

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03859

研究課題名(和文)単原子レベルでの化学結合論の検証

研究課題名(英文)Verification of chemical bonding theory at the atomic level

研究代表者

杉本 宜昭 (Sugimoto, Yoshiaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00432518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2つの原子の間に生じる化学結合エネルギーを計測することができる原子間力顕微鏡(AFM)を用いて、化学結合論を検証することを目的とした。そのために、AFMの探針先端の原子と表面の原子との間の距離を変えながら、2原子間に生じる化学結合エネルギーを精密に計測した。様々な探針の状態で、表面の原子の上で化学結合力の計測を行った。化学結合エネルギーの最大値の散布図を作成したところ、化学結合論によって説明できるものであった。これは共有結合の幾何平均則を元にしたポーリングの化学結合論の妥当性を強く支持する結果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化学結合は物質科学において普遍的な概念であるので、分野を問わず様々な局面で議論されてきた。特に計算科学の発展によって、高精度な結果が得られるようになり、物質設計などに役立っている。一方、化学結合論を実験的に検証する研究は乏しいと言わざるを得ない。原子間の化学結合を調べる方法として、熱力学的手法や分光的手法があるが、いずれも多数の原子の平均値を測定するものである。個々の原子の間の化学結合を調べるには、AFMを用いた本手法以外にないといえる。本手法により、個々の原子を化学識別する究極的な化学分析法へと発展させることができる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to verify the chemical bonding theory using an atomic force microscope (AFM), which can measure the chemical bonding energy between two atoms. To this end, the chemical bonding energy between two atoms was precisely measured by varying the distance between the atoms at the tip of the AFM probe and the atoms on the surface. The chemical bonding forces were measured on the surface atoms at various tip states. Scatter plots of the maximum values of the chemical bond energies can be explained by the chemical bond theory. This result strongly supports the validity of Pauling's chemical bonding theory based on the geometric mean rule for covalent bonds.

研究分野：走査プローブ顕微鏡

キーワード：走査プローブ顕微鏡 化学分析

1. 研究開始当初の背景

Pauling の著書「The Nature of the Chemical Bond」は、Newton の「プリンシピア」、Darwin の「種の起源」と並んで、学术界に大きな影響を与えた書籍である。この書籍は初版から 80 年近くたった現在においても化学の入門書として広く読まれている。Pauling は当時確立したばかりの量子力学を用いて、化学結合を記述した。Pauling の化学結合論では、原子軌道を用いて 2 つの原子の間に生じる化学結合を議論する。例えば、水素分子は水素原子の 1s 軌道同士が近づいて共鳴することで安定化する。また、メタン分子は炭素原子の 2s 軌道と 2p 軌道から sp³ 混成軌道を作り、4 つの sp³ 混成軌道にそれぞれ水素原子の 1s 軌道が結合する。より複雑な化学結合も、混成・共鳴・電気陰性度などの概念を導入することによって説明される。化学結合論は、現在においても有機化学・物性化学・材料科学など幅広い分野で考えのよりどころになっており、物質科学の根幹をなすといっても過言ではない。

しかし、Pauling の化学結合論は原子軌道に基づいており、そこに、ある種の単純化がある。より厳密には分子や物質を構成する原子核を配置して、そこでの電子の全波動関数を考える必要がある。Pauling のように隣り合う原子の化学結合(ボンド)を考えるより、電子の海に原子核が配置しているという描像の方が正確である。その点において、化学結合は便宜的なもので概念上のフィクションにすぎないという論調すらある。そこで、Pauling の化学結合論はどの程度正しいのかを検証するという意義が生じる。

2. 研究の目的

個々の原子に対して、化学結合を計測する手法がなかったため、化学結合論の妥当性の検証は行われておらず、曖昧な点を多く残したまま今に至っている。本研究では、Pauling の化学結合論を個々の原子レベルで検証することを目的とする。化学結合を調べる最も基本的な方法は、原子間の化学結合エネルギーを計測することである。これまで、化学結合エネルギーの計測は、ガスの反応熱の測定など、多数の原子の集団平均的な量の計測に限られていた。本研究では、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて 2 つの原子の間に生じる化学結合エネルギーを計測する。AFM とは、鋭く尖らせた探針を試料表面に近づけ、探針先端の 1 つの原子と、表面の 1 つの原子との間の力を測定して、原子を観察する顕微鏡である。AFM を用いると探針先端の原子と、表面の原子の相対位置を変えながら化学結合エネルギーを計測できるので、平衡位置のみならず化学結合の距離依存性や方向性を調べることができる。

3. 研究の方法

本研究では、AFM の探針先端の原子と表面の原子を近づけて、近接する 2 原子の間に生じる化学結合エネルギーを計測する。例えば、Si の価数は 4 であるが、他の 3 つの Si 原子と結合して保持されれば、1 つだけ不対電子を持つことになる。そこにもう 1 つの不対電子を近づけて化学結合させれば、1 本の化学結合を調べることができる。近接する 2 つの原子の間に生じる化学結合エネルギーを、2 原子間の距離の関数として計測する。このような計測手法により、化学結合論に関する概念を系統的かつ包括的に検証する。実験には、超高真空の AFM を用いて、周波数変調方式で動作させる。超高真空中で、原子レベルで清浄な表面を作成し、原子レベルで規定されたモデル系を準備する。また、探針先端もイオンスパッタにより清浄化して、必要に応じて異なる原子を針先に導入して、実験を行った。

4. 研究成果

これまで、試料表面の原子種を変えて、探針との相互作用を調べていたが、今回探針先端の原子種を変えて相互作用を調べた。具体的にはシリコンの探針先端にアルミニウムを蒸着して実験した。これにより探針先端の原子がシリコンもしくはアルミニウムとなる状況を作った。そして、様々な探針の状態、表面の原子の上で化学結合力の計測を行った。化学結合エネルギーの最大値の散布図を作成したところ、これまでシリコン探針で得られていた直線上に分布するデータ群に加えて、新たに別の直線上に分布するデータ群を得た。新たに得られた直線は、アルミニウム原子を先端に持つ探針を想定すると化学結合論によって説明できるものであった。これは共有結合の幾何平均則を元にしたポーリングの化学結合論の妥当性を強く支持する結果である。

走査プローブ顕微鏡(SPM)では試料を走査するために極細の探針が用いられており、探針先端の原子は画像のコントラストや各種スペクトロスコピーに大きな影響を与える。今回、AFM

を用いて探針と表面原子の間に働く化学結合エネルギーを測定することで、探針先端原子の元素識別が可能であることを見出したといえる。本手法は室温、in-situで行うことができ、様々な元素に対しても有効である可能性があるため、構造が規定されたモデル表面だけでなく不規則な実材料表面に対しても原子スケールでの元素分析が適用できると期待できる。また、これまでは理論計算によるサポートが必要であったAFMによる単原子の電気陰性度測定に関して、本手法で識別された探針を用いることで、実験のみで電気陰性度を決定できることが初めて明らかとなった。探針の元素識別によってSPMデータの解釈が容易となるだけでなく、原子スケールでの化学分析、化学反応性分析の道が拓けたため、この成果は今後の材料探索や開発の分野において大きく貢献できると期待できる。

さらに、異なる化学状態を有する原子を同一表面に準備することにも成功した。様々な元素の原子対を用いることによって、化学結合に含まれるイオン性・金属性、また結合の方向性など、化学結合論の根幹をなす概念を検証し、それらの適用範囲を調べることを目標としている。共有結合エネルギーは、原子軌道の化学状態に依存する。例えば、s軌道、sp³混成軌道、p軌道のように原子軌道の波動関数が異なると、共有結合エネルギーが変化すると予想される。そこで、これまで調べてきたシリコン表面の構造とは異なる構造を持つシリコンナノ構造を模索した。銀表面にシリコン原子を蒸着することにより、これまで報告例のないシリコン原子からなるチェーン構造を発見した。AFMにより高分解能に観察し、さらに第一原理計算による構造最適化を行うことによって、シリコン原子の4員環を持つユニークな構造を有してことが判明した。また、チェーン構造の端については、対称性を破る非自明な構造をしており、銀基板の影響について検討した。このような新しいナノ構造によって、異なる軌道混成の原子を準備して、化学結合力の計測が行えるようになった。実際に、異なる軌道混成の原子で化学結合力を比較すると明確に異なる最大引力を生じていることが判明し、原子レベルでの軌道混成の検証への道を切りひらいた。

化学結合力の計測に関する技術面においても、進展させた。AFMにおいて、針先端の鋭さは長距離力を抑制するために重要である。しかし、スキャンなど測定中に針先端が試料表面に接触して、徐々に針先端が鈍化して力の感度が減少していく。その場合、新しく針を導入するのが常であった。そこで、高感度な化学結合力計測を持続させるための技術を発展させるために、針先端の先鋭化の新しい方法論を提案し、その有用性を実証した。さらに、鈍化した探針先端の形状を再び先鋭化する探針の再生に関する成果をあげることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishii Ayumu, Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Quality control of on-surface-synthesised seven-atom wide armchair graphene nanoribbons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 6651 ~ 6657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR10942K	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 Onoda Jo, Miyazaki Hiroki, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 20
2. 論文標題 Chemical Identification of the Foremost Tip Atom in Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2000 ~ 2004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b05280	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 Isshiki H., Kondou K., Takizawa S., Shimose K., Kawabe T., Minamitani E., Yamaguchi N., Ishii F., Shiotari A., Sugimoto Y., Miwa S., Otani Y.	4. 巻 19
2. 論文標題 Realization of Spin-dependent Functionality by Covering a Metal Surface with a Single Layer of Molecules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7119 ~ 7123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b02619	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 Onoda Jo, Feng Lingyu, Yabuoshi Keisuke, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 3
2. 論文標題 Less-ordered structures of silicene on Ag(111) surface revealed by atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104002 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.104002	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 Sugimoto Yoshiaki, Onoda Jo	4. 巻 115
2. 論文標題 Force spectroscopy using a quartz length-extension resonator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 173104 ~ 173104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5112062	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 Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki, Kamio Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Characterization of two- and one-dimensional water networks on Ni(111) via atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 093001(R) 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.093001	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 Isshiki H., Kondou K., Takizawa S., Shimose K., Kawabe T., Minamitani E., Yamaguchi N., Ishii F., Shiotari A., Sugimoto Y., Miwa S., Otani Y.	4. 巻 19
2. 論文標題 Realization of Spin-dependent Functionality by Covering a Metal Surface with a Single Layer of Molecules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7119 ~ 7123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b02619	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 Yabuoshi Keisuke, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 58
2. 論文標題 Evidence for honeycomb-chained trimer structure of multilayer silicene on Ag(111) with noncontact atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020903 ~ 020903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aaf4b5	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 Lingyu, Yabuoshi Keisuke, Sugimoto Yoshiaki, Onoda Jo, Fukuda Masahiro, Ozaki Taisuke	4. 巻 98
2. 論文標題 Structural identification of silicene on the Ag(111) surface by atomic force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.195311	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 Shiotari Akitoshi, Odani Takafumi, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 121
2. 論文標題 Torque-Induced Change in Configuration of a Single NO Molecule on Cu(110)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 116101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.116101	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 Oki Kosuke, Takase Masayoshi, Mori Shigeki, Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki, Ohara Keishi, Okujima Tetsuo, Uno Hidemitsu	4. 巻 140
2. 論文標題 Synthesis, Structures, and Properties of Core-Expanded Azacoronene Analogue: A Twisted System with Two N-Doped Heptagons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 10430 ~ 10434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b06079	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 Koshida Hiroyuki, Hatta Shinichiro, Okuyama Hiroshi, Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki, Aruga Tetsuya	4. 巻 122
2. 論文標題 Water NO Complex Formation and Chain Growth on Cu(111)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 8894 ~ 8900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b12447	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 Lingyu, Shiotari Akitoshi, Yabuoshi Keisuke, Fukuda Masahiro, Ozaki Taisuke, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Structure of one-dimensional monolayer Si nanoribbons on Ag(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 034002 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.5.034002	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 Onoda Jo, Hasegawa Tsuyoshi, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 15
2. 論文標題 In Situ Reproducible Sharp Tips for Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034079 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.15.034079	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 Wagner Philipp, Foster Adam, Yi Insook, Abe Masayuki, Sugimoto Yoshiaki, Hoffmann-Vogel Regina	4. 巻 32
2. 論文標題 Role of tip apices in scanning force spectroscopy on alkali halides at room temperature chemical nature of the tip apex and atomic-scale deformations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 035706 ~ 035706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/abbea8	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 Ishii Ayumu, Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Mechanically induced single-molecule helicity switching of graphene-nanoribbon-fused helicene on Au(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 13301 ~ 13306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SC03976H	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38件(うち招待講演 8件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 小野田穰, 馮凌瑜, 藪押慶佑, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるシリセンT相の高分解能観察
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年~2020年

1. 発表者名 馮凌瑜, 小野田穰, 藪押慶佑, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いたAg(111)上シリセンのT相の構造解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2019年~2020年

1. 発表者名 塩足亮隼, 尾谷卓史, Pham Thanh Ngoc, 濱本雄治, 森川良忠, 濱田幾太郎, 杉本 宜昭
2. 発表標題 Cu(110)表面上のNO 単分子のトグルスイッチ動作とその機構解明
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2019年~2020年

1. 発表者名 Y. Sugimoto
2. 発表標題 Determination of adsorption structures of small molecules using atomic force microscopy
3. 学会等名 The 4th international symposium on "Elucidation of Property of Next Generation Functional Materials and Surface/Interface" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年~2020年

1. 発表者名 Y. Sugimoto
2. 発表標題 Imaging and force spectroscopy of individual atoms/molecules using atomic force microscopy
3. 学会等名 The 81st Okazaki Conference, Forefront of Measurement Technologies for Surface Chemistry and Physics in Real-Space, k-Space, and Real-Time (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 杉本宜昭, 小野田穰
2. 発表標題 長辺振動水晶振動子を用いたフォーススペクトロスコピー
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 馮凌瑜, 藪押慶祐, 小野田穰, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いたAg(111)上のシリセントフェーズの構造解析
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 尾谷卓史, 塩足亮隼, 杉本宜昭
2. 発表標題 Cu(110)表面上NO単分子のスイッチ機能の開発
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 E. Inami, Y. Sugimoto, T. Shinozaki, O. Gurlu and A. Yurtsever
2. 発表標題 Combined atomic force and scanning tunneling microscopy study to identify atomic species in Pt-induced nanowires on Ge(001) surface
3. 学会等名 Atomic Level Characterization (ALC19) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 杉本宜昭, 小野田穰
2. 発表標題 長辺振動水晶振動子による原子間力計測
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による単原子分子計測と操作
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 走査プローブ顕微鏡分科会技術セミナー・研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 A. Shiotari, T. Odani, T.N. Pham, Y. Hamamoto, Y. Morikawa, I. Hamada, and and Y. Sugimoto
2. 発表標題 Mechanical toggle switch of a nitric oxide molecule
3. 学会等名 22th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 J. Onoda, and Y. Sugimoto
2. 発表標題 Force spectroscopy using a quartz length extension resonator
3. 学会等名 22th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 L. Feng, J. Onoda, K. Yabuoshi, and Y. Sugimoto
2. 発表標題 Structural Identification for T phase of Silicene on Ag(111) by High-resolution AFM Imaging
3. 学会等名 22th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による単原子分子計測と操作
3. 学会等名 科学技術交流財団 第4回「ポストグラフェン材料のデバイス開発研究会」(招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた単原子分子の計測・制御技術の開発
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 塩足亮隼, 塩澤佑一郎, 杉本宜昭, 吉信淳
2. 発表標題 STM/AFM およびIRAS によるCu(111)表面上のギ酸の吸着構造解明
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 藪押慶祐, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いたAg(111)表面上の多層シリセンの構造解析
3. 学会等名 第66回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 尾谷卓史, 塩足亮隼, 杉本宜昭
2. 発表標題 NO修飾探針の作製とSTM像シミュレーション
3. 学会等名 第66回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 塩足亮隼, 尾谷卓史, 杉本宜昭
2. 発表標題 斥力誘起による銅表面上の一酸化窒素単分子の配向変化制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた単原子の計測と操作
3. 学会等名 第29回科学技術交流フォーラム「最先端計測分析技術の開発と高度解析技術の進化」(招待講演)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 塩足亮隼, 尾谷卓史, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による銅表面上の一酸化窒素単分子のトグルスイッチ制御
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 馮凌瑜, 藪押慶祐, 小野田穰, 福田将大, 尾崎泰助, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いたAg(111)上のシリセン(R13×R13)R13.9°相の構造解析
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 藪押慶祐, 杉本宜昭
2. 発表標題 Ag(111)表面上に形成したSi ベース二次元物質のAFM 観察
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 川上直也, 塩足亮隼, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による氷表面の構造評価
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 K. Yabuoshi and Y. Sugimoto
2. 発表標題 Characterization of Silicene $4/3 \times 4/3$ Phase on Ag(111) Surface with Atomic Force Microscope
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 L. Feng, K. Yabuoshi, J. Onoda, M. Fukuda, T. Ozaki and Y. Sugimoto
2. 発表標題 High-resolution Imaging of Silicene (13×13)R13.9° Structure on Ag(111) by Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 A. Shiotari and Y. Sugimoto
2. 発表標題 Ultra-high-resolution imaging of water networks on a Cu surface by atomic force microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 J. Onoda, L. Feng, K. Yabuoshi, M. Fukuda, T. Ozaki and Y. Sugimoto
2. 発表標題 High Resolution AFM Observation of Silicene on Ag(111) by Active Imaging
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 藪押慶祐, 馮凌瑜, 小野田穰, 福田将大, 尾崎泰助, 杉本宜昭
2. 発表標題 Ag(111)表面上シリセン 13x 13 R13.9°相の構造決定
3. 学会等名 第79回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 塩足亮隼, 塩澤佑一郎, 杉本宜昭, 吉信淳
2. 発表標題 Cu(111)表面上に吸着したギ酸のナノスケール構造解明
3. 学会等名 第79回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 川上 直也, 塩足亮隼, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた氷表面の高分解能観察
3. 学会等名 第79回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 塩足亮隼, 尾谷卓史, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるCu(110)表面上のNO単分子のトグルスイッチ制御
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 福田将大, 馮凌瑜, 藪押慶祐, 小野田穰, 杉本宜昭, 尾崎泰助
2. 発表標題 第一原理計算による原子間力顕微鏡の探針とシリセン表面の原子間の化学結合力評価
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 馮凌瑜, 藪押慶祐, 小野田穰, 杉本宜昭, 福田将大, 尾崎泰助
2. 発表標題 Ag(111)表面上のシリセンの高分解能AFMイメージング
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 川上直也, 塩足亮隼, 杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた氷表面の原子分解能観察
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Y. Sugimoto
2. 発表標題 High resolution imaging of water molecules by non-contact atomic force microscopy
3. 学会等名 SPSTM-7 & LTSPM-1 International Conference 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Y. Sugimoto
2. 発表標題 AFM imaging of water molecules on metal
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on "Recent Trends in the Elucidation and Function Discovery of Next Generation Functional Materials of Surface / Interface Properties (招待講演)
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP http://www.afm.k.u-tokyo.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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	Karlsruher Institute			
フィンランド	Aalto University School of Science			