

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02598

研究課題名(和文)液中原子間力顕微鏡におけるエネルギー散逸機構の解明と物性・機能計測への展開

研究課題名(英文) Investigations on Energy Dissipation Mechanisms in Atomic Force Microscopy in Liquids

研究代表者

小林 圭 (Kobayashi, Kei)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40335211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：液中で動作する周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)を用いて、DNAオリガミに固定したタンパク質分子(streptavidin)を対象に3次元フォースマッピング計測を行い、タンパク質分子の分子変形量の推定および電荷密度分布の計測に成功した。一方、ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)がその水溶液中でグラファイト基板上に形成する半ミセルと、探針先端に同様に形成されたミセルとの融合・分離の過程を散逸エネルギー計測により明らかにした。さらに、高度好塩菌の紫膜のタンパク質(バクテリオロドプシン)のKCl水溶液中でのフォースマッピング実験により、局所的な水和構造の存在を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固液界面は、結晶成長や触媒反応などのさまざまな物理・化学反応の反応場として、また一方、生体分子が機能を発現する活性場として極めて重要な役割を担っている。本研究で明らかにされた固液界面、生体分子表面の原子・分子レベルの構造や水和構造、また散逸エネルギー解析によって明らかとなった粘性との相関に関する知見により、固液界面における物理・化学反応を利用したデバイスの高機能化や、生体分子機能の理解に繋がること期待される。

研究成果の概要(英文)：We performed three-dimensional force mapping experiments on streptavidin protein molecules attached to DNA origami sheet, and revealed the relationship between the exerted force and the deformation of the molecule during force mapping. We also estimated the surface charge density on the streptavidin. We clarified the disruption and formation processes of the micelles of the sodium dodecyl sulfate (SDS) formed on graphite by the dissipation measurements. We also visualized the hydration shell on the bacteriorhodopsin in purple membrane in KCl aqueous solutions.

研究分野：応用物理学

キーワード：原子間力顕微鏡 固液界面 エネルギー散逸

1. 研究開始当初の背景

固体と液体の界面（固液界面）は結晶成長、電極反応、触媒反応等さまざまな物理・化学現象の活性場、また生体分子の機能発現の場として重要な役割を担っている。液体中において固体表面は真空中とは違った表面構造を呈することがあり、また液体は固体表面に界面特有の疎密構造（溶媒和構造）を形成する。これらのいわゆる埋もれた界面構造を調べる手段としては X 線/中性子反射率測定や和周波発生/第二高調波発生等の分光学的手法があるが、これらの手段では面内で平均された情報しか得ることができなかった。

一方、液中で動作する周波数変調原子間力顕微鏡（FM-AFM）による 3 次元フォースマッピング法により、鉍物試料や生体分子の水和構造が可視化され、また電荷密度分布も計測できるようになってきた。3 次元フォースマッピングでは、通常、カンチレバーの周波数シフトすなわち保存力の 3 次元分布を計測するが、カンチレバーの散逸エネルギーすなわち散逸力はあまり注目されてこなかった。

2. 研究の目的

本研究課題は、液中 FM-AFM における散逸エネルギーに着目し、試料のステップ端や欠陥、または特定の官能基等の機械的安定性や粘弾性情報の取得や、生体分子の物性や生体分子間相互作用の計測へ応用することを目的とした。

3. 研究の方法

液中 FM-AFM を用いた 3 次元フォースマッピング法により、streptavidin や bacteriorhodopsin 等のタンパク質分子や固液界面に形成される界面活性剤の自己組織化構造上で 3 次元フォースマッピングを行い、カンチレバーの保存力および散逸力の 3 次元分布を記録し、構造と物性の相関を計測した。

4. 研究成果

DNA オリガミに固定したタンパク質分子（streptavidin: SA）を対象に 3 次元フォースマッピング計測を行い、タンパク質分子の分子変形量の推定および電荷密度分布の計測に成功した。DNA オリガミに用いるステーブル DNA を、固定化したいタンパク質と特異的に相互作用するリンカー分子で修飾したステーブル DNA に置換して DNA 折り紙を作製することにより、DNA オリガミの所望の位置にタンパク質を固定化することができる。今回、リンカー分子として biotin 分子を採用し、SA 分子が DNA オリガミの設計した位置へ固定化されることを確認した（図 1）。一方、DNA オリガミを基板に固定する際、基板として白雲母（muscovite mica）を用いることで、SA 分子の配向を制御、すなわち biotin 結合部位を持たない面を環境溶液側へ露出させられることを明らかにした。また、液中 FM-AFM によって取得した 3 次元フォースマップから、SA 分子の表面形状像における高さヒストグラムを解析し、3 次元フォースマッピングにおける探針が分子におよぼす応力と分子変形の大きさの相関を明らかにした（図 2）。一方、比較的遠方における保存力-距離依存性を DLVO 力の理論式にフィッティングすることで、表面電荷密度を見積もったところ、先行研究で計測された biotin 結合部位を持つ面と近い値（ -17 mC/m^2 ）となった（図 3）。なお、本研究で提案した DNA オリガミを用いた SA 分子の配向制御技術は、分子の固定方法や基板の選定により制御したものであり、ほかの生体分子についても応用が可能であり、今後さまざまな生体分子の物性計測への応用が期待される。

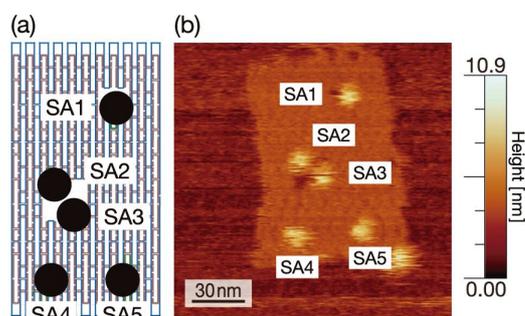


図 1: (a) DNA オリガミにおける SA 分子固定位置の模式図. (b) SA 分子を固定した DNA オリガミの液中 FM-AFM 像.

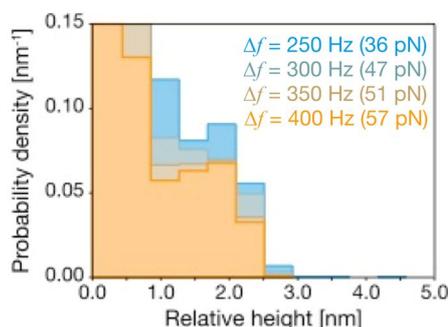


図 2: DNA オリガミに固定された SA 分子上で取得した表面形状像から得られた高さヒストグラムの応力依存性.

なお、液中 FM-AFM における走査中の各点において任意の波形を用いて探針を近接・離反させて周波数シフト、散逸エネルギー、平均たわみの情報を記録する時分割フォースマッピング法を開発した。この方法を用いて、脂質二重膜や生体分子の粘弾性を定量的にマッピングできるようになった。また、biotin 分子で修飾した探針を用いて、時分割フォースマッピング法により 3 次元フォースマップを取得することで、biotin-streptavidin の特異的相互の破断力マップを取得することに成功した。

次に、液中 FM-AFM を用いた 3 次元フォースマッピング法を用いて、高度好塩菌の紫膜に存在する光駆動プロトンポンプタンパク質 (bacteriorhodopsin: bR) における 3 次元水和構造計測を行った。紫膜の細胞質面を対象として、2 通りのカンチレバー振動振幅条件を採用し、2 つの異なる振幅条件間の測定結果を比較することで、振動的な探針-試料間距離依存性を示す界面水和構造に由来する水和力と、分子表面の立体構造の変形を伴う応力とを切り分けることができた。その結果、探針が E-F ループと相互作用する高さよりも遠方において、C-D ループ上において振動的な水和力が検出された。このことから、C-D ループ上に水分子が局在化した領域の存在が示唆された (図 4)。

一方、マイカ基板に吸着した紫膜の細胞質 (CP) 面および細胞外 (EC) 面において bR の分子分解能観察に成功し、見かけ上の紫膜の高さが異なるのは、CP 面とマイカ基板の界面に水の層が存在するためであることを明らかにした (図 5)。

また、陰イオン界面活性剤であるドデシル硫酸ナトリウム (SDS) や陽イオン界面活性剤であるセチルトリメチルアンモニウムブロミド (CTAB) が、これらの水溶液とグラファイト基板との界面に形成する自己組織化構造体 (半ミセル) の形成および破壊過程のナノメカニクスを FM-AFM フォースマップ測定により明らかにした。垂直方向のフォースカーブを精密に解析することにより、フォースカーブは指数関数的な電気二重層領域、弾性圧縮領域、ミセル破壊領域の 3 つの領域に分類されることを見出した。

また、CTAB はグラファイト基板との界面において、分子鎖を基板に平行にした二層膜領域と半円筒状ミセルの半ミセル領域の 2 種類の自己組織構造体を形成することを見出し、これらに対し 3 次元フォースマップ法による物性計測を行ったところ、半ミセル上でのみ大きな散逸エネルギーが観測された (図 6)。これは、探針側と基板側の半ミセルの融合・破壊の繰り返しによるエネルギー損失に起因する。

図 6: グラファイト基板上に形成されたセチルトリメチルアンモニウムブロミド (CTAB) の自己組織構造体: 二層膜領域 (M 領域) と半円筒ミセル領域 (H 領域) における 2 次元周波数シフト (保存力) マップ (左) および散逸エネルギー (散逸力) マップ (右)。

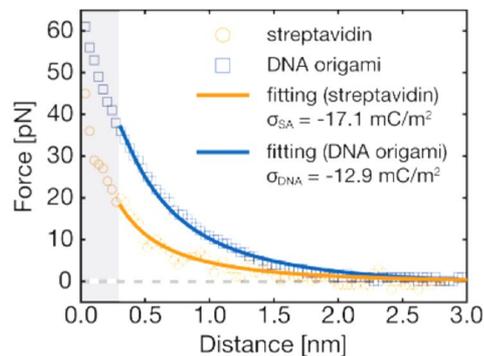


図 3: DNA オリガミと SA の電荷密度計測.

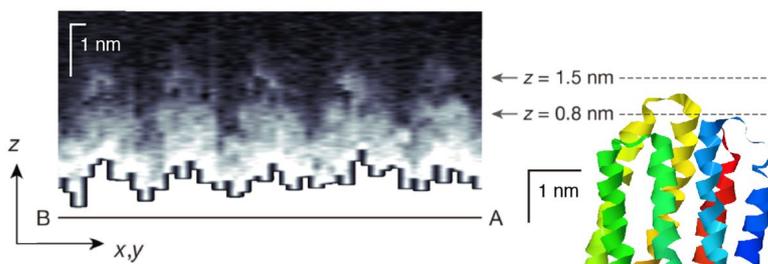


図 4: 紫膜のタンパク質 (bacteriorhodopsin) の KCl 水溶液中での 3 次元水和構造計測.

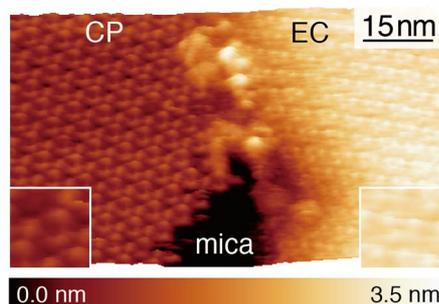


図 5: 紫膜の細胞質 (CP) 面および細胞外 (EC) 面における bR の分子分解能 FM-AFM 像.

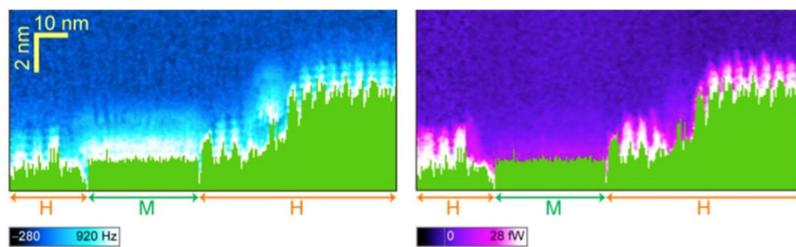


図 6: グラファイト基板上に形成されたセチルトリメチルアンモニウムブロミド (CTAB) の自己組織構造体: 二層膜領域 (M 領域) と半円筒ミセル領域 (H 領域) における 2 次元周波数シフト (保存力) マップ (左) および散逸エネルギー (散逸力) マップ (右)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ido Shinichiro, Kobayashi Kei, Oyabu Noriaki, Hirata Yoshiki, Matsushige Kazumi, Yamada Hirofumi	4. 巻 22
2. 論文標題 Structured Water Molecules on Membrane Proteins Resolved by Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2391 ~ 2397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.2c00029	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 Umeda Kenichi, Kobayashi Kei, Yamada Hirofumi	4. 巻 14
2. 論文標題 Nanomechanics of self-assembled surfactants revealed by frequency-modulation atomic force microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 4626 ~ 4634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2nr00369d	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 Minato Taketoshi, Umeda Kenichi, Kobayashi Kei, Araki Yuki, Konishi Hiroaki, Ogumi Zempachi, Abe Takeshi, Onishi Hiroshi, Yamada Hirofumi	4. 巻 60
2. 論文標題 Atomic-level nature of solid/liquid interface for energy conversion revealed by frequency modulation atomic force microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SE0806 ~ SE0806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abffa2	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 Yamamoto Yuki, Kominami Hiroaki, Kobayashi Kei, Yamada Hirofumi	4. 巻 120
2. 論文標題 Surface charge density measurement of a single protein molecule with a controlled orientation by AFM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 2490 ~ 2497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2021.04.016	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 Umeda Kenichi, Kobayashi Kei, Minato Taketoshi, Yamada Hirofumi	4. 巻 11
2. 論文標題 Molecular-Scale Solvation Structures of Ionic Liquids on a Heterogeneously Charged Surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 8094 ~ 8099
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c02356	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 Umeda Kenichi, Kobayashi Kei, Minato Taketoshi, Yamada Hirofumi	4. 巻 11
2. 論文標題 Atomic-Scale Three-Dimensional Local Solvation Structures of Ionic Liquids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1343 ~ 1348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b03874	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 Yuki, Kominami Hiroaki, Kobayashi Kei, Yamada Hirofumi	4. 巻 59
2. 論文標題 Experimental study on molecular fluctuations of biomolecules by force spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11103 ~ S11103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7b13	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49件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 合原 岳、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 フォースマッピングにおける特異結合の破断検出
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷 隼太郎、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 FM-AFMを用いたフォースマッピング法によるコラーゲンの粘弾性計測
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船戸 開、木村 邦子、平田 芳樹、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 走査型熱振動顕微鏡法: 表面下ナノ粒子可視化および表面近傍の実効ヤング率測定への応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 一世、木南 裕陽、小林 圭、平田 芳樹、山田 啓文
2. 発表標題 FM-AFMを用いたバクテリオロドプシンの細胞内面および外面における表面構造・物性計測
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 FM-AFMによるフォースマッピングにおける表面位置特定および物性解析
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷 隼太郎、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 自己組織化したコラーゲン分子の液中FM-AFM観察
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 一世、木南 裕陽、小林 圭、平田 芳樹、山田 啓文
2. 発表標題 FM-AFMを用いたバクテリオロドプシンの細胞内面および外面における表面構造・物性計測(2)
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合原 岳、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 脂質二重膜上streptavidinにおけるbiotinとの特異的相互作用の評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船戸 開、木村 邦子、平田 芳樹、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 走査型熱振動顕微鏡法によるparylene膜下に埋もれたナノ粒子の可視化
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 脂質2重膜-マイカ界面の水分子層の直接可視化
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 時分割フォースマッピング法の開発および生体機能計測への応用
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内 孝介、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 時分割フォースマッピング法を用いた生体分子間相互作用評価
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 悠樹、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMによるDNAオリガミの構造解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 一世、木南 裕陽、小林 圭、平田 芳樹、山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMを用いたバクテリオロドプシンの細胞内面および外面における表面構造・物性計測
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷 隼太郎、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMによるDNAナノワイヤの3次元固液界面構造計測
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 液中AFMを用いた時分割フォースマッピング法による生体分子のナノ弾性率測定
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊谷 隼太郎、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMによるDNAナノワイヤの高分解能観察
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀内 孝介、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 生化学修飾探針を用いたFM-AFMによる生体分子の高分解能観察
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 一世、木南 裕陽、小林 圭、平田 芳樹、山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMによるバクテリオロドプシンの表面構造・物性計測
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 悠樹、木南 裕陽、小林 圭、山田 啓文
2. 発表標題 DNAオリガミへ固定されたタンパク質分子のAFM測定におけるゆらぎの影響
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kominami, K. Kobayashi, and H. Yamada
2. 発表標題 Nanomechanical characterization of biomolecules with time-division force mapping method by using AFM in aqueous solution
3. 学会等名 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Horiuchi, H. Kominami, K. Kobayashi, and H. Yamada
2. 発表標題 High-resolution imaging of biomolecules by FM-AFM using a biochemically functionalized tip
3. 学会等名 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木南 裕陽, 小林 圭, 平田 芳樹, 山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMを用いた生体分子のナノスケール弾性率マッピング
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 2020年

1. 発表者名 前田 祥吾, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 streptavidin 2次元結晶へのbiotin分子特異結合と結晶無秩序化との相関に関する研究
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 2020年

1. 発表者名 堀内 孝介, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 PEG-biotin修飾探針がFM-AFM分解能に与える影響
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 2020年

1. 発表者名 深澤 直人, 木南 裕陽, 小林 圭, 平田 芳樹, 山田 啓文
2. 発表標題 周波数変調原子間力顕微鏡を用いたフォースマッピングによるバクテリオロドプシンの表面物性計測
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 2020年

1. 発表者名 熊谷 隼太郎, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 液中FM-AFMによるDNA G-wireイメージング
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 2020年

1. 発表者名 山本 悠樹, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 DNAオリガミを用いたタンパク質分子の固定とAFM表面形状測定への影響
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 2020年

1. 発表者名 K. Kobayashi
2. 発表標題 Nanometer-Scale Viscoelastic Measurements by Peak-Tracking Scanning Thermal Noise 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

1. 発表者名 M. Takeshita, K. Kobayashi and H. Yamada
2. 発表標題 Investigation of Carrier Dynamics in Organic Polymer Thin-Film Transistors by Time-Resolved Kelvin-Probe Force Microscopy
3. 学会等名 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM27) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kobayashi, K. Kimura and H. Yamada
2. 発表標題 Local Viscoelastic Measurements of Polymer Thin Films by Peak-Tracking Scanning Thermal Noise Microscopy
3. 学会等名 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM27) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Fukazawa, H. Kominami, K. Kobayashi and H. Yamada
2. 発表標題 Local Hydration Structure Measurements by Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy with Instantaneous Frequency Method
3. 学会等名 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM27) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 啓文, 小林 圭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡計測の最前線 -高分解能液中AFMおよび表面下構造イメージング
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第62回シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kominami, K. Kobayashi, Y. Hirata and H. Yamada
2. 発表標題 Structural and Functional Visualization of Biomolecules by Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tono, K. Kobayashi, Y. Hirata, K. Kimura, H. Yamada
2. 発表標題 Visualization of Nanoparticles in Polymer Matrix by Scanning Thermal Noise Microscopy
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamamoto, H. Kominami, K. Kobayashi and H. Yamada
2. 発表標題 Experimental Study on Molecular Fluctuations of Biomolecules by Force Spectroscopy
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による生体分子間相互作用力の可視化
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深澤 直人, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 瞬時周波数法FM-AFMを用いた固液界面水和構造計測(2)
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 2020年

1. 発表者名 山本 悠樹, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 フォースカーブ解析によるタンパク質分子のゆらぎ評価の検討(2)
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 2020年

1. 発表者名 平田 芳樹, 木南 裕陽, 小林 圭, 田中 睦生, 黒澤 茂, 山田 啓文
2. 発表標題 脂質膜表面を足場とする膜孔形成タンパク質分子のFM-AFMを用いたその場観察
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 2020年

1. 発表者名 前田 祥吾, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 treptavidin 2次元結晶へのbiotin修飾分子結合と結晶無秩序化との相関に関する研究(2)
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 2020年

1. 発表者名 堀内 孝介, 木南 裕陽, 小林 圭, 山田 啓文
2. 発表標題 FM-AFMを用いたstreptavidin-biotin間特異的結合破断評価
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 2020年

1. 発表者名 木南 裕陽, 小林 圭, 平田 芳樹, 山田 啓文
2. 発表標題 FM-AFMによる生体分子の分子スケール力学計測
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 2020年

1. 発表者名 H. Kominami, Y. Hirata, K. Kobayashi, H. Yamada
2. 発表標題 Molecular-scale mechanical property mapping of biomolecules using FM-AFM in liquids
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (NC-AFM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamamoto, H. Kominami, K. Kobayashi and H. Yamada
2. 発表標題 Immobilization of biomolecules using DNA origami for force spectroscopy using FM-AFM
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (NC-AFM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kobayashi
2 . 発表標題 Peak-Tracking Atomic Force Microscopy
3 . 学会等名 The 22nd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (NC-AFM2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Tono, K. Kobayashi and H. Yamada
2 . 発表標題 Fast scanning thermal noise microscopy for visualization of buried nanostructures in a polymer matrix
3 . 学会等名 Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Takeshita, K. Kobayashi and H. Yamada
2 . 発表標題 Investigation of local electric properties of organic polymer thin-film transistors by Kelvin-probe force microscopy
3 . 学会等名 Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Maeda, H. Kominami, K. Kobayashi and H. Yamada
2 . 発表標題 Investigation of relationship between specific binding of biotinylated proteins to streptavidin and disruption of streptavidin 2D crystals
3 . 学会等名 Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 辻 幸一、藤原 学、宗林 由樹、南 秀明	4. 発行年 2021年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 208
3. 書名 機器分析ハンドブック 3 固体・表面分析編	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 計測装置、原子間力顕微鏡、および計測方法	発明者 小林 圭, 木村 邦子, 山田 啓文	権利者 国立大学法人京 都大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-139696	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>京都大学大学院工学研究科電子工学専攻電子材料物性工学研究室 https://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/</p>

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
---------	---------