674 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b07745 | 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 L. Lei, R. Xu, S. Ye, X. Wang, K. Xu, S. Hussain, Y. J. Li, Y. Sugawara, L. Xie, W. Ji, Z.H. Cheng | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Local characterization of mobile charge carriers by two electrical AFM modes: multi-harmonic EFM versus sMIM | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics Communications | 6. 最初と最後の頁 025013(10) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/2399-6528/aaa85f | 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 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Zhang, Y. Adachi, E. Arima, Y. Kinoshita, H. Nomura, Z. Ma, L. Kou, Y. Tsukud, Y. Naitoh, Y. Sugawara, R. Xu, and Z. Cheng | 4. 巻 191 |
| 2. 論文標題 Stable Contrast Mode on TiO ₂ (110) Surface with Metal-Coated Tips Using AFM | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Ultramicroscopy | 6. 最初と最後の頁 51-55 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2018.04.003 | 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 H. F. Wen, Q. Zhang, Y. Adachi, M. Miyazaki, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara | 4. 巻 122 |
| 2. 論文標題 Direct visualization of Oxygen Reaction with Paired Hydroxyl on TiO ₂ (110) Surface at 78 K by Atomic Force Microscopy | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 17395-17399 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b06289 | 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 S.W. Zhang, Z.M. Ma, L. Qin, Y.P. Fu, Y.B. Shi, J. Liu, and Y.J. Li | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Fluorescence detection using optical waveguide collection device with high efficiency on assembly of nitrogen vacancy centers in diamond | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Express | 6. 最初と最後の頁 013007(1-4) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/APEX.11.013007 | 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 Z.M. Ma, S.W. Zhang, Y.P. FU, H. Yuan, Y.B. Shi, J. Gao, L. Qin, J. Tang, J. Liu and Y. J. Li | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Magnetometry for precision measurement using frequency-modulation microwave combined efficient photon-collection technique on an ensemble of nitrogen vacancy centers in diamond | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 OPTICS EXPRESS | 6. 最初と最後の頁 382-390 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) org/10.1364/OE.26.000382 | 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 J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. J. Li, and Y. Sugawara | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Heterodyne Frequency Modulation in Photoinduced Force Microscopy | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical review applied | 6. 最初と最後の頁 24031 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.02403 | 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 E. Arima, H.F. Wen, Y. Naitoh, Y. Sugawara, Y. J. Li | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 KPFM/AFM imaging on TiO ₂ (110) surface in O ₂ gas | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 404001(1-6) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aa815d | 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 Y. J. Li, H.F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, E. Arima, Y. Kinoshita, H. Nomura, Z.M. Ma, L. Kou, Y. Tsukuda, Y. Naitoh, Y. Sugawara, R. Xue and Z. H. Cheng | 4. 巻 191 |
| 2. 論文標題 Stable Contrast Mode on TiO ₂ (110) Surface with Metal-Coated Tips Using AFM | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Ultramicroscopy | 6. 最初と最後の頁 51-55 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2018.04.003 | 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 R. Turansky, K. Palotas, J. Brndiar, Y. J. Li, Y. Sugawara, I. Stich | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Subatomic-scale resolution with SPM: Co adatom on p(2 x 1)Cu(110):0 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 095703(1-7) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaf6dc | 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 Eiji Arima, Huanfei Wen, Yoshitaka Naitoh, Yanjun Li, and Yasuhiro Sugawara | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 KPFM/AFM imaging on TiO ₂ (110) surface in O ₂ gas | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 105504 (1-8) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaa62c | 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 Junsuke Yamanishi, Yoshitaka Naitoh, Yan Jun Li and Yasuhiro Sugawara | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Heterodyne Frequency Modulation Technique in Photoinduced Force Microscopy | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physica Review Applied | 6. 最初と最後の頁 024031(1-5) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.024031 | 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 Yukinori Kinoshita, Yan Jun Li, Satoru Yoshimura, Hitoshi Saito and Yasuhiro Sugawara | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Magnetic resonance force microscopy using ferromagnetic resonance of a magnetic tip excited by microwave transmission via a coaxial resonator | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 485709(1-6) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa90f4 | 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 Eiji Arima, Yoshitaka Naitoh, Yan Jun Li, and Yasuhiro Sugawara | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter | 6. 最初と最後の頁 404001(1-6) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa815d | 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 Yoshitaka Naitoh, Robert Turansky, Jan Brndiar, Yan Jun Li, Ivan Stich, and Yasuhiro Sugawara | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Subatomic-scale force vector mapping above a Ge(001) dimer using bimodal atomic force microscopy | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nature Physics | 6. 最初と最後の頁 663-667 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/NPHYS4083 | 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21件（うち招待講演 18件 / うち国際学会 21件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li |
| 2. 発表標題 Kelvin Probe Force Microscopy with Atomic Resolution |
| 3. 学会等名 Nanoscience and Graphene Nanotechnology 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li |
| 2. 発表標題 Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy |
| 3. 学会等名 International Conference and Expo on nanotechnology and Nanomaterials (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li |
| 2. 発表標題 Atomic-Scale Spin Imaging on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM) |
| 3. 学会等名 The 8th International Conference on Nanoscience & technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yan jun Li |
| 2. 発表標題 Study of the charge state of adsorbed O adatoms on rutile TiO ₂ (110) surface by nc-AFM and KPFM at 78 K |
| 3. 学会等名 The 8th International Conference on Nanoscience & technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li |
| 2. 発表標題 Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM) |
| 3. 学会等名 12th International Symposium on Test and Measurement (ISTM 2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yan jun Li |
| 2. 発表標題 Study of the charge state of adsorbed oxygen adatoms on rutile TiO ₂ (110)-1 × 1 surface by nc-AFM and KPFM |
| 3. 学会等名 The 7th China-Japan Symposium on Nanomedicine (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuhiro Sugawara and Yan Jun Li |
| 2. 発表標題 Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM) |
| 3. 学会等名 The collaborative conference on Materials Research (CCMR) 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, Y. Adachi, H. F. Wen, Q. Zhang, Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 Charge states of O ₂ adsorbed on rutile TiO ₂ surface by AFM/KPFS |
| 3. 学会等名 5th Global Nanotechnology Congress and Expo (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen Q. Z. Zhang, Y. Adachi, and Y. Sugawara |
| 2 . 発表標題 Reversible bond formation between Oxygen atoms vis charge manipulation on rutile TiO ₂ (110) surface |
| 3 . 学会等名 The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces & Cross-Strait Symposium on Solid Surfaces (APSSS-3) (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2 . 発表標題 The study of local dipole moment and contact potential difference on TiO ₂ (110) surface by AFM |
| 3 . 学会等名 24th World Nano Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh, and Y. Sugawara |
| 2 . 発表標題 The measurement of local dipole moment and local contact potential difference on rutile TiO ₂ (110) surface by AFM with atomic resolution |
| 3 . 学会等名 Nano 2018 conference (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen and Y. Sugawara |
| 2 . 発表標題 The measurement of local dipole moment and local contact potential difference on rutile TiO ₂ (110) surface by AFM |
| 3 . 学会等名 13th International Conference and Exhibition on Materials Science and Engineering, 4th Global nanotechnology Congress and Expo (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 The study of local dipole moment and contact potential difference on TiO ₂ (110) surface by AFM |
| 3. 学会等名 23rd International Conference on Nanomaterials and Nanotechnology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Sugawara, E. Arima, Y. Naitoh, and Y. J. Li |
| 2. 発表標題 Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy |
| 3. 学会等名 21st International Conference of Noncontact Atomic Force Microscopy (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 The study of local dipole moment and contact potential difference on TiO ₂ (110) surface by AFM |
| 3. 学会等名 23rd International Conference on Nanomaterials and Nanotechnology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 Local dipole moment on rutile TiO ₂ (110) surface by electrostatic force microscopy |
| 3. 学会等名 2nd World Congress and Expo on Graphene & 2D Materials, Nanoscience and Molecular Nanotechnology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 The investigation of Au cluster on TiO ₂ (110) surface by Kelvin probe force microscopy |
| 3. 学会等名 The 5th China-Japan Symposium on Nanomedicine (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 The investigation of Au cluster on TiO ₂ (110)-1x1 surface by KPFM |
| 3. 学会等名 2017 EMN Meeting on Titanium-Oxides (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. J. Li, H. F. Wen, Q. Z. Zhang, Y. Adachi, Y. Naitoh and Y. Sugawara |
| 2. 発表標題 The investigation of local dipole moment on TiO ₂ (110) surface by electrostatic force microscopy |
| 3. 学会等名 The Collaborative Conference on 3D & Materials Research 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ryo Izumi, Yoshitaka Naitoh, Yanjun Li and Yasuhiro Sugawara |
| 2. 発表標題 Development of AFM-based scanning microwave impedance microscopy using heterodyne technique |
| 3. 学会等名 2017 International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Huan Fei Wen, Quan Zhen Zhang, Yoshitaka Naitoh, Yan Jun Li, and Yasuhiro Sugawara |
| 2. 発表標題 Simultaneous Characterization of Tunneling Current and Local Contact Potential Difference on TiO ₂ (110) Surface |
| 3. 学会等名 2017 International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Y. J. Li, Haunfei Wen, Zong Min Ma, Lili Kou, Yoshitaka Naitoh, and Yasuhiro Sugawara | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 Springer | 5. 総ページ数 521 |
| 3. 書名 Kelvin Probe Force Microscopy - From Single Charge | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| 大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 ナノ物性工学領域 菅原・李グループ http://nanophysics.ap.eng.osaka-u.ac.jp/ |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 内藤 賀公 (Naitoh Yoshitaka) (90362665) | 大阪大学・工学研究科 ・助教 (14401) | |