

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02111

研究課題名（和文）環境制御型高速3次元力顕微鏡による界面分子吸着構造の分子スケール解析

研究課題名（英文）Molecular-scale investigations on interfacial molecular adsorption structures by high-speed three-dimensional scanning force microscopy with an environmental control system

研究代表者

福間 剛士（Fukuma, Takeshi）

金沢大学・ナノ生命科学研究所・教授

研究者番号：90452094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、3次元走査型力顕微鏡（3D-SFM）による原子スケール3次元水和構造計測の速度を、従来の1分/像から3秒/像まで格段に高速化させた。さらに、密閉セルや溶液置換機能などの環境制御機能を付加した。一方、開発した密閉セルを使って、揮発性のあるメタノール-水混合液中でのグラファイト表面における分子吸着構造計測を実現した。また、溶液置換機能を使って、界面活性剤であるCTAB分子のサファイア上における吸着構造の溶液濃度依存性を明らかにした。以上の通り、本研究により、3D-SFMによる分子吸着解析技術の実用性・有用性を大幅に改善することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固液界面に分子吸着構造を形成することで、界面物性を制御する技術は様々な材料・デバイスに応用されているが、そのような揺動する分子の3次元吸着構造を直接観察することは従来技術では困難であった。本研究で開発した技術により、それらの吸着構造が可視化できれば、界面物性の起源を分子レベルで根本的に理解することができ、それをより精密に制御することが可能となる。これにより、潤滑性、防汚性、親水性、凝集性など、様々な界面物性・機能をより最適に制御できるようになる。これらは、界面科学の発展につながるだけでなく、例えば自動車の燃費向上、液晶デバイスの性能向上など、社会の発展にも貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have improved the speed of three-dimensional scanning force microscopy (3D-SFM) imaging of an atomic-scale 3D hydration structure from 1 min/image to 3 s/image. In addition, we added closed cell and fluid-exchange function to the 3D-SFM system. With this improved setup, we performed imaging of various molecular adsorption structures. For example, we imaged methanol adsorption structures on a graphite surface in a volatile methanol-water mixture. We also imaged adsorption structures of surfactants (CTAB) and their concentration dependence was investigated by the fluid exchange system. These results demonstrate that usability and effectiveness of the developed 3D-SFM system for 3D molecular adsorption structure analysis.

研究分野：ナノ計測工学

キーワード：原子間力顕微鏡 分子吸着構造 界面構造 水和構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固液界面に分子吸着層を形成し、界面物性を制御する方法は様々な学術・産業分野で利用されている。しかし、それらの分子の3次元吸着構造を従来の計測技術では直接観察することは困難であり、それがこれらの界面制御技術の精度の改善を妨げている。それに対し、近年、周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) や3次元走査型力顕微鏡 (3D-SFM) の開発により、固液界面における3次元水和構造や3次元分子鎖分布を測定できることが示され、分子吸着構造解析への応用が期待されている。しかし、現在の3D-SFMを幅広い分子吸着構造の計測に応用するためには、その動作速度や環境制御機能が不足しており、それらの解決が強く望まれる。

2. 研究の目的

3D-SFMを、産業分野で利用される分子層の3次元吸着構造解析に用いるには、その動作速度と環境制御機能を格段に向上させるとともに、観察機構に関する未解明の点を明らかにし、データ解析法も確立する必要がある。また、その実用性を実証するための応用実験にも取り組む必要がある。本研究では、これらの装置開発および応用研究に取り組み、3D-SFMによる分子スケール3次元分子吸着構造解析技術を確立する。

3. 研究の方法

AFMでは、先端に鋭く尖った探針を持つ片持ち梁 (カンチレバー) を力検出器として用いる。探針を試料に近づけると、探針-試料間に相互作用力 (F_i) が働く。これを検出し、それが一定となるよう探針-試料間距離を制御する。この状態で、探針を水平方向に走査すると、探針は試料表面の凹凸をなぞるように上下するため、その際の探針の軌跡から表面形状像が得られる (図1a)。3D-SFMでは、水平方向に加えて、垂直方向にも探針を高速に走査し、その間の F_i の変化を記録することで、界面における3次元力分布を計測する (図1b)。本研究では、この3D-SFMの制御装置を高速化し、観察速度を従来の10倍以上改善する。一方で、密閉セルを装置に付加し、揮発溶液中での計測や、溶液置換機能を実装する。さらに、これらの改良後の装置を使って、様々な分子吸着構造を測定し、その性能を実証する。

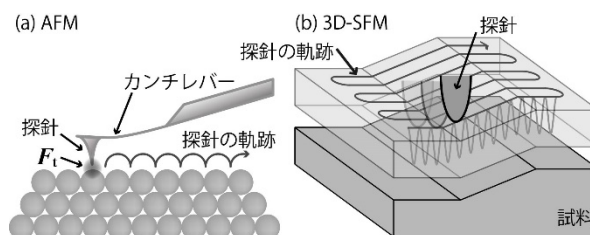


図1. AFMと3D-SFMの動作原理

4. 研究成果

(1) 3D-SFMの高速化: 我々は、これまでに液中で原子分解能観察が可能なFM-AFMの動作速度を向上させるための開発に取り組み、その速度を従来の約50倍改善し、約1秒/フレームでの原子分解能観察を可能としてきた。一方で、3D-SFMの動作速度は約1分/3次元像程度であり、まだ動的挙動の解析には用いることができない。そこで本研究では、高速FM-AFMの制御ソフトウェアとファームウェア (FPGA回路) に改良を加え、数秒/3次元像程度の高速な3D-SFM計測を可能とした。しかし、高速に取得される3次元データを漏らさず記録するためには、従来のHDDにデータを転送する方法では間に合わなくなってしまった。そこで、SSD6台をRAID0により並列接続し、高速にデータを保存できるシステムを開発した。これにより、3-5秒/3次元像程度の速度で3D-SFM計測が可能となった。図2に、その一例を示す。この例では、カルサイト/水界面の3次元水和構造を3秒/像の速度で捉えることができていた。このような高速動作にも関わらず、原子レベルの周期構造が明瞭に観察されており、単に高速化しただけでなく、力検出限界も向上していることがうかがえる。

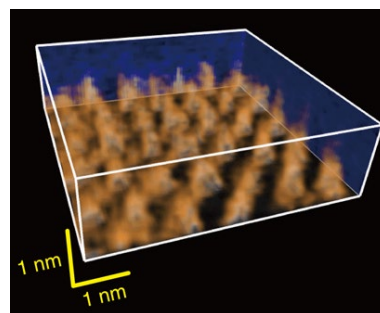


図2. カルサイト/水界面の高速3D-SFM像 (3秒/像)

(2) 環境制御機能の付加: 従来の3D-SFMでは、観察溶液が密閉領域に入れられておらず、時間とともに、揮発していく問題があった。また、従来の密閉セルの多くは、内壁を構成する一部が容易に着脱できず、超音波や強酸などにより強力に洗浄できない問題があった。本研究では、図3に示すように、上下を使い捨て可能な安価な高分子メンブレンで挟み、その他の蒸気に接するすべての部分を着脱洗浄可能な構成とすることにより、クロスコンタミネーションの問題の無い密閉セルを開発した。また、これらに溶液やガスのインレットとアウトレットを取り付けることで、観察中の溶液およ

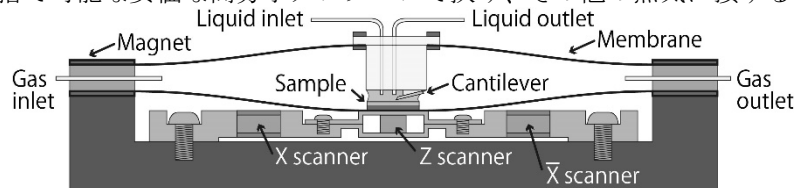


図3: 環境制御型3D-SFMの構成の概略図

びガスの置換を可能とした。

(3) 開発した 3D-SFM の分子吸着構造解析への応用例

①分子吸着抑制界面における 3 次元水和揺動構造

SiO₂ 微粒子表面に glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPS) 分子鎖を修飾し、それを家屋の壁面や屋根の表面に塗布することで、防汚効果を持たせることができ、このような技術はすでに民間において使われている。我々は、オーストラリアの民間企業および大学と共同で、この GPS 修飾微粒子が持つ吸着抑制能の起源について、ナノスケールで調べた。図 4 に示す通り、GPS 修飾前後の水和構造変化を捉えることに成功した。GPS 修飾前には、明瞭な層状構造が確認されるのに対して、修飾後にはそれがなくなっている。界面における力-距離曲線を観ると、GPS 修飾前にあった振動的なプロファイルが、修飾により単調に増加するプロファイルに変化していることが分かる。これは、探針が接触したときに表面の水和層を押しよけるよりも前に、分子鎖が変形してその弾力性により探針を押し返す力が強く働くことを示している。

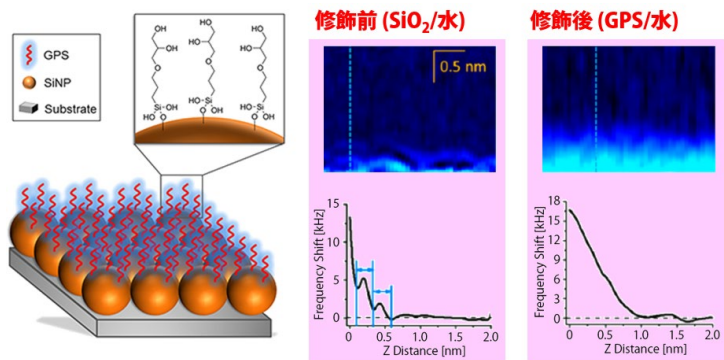


図 4. GPS 修飾前後の水和構造変化[1].

同様の現象が、外来分子が衝突した場合にも生じていることが予想され、これにより、分子吸着抑制機構が分子レベルで理解できた。この成果は、ACS Nano 誌に論文として発表した[1]。

②疎水表面／水界面におけるガス分子吸着構造

疎水表面／水界面の物性は、潤滑や防汚など、様々な界面物性に関連して広く研究されてきた。中でも、近年、溶存するガス分子が界面に吸着構造を自己組織的に形成する可能性が指摘され多くの研究者が研究に取り組んでいる。本研究では、台湾の研究グループと共同で、グラフェン／水界面を 3D-SFM 解析し、酸素や窒素などと思われるガス吸着分子の形成する自己組織化構造と、その表面に形成される水和構造を明らかにした。図 5a に示す通り、典型的にはストライプ状の吸着構造を示す。図 5c より、グラファイト表面では層状の水和構造を形成するのに対し、分子吸着構造の表面では明瞭な層状構造が確認できないことが分かった。これは、層状構造を形成する吸着分子が室温において熱的に揺動しているためと予想される。これらの知見は、疎水表面／水界面の物性に関する分子レベルでの知見を与える重要な結果と言える。この成果は Phys. Chem. Chem. Phys. 誌に論文として発表した[2]。

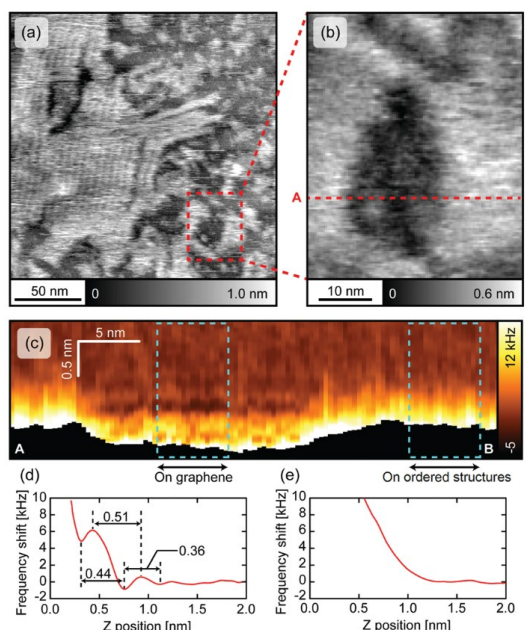


図 5. グラフェン上に吸着したガス分子とその表面に形成された水和構造 [2]

③有機小分子の自己組織化膜形成

有機小分子の界面吸着構造は幅広く界面物性制御に使われているが、その制御は極めて難しい。本研究では、基本的な小分子であるエタノールやメタノールとグラファイトの界面において形成される自己組織化構造が、溶液中に存在するイオンや別の微量分子の影響でどのように変化するかを 3D-SFM により調べた。この研究は、イギリスの Durham 大学の研究グループと共同で実施した。図 6 に示した通り、メタノール-水 (1:1) 混合溶液中で測定した HOPG 上における 3 次元界面構造がサブナノスケールの分解能で明瞭に観察できている。この吸着構造は溶液中に溶液にリン酸緩衝液を微量加えることで劇的に変化することも確認できた。これらの計測は、メタノールのような揮発性の溶液中で実施する必要があり、本研究で開発した環境制御セルが極めて有効に活用できた例と言える。この成果は、Nanoscale 誌に論文として発表した[3]。

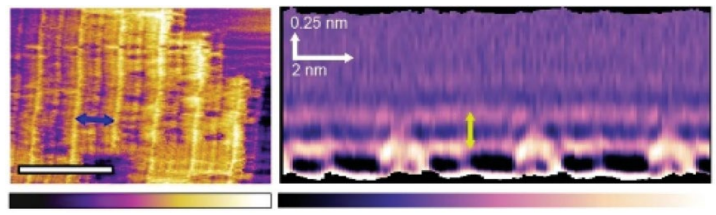


図 6. HOPG 上のメタノール分子吸着構造[3].

<引用文献>

1. P. J. Molino, D. Yang, M. Penna, K. Miyazawa, B. R. Knowles, S. MacLaughlin, T. Fukuma, I. Yarovsky, M. J. Higgins, "Hydration Layer Structure of Biofouling-Resistant Nanoparticles" ACS Nano 12 11610–11624 (2018)
2. CW. Yang, K. Miyazawa, T. Fukuma, K. Miyata, IS. Hwang, "Direct comparison between subnanometer hydration structures on hydrophilic and hydrophobic surfaces via three-dimensional scanning force microscopy" Phys.Chem.Chem.Phys., 20, 23522–23527 (2018).
3. W. Foster, K. Miyazawa, T. Fukuma, H. Kusumaatmaja, K. Vořtchovsky, "Self-assembly of small molecules at hydrophobic interfaces using group effect", Nanoscale, 12, 5452-5463 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fukuma Takeshi, Garcia Ricardo	4. 巻 12
2. 論文標題 Atomic- and Molecular-Resolution Mapping of Solid/Liquid Interfaces by 3D Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 11785 ~ 11797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.8b07216	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 Molino Paul J., Yang Dan, Penna Matthew, Miyazawa Keisuke, Knowles Brianna R., MacLaughlin Shane, Fukuma Takeshi, Yarovsky Irene, Higgins Michael J.	4. 巻 12
2. 論文標題 Hydration Layer Structure of Biofouling-Resistant Nanoparticles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 11610 ~ 11624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.8b06856	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 Asakawa Hitoshi, Holmström Eero, Foster Adam S., Kamimura Sunao, Ohno Teruhisa, Fukuma Takeshi	4. 巻 122
2. 論文標題 Direct Imaging of Atomic-Scale Surface Structures of Brookite TiO ₂ Nanoparticles by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy in Liquid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 24085 ~ 24093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b06262	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 Morimoto Masayuki, Takatsuji Yoshiyuki, Hirata Kaito, Fukuma Takeshi, Ohno Teruhisa, Sakakura Tatsuya, Haruyama Tetsuya	4. 巻 290
2. 論文標題 Visualization of catalytic edge reactivity in electrochemical CO ₂ reduction on porous Zn electrode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 255 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2018.09.080	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 Chih-Wen、Miyazawa Keisuke、Fukuma Takeshi、Miyata Kazuki、Hwang Ing-Shouh	4. 巻 20
2. 論文標題 Direct comparison between subnanometer hydration structures on hydrophilic and hydrophobic surfaces via three-dimensional scanning force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 23522 ~ 23527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1039/c8cp02309c	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 Hirata Kaito、Kitagawa Takuya、Miyazawa Keisuke、Okamoto Takahiro、Fukunaga Akira、Takatoh Chikako、Fukuma Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Visualizing charges accumulated in an electric double layer by three-dimensional open-loop electric potential microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 14736 ~ 14746
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1039/c8nr03600d	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 Miyata Kazuki、Fukuma Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantitative comparison of wideband low-latency phase-locked loop circuit designs for high-speed frequency modulation atomic force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Beilstein Journal of Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 1844 ~ 1855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3762/bjnano.9.176	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 Li Xin、Collins Liam、Miyazawa Keisuke、Fukuma Takeshi、Jesse Stephen、Kalinin Sergei V.	4. 巻 9
2. 論文標題 High-veracity functional imaging in scanning probe microscopy via Graph-Bootstrapping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-018-04887-1	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 Kakimoto Yasuhiro, Tachihara Yoshihiro, Okamoto Yoshiaki, Miyazawa Keisuke, Fukuma Takeshi, Tero Ryugo	4. 巻 34
2. 論文標題 Morphology and Physical Properties of Hydrophilic-Polymer-Modified Lipids in Supported Lipid Bilayers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 7201 ~ 7209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.8b00870	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 Kobayashi Naoya, Inano Kouichi, Sasahara Kenji, Sato Takaaki, Miyazawa Keisuke, Fukuma Takeshi, Hecht Michael H, Song Chihong, Murata Kazuyoshi, Arai Ryoichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Self-Assembling Supramolecular Nanostructures Constructed from de Novo Extender Protein Nanobuilding Blocks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Synthetic Biology	6. 最初と最後の頁 1381 ~ 1394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssynbio.8b00007	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 Songen Hagen, Reischl Bernhard, Miyata Kazuki, Bechstein Ralf, Raiteri Paolo, Rohl Andrew L., Gale Julian D., Fukuma Takeshi, Kuhnle Angelika	4. 巻 120
2. 論文標題 Resolving Point Defects in the Hydration Structure of Calcite (10.4) with Three-Dimensional Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.120.116101	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 該当する

1. 著者名 Asakawa Hitoshi, Inada Natsumi, Hirata Kaito, Matsui Sayaka, Igarashi Takumi, Oku Norihisa, Yoshikawa Norinobu, Fukuma Takeshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Self-assembled monolayers of sulfonate-terminated alkanethiols investigated by frequency modulation atomic force microscopy in liquid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 455603 ~ 455603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/aa8aa7	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 Miyata Kazuki, Tracey John, Miyazawa Keisuke, Haapasilta Ville, Spijker Peter, Kawagoe Yuta, Foster Adam S., Tsukamoto Katsuo, Fukuma Takeshi	4. 巻 17
2. 論文標題 Dissolution Processes at Step Edges of Calcite in Water Investigated by High-Speed Frequency Modulation Atomic Force Microscopy and Simulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4083 ~ 4089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.7b00757	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 Miyazawa K, Watkins M, Shluger A L, Fukuma T	4. 巻 28
2. 論文標題 Influence of ions on two-dimensional and three-dimensional atomic force microscopy at fluorite-water interfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 245701 ~ 245701
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/aa7188	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. Tracey, K. Miyazawa, P. Spijker, K. Miyata, B. Reischl, F. F. Canova, A. L. Rohl, T. Fukuma, A. S. Foster	4. 巻 27
2. 論文標題 Understanding 2D atomic resolution imaging of the calcite surface in water by frequency modulation atomic force microscopy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nanotechnology	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) 10.1088/0957-4484/27/41/415709	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

〔学会発表〕 計57件 (うち招待講演 36件 / うち国際学会 29件)

1. 発表者名 Takeshi Fukuma
2. 発表標題 Three-dimensional AFM imaging of hydration and flexible surface structures at solid-liquid interfaces
3. 学会等名 APS March Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 高速・3次元液中FM-AFMによる原子スケール固液界面構造とその動態の計測
3. 学会等名 日本顕微鏡学会走査型プローブ顕微鏡分科会研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮田一輝、福間剛士
2. 発表標題 高速液中FM-AFMによるイオン結晶溶解過程の原子分解能その場観察
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Visualizing atomic-scale structures and dynamics at solid-liquid interfaces by high-speed frequency modulation AFM
3. 学会等名 International Symposium & School on Crystal Growth Fundamentals（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 顕微鏡で観る物性や生命現象の起源
3. 学会等名 金沢大学公開市民講座（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 オープンループ電位顕微鏡を用いたナノスケール腐食解析
3. 学会等名 2018年電気化学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 高速周波数変調原子間力顕微鏡を用いたカルサイト結晶溶解過程の原子スケールその場観察
3. 学会等名 2018年電気化学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 高速周波数変調原子間力顕微鏡を用いたカルサイト結晶溶解過程の原子スケールその場観察
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会（物性）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた固液界面の3次元水和構造計測
3. 学会等名 日本セラミックス協会第31回秋季シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Visualizing Subnanometer-Scale Structures and Dynamics at Solid-Liquid Interfaces by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 Molecular Foundry User Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Visualizing Calcite Growth and Dissolution Processes by High-Speed FM-AFM
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Biomineralization (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 FM-AFM in Liquids
3. 学会等名 MAINZ Summer School: Investigating Solid-Liquid Interfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Visualizing Nanoscale Distribution of Corrosion Cells by Open-Loop Electric Potential Microscopy
3. 学会等名 The 1st Ebara Open Innovation International Symposium on CMP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中原子間力顕微鏡を用いたナノサイエンス研究
3. 学会等名 金沢市医師会主催第17回卒後研修セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Recent Progress in Liquid-Environment Frequency Modulation AFM and Its Related Techniques
3. 学会等名 The 20th International Scanning Probe Microscopy Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中高分解能原子間力顕微鏡技術の開発と固液界面研究への応用
3. 学会等名 福井大学テニュアトラック制度シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中で原子・分子の動きを観る顕微鏡
3. 学会等名 日本海イノベーション会議（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Recent Progress in FM-AFM and 3D-AFM for Visualizing Structures and Dynamics at Solid-Liquid Interfaces
3. 学会等名 XX. Annual Linz Winter Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Recent Progress in Liquid-Environment FM-AFM and Its Related Techniques
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 AFM用力検出機構の高性能化と応用事例
3. 学会等名 第二回AFMソリューションセミナー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中原子間力顕微鏡を用いた固液界面現象のその場観察
3. 学会等名 日本顕微鏡学会「様々なイメージング技術研究部会」第5回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 オープンループ電位顕微鏡による電解液中で生じる電気化学反応分布のナノスケール観察
3. 学会等名 日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会第87回研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Atomistic Calcite Dissolution Model Investigated by High-Speed Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 Gordon Research Conference - Crystal Growth and Assembly（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 高分解能AFMを用いた3次元水和・揺動構造計測技術の進展
3. 学会等名 第3回「水シグナリングの分子動態から病態へ」研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中原子間力顕微鏡の新技术開発と固液界面計測への応用
3. 学会等名 第41回日本顕微鏡学会関東支部講演会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中原子間力顕微鏡による固液界面計測技術の進展
3. 学会等名 第6回生体界面研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 周波数変調AFMによる固液界面での水和と分子吸着構造解析
3. 学会等名 極限ナノ造形・構造物性研究会2017年第1回研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Development and Applications of Advanced Atomic Force Microscopy Techniques for Nanoscience Research
3. 学会等名 The First Tufts University - Kanazawa University Joint Symposium on Structure and Function of Molecules, Tissues, and Organisms（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 周波数変調原子間力顕微鏡を用いたサブナノスケール水和構造解析
3. 学会等名 日本表面科学会関東支部第5回関東支部セミナー「表面・界面の水が拓くものづくりの未来」（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中原子間力顕微鏡を用いた原子・分子スケール固液界面計測
3. 学会等名 第18回関西表面技術フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 液中AFMの新技术開発と産学連携研究への応用展開
3. 学会等名 日本顕微鏡学会走査型プローブ顕微鏡分科会研究会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Atomic-resolution imaging of calcite dissolution process at 1sec/frame by high speed frequency modulation atomic force microscope
3. 学会等名 4th Kanazawa Bio-AFM Workshop 2016（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 原子スケール液中AFM技術の現状と今後の展望
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Fukuma, K. Miyata, Y. Kawagoe, K. Miyazawa, P. Spijker, A. Foster
2. 発表標題 Calcite Dissolution Processes Visualized by High-Speed Frequency Modulation Atomic Force Microscopy with True Atomic Resolution
3. 学会等名 The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福間剛士
2. 発表標題 高速原子間力顕微鏡によるカルサイト溶解過程の原子分解能観察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Fukuma
2. 発表標題 Recent Advancement and Future Prospects in FM-AFM Instrumentation for Liquid-Environment Applications
3. 学会等名 Japan-Finland Research Exchange Meeting: Experiments and Theory of Liquid-Environment Scanning Probe Microscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Fukuma, H. Asakawa, K. Miyata, N. Inada, K. Miyazawa
2. 発表標題 Recent Developments in Liquid-Environment frequency modulation AFM
3. 学会等名 Symposium Solid-Liquid Interfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Miyazawa, N. Nakajima, M. Toyoda, R. Sagata, T. Shimizu, T. Fukuma
2 . 発表標題 Visualizing Inhomogeneous Molecular Adsorption Structures of Lubricant Molecules on a Magnetic Hard Disk by 3D-SFM
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 K. Miyazawa, H. Izumi, T. Watanabe-Nakayama, T. Fukuma
2 . 発表標題 Fabricating an electron beam deposited tip for atomic-scale AFM measurements in liquid with small cantilevers
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 K. Miyata, P. Spijker, K. Miyazawa, J. Tracey, Y. Kawagoe, A. S. Foster, K. Tsukamoto, T. Fukuma
2 . 発表標題 Atomistic Calcite Dissolution Model Revealed by High-Speed FM-AFM and Molecular Dynamics Simulation
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 K. Miyazawa, N. Nakajima, M. Toyoda, R. Sagata, T. Shimizu, T. Fukuma
2 . 発表標題 Visualizing Three-Dimensional Adsorption Structures of Lubricant Molecules on a Hard Disk by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy
3 . 学会等名 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 N. Inada, H. Asakawa, T. Fukuma
2 . 発表標題 Molecular-scale Investigation of Oligo (ethylene glycol)-terminated SAMs by Frequency Modulation AFM in Liquid
3 . 学会等名 AsiaNANO 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 T. Fukuma, K. Miyazawa, N. Nakajima, M. Toyoda, N. Inada, H. Asakawa, R. Sagata, T. Shimizu and T. Soda
2 . 発表標題 Visualizing inhomogeneous adsorption structures of lubricant molecules on a magnetic hard disk by three-dimensional scanning force microscopy
3 . 学会等名 19th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Miyata, P. Spijker, J. Tracey, V. Haapasilta, K. Miyazawa, A. S. Foster, T. Fukuma
2 . 発表標題 Atomistic calcite dissolution model revealed by high-speed FM-AFM experiments and simulation
3 . 学会等名 19th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Miyata, Y. Kawagoe, T. Fukuma
2 . 発表標題 Development of low-latency wideband PLL for high-speed FM-AFM
3 . 学会等名 19th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 N. Inada, H. Asakawa, N. Oku, T. Fukuma
2 . 発表標題 Molecular-scale investigation of sulfonate-terminated alkanethiol SAMs by FM-AFM in liquid
3 . 学会等名 19th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Miyazawa, M. Watkins, A. Shluger, K. Amano, T. Fukuma
2 . 発表標題 Influence of ions on 3D force images measured at fluorite-water interfaces
3 . 学会等名 19th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Miyata, J. Tracey, P. Spijker, K. Miyazawa, A. S. Foster, T. Fukuma
2 . 発表標題 Investigation of Transition Region on Dissolving Calcite Step Edges by High-speed FM-AFM and MD Simulation
3 . 学会等名 Japan-Finland Research Exchange Meeting:Experiments and Theory of Liquid-Environment Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 N. Inada, K. Takao, H. Asakawa, T. Fukuma
2 . 発表標題 3D-SFM Visualization of Fluctuating Nanoscale Chain Structures at the Solid/Liquid Interface
3 . 学会等名 Japan-Finland Research Exchange Meeting:Experiments and Theory of Liquid-Environment Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Miyazawa, J. Tracey, N. Kobayashi, B. Reischl, P. Spijker, F. F. Canova, A. S. Foster, T. Fukuma
2. 発表標題 Visualizing three-dimensional hydration structures at a calcite-water interface by 3D-SFM with atomic-scale AFM simulations
3. 学会等名 Japan-Finland Research Exchange Meeting:Experiments and Theory of Liquid-Environment Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 N. Nakajima, K. Miyazawa, M. Toyoda, R. Sagata, T. Shimizu, T. Soda, T. Fukuma
2. 発表標題 Three-dimensional adsorption structure of lubricant molecules on magnetic hard disk visualized by 3D-SFM
3. 学会等名 Japan-Finland Research Exchange Meeting:Experiments and Theory of Liquid-Environment Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中山響介、中嶋脩貴、豊田真理子、福間剛士
2. 発表標題 AFMによるサファイア/水界面における界面活性剤の分子スケール三次元吸着構造解析
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小松史弥、豊田真理子、宮田一輝、福間剛士
2. 発表標題 原子間力顕微鏡のための圧縮乾燥空気を用いた湿度制御機構の開発
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮澤佳甫、中嶋脩貴、豊田真理子、相方良介、清水豪、福間剛士
2. 発表標題 三次元走査型力顕微鏡を用いたハードディスク用潤滑層の分子スケール3次元吸着構造解析
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮澤佳甫、泉 久範、中山隆宏、福間剛士
2. 発表標題 液中原子分解能FM-AFM計測に適した小型カンチレバー用探針の作製
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮澤佳甫、中嶋脩貴、豊田真理子、相方良介、清水 豪、福間剛士
2. 発表標題 3D-SFMを用いたハードディスク用潤滑剤の3次元分子吸着構造解析
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 川越祐太、宮田一輝、S. Peter、T. John、H. Villedieu、宮澤佳甫、F. Adam、福間剛士
2. 発表標題 高速FM-AFM及びMDシミュレーションによるカルサイト溶解過程の原子モデルの解明
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Y.Zhou, T.Fukuma, Y.Takahashi	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 5560
3. 書名 Encyclopedia of Interfacial Chemistry	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 基板洗浄装置及び基板洗浄方法	発明者 高東智佳子、宇野 恵、尾形奨一郎、濱 田聡美、福間剛士	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-194095	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

http://fukuma.w3.kanazawa-u.ac.jp 福間研究室ホームページ http://fukuma.w3.kanazawa-u.ac.jp/frame.html 金沢大学ナノ生命科学研究所 https://nanolab.kanazawa-u.ac.jp/ 金沢大学 福間研究室 http://fukuma.w3.kanazawa-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
研究協力者	宮田 一輝 (Miyata Kazuki)	金沢大学・ナノ生命科学研究所・助教	
研究協力者	宮澤 佳甫 (Miyazawa Keisuke)	金沢大学・理工研究域フロンティア工学系・助教	