

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02787

研究課題名(和文)真空電気化学AFMによるリチウムイオン蓄電池電極界面の原子レベルオペランド計測

研究課題名(英文)Atomic-scale characterization on lithium-ion battery electrodes by using vacuum electrochemical AFM

研究代表者

一井 崇 (Ichii, Takashi)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30447908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、われわれが独自に開発を進めてきた真空電気化学原子間力顕微鏡技術を用い、リチウムイオン蓄電池(LIB)における電極/電解液界面の原子・分子レベル構造分析に取り組んだ。特にイオン液体電解液中において、LIB負極の一つであるチタン酸リチウムへのリチウムイオン挿入による表面構造変化を原子レベルで撮像することに成功した。また、イオン液体電解液だけでなく、近年注目を集めている超濃厚水溶液についても、原子・分子レベルで界面構造の分析に成功した。さらに、構造分析だけではなく、表面・界面物性分析のための新手法の開発にも成功し、本手法のさらなる応用への道が開かれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リチウムイオン蓄電池(LIB)をはじめとする蓄電池技術の発展は、資源小国の我が国において極めて重要である。LIBでは、電極/電解液界面におけるリチウムイオンの脱挿入により充放電が行われる。本研究で用いた真空電気化学原子間力顕微鏡(Vac-EC-AFM)は、充放電前後における電極構造を原子レベルで可視化できる。このような原子・分子レベルでの界面解析は、LIB開発に重要な知見を与えると期待している。

研究成果の概要(英文)：Vacuum electrochemical atomic force microscopy (Vac-EC-AFM) is a powerful technique to investigate electrode/electrolyte interfacial structures on atomic or molecular scales. In this study, we applied this technique for spinel-type lithium titanium oxide, which is known as a promising material for negative electrode in lithium ion batteries (LIBs), and we successfully imaged LTO electrode surfaces on the atomic resolution before and after Li⁺ ion insertion in an ionic-liquid electrolyte. We also applied our AFM to investigate interfacial structure of superconcentrated aqueous electrolytes. In addition, we newly developed a friction-force measurement technique in liquid, which would be useful for investigate material properties on the nanometer/atomic scale.

研究分野：表面科学

キーワード：原子間力顕微鏡 走査プローブ顕微鏡 リチウムイオン電池 イオン液体 電気化学 固液界面

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン蓄電池 (Li-ion battery; LIB) は高い起電力とそれに起因する高いエネルギー密度、良好な充放電サイクル特性を有する二次電池であり、各種電子機器だけでなく、自動車などの高出力・高容量を必要とする機器においても実用化されている。その一方で、その性能・安全性の向上に向けた研究も依然精力的に行われている。LIB は主に正極・電解液(質)・負極の3つの部材からなる。充電すると、正極から Li イオンが電解液中に脱離し、負極では Li イオンが電解液から挿入される。放電はこの逆の反応が起きる。すなわち、正極・負極いずれにおいても、Li イオンの脱挿入により充放電が行われる。したがって、電極への Li イオン脱挿入メカニズムの解明は、LIB の研究開発に最も重要である。そのためには、LIB 電極/電解液界面の動作中における直接分析、すなわちオペランド計測が必要である。現在、LIB のオペランド計測は X 線・中性子線・赤外分光・電子顕微鏡などを用いて盛んに行われている。これらに対し、Li イオン脱挿入が起きる電極最表面のみを実空間で原子分解能イメージング可能であること、さらに電極近傍の溶媒分子・イオン分布を可視化できるという点においては、後述の原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy; AFM) は有力な分析手法として期待できる。

本研究では、イオン液体 (Ionic Liquid; IL) を電解液とする LIB に着目する。IL とは、イオンのみを構成単位とする、室温付近で液体となる新規機能性溶媒である。IL は一般に高い電気化学的安定性と難揮発性・難燃性という特徴を有し、LIB の安全性向上に大きく寄与すると期待されているが、まだ実用化には至っていない。IL 電解液中における Li イオン脱挿入過程の解析が強く求められている。

われわれはこれまで IL 中で原子分解能を有する AFM の開発に取り組んできた。IL は一般に水や有機溶媒に比べて極めて粘度が高い (典型的に水の 100 倍)。従来の液中 AFM では、主に Si 製カンチレバーがそのフォースセンサとして用いられ、これを共振周波数で振動させ、カンチレバーに働く力をその共振周波数変化として検出し、高分解能観察を実現する。その力検出感度はフォースセンサの振動の Q 値に依存する。Q 値は粘度の低い水中では約 10 であるが、高粘度 IL 中では約 1 と著しく低下し、力検出感度も低下する。そこでわれわれは、先鋭化した金属探針を取り付けた音叉型水晶振動子をフォースセンサ (qPlus センサ) とし、探針先端のみを IL 中に浸漬する方式を考案し、IL 中においても 100 程度の Q 値を得た。これにより、これまで、幅広い材料表面の原子・分子分解能観察に成功している。

この AFM を電気化学計測系と組み合わせ、さらに IL の難揮発性という特徴を生かした、真空電気化学 AFM は、IL/電極界面の原子スケール構造解析に有用であると期待できる。真空チャンバー内に電気化学 AFM を入れることで、IL 中の微量水分の影響を完全に除去するだけでなく、真空断熱により、装置の機械的安定性も向上するという利点もある。

2. 研究の目的

本課題では、上記の真空電気化学 AFM 技術を用い、IL 電解液中において Li イオン挿入前後の電極構造を原子レベルで分析することを目的とする。Li 挿入電位の異なる電極に対し、本技術を適用することで、Li 挿入過程をナノメートルから原子スケールレベルで解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 真空電気化学 AFM によるイオン液体電解液/チタン酸リチウム負極界面分析

LIB 電極材料として、チタン酸リチウム ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$; LTO) 単結晶(111)面を用いた。LTO は LIB の高電位負極 (+1.6 V vs. Li) として既に一部実用化されており、最も多く用いられているカーボン負極などと比べ、より安全性に優れると期待されている。また、充放電に伴う体積変化が極めて小さく、優れたサイクル特性を示す。LTO(111)試料は TiO_2 (111)単結晶基板と水酸化リチウム (LiOH) をルツポに入れ、890 °C で 15 時間焼成することにより作製した。イオン液体として 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (EMI-Tf₂N) を用い、これに Li-Tf₂N を溶かして電解液を得た。

qPlus センサ、AFM 装置外観と装置構成図、および電気化学セルをそれぞれ図 1(a)~(d) に示す。qPlus センサとは、音叉型水晶振動子にその片腕を固定し、もう一方に先鋭化した金属探針を取り付けたものである。本研究では (以降すべてにおいて) 電解研磨したタングステン探針を用いた。液滴に探針先端を浸漬するため、通常の qPlus センサと比べて探針は長くしてある (1~1.5 mm)。水晶は圧電体であるため、その振動を圧電電流として検出し、アンプにより増幅した。

LIB の動作には、その雰囲気および電解液より水分を除去する必要がある。そこで、AFM 装置を真空チャンバに設置し、その内部をドライポンプで真空とすることで、これを実現した。多くの AFM においては、フォースセンサに Si カンチレバーを用い、その変位検出にレーザの反射を利用する (光てこ法)。この変位検出系のため、フォースセンサを走査するのではなく、試料を走査する方式が用いられることが多い。しかし、電気化学 AFM においては、試料に電気化学セル (測定対象としての作用極に加え、参照電極と対極を含む) を用いる必要がある。すなわち、その試料サイズが大きくなるため、試料走査型の AFM では制限が大きい。本 AFM で用いる qPlus センサは、水晶の圧電性を利用し、振動に対応した圧電電流を電氣的に検出する。これにより探針走査型の装置構成をとることができ、その結果、自由度の高い電気化学セルの設計が可能となった。参照電極には金属 Li を、対極には Pt を用いた。

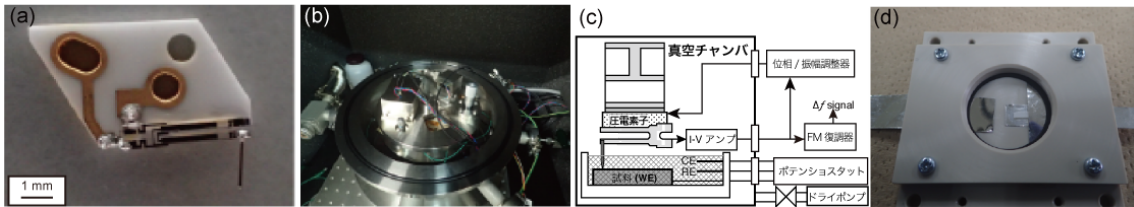


図 1. (a) 液中 FM-AFM 用 qPlus センサ, (b) 真空電気化学 AFM の装置外観
(c) 同 AFM の装置構成, (d) 電気化学セル外観

(2) 真空電気化学 AFM によるイオン液体電解液/シリコン負極界面分析

シリコンは次世代の高容量負極材料として盛んに研究が進められている。また、LTO と比べて Li^+ イオン挿入電位が低い。そこで、イオン液体として EMI-Tf₂N よりもより広い電位窓をもつ 1-methyl-1-propylpyrrolidinium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (Py_{1,3}-TFSI) を採用し、これに Li-TFSI をイオン液体との重量比で 1% 添加することで電解液とした。試料 (作用電極 WE) には表面を水素終端化した n 型 Si(111) 基板を用い、参照電極を Li 金属箔、対極を Pt 線とした。その他については LTO と同様とし、真空電気化学 AFM により Li^+ イオン挿入過程のその場分析を行った。

(3) 超濃厚水溶液/固体界面の AFM 分析

LIB 電解液として、その安全性から水系電解液の開発が精力的に行われている。一方、有機溶媒やイオン液体に比べ、水は電気化学的安定性が低い (電位窓が狭い) ため、LIB の起電力が劣るといった問題点があった。これに対し、最近になり、極めて高い塩濃度の水溶液を用いることでこの問題を解決することができるという報告がなされ、この分野に大きな進展があった。その電解液は、その極めて高い塩濃度により、水分子のほとんどが溶質イオンに水和し、いわゆる自由な水分子がほとんど含まれないという特徴がある (water in salt や hydrate melt と呼ばれる)。AFM による水溶液/固体界面の構造分析はこれまで数多く報告されているが、そのほとんどが希薄水溶液に対するものであり、このような超濃厚水溶液を対象としたものはなかった。そこで本研究では、まず希薄水溶液中 AFM において最も研究例が多いマイカ基板を用い、超濃厚水溶液との界面の qPlus AFM 分析を行った。Li-TFSI と lithium bis(pentafluoroethylsulfanyl)imide (Li-BETI) および水をモル比で 0.7 : 0.3 : 2 で混合し (すなわち Li^+ イオンと水分子とのモル比が 1 : 2)、水溶液を調製し、これを用いた (以下これを L_1W_2 と呼ぶ)。

(4) 垂直/水平力を同時検出するバイモーダル AFM の開発

qPlus センサを用いた AFM はこれまで述べた通り、高粘度液体中における高分解能分析が可能であるという大きな利点がある。一方で、垂直方向の相互作用力と水平方向の相互作用力 (以下、それぞれ垂直力、水平力) を同時検出することができないという問題点があった。一般に、垂直力は表面構造や界面溶媒和構造の検出に用いられる。これに対し、水平力は探針-試料間距離が極めて近い状況では摩擦力に対応する。このような構造と物性の同時計測は、実際の電池のようなマルチマテリアル系においてより有用であると予想される。

われわれは、qPlus センサについて有限要素法を用いた振動モード解析により、垂直・水平方向それぞれに振動する共振モードを有するセンサ構造を見出した。さらに、両方の振動モードで同時にセンサを励振するバイモーダル法を適用し、表面構造と物性の同時計測を実現した。

4. 研究成果

(1) 真空電気化学 AFM によるイオン液体電解液/チタン酸リチウム負極界面分析

図 2(a), (b) に真空電気化学 AFM による Li^+ イオン挿入前後の LTO(111) のその場測定 AFM 解析結果を示す。ドリフトにより 200 nm ほどのズレがあるものの、ほぼ同じ位置を撮像している。非常に興味深いことに、 Li^+ イオン挿入前だけでなく、挿入後においても LTO 表面の原子ステップが保持されていることが確認できる。同じく LIB 負極として用いられるカーボンや後述のシリコンなどと比べ、LTO は Li^+ イオン挿入に伴う体積変化が極めて小さく、そのために無歪み材料と呼ばれる。しかしながら、当然ながら体積変化は小さいとはいえゼロではなく、その状態で表面原子ステップすら保持したまま Li^+ イオンが挿入されるというのはこれまでに明らかになっておらず、本手法の有用性が示された。なお、AFM 装置外で電気化学的に Li^+ イオン挿入を行なったのち、大気を経由して AFM で測定する (ex situ 測定) と、これとは全く違った結果になり、その場で測定することが重要であるということを示しておく。

さらに、より高分解能での撮像結果が図 3 である。 Li^+ イオン挿入前 (図 3(a)) には、0.6 nm 間隔の輝点が撮像されており、原子分解能が得られていることがわかる。一方、真空電気化学 AFM 環境下で Li^+ イオン挿入後にその場で原子分解能観察を行なった結果が図 3(b) である。一見類似の構造に見えるが、輝点間の距離が 0.3 nm になっている。これは Li^+ イオン挿入後の LTO の結晶 ($\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) の構造と良い一致を示しており、本手法により、原子レベルで Li^+ イオン挿入過

程を分析可能であることが示された。また、表面構造が原子レベルで分析されたということより、後述のシリコンと異なり、固液界面での電解液の分解もないことと結論づけられる。これは、LTO への Li^+ イオン挿入電位が他の負極材料と比べて高いことに起因すると考えられる。

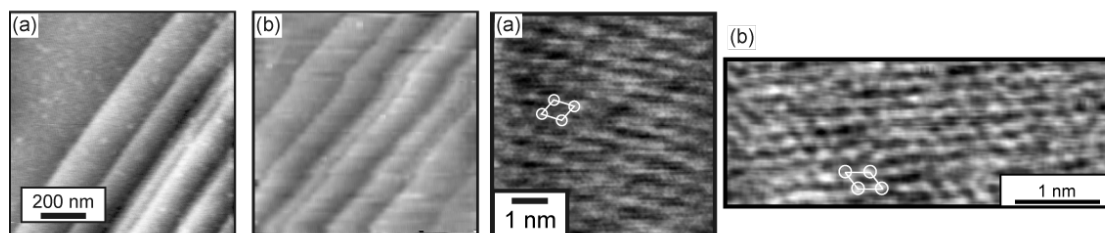


図 2. 真空電気化学 AFM による LTO(111)面への Li^+ イオン挿入過程のその場 AFM 観察像 (a) Li^+ イオン挿入前, (b) Li^+ イオン挿入後

図 3 (a) Li^+ イオン挿入前の LTO(111)原子分解能表面形状像, (b) 真空電気化学 AFM による Li^+ イオン挿入後の LTO(111)表面形状像

(2) 真空電気化学 AFM によるイオン液体電解液/シリコン負極界面分析

自然浸漬電位における水素終端化 n 型 Si(111)面の表面形状像を図 4(a)に示す。水素終端化 Si(111)面に特徴的な原子ステップを確認できる。これに、電位を 0.2 V vs Li/Li^+ として定電位電解を行なった結果が図 4(b)および(c)である。電解時間はそれぞれ 5 分および 35 分とした。原子ステップを保持したまま、電解時間が長くなるにつれて表面に数 nm から 10 nm 以上の凸部が形成された。この電位は Si に Li^+ イオンを挿入可能な電位であり、Si に Li^+ イオンが挿入されたことによる体積膨張ならびに電解液の分解生成物のいずれか、もしくは両方によるものと考えられる。このように本手法により、LTO と Si とではその界面現象が全く異なることをナノメートルスケールで描像することができる。

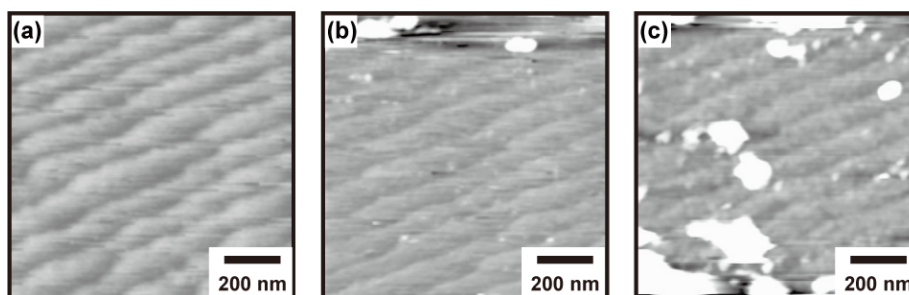


図 4. イオン液体電解液中における Li^+ イオン挿入過程のその場観察 AFM 像 (a) 0 分後, (b) 5 分後, (c) 35 分後

(3) 超濃厚水溶液/固体界面の AFM 分析

超濃厚水溶液 Li_1W_2 中で撮像したマイカ碧界面の AFM 像を図 5 に示す。マイカ壁界面特有のハニカム構造が明瞭に確認でき、原子スケールの分解能を有していることが確認できる。 Li_1W_2 の粘度は水の 200 倍以上である。これまでわれわれは qPlus AFM の高粘度液体への有用性を指摘し、主にイオン液体中における分析結果を報告してきたが、このような超濃厚水溶液に対しても有用であることが明らかとなった。

次に、 Li_1W_2 /マイカ界面の二次元周波数シフトマッピング ($2\text{D } \Delta f$ マッピング) をおこなった。一般に、AFM 表面形状測定では、図 6(a)に示すように、AFM 探針 (プローブ) を固体試料表面に平行に (xy 方向に) 走査する。一方、 $2\text{D } \Delta f$ マッピングでは、図 6(b)のように試料表面に垂直に (xz 方向に) 探針を走査し、その際の Δf (AFM 表面形状測定におけるフィードバック信号) を画像化する。これにより、固液界面における液体分子・イオンの非等方的密度分布 (溶媒和構造) を描像できる。その結果を図 6(c)に示す。マイカ基板表面に対し、ストライプ状の構造が存在することが確認できる。これはマイカ基板からの距離に対し、 Δf が単調に増加あるいは減少するのではなく、増減を繰り返すことを示しており、いわゆる溶媒和層の存在が確認できる。一方で、その層の厚さはマイカ表面から離れるにつれて増大しており、これはこれまで報告されてきた他の液体 (水溶液や有機溶媒、イオン液体など) とは大きく異なる結果であった。これまで、角層の厚さはおおそ溶媒分子 (イオン液体の場合はイオンペア) の大きさとほぼ一致することが報告されているが、 Li_1W_2 /マイカ界面では全く異なる結果であった。本実験結果はこれまでに類似の研究がほとんどなく、その意味することを結論づけるのは現段階では容易ではない。今後、他の塩を用いた超濃厚水溶液などを対象にさらに研究を進める計画である。

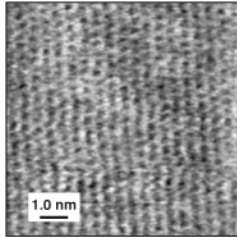


図 5. L_1W_2 中で撮像したマイカ表面形状像

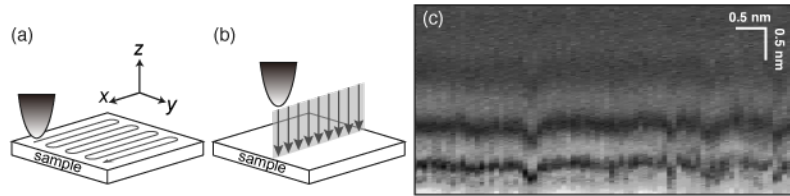


図 6 (a) 表面形状測定の様式図, (b) 2D Δf マッピングの様式図, (c) L_1W_2 /マイカ界面の 2D Δf マップ

(4) 垂直/水平力を同時検出するバイモーダル AFM の開発

qPlus センサの振動モードに関する有限要素法解析結果を図 7 に示す。水晶振動子に取り付けるタンゲステン探針の長さが 1.0~2.0 mm の時、探針先端が一次共振周波数 (f_1) では垂直に、二次共振周波数 (f_2) では水平に振動することを見出した。これらの振動モードで同時に励振したバイモーダル AFM による測定結果を図 8 に示す。試料としてはグラファイト (HOPG) 基板に酸化グラフェン (GO) を展開したものを用い、イオン液体 EMI-Tf₂N 中において撮像を行なった。その結果、 f_1 において表面形状像 (図 8(a)) を取得しながら、 f_2 において表面形状に依存しない HOPG と GO との摩擦特性の違い (図 8(b)) を撮像することに成功した。今後、本手法の定量化について研究を進めるとともに、高分解能化についても取り組んでいく計画である。

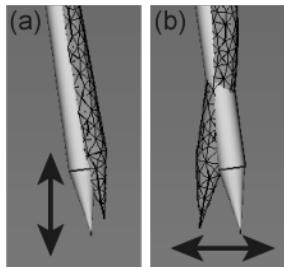


図 7 有限要素法による振動モードのシミュレーション結果 (a) f_1 (b) f_2

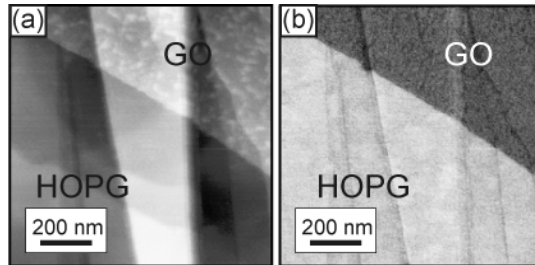


図 8 バイモーダル AFM による GO/HOPG の分析結果, (a) 表面形状像, (b) f_2 振幅像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Yamada Yuya, Ichii Takashi, Utsunomiya Toru, Sugimura Hiroyuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Visualizing polymeric liquid/solid interfaces by atomic force microscopy utilizing quartz tuning fork sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SN1009 ~ SN1009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/AB84B0	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 Ichii Takashi, Ichikawa Satoshi, Yamada Yuya, Murata Makoto, Utsunomiya Toru, Sugimura Hiroyuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Solvation structure on water-in-salt/mica interfaces and its molality dependence investigated by atomic force microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SN1003 ~ SN1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/AB80A6	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 Yamada Yuya, Ichii Takashi, Utsunomiya Toru, Sugimura Hiroyuki	4. 巻 58
2. 論文標題 Simultaneous detection of vertical and lateral forces by bimodal AFM utilizing a quartz tuning fork sensor with a long tip	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 095003 ~ 095003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/AB3617	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19件（うち招待講演 2件／うち国際学会 11件）

1. 発表者名 山田祐也、一井崇、宇都宮徹、杉村博之
2. 発表標題 バイモーダルqPlus AFM による高分子液体/固体界面の分析
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 2020年

1. 発表者名 Takashi Ichii, Satoshi Ichikawa, Yuya Yamada, Toru Utsunomiya and Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Structural analysis on hydrate-melt/mica interfaces by qPlus AFM
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 Yuya Yamada, Takashi Ichii, Toru Utsunomiya and Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Atomic resolution imaging in polymeric liquid by qPlus AFM
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 Takashi Ichii, Makoto Murata, Toru Utsunomiya, Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Atomic-scale investigations on crystal growth in liquid Gallium by qPlus AFM
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 山田祐也、相羽 柚香、一井崇、宇都宮徹、杉村博之
2. 発表標題 FM-AFMによる高分子液体/固体界面の構造分析
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

1. 発表者名 Yuya Yamada, Takashi Ichii, Toru Utsunomiya and Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Simultaneous detection of vertical and lateral forces by bimodal AFM utilizing qPlus sensor with a long tip
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ichii, Makoto Murata, Ken Chinaka, Toru Utsunomiya, Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Atom-resolved in situ observation of crystal growth in liquid Gallium by qPlus AFM
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 一井 崇
2. 発表標題 真空電気化学AFMによるイオン液体/チタン酸リチウム電極界面の原子レベル構造分析
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 山田祐也、一井崇、宇都宮徹、杉村博之
2. 発表標題 qPlusセンサを用いたイオン液体中Bimodal AFM
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉和幸、一井崇、宇都宮徹、杉村博之
2. 発表標題 Li+イオン脱挿入過程におけるSi/イオン液体界面のEC-FM-AFM解析
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

1. 発表者名 Harshal P. Mungse, Takashi Ichii, Toru Utsunomiya, and Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Atomic Resolution Imaging and Solvation Structure Probed by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy in Ionic Liquid
3. 学会等名 2018 MRS Spring Meeting and Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉 和幸, 寶 雄也, 一井 崇, 宇都宮 徹, 杉村 博之
2. 発表標題 Li+イオン挿入過程におけるSi/イオン液体界面のFM-AFM構造解析
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Itakura, Yuya Takara, Takashi Ichii, Toru Utsunomiya and Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 FM-AFM investigation of Li+ ion insertion electrode behavior on Si electrode in ionic liquid electrolyte
3. 学会等名 The 25th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Takara, M. Kitta, T. Ichii, T. Utsunomiya and H. Sugimura
2. 発表標題 Electrochemical FM-AFM analysis of LTO during Li+ insertion in ionic-liquid-electrolyte
3. 学会等名 The 25th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 賣雄也、橘田晃宜、一井崇、宇都宮徹、杉村博之
2. 発表標題 イオン液体中におけるLTO表面のEC-FM-AFM解析
3. 学会等名 第19回関西表面技術フォーラム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Harshal P. Mungse, Saki Okudaira, Miho Yamauchi, Takashi Ichii, Toru Utsunomiya, Shingo Maruyama, Yuji Matsumoto, and Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Atomic Resolution Imaging and Surface Charge Dependent Solvation Structure Probed by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy in Ionic Liquid
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 賣雄也、橘田晃宜、一井崇、宇都宮徹、杉村博之
2. 発表標題 LTO/イオン液体界面のEC-FM-AFM解析
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. P. Mungse, S. Okudaira, M. Yamauchi, T. Ichii, T. Utsunomiya, S. Maruyama, Y. Matsumoto, and H. Sugimura
2. 発表標題 Investigation of KBr (100) and KBr (111) in Ionic Liquid by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 The 19th International Scanning Probe Microscopy Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuya Takara, Mitsunori Kitta, Takashi Ichii, Toru Utsunomiya, Hiroyuki Sugimura
2. 発表標題 Li+ insertion behavior on LTO/ionic-liquid-electrolyte interfaces investigated by FM-AFM
3. 学会等名 The 19th International Scanning Probe Microscopy Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	宇都宮 徹 (Utsunomiya Toru) (70734979)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究 分担者	橘田 晃宜 (Kitta Mitsunori) (90586546)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	