

令和元年6月5日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02076

研究課題名(和文) 固体表面と極薄水膜界面の原子レベル解析と反応過程の制御

研究課題名(英文) Atomic level analysis of the interfaces between solid surfaces and ultrathin water films for control of the interface reactions

研究代表者

新井 豊子 (Arai, Toyoko)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：20250235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：大気中の水蒸気から固体表面上に吸着した数ナノメートル厚の水膜(ナノ水膜)は、強い水和水分子のネットワークを形成し、界面水和層には固体の欠陥を反映した欠陥が存在することを発見した。ナノ水膜は、厚水膜とは異なり、固体的な性質と、液体的性質を併せ持つ「準液体性」であることを初めて明らかにした。また、本研究で開発した周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)を用いて、ナノ水膜/固体界面構造を原子・分子分解能で観察に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の生活圏は水で囲まれ、乾燥して見える固体表面でも、多くの場合、数ナノメートル厚の水膜が吸着している。このわずかに吸着した水を介して表面化学反応が進んだり、失活したりすることがある。しかし、このような水膜の挙動を直接調べる手法はなく、その理解は進んでいなかった。本研究によりナノ水膜固体界面の性質を、原子・分子レベルで解析する手法が開拓され、ナノ水膜特有の性質を明らかにした。本成果を下に、実環境で起こっているナノ水膜の存在による広範な事象に問題解決の糸口を与え、さらに、新たな原子レベル反応制御への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The water vapor in the air can cover solid surfaces in a thickness of a few nm, which is named "nanometer-thick water film". We found that a firm network of water molecules was formed in the hydration layers of the nanometer-thick water film on the solid surface. In addition, defective structures of the network persisted from the first hydration layer to the second hydration layer over the solid surface. The nanometer-thick water film was revealed to be "quasi-liquid" over the solid surface, which means the intermediate state between solid and liquid. Using the frequency modulation atomic force microscope (FM-AFM) developed in this research, we successfully obtained images of the network over the surface with atomic and molecular resolutions.

研究分野：表面科学

キーワード：ナノ水膜 水固体界面 周波数変調原子間力顕微鏡

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

大気中に在る固体表面には、多くの場合水分子が吸着している。吸着した水分子層の厚さは、その表面の特性および温度・湿度に依存し、一分子層から、ナノメータスケール程度で、肉眼では、乾燥して見える。研究開始当初、このような水膜の存在は、知られており、大気中の固体の腐食や錆などもこの吸着水膜の影響であると考えられている。また一方で、表面の水膜を利用した大気中走査プローブリソグラフィ（SPL: 原子間力顕微鏡（AFM）や走査型トンネル顕微鏡（STM）の探針と試料の間に電圧印加して陽極酸化などを誘起しながら細線を描画）技術なども知られていた。しかし、親水性表面への大気からの吸着水膜は、一層程度であれば、固体最表面層と水分子は水素結合で結合し、固体的な性質を持ち、三層以上吸着すれば、液体中の固液界面状態に近づくと考えられていた。我々は、本研究開始二年前に、温度と湿度を制御して KBr(001) 表面に薄い水膜（厚み約 10 nm）を形成し、大気動作周波数変調（FM）AFM によって KBr(001) 表面の溶解・析出過程の原子分解能観察に成功し、探針と試料間の相互作用力を 3 次元的に高分解能で測定して、水膜と結晶との界面の水和構造も明らかにした。この成果は、ナノメータ厚の水膜は、厚い（例えば、ミクロンレベル）水膜下の固液界面部分よりも、溶解・析出速度が遅く、界面の水和構造がより硬いことを示している。人間の生活環境やデバイス製作過程、触媒反応にとって固体表面を覆う水膜は物質をやり取りする重要な出入り口である。しかし、水膜内の現象は解析手段も少なく、その理解は進んでいない。そこで、固体表面に形成されたナノメータレベルの水膜（ナノ水膜）そのものの特性を解明し、ナノ水膜内での反応過程を制御することを着想した。

2. 研究の目的

ナノメータスケールの厚さの水膜と固体界面を原子レベルの空間分解能で、解析するために、大気型 FM-AFM が用いられる。ナノメータスケールの厚さの水膜（ナノ水膜）に探針先端を浸し、ナノ水膜/固体界面構造を解析するためには、探針の振動振幅（peak-to-peak 振幅：2A）を水膜厚さよりも十分に小さく、理想的には水分子直径（0.2 nm 程度）以下にする必要がある。研究開始当時所有していた Si 探針、Si カンチレバーを用いる光てこ方式の FM-AFM は、振幅を 0.5 nm 程度でも低ノイズで、ナノ水膜中の固液界面観察が可能である。よって、本研究開始直後から、既存 FM-AFM を用いて、ナノ水膜研究を開始するが、Si カンチレバーでは、気液界面での jump-to-contact が起こったり、第一水和層を剥がすだけの力を加えられなかったり、ナノ水膜研究ツールとしては不十分である。そこで、本研究では、既存 FM-AFM によるナノ水膜研究と平行して、大気圧下で湿度・温度を制御した環境で動作し、微小振幅で、小さな力から、大きな力まで解析可能な複合顕微鏡（FM-AFM/ STM）を開発することも研究の目的とした。厚さ 1 - 10 nm のナノ水膜で覆われた固体表面を制御して調製し、固体表面および水膜-固体界面の構造を原子分解能で観察・解析し、原子レベルの反応制御法を確立する。本研究の推進により、水膜内の表面・界面の原子分解能顕微鏡法を進展させ、ナノ水膜の特性を解明し、それを活かす「固体表面上のナノ水膜内の科学技術」を開拓する。

3. 研究の方法

(1) 大気中駆動 FM-AFM によるナノ水膜/固体界面解析

FM-AFM とは、探針が取り付けられたカンチレバーをその共振周波数(f)で、振幅が一定になる様に加振し、探針試料間に働く相互作用力によるカンチレバーの共振周波数の変化量(Δf)を検出する走査型プローブ顕微鏡(SPM)である。まず、所有していた大気型 FM-AFM（島津製作所、SPM-8000FM プロトタイプ機）を用いて、ナノ水膜の研究を開始した。ナノ水膜を環境中の水蒸気から吸着により形成するため、FM-AFM を恒温槽（三菱電機エンジニアリング社、CN-40A）内に設置し、純水を貯めた容器を恒温槽内に置き、環境湿度を 70-85%に保った。本 FM-AFM は、シリコンカンチレバーの変位を光てこ方式で検出するため、試料近くには、レーザーや、ミラー、プリズムなどの光学系があり、85%以上にすると光学系に結露するなど測定が困難になる。そこで、ナノ水膜を形成するのに 100%近い湿度環境が必要な試料の場合、試料直下に水を蓄えられる試料ホルダーを作製した。これにより、恒温槽全体は湿度 85%程度で、試料近傍のみ 100%近い湿度を実現した。また、走査用チューブピエゾの電極部分に防湿処理をし、高湿度環境でも装置が破損することを防いだ。庫内は常に 25 °Cに保った。

(2) 音叉型水晶振動子を力センサーに用いる大気型 FM-AFM/STM の開発

ナノ水膜下の固液界面解析のためには、FM-AFM の探針の peak-to-peak 振幅(2A)を、水分子直径 (0.2 nm 程度) 以下にすることで、力検出信号の S/N 比を最大にできることを明らかにしている。この様な微小振幅で安定に制御するためには、カンチレバーのバネ定数(k)と振幅(A)の積が最大探針試料間力よりも大きくしなくてはならないため、市販されている Si カンチレバーよりも (k=40N/m) よりも、

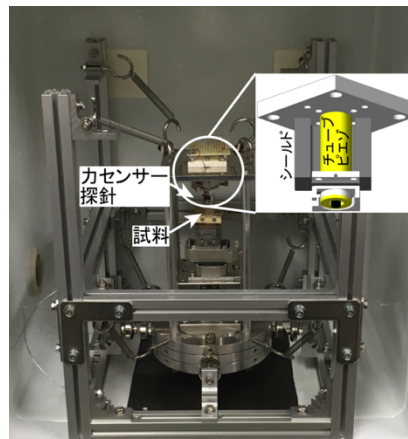


図 1. 開発した FM-AFM/STM 本体写真。恒温槽内に設置。

バネ定数の大きな力センサーが求められる。そこで、音叉型水晶振動子の片方のプロングを基板に固定し、もう一方のプロングに探針を形成する qPlus センサーを用いる新たな FM-AFM を設計製作した。図 1 に装置写真を載せる。高湿度環境で FM-AFM を動作させるために、電極が露出しているパーツ（水晶振動子力センサー、振動振幅検出用プリアンプ、駆動用ピエゾ素子）に、フッ素系コーティング材（フロロサーフ、フロロテック）を塗布し耐湿処理を行った。特に、水晶振動子へのコーティング剤のコートは、検出感度に大きく影響する振動子の機械的 Q 値を悪化させやすい。しかし、粘度の低いコーティング剤を、塗布することで、Q 値の低下を招くことはなかった。耐湿処理を施さずに環境湿度を 60%以上にすると周波数シフト信号のノイズフロアが大きくなるが、耐湿処理を施した後は、湿度 90%でもノイズフロアは悪化せず、高分解能計測が可能になった。本装置も既存装置と同様に恒温槽内に設置し、湿度は、槽内に加湿用の水を満たしたビーカーと除湿用のシリカゲルの量を調整して制御した。

(3) 計算科学による固液界面解析

先ず、カンチレバーに接続されたナノカーボン探針 - ナノカーボン試料表面系の原子間力顕微鏡 (AFM) の古典分子力学シミュレータを構築し、AFM 探針に働く相互作用力の長距離成分（ファンデルワールス力）の効果を、超高真空中、大気中、水中で Lifshitz の理論に基づき評価した。次に、原子間力顕微鏡探針と金属表面間に閉じ込められた水分子の振る舞いをモデル化するため、二枚の白金電極間に水分子を閉じ込めて、電極間距離を圧縮して圧力を評価する分子動力学シミュレーションを行った。一方、表面でのエネルギー散逸を評価するため、一次元のエネルギー輸送を解析的に評価し、数値シミュレーションと比較した。

4. 研究成果

(1) マイカ基板上的ナノ水膜

既存 FM-AFM を用いて、マイカ（モスコバイト： $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ）基板上的ナノ水膜の特性を評価した。Si 探針は使用前にオゾンクリーナーで酸化清浄化し、表面は、親水性のシリコン酸化膜にした。マイカ(001)基板をスコッチテープを用いて研究室環境で劈開した(図 2 (a))。 (001) 劈開面は、 SiO_2 四面体が歪んだハニカム構造を形成している。この SiO_2 四面体の Si の 1/4 は、Al で置換されている。場所はランダムだが、Al が隣接する位置には入らないと言われている (Al-avoidance rule (Loewenstein's rule))。ハニカム構造のキャビティには、層間に存在している K^+ イオンが 1/2 の確率で、ランダムに残っている (図 2 (b))。図 2 (c)には、上面を劈開面として、[010]方向からの側面図を示す。劈開後直ちに試料直下に水桶を持つ試料ホルダーに付け、恒温槽内の FM-AFM にセットする。恒温槽内には超純水を満たしたビーカーを入れ、約 1~2 時間後に、恒温槽内の湿度は 80%程度に落ち着く。湿度が飽和した後、探針を水膜外から、試料表面に向かって動かし、 Δf -z 曲線を取得した。メニスカス力が働く位置から、急激に斥力が強くなる位置までの距離から、探針とマイカ基板間の水膜厚さは約 2.7 nm であった。これは、探針が試料から離れた位置で、マイカ上の水膜厚さと、探針上の水膜厚さの合計である。

探針先端をナノ水膜内に浸し、徐々に試料に近づけながら擬似高さ一定モードで、界面の水和構造を観察した。図 3 は、試料から離れた方から順に取得した (a) 第 3 水和層、(b) 第 2 水和層、(c) 第 1 水和層、(d) 吸着層の FM-AFM (Δf) 像である。FM-AFM 像に、マイカ(001)面のハニカム構造を重ねて示し、図 (d) 中には、特に強い輝点の位置を緑丸で示した。また、図中の線 AB の断面プロファイルを下に示した。従来、水中のマイカ基板との界面の水和層は、マイカ基板表面のハニカム構造と同様のハニカム構造をとる第 1 水和層、キャビティ上にドット構造をとる第 2 水和層が観察されていた。ナノ水膜/マイカ界面の第 1、第 2 水和層も同様の構造であった。水中では第 3 水和層は、僅かに水分子密度が増加する領域はあるが、AFM 像としては観察されていなかったが、ナノ水膜界面では、第 1 水和層と同様、ハニカム構造を示した。ナノ水膜中の水和ネットワークは水中よりも強く水素結合していることを示している。第 1 水和層よりもよりマイカ表面に近づいた吸着層では、ほぼ 1/2 のキャビティ位置で、高いドット、それ以外のキャビティ位置で低いドット構造が観察された。高いドットは残存した K^+ イオンを示し、低いドットはキャビティに吸着した H_3O^+ イオンであると推定できる。マイカ劈開面に残存した K^+ イオンは、大量の水中では水中に溶解する。本研究で、ナノ水膜中には、 K^+ イオンはほとんど溶解せずに、キャビティ位置に残存していることを直接観察できた。また、図 (d) には、マイカ基板のハニカム構造位置に、特に Δf が小

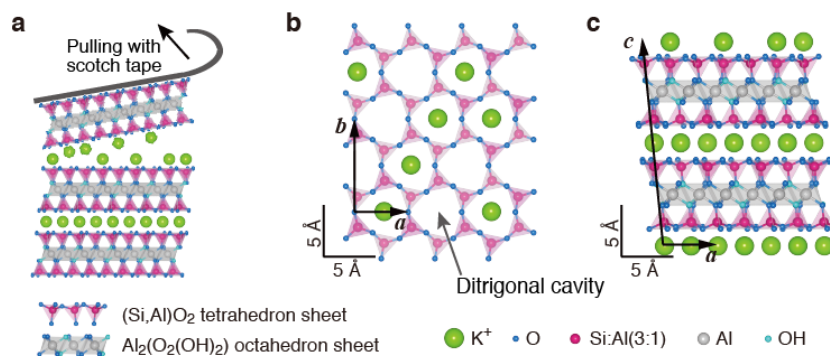


図 2. (a)マイカ基板劈開の概念図. (b)劈開後のマイカ(001)面構造模式図. (c)劈開マイカ基板の[010]方向からの側面図.

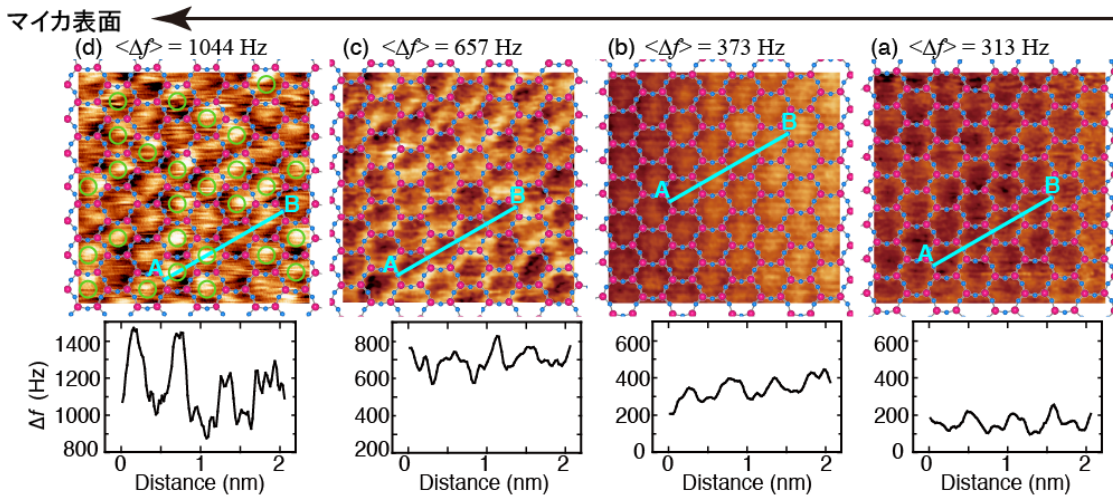


図3. ナノ水膜/マイカ(001)界面水和層のFM-AFM像と断面プロファイル。(a)第3水和層。マイカ表面と同様のハニカム構造。(b)第2水和層。キャビティ位置にドット構造。(c)第1水和層。マイカ表面のハニカム構造を反映した構造。(d)吸着層。1/2の確率で K^+ ionがキャビティに残存している。

さい暗点が存在する。この暗点は、最上層の SiO_2 四面体シートのSiがAlで置換された位置を示していると考えられている。しかし、隣接した位置に暗点がつながって見える位置もあり、それはAl-avoidance ruleでは否定される。よって、この結果だけで、 SiO_2 四面体シートへのAlの置換位置を確定したと断言できないが、従来、個々のSiとAlを同定する方法は無く、本研究により直接観察の可能性は示された。

図3と同様の水和層をFM-AFM観察して、第1水和層から第2水和層にかけて、水和層に欠陥があることを発見した(図4)。基板に何らかの欠陥が存在し、その欠陥構造を反映して、水和層に欠陥が観察されたと考えられる。(厚膜)水/固体界面の水和層内に欠陥が確認されたことはない。成長方向に連なった欠陥が存在することは、それ以外の部分が水素結合により安定な3次元秩序構造を取っていることを意味し、欠陥とは、まさしく固体の性質である。しかし、固体膜であれば、AFM像取得時に、表面を破壊すれば、その痕跡が残るが、この水膜内部の固体の層は、下層を画像化した後も、探針を上層位置の高さで画像化すれば、壊れた痕跡はなく、再度、水素結合する柔軟さを持っている。上述したように、ナノ水膜は、マイカ劈開時に存在する K^+ イオンを溶解せず、表面に保存する(図3(d))。マイカ基板を水中に浸すと表面の K^+ イオンは水中に溶解し、マイカ表面には残らないことが知られている。ナノ水膜内では、水分子・溶質の移動度が、水バルクに比べて非常に遅い。すなわち、ナノ水膜/固体界面は、厚水膜/固体界面とは異なり、水素結合による固体的な安定性で秩序構造を持ち、かつ、液体的流動性を併せ持つ「準液体性」を示すことを明らかにした。

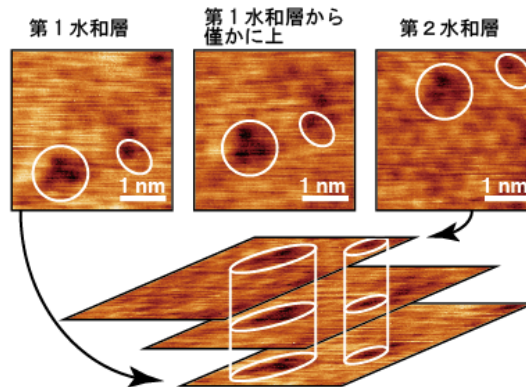


図4. ナノ水膜/マイカ(001)界面水和層のFM-AFM像。第1水和層から、第2水和層にかけて白丸で囲んだ領域に欠陥が続いている。

図3と同様の水和層をFM-AFM観察して、第1水和層から第2水和層にかけて、水和層に欠陥があることを発見した(図4)。基板に何らかの欠陥が存在し、その欠陥構造を反映して、水和層に欠陥が観察されたと考えられる。(厚膜)水/固体界面の水和層内に欠陥が確認されたことはない。成長方向に連なった欠陥が存在することは、それ以外の部分が水素結合により安定な3次元秩序構造を取っていることを意味し、欠陥とは、まさしく固体の性質である。しかし、固体膜であれば、AFM像取得時に、表面を破壊すれば、その痕跡が残るが、この水膜内部の固体の層は、下層を画像化した後も、探針を上層位置の高さで画像化すれば、壊れた痕跡はなく、再度、水素結合する柔軟さを持っている。上述したように、ナノ水膜は、マイカ劈開時に存在する K^+ イオンを溶解せず、表面に保存する(図3(d))。マイカ基板を水中に浸すと表面の K^+ イオンは水中に溶解し、マイカ表面には残らないことが知られている。ナノ水膜内では、水分子・溶質の移動度が、水バルクに比べて非常に遅い。すなわち、ナノ水膜/固体界面は、厚水膜/固体界面とは異なり、水素結合による固体的な安定性で秩序構造を持ち、かつ、液体的流動性を併せ持つ「準液体性」を示すことを明らかにした。

(2) KBr(001)上に形成されたナノ水膜

新たに開発したFM-AFMを用いて、ナノ水膜/KBr(001)界面を解析した。音叉型水晶振動子に砕いたサファイア片を探針として接着したqPlusセンサーを用いた。KBrは潮解性のあるイオン結晶であり、潮解湿度は、室温で85%である。湿度30%程度で、1分子層の吸着水膜で被われ、湿度の上昇に伴って、吸着水膜は厚くなる。本研究では、温度25°C、湿度は50-60%に制御した。この温・湿度条件では、探針試料間に2-3 nmのナノ水膜が形成された。

ナノ水膜/KBr界面で Δf -z曲線を取得したところ、水和力による振動曲線が得られた(図5(a))。振動ピークよりもわずかに高い位置で、FM-AFM像を取得した(図5(b-d))。2D FFTフィルター処理によりランダムノイズを除去し、像の周期構造を鮮明にして各図の左下に重ねた。観察像内の輝点間距離は約470 pmであり、KBr(001)面の同種イオンの最近接距離(KBrの格子間隔660 pmに対して、 $660/\sqrt{2}$)に相当する。すなわち各FM-AFM像は、KBr(001)面の K^+ イオン上、または、Brイオン上に形成された水和層を描き出している。これらの層間は約300 pmで水分子長径程度

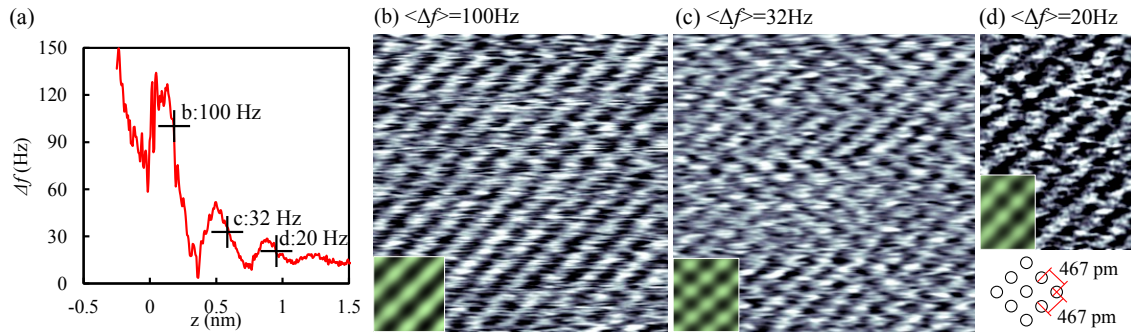


図5. (a) ナノ水膜/KBr(001)界面水和層付近の Δf - z 曲線と(b-d) FM-AFM 像. (a)中の+マーク b, c, d で示した z 距離と Δf セットポイント値でそれぞれ FM-AFM 像を取得した. 観察像の左下に 2D FFT フィルター処理をした像を重ねた.

である。飽和水溶液中の KBr-水界面水和構造の MD シミュレーションによると、KBr(001)面の K^+ イオン直上に直接水和する水分子と、 Br^- イオン直上に直接水和する水分子では、配列する高さの違いは約 100pm である。図 5(a)の Δf - z 曲線からは K^+ イオン直上の第 1 水和層と、 Br^- イオン直上の第 2 水和層を分離できていないが、図 5(b)と同様の条件で、FM-AFM 像の取得を開始し、1 枚の像取得途中で、走査高さ (Δf セットポイント) を約 100 pm、KBr 表面に近づけて FM-AFM 像を取得したところ、明暗の周期が反転した像が得られた。すなわち、図 5(b)は、 Br^- イオン直上の第 2 水和層であり、それよりも約 100 pm、KBr 表面に近づいた高さの K^+ イオン直上の第 1 水和層も分子分解能で、画像化に成功した。飽和溶液中で、KBr(001)

界面の第 1、2 水和層の観察例はあるが、その上層の第 3、4 水和層まで観察できた報告は無い。厚い水中環境での固液界面と比べて、ナノ水膜中では固体から遠く離れた水和水分子 (4 層の水和層: K^+ 上 2 層、 Br^- 上 2 層) まで、強い水和ネットワークが形成されていることを示唆している。

図 5(a)で示したよりも大きな Δf まで approach を続け、KBr 表面から約 1 nm 押し込んだ後 retract したところ、行き帰りともにほぼ同じ周期の振動的 Δf - z 曲線が得られた。この結果は、図 5(a)の振動的 Δf - z 曲線で、approach 方向では探針先端が水和層を圧縮剥離しながら KBr に接近し、retract 方向では探針試料間に水分子が入る空間が出来ると直ちに元の水和構造配置に戻って得られたのと同様に、探針が固体中の KBr(001)面の K^+ イオンと Br^- イオンを剥離しながら approach し、retract では、 K^+ ion と Br^- ion が元の位置に結合したと考えられる。図 6(a)は、KBr 結晶中に押し込んで得られた最も浅い振動ピーク付近で FM-AFM 走査を開始し領域 A (y 幅約 3.5 nm) で像を取得後、KBr(001)面間隔に相当する 300 pm 探針を押し込み領域 B (y 幅約 4 nm) 像を取得後、300 pm 戻して領域 C (y 幅約 2 nm) を取得した XY 像である。領域 A では $\langle \Delta f \rangle$ セットポイント +170Hz の準高さ一定モードで像取得したが、領域 B、C では、(完全) 高さ一定モードで像を取得した。領域 A と、領域 C は、 z スキャナーの設定位置は同じ高さに戻したが、ドリフトによってわずかに距離が変化したため、 $\langle \Delta f \rangle$ は、 $\sim +170\text{ Hz}$ と $\sim +140\text{ Hz}$ であり、領域 C の方が、領域 A よりも少し浅い位置を走査している。図 6(a)の右側は 2D-FFT フィルターを適用して周期構造を鮮明化した像である。像の明暗コントラストは、より斥力が強い輝点はその点に探針先端と同極性のイオンがあることを、また、探針直下に逆極性のイオンがある場合、静電引力によりトータル斥力が減少して暗点になる。図 6(b)には図 6(a)の破線部での z - y および Δf - y プロファイルを示した。図 6(a)のフィルターされた像中の赤線は KBr の [110] 軸方向を示している。赤線上での明暗コントラストの比較すると、領域 A, B, C それぞれの境界でコントラスト反転が生じている。塩化ナトリウム構造の(001)面は、カチオン/アニオンの直下には逆極性のアニオン/カチオンが配列する。そのため、図 6(a)で得られた KBr(001)面間隔に相当する高さ変化(300pm)で生じた FM-AFM 像のコントラスト反転は、イメージング対象が隣(一層上下)の KBr(001)面に変化したことを示している。領域 A, C は領域 B よりも一層高い位置の KBr(001)面である。この図 6(a)像取得直後に領域 C の高さで、準高さ一定モードで同じ領域を観察したが、領域 B 部分に凹み/削れた痕跡は観察されなかった。すなわち、XY ラスター走査において、探針圧力により探針直下のイオンをナノ水膜中に溶かし、探針が移動すると、溶出したイオンが元の場所に析出

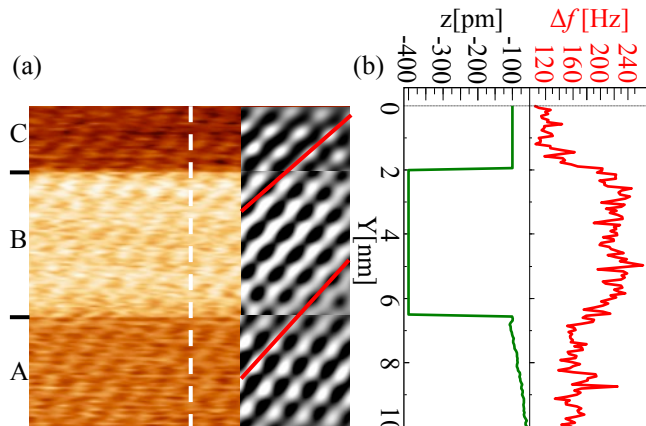


図6. (a) z 距離を変化させて取得した KBr(001)の FM-AFM 像. 右に 2D FFT フィルター処理をした像を重ねた. (b) (a)内の破線部分の z および Δf プロファイル.

したと考えられる。ナノ水膜中で KBr 結晶は、探針誘起により溶解・再生が起こることを明らかにした。

(3) 計算科学による固液界面解析

AFM の分子力学シミュレータを用いて、グラフェン表面に吸着したグラフェンシートの剥離シミュレーションを行い、剥離に現れる摩擦の異方性を見出した。次に、剥離シミュレーションで用いた分子力学ポテンシャルを粗視化して、高速計算に適したアルゴリズムを開発し、計算時間を $10^3 \sim 10^4$ に短縮することに成功した。QCM-AFM による試料表面でのエネルギー散逸を評価するため、一次元のエネルギー輸送を解析的に評価した。分子動力学法を用いて、二枚の白金電極間に封入した水分子の圧縮シミュレーションを行ったところ、電極表面にかかる圧力 (GPa オーダー) が引力から斥力に変化した。圧力 — 押し込み距離曲線には、封入水分子の層構造の変化を反映する微細構造が現れた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① H. Ooe, D. Kirpal, D. S. Wastl, A. J. Weymouth, T. Arai, and F. J. Giessibl, “Amplitude dependence of image quality in atomically-resolved bimodal atomic force microscopy”, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 141603-1-4 (2016). DOI: 10.1063/1.4964125.
- ② Toyoko Arai, Kohei Sato, Asuka Iida & Masahiko Tomitori, “Quasi-stabilized hydration layers on muscovite mica under a thin water film grown from humid air”, *Scientific Reports*, **7**, 4054-1-11 (2017). DOI:10.1038/s41598-017-04376-3
- ③ Toyoko Arai, Ryo Inamura, Daiki Kura, and Masahiko Tomitori, “Energy dissipation unveils atomic displacement in the noncontact atomic force microscopy imaging of Si(111)-(7 × 7)”, *Phys. Rev. B*, **97**, 115428 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.97.115428
- ④ R. Okamoto, K. Yamasaki and N. Sasaki, “New potential model for atomic-scale peeling of armchair graphene : toward understanding of micrometer-scale peeling”, *Materials Chemistry Frontiers*, **2**, 2098-2103 (2018). DOI: 10.1039/C8QM00267C.

[学会発表] (計 62 件)

- ① Toyoko Arai, Hiroaki Ooe, “Atom-resolved FM-AFM study of KBr(100) surfaces covered with a thin water film under humidified air conditions using a moisture-proofed qPlus sensor”, 21st International Conference on non contact Atomic Force Microscopy, 2018.
- ② H. Ooe and T. Arai, “Atomic Scale Analysis Using Frequency Modulation Atomic Force Microscopy for Cleaved KBr₂ Water Interfaces Formed in Air with Different Humidities”, ACSIN-14 & ICSPM26, 2018.
- ③ Toyoko Arai, Kohei Sato, Asuka Iida, and Masahiko Tomitori, “FM-AFM analysis of the interface with quasi-stabilized hydration layers between a thin water film and a muscovite mica surface”, 20th International Conference on non contact Atomic Force Microscopy, 2017.

[その他]

ホームページ : <http://nanophys.w3.kanazawa-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 佐々木 成朗

ローマ字氏名 : Naruo Sasaki

所属研究機関名 : 電気通信大学

部局名 : 情報理工学 (系) 研究科

職名 : 教授

研究者番号 (8 桁) : 40360862

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 大江 弘晃

ローマ字氏名 : Hiroaki Ooe

※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。