

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03879

研究課題名(和文) 散逸エネルギー検出機能を持つ複合走査型プローブ顕微鏡によるナノ接合の力学的解析

研究課題名(英文) Nanoscale mechanical analysis of nanocontacts using combined scanning probe microscopy capable of detection of energy dissipation

研究代表者

富取 正彦 (Tomitori, Masahiko)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：10188790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：走査型プローブ顕微鏡技術を基に、物質の融着、転移導入過程で散逸される力学エネルギーの検出技術を開発させ、ナノサイズの物質接合の電気・力学特性を評価した。透過型電子顕微鏡(TEM)ホルダーに水晶振動子(LER)を力センサーとして組み込み、原子鎖の観察・力学特性のその場測定を行った。LER端とTEMホルダーの電極部の間に金または白金の細線を張り、それをTEM観察しながら延伸させてナノ接合を形成した。究極的な単原子鎖のナノ接合を形成して単原子間の結合の等価バネ定数を算出し、また、散逸エネルギー測定からナノ接合の臨界剪断応力を算出した。散逸エネルギー測定から表面電子特性を評価する解析も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノサイズの材料・デバイスは、今後の社会インフラを支え、人類が直面している種々の課題を解決する助けになると期待される。それらの材料・デバイスに画期的機能を発現させるには、科学技術における新たな発想とともに、ナノ・原子レベルで材料を評価する技術の開発が望まれる。本研究では、走査型プローブ顕微鏡の物性検出技術を電子顕微鏡に組み込み、ナノ構造の原子配列を観察しながら力学特性を計測し、従来法では不可能であったナノ接合の力学特性を抽出した。とくに探針を担持させた振動子の力学的振動エネルギーが探針を介して試料へと伝達される散逸エネルギー量を計測した点が特徴であり、ナノ計測として学術的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：Based on scanning probe microscopy techniques, we measured mechanical energy dissipation in nano-sized material junctions to evaluate their electrical and mechanical properties. A transmission electron microscope (TEM) holder equipped with a quartz crystal resonator (LER) as a force sensor was developed to observe nanojunctions and to in-situ characterize their mechanical properties; thin gold (Au) or platinum (Pt) wires were stretched between the LER end and the electrode of the TEM holder, which were being observed by the TEM. The equivalent spring constants of individual bonds between the atoms in the ultimate monoatomic chain of Pt nanojunctions were evaluated, and the critical shear stress of Au nanojunctions was evaluated from the energy dissipation measurements. An analysis was also performed to evaluate the surface electronic properties from the dissipation energy measurements.

研究分野：表面科学

キーワード：表面・界面物性 エネルギー散逸 走査型プローブ顕微鏡 電子顕微鏡 接合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

材料合成技術、成膜技術や微細加工技術の進歩によって、ヘテロ構造を持つナノサイズのデバイスやナノサイズの材料が比較的容易に作製できるようになってきた。その結果、ユビキタな微小電子デバイスやナノ電子機械システム (NEMS)、希少元素消費の低減に繋がるナノ触媒、摩擦を低減するナノ材料による機械潤滑などの開発が進んだ。これらデバイスや材料の機能を拡張し、さらにその特性を改善することが人類社会の持続的発展に繋がると期待されている。その技術革新を支え、さらに加速するために、材料界面の構造、電気特性、化学活性、力学的機械特性をナノスケール・原子スケールで解析することがますます重要となっている。その中でも、とくにナノスケールの機械特性の評価法が未確立である。物質中で原子と原子を結びつけている相互作用力、それらの外力・外場に対する応答、原子の拡散や転移導入などの原子配列構造を決定する自由エネルギーやその流入を計測する手法の開発は未達成な分野と言える。学術的にもナノサイズ・原子サイズの物質の力学的特性を探究することは興味深く、原子スケール・ナノスケールでの力学的機械特性を評価できる高精度で高確度な手法の確立が期待されている。

原子・分子の配列を原子レベルで直視的に観察する手段として走査型プローブ顕微鏡 (SPM) がある。原子スケールで鋭利な探針を試料表面に接近させて表面の原子・分子をなぞるように描き出す SPM は、種々の物性測定にも応用され、ナノテクノロジーの発展を支えてきた。原子分解能を有する SPM は、主に 2 種類の物理量の 3 次元空間的な精密測定 (探針-試料間距離に敏感に変化する“トンネル電流”、および、“原子・分子間に働く力”) によって達成された。ところで、探針を試料表面に近づけたとき、探針と試料を構成する原子の位置は不動のままではない。微弱ではあるが相応な力が各構成原子に働いて、原子が平衡位置から変位したり、移動したりする。例えば、探針先端が試料に極接近すると SPM 像が変化することは SPM 開発当初から知られていた。この現象の探求を契機とした研究が“SPM による原子操作技術”の実現に繋がった。一方、観察・測定という点では、「試料表面にあるべき原子の配列構造」を想定しながら SPM による表面研究が進んできた。例えば、第一原理計算によって探針と試料の原子配置が最適化・シミュレートされ、SPM 像が描き出す“原子像”の意味が考察・正当化されてきた。しかし、SPM は、あくまで探針と試料が近接したときの“トンネル電流”や“力”の空間変化を画像化する。従って、“電流や力の SPM 像”の裏に隠されたダイナミックな原子集団の変位や応答が原子分解能で直接的に描写されているわけではない。

このような背景の下、本研究の核心をなす学術的な問いは、「SPM 像に隠されている原子レベルの力学的実体を計測によって抽出できるか」という点にあった。そのために、探針と試料間で授受される物理量の測定対象を“電流と力”以外の“散逸エネルギー”にも広げ、その測定精度や再現性を高めることでこの「問い」に挑んだ。

2. 研究の目的

本研究では、原子位置の変位や、物質の融着、転移導入過程で内部摩擦として消費される力学的エネルギー (散逸エネルギー) の検出技術を中心に、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の原子・分子を観察・解析する能力を拡張し、ナノサイズの物質接合の電気・力学特性を原子レベルで評価することを目的とした (図 1)。手法として、独自開発の下記の特徴ある 3 つの SPM 技術:

- ・力学的散逸エネルギーの高感度検出法、および分光学的応用、
- ・チャージアンプを利用した電荷移動、表面電位の高感度検出法、
- ・電子顕微鏡と SPM の複合化技術、

を発展させながら複合・集積化する。研究対象は、SPM 探針と試料の間に条件 (印加応力、温度、ガス雰囲気) を変えて形成した金属・半導体・酸化物の原子接点やナノサイズの接合である。それらに対して“個々の原子の変位”や“原子集団の動き”を敏感に検出できる本手法を適用し、表面や原子接点での原子の拡散・反応の力学的ポテンシャル場を解析し、また、応力印加時や通電時の原子レベルの融着、接合界面でのドメイン形成・転移導入などの動的過程での電気・力学特性の変化を調べる。この成果を基に、微小デバイスで重要なナノサイズの接合や基板に担持されたナノ触媒の動作時の特性変化や劣化現象のモデルを提供し、電気・力学的に安定で高機能なナノ材料・デバイスの創製に繋げることを狙った。

3. 研究の方法

本研究では、ナノ接合のダイナミックな形成過程や機能発現の機構を原子レベルでナノ力学 (原子・分子の相互作用に基づくナノスケール現象を扱う物理・化学的力学) 的に解析するために、下記の様

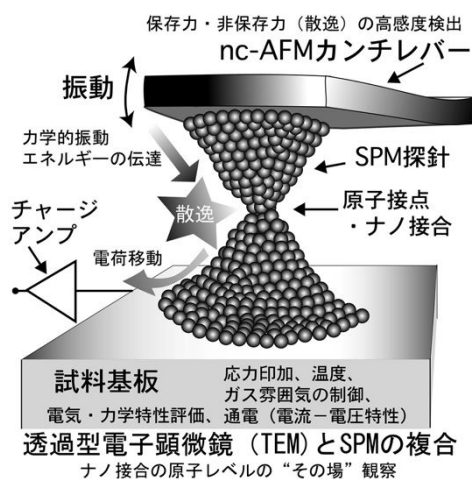


図 1. 研究の概念図. TEM 観察しながら探針-基板間に原子接点・ナノ接合を形成し、振動するカンチレバーから伝達されるエネルギーの散逸、電荷移動などを解析し、安定で高機能なナノ接合の創製法を確立する。

に SPM 技法を発展させつつ研究を進めた。

(1) 電子顕微鏡と SPM の複合化によるナノ接合の形成と伸展の観察と解析

超高真空中で稼働する透過型電子顕微鏡(TEM)のホルダーに、市販の小型長辺振動水晶振動子 (length extension resonator(LER)、長さ約 3 mm、幅約 0.1 mm) を力センサーとして組み込み (図 2) LER 先端にナノ接合を形成した。LER を力センサーとして機能させるために、周波数変調 (FM-) AFM で利用されている FM 法を採用した。LER の電極 1 に交流電圧を印加することによってこの LER 水晶振動子を励振する。LER の振動は、水晶の圧電効果によって誘起される電荷の変化から検出する。具体的には、電極 1 に対向した LER の電極 2 に高速チャージアンプを接続することによって誘起電荷の変化を高速で増幅検出する。この振動信号の出力をフェーズロックドループ(PLL)に入力し、励振電圧との位相差が一定になるように励振信号の位相を制御する。この制御によって、LER の共振周波数 ($f \approx 1$ MHz) が僅かに変化 (Δf) しても LER が常に共振振動するように制御することができ、また、その制御信号から Δf の値を測定できる。この Δf 値は、LER に印加される力の LER 変位の微分に比例し、この関係から測定対象の接合部の等価バネ定数を算出できる。LER の剛性は 10^6 N/m とナノサイズの接合の剛性よりも十分に高いので、LER がナノ接合の機械的バネ特性と連成振動したり、測定に影響が現れるほど大きく歪むことはない。また、独立したフィードバック制御によって振動振幅が一定になるように励振信号の振幅を制御する。測定系のノイズを低減化することによって、LER の振幅値は数十 pm にまで小さく制御することができる。この程度にまで振動振幅を小さくすることによって、TEM 観察における原子レベルの空間分解能の劣化を抑制できる。また、LER の振動振幅の二乗が LER の機械的振動エネルギーに比例するので、その振動振幅を一定に保つための励振信号の振幅変化が LER に働く非保存的な相互作用による散逸エネルギーに比例する。真空中では、LER の振動子としての特性を表す Q 値 (振動子に蓄積された力学的振動エネルギーを、振動 1 周期で振動子から失われる振動エネルギー値で割って、2 掛けした値) は 1 万以上になるので、ナノ接合に働く非保存的な相互作用によって引き起こされる微小な散逸エネルギーを感度良く検出することができる。この FM 法を利用することによって、保存的な相互作用によって引き起こされる Δf と非保存的な相互作用による散逸エネルギーを独立して同時計測することが可能となる。

試料調製として、縦に伸縮振動する LER のブロング (細い長手の角柱) の先端に試料となる微小金属片を接着しておく。本研究では、試料として、機械的接触によって接合を形成し易い金 (Au) および白金 (Pt) を採用した。TEM ホルダー内には、この LER の位置を制御するための一軸粗動ステージ (小型の超音波モータで駆動) とチューブ型ピエゾ素子による 3 次元微動機構を組み込んでおく。TEM ホルダーには、ブロング先端の金属片試料に対向して、別の微小金属片をあらかじめ接着させておく (その金属片端が TEM の視野内に入るように固定)。その金属片端に向けて LER を接近させ、LER のブロング端の金属片との間にナノサイズの接合を形成する。ピエゾ素子によってナノ接合を引張ったり縮めたりすることができ、ナノ接合を引張って徐々に細くして破断したり、破断した後、再度接触させてナノ接合を再形成することができる。その様子を TEM によって連続観察する。その際、2 つの金属片の間に微小電圧を印加して、接触したときに流れる電流からナノ接合の電気電導コンダクタンスを測定し、 Δf と共に記録する。ナノサイズの接合のコンダクタンスは最小断面積に比例することが知られている。その値からナノ接合の断面積を推量することができる。清浄なナノ接合を形成するためには、観察前の予備加熱や電子線照射などの処理が重要であることも付記しておく。

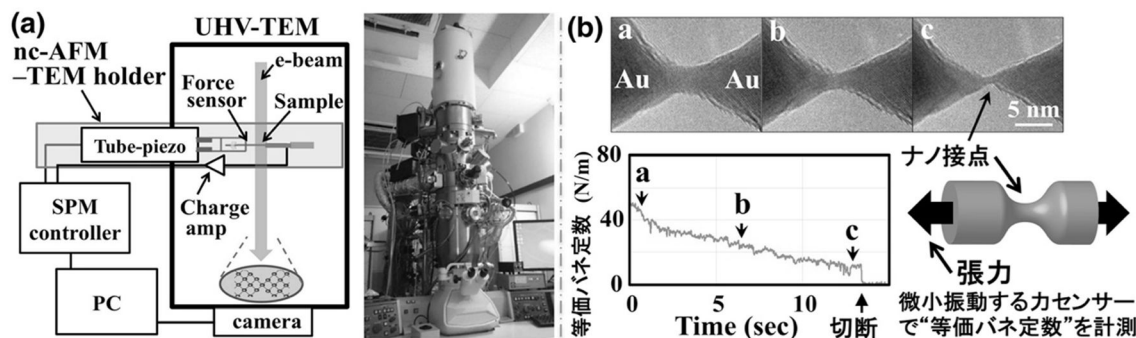


図 2 . (a) LER 力センサー組込型 TEM ホルダーと TEM 計測システム の概念図、および、使用した超高真空 TEM 装置の写 真 . (b) LER 力センサーのブロング端に金小片を取付け、対向した金小片に機械的に接触させてナノ接合を形成した . そのナノ接合を引 き延ばしつつ観察したと た連続 TEM 像 . 同時に、LER 力センサーの共振周波数の変化 (Δf) に比例するナノ接合の等価バネ定数の変化を求めた . グラフの右端の急峻な変化はナノ接合が破断したことを示す .

(2) 力学的散逸エネルギーの高感度検出、および、印加電圧による分光学的応用

鋭利な探針と試料の間に働く微弱力を高感度検出できる FM-AFM は、探針先端を試料表面にぶつけること無く安定に極接近させることができるので、デバイス表面に形成された特異構造の電子特性を高空間分解能かつ非接触で計測できる手法としての可能性をもつ。従来の表面電気電導を調べる多探針プローブ法は探針を試料に接触させた上でプローブ間に電圧を印加してそ

の間に流れる電流を検出する。試料に注入された電流は、表面より内部の抵抗が小さい領域を探るように流れるので、ナノサイズのデバイス表面・界面の電気電導を必ずしも計測できているとは限らない。また、プローブが試料に接触しているため、プローブと試料の間に形成された刹那的な接合の電気・機械特性が測定にも影響を与える。そこで本研究では、既存 AFM を改良して FM-AFM として動作させ、力学的な計測量である散逸エネルギーを高感度測定することで、非接触で試料表面の電気伝導度を調べる手法としての FM-AFM が持つ可能性を探究した。前述したように FM-AFM では、保存的な相互作用を f 、および、非保存的な相互作用を散逸エネルギーとして計測できる。今、探針と試料間に電圧を印加する。FM-AFM では、先端に探針を有するカンチレバーを共振振動させている。すると探針と試料の間の距離が振動によって変調される。従って、探針と試料間の静電容量が振動変調されることになり、探針と試料間には変位電流が流れる。この変位電流が、探針-試料系の抵抗 (R) を流れることによってジュール発熱する。このジュール発熱エネルギー (D_j) は、探針振動の 1 サイクルあたりでみると電源ではなく、探針の力学的振動エネルギーによってもたらされることになる。研究代表者らは以前、電圧印加した探針-試料間に働く静電力によるカンチレバーの共振周波数変化 (f_{ele}) が、近似として D_j に比例することを見出している。比例定数には探針-試料間距離や印加電圧は含まれず、未知量として R が明示的に含まれる。逆に言えば、計測した D_j と f_{ele} をプロットしてその直線の傾きを調べることで R が求まる。清浄な半導体 Si を試料として計測したところ、 R 値は G オーダとなり、想定より高い値となった。今回改造した AFM を用いて、その大きな R 値の起源に迫り、FM-AFM による散逸エネルギーが表面近傍に形成されたナノサイズの接合に対しても電子特性評価に有力な手法であることを示す。そのための実験的探究を行った。実験対象として、安定な貴金属であるイリジウム (Ir) を Si ウェハー基板に蒸着して金属薄膜試料を調製した。さらに、純度の高い人工マイカ (弗化フロゴパイト) を 3-15 nm の厚みに剥離して Ir/Si 基板上に担持し、金属部分と誘電極薄膜としてのマイカ膜部分で計測される散逸エネルギーの差異を調べた。ここで注意点として、 R 値には試料表面の抵抗のみでなく、探針表面の抵抗も含まれることになる。従って、同じ探針で金属上とマイカ上の領域での散逸エネルギーの差異を調べることを計画した。

4. 研究成果

(1) 電子顕微鏡と SPM の複合化によるナノ接合の形成と伸展の観察と解析

LER 力センサーを組み込んだ TEM ホルダーを使って、白金 (Pt) の単原子鎖からなるナノ接合の力学的特性を TEM 観察しながら解析した[1]。まず、TEM 観察しながら Pt の小片同士を接触させて引き延ばすことによって、Pt 原子数の異なる、即ち、長さが異なる 1 本の原子鎖からなるナノ接合を作製した。その際、LER 力センサーと計測システムによって、ナノ接合の等価バネ定数および電気電導コンダクタンスの変化を同時測定した。測定結果を解析するための原子鎖の力学モデルとして、直列に結合した弾性バネ系のモデルを導入し、数個の原子数からなる 1 本原子鎖の力学系の連立方程式を解いた。1 本原子鎖の構成原子数は TEM 観察から確認し、同時測定した等価バネ定数値を連立方程式に代入することで、構成 Pt 原子間の個々の結合 (ボンド) の等価バネ定数を算出した。原子鎖中央ではボンドの等価バネ定数は 25 N/m、末端の Pt 小片 (ベース) に結合する部位でのボンドの等価バネ定数は 23 N/m であった。本測定の精度を評価し、この二つ値の差 (2 N/m) が有為であると結論した。これらの値は Pt バルク中のボンドの平均化された等価バネ定数値よりも大きかった。また、原子鎖の長さや小片の結晶方位には依存しなかった。更には、1 本原子鎖のボンド長が 24% の歪みに対しても破断しないという特性を見出した。これらの現象を理解するためにストリング・テンション (紐張力) を導入した。ストリング・テンションは、ベース部から 1 個の原子を引き抜いて 1 本原子鎖に組み込む際の原子間隔の変化を考慮した、原子鎖の単位長さ当たりの力学系自由エネルギーである。本来、原子団は 3 次元的な塊として存在していた方が安定である。一方、ベース (塊) から原子を引き抜いて原子鎖に組み込むと原子鎖の原子間隔は縮む。その際、結合に関わる電子系エネルギーは減少し、原子鎖が準安定化する。本研究の成果は、1 次元系物質の力学的な挙動を直接その場 TEM 観察して得たものであり、ナノメカニカルデバイスを作製する際の基礎となり得るものである。

LER 力センサーを組み込んだ TEM ホルダーを使って、TEM 観察しながら金 (Au) のナノ接合の力学的特性を測定し、その測定結果を基にナノ接合の周囲表面と内部の力学特性の違いをモデル解析した[2]。物質のサイズがナノスケールになると、内部に比べて表面の原子数の割合が大きくなる。その結果、表面では原子間の結合配位が変化し、ナノサイズの物質では表面構造がソフト化するか、ハード化すると予想されている。しかし、その変化を明確に測定した実験は希有である。そこで、超高真空中 TEM を用いて表面が清浄な [111] 方位の Au ナノ接合を延伸しながら TEM 観察し、その等価バネ定数と電気電導コンダクタンスを同時測定した。ナノ接合の力学的構造の解析として、ナノ接合をディスク状に輪切りにして、それら一つずつを弾性体とみなし、直列に配置したバネに基づくモデルを採用した。[111] 方位に引き延ばした Au ナノ接合は、2 つの三角錐の尖った方向を逆向きに合わせたように微小面に囲まれながら中央部が狭くなっている。最小断面積は電気電導コンダクタンスを基に推量できる。その値を参考にしながら、TEM 像からナノ接合の原子配列構造を決定した。ナノ接合の延伸は最小断面積部に一つの (111) 面が追加挿入されながら進んでいった。この変化から比較的太い領域の Au ディスクのヤング率が 80 GPa であると算出した。この値はバルクの推定値 (116 GPa) よりも小さい。ナノ接合を引き延ばしていくとヤング率は徐々に低下し、ナノ接合断面の幅が 2 nm 以下になるとヤング率は 30 GPa と

なった。このナノ接合の断面積の減少に伴うヤング率の減少を理解するために、ナノ接合の外周表面1層が内部とは異なるヤング率を持つと仮定して解析した。その結果、内部はバルクの値と近い119 GPaとなり、最外層表面のヤング率は22 GPaと算出された。これにより、ナノ接合の狭幅化によるヤング率の低下(ソフト化)はナノ接合の最外層の原子配列によってもたらされると結論した。この成果は、本手法がナノサイズ物質の力学特性を明確に解析できることを示す。

LER力センサーを組み込んだTEMホルダーを使って、金ナノ接合の臨界剪断応力を計測した[3]。その測定には、ナノ接合が剪断を起こした際に失われていくLERの振動エネルギーの損失を高感度で検出する手法を利用した。試料である金ナノ接合は、(1)(2)で記述した方法と同様に、ナノ接合の等価バネ定数および電気電導コンダクタンスを同時測定しつつ、TEM像を観察しながら調製した。調製した金ナノ接合の結晶方向は $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ の2種類があった。ナノサイズ材料一般に言えることであるが、金ナノ接合の結晶構造は理想的な単結晶に近い。従って、弾性的変化から塑性的変化に伴う力学応答の変化を捉えやすいと予想される。目的のサイズの金ナノ接合を調製したのち、電気電導コンダクタンスを一定に保つようにナノ接合を挟んでいる金小片の距離を制御した。即ち、ナノ接合の最小断面積の大きさを一定に保った(本研究では断面積が約3 nm²または5 nm²に相当した)。この状態で、LERの振動振幅を大きくしながらLERの振動エネルギーの損失(散逸エネルギー)を計測した。計測原理として、LERの振動振幅を一定に保つための加振交流信号の振幅値の変化が散逸エネルギーの変化に比例することを用いた。LERの振動振幅を一定に保つ制御の際の、その目標振動振幅の設定値を徐々に大きくしながら加振信号の振幅変化を記録した。LERの振動振幅を大きくすると、LERの内部摩擦によっても振動エネルギーの損失は大きくなるが、LERのQ値は高いので、その損失変化は本実験の設定条件範囲では小さく、無視することができた。LERの振動振幅を100 pm以上にすると、散逸エネルギーの増加変化が明確に大きくなった。この振幅値のときにナノ接合へのLER振動の影響が弾性変形から塑性変形になったと推測される。このときのLERの振幅値と電気電導コンダクタンスの値(断面積に対応)からナノ接合の降伏応力を算出した。この現象を解析するために、金の(111)面がすべり面であることを仮定し、ナノ接合の軸方位を考慮してSchmidt因子を考慮して臨界剪断応力を求めた。すると、方位が $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ の両方の試料において臨界剪断応力が同じ値(0.94 GPa)と算出された。従って、(111)面内[112]方向へのすべりに対して、金ナノ接合固有の臨界剪断応力を捉えた結論した。この成果は、本研究で提案した散逸エネルギー計測を利用した解析がナノサイズ材料の力学解析に有用な手法となることを示している。

(2) 力学的散逸エネルギーの高感度検出、および、印加電圧による分光学的応用

Si基板上にIr薄膜を形成し、その表面をナノスケール膜厚の人工マイカで部分的に覆う手法を開発した[4]。具体的には、単結晶人工マイカの表面で電気伝導性ポリウレタンローラ(径20 mm)を転がすことによって極薄のマイカを剥離しながらローラ表面に移し取り、さらにそのローラをIr/Si基板上で転がすことによって剥離したマイカ(マイカナノシート)を基板に転写した。膜厚にも依存するが、数10 μm以上の幅をもつマイカナノシートを簡便かつ汚染を抑制しながら基板に担持させる技術を確認した。この基板上的マイカナノシートが、膜厚に依存してトンネル特性をもつ金属-絶縁体接合を示すことを接触式プローブで確認した。金属被覆した探針をセットしたFM-AFMによってこの試料の形状を観察しながら、相互作用と散逸エネルギーの探針-試料間距離依存性および探針-試料間電圧依存性を測定した[5]。すると、マイカが被覆されていないIr膜部分、および、マイカナノシート上で、ジュール発熱による散逸エネルギー(D_j)と静電量によるカンチレバーの共振周波数の変化(f_{res})が比例することがわかった。その比例定数から、どちらの部位でもジュール発熱に関する抵抗値Rの桁はGとなり、マイカナノシート上で値の方がIr上よりも大きかった。このR値は過去の半導体Siでの測定と同じ桁となり、R値がバルクの伝導率に依存していないことが示唆された。電圧を印加された探針が試料に接近すると、試料表面には静電誘導によって電荷が出現する。探針振動によって探針が試料に接近すれば、電荷は増えると共に探針に引きずられるように探針直下をめざして表面を移動する。探針が試料から離れば、探針直下に寄っていた表面電荷は表面に沿って広がるように拡散する。このように探針の振動運動が引き起こす表面上での電荷の移動がジュール発熱を起こすと考えられる。その熱起源である電荷の移動を抑えようとする非弾性散乱は、まさしく表面での電子散乱である。簡単なモデルを導入し、その非弾性散乱の緩和時間が10⁻¹⁹秒程度であると推量した。この値は、導体モデルにおける静電誘導の緩和時間と同じ桁であり、FM-AFMによって検出される散逸エネルギーのジュール発熱機構の解明を一步進めることができた。マイカナノシート上でR値が増大した理由は、誘電体膜で印加電界の変化に対する電荷誘起の遅れが引き起こす誘電損出であると結論した。探針と試料間の静電容量測定とFM-AFMによる散逸エネルギー測定を組み合わせることで、ナノサイズの接合の誘電損出を表すtan δ値を計測できることを提案した。以上、FM-AFMによるナノスケールの力学的測定(散逸エネルギーの測定)がナノスケールの接合構造を持つデバイス表面の電子特性の非接触評価に有効であることを示した。

[1] Zhang et al., Nano Lett. **21** (2021) 3922.

[2] Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **128** (2022) 146101.

[3] Liu et al., Appl. Phys. Express **14** (2021) 075006.

[4] M.R. Islam and M. Tomitori, Appl. Surf. Sci. **532** (2020) 147388.

[5] Hasan et al., Jpn. J. Appl. Phys. **61** (2022) 065006.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10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 Zhang Jiaqi, Tomitori Masahiko, Arai Toyoko, Oshima Yoshifumi	4. 巻 128
2. 論文標題 Surface Effect on Young's Modulus of Sub-Two-Nanometer Gold [111] Nanocontacts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 146101-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.128.146101	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 Hasan Md Mahamudul, Arai Toyoko, TOMITORI Masahiko	4. 巻 61
2. 論文標題 Mechanical energy dissipation of an oscillating cantilever close to a conductive substrate partly covered with thin mica films evaluated by frequency modulation atomic force microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065006-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac6b02	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 Liu Jiaming, Zhang Jiaqi, Arai Toyoko, Tomitori Masahiko, Oshima Yoshifumi	4. 巻 14
2. 論文標題 Critical shear stress of gold nanocontacts estimated by in situ transmission electron microscopy equipped with a quartz length-extension resonator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075006 ~ 075006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac09bd	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 He Gada, Oshima Yoshifumi, Tomitori Masahiko	4. 巻 60
2. 論文標題 In-situ high-resolution scanning electron microscopy observation of electrodeposition and stripping of lead in an electrochemical cell	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 035509 ~ 035509
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abe640	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 Zhang Jiaqi, Ishizuka Keisuke, Tomitori Masahiko, Arai Toyoko, Hongo Kenta, Maezono Ryo, Tosatti Erio, Oshima Yoshifumi	4. 巻 21
2. 論文標題 Peculiar Atomic Bond Nature in Platinum Monatomic Chains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3922 ~ 3928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00564	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 大島 義文、石塚 慧介、張 家奇、富取 正彦、新井 豊子	4. 巻 56
2. 論文標題 その場TEM法による金属ナノ接点の力学測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 顕微鏡	6. 最初と最後の頁 13 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11410/kenbikyo.56.1_13	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 Islam Mohammad Razzakul, Tomitori Masahiko	4. 巻 13
2. 論文標題 Layer etching of mica nanosheets using a focused electron beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 106502 ~ 106502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abb385	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 Islam Mohammad Razzakul, Tomitori Masahiko	4. 巻 532
2. 論文標題 Evaluation of the discrete thickness of exfoliated artificially synthesized mica nanosheets on silicon substrates: Toward characterization of the tunneling current through the nanosheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 147388 ~ 147388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2020.147388	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 Zhang Jiaqi, Ishizuka Keisuke, Tomitori Masahiko, Arai Toyoko, Oshima Yoshifumi	4. 巻 31
2. 論文標題 Atomic scale mechanics explored by in situ transmission electron microscopy with a quartz length-extension resonator as a force sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 205706(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/ab71b9	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 Ishizuka Keisuke, Tomitori Masahiko, Arai Toyoko, Oshima Yoshifumi	4. 巻 13
2. 論文標題 Mechanical analysis of gold nanocontacts during stretching using an in-situ transmission electron microscope equipped with a force sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025001 ~ 025001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab6936	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 Nogami Makoto, Fleurence Antoine, Yamada-Takamura Yukiko, Tomitori Masahiko	4. 巻 6
2. 論文標題 Nanomechanical Properties of Epitaxial Silicene Revealed by Noncontact Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 1801278 ~ 1801278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.201801278	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63件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 白金原子鎖の機械的性質
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第77回学術講演会、6月14-16日、つくば国際会議場、つくば市
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaming Liu, Jiaqi Zhang, Toyoko Arai, Masahiko Tomitori, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Critical shear stress of gold nanocontact measured by TEM combined with a quartz resonator
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会、9月13日、online
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Atomic bond stiffness in Pt atomic chains measured by TEM coupled with a quartz LER
3. 学会等名 Advanced Imaging and Analysis at Nanoscale 2nd Canada-Japan Microscopy Societies Symposium, Nov. 16, online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaming Liu, Jiaqi Zhang, Toyoko Arai, Masahiko Tomitori, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Critical shear stress of gold nanocontact measured by TEM combined with a quartz resonator
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science, Dec. 1, online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Mechanical properties of Pt atomic chains measured by TEM coupled with a quartz resonator
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science, Dec. 1, online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Mechanical properties of Pt atomic chains measured by TEM coupled with a quartz resonator
3. 学会等名 The Material Research Meeting 2021 (MRM2021), Dec. 16, パシフィコ横浜北、横浜市 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaming Liu, Jiaqi Zhang, Toyoko Arai, Masahiko Tomitori, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Measurement of critical shear stress of gold nanocontacts by in-situ transmission electron microscopy equipped with a quartz resonator
3. 学会等名 The Material Research Meeting 2021 (MRM2021), Dec. 16, パシフィコ横浜北、横浜市 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 佳明、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 水晶振動子を組み込んだTEM法による金ナノ接点の臨界せん断応力サイズ依存性の研究
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会、3月25日、青山学院大学相模原キャンパス、相模原市
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉 佳明、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 水晶振動子を組み込んだ TEM 法による金ナノコンタクト臨界せん断応力の計測
3. 学会等名 ISSP workshop “Frontier of scanning probe microscopy and related nano science”、3月29日、online
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang
2. 発表標題 Atomic scale mechanics by in situ transmission electron microscopy with a quartz length-extension resonator
3. 学会等名 ISSP workshop “Frontier of scanning probe microscopy and related nano science”、3月29日、online (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石塚 慧介、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 水晶振動子力学センサーを組み込んだTEMホルダーによる金ナノ接点のヤング率計測
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第76回学術講演会、5月25日 - 27日、紙上開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Keisuke Ishizuka, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Development of transmission electron microscopy holder with a quartz force sensor
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第76回学術講演会、5月25日 - 27日、紙上開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Islam Mohammad Razzakul and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Mica nanosheet patterned etching using focused electron beam
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会、9月8-11日、online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Md Mahamudul Hassan and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Dissipative interaction via capacitive coupling through mica nanosheets examined by non-contact atomic force microscopy
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会、9月8-11日、online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Keisuke Ishizuka, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Atomic scale mechanics measured by TEM holder combined with a frequency-modulation force sensor
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会、9月8-11日、online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Md Mahamudul Hassan and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Dissipative interaction due to Joule heat through displacement current on mica nanosheets examined by non-contact atomic force microscopy
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会、11月19日 21日、online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Anh-Duc Dao, Tien-Sinh Vu, Duong-Nguyen Nguyen, Keisuke Ishizuka, Yoshifumi Oshima, Masahiko Tomitori, and Hieu-Chi Dam
2. 発表標題 Interpretable machine learning to comprehend the mechanical and electric properties of gold nanocontacts measured by in-situ TEM equipped with a force sensor
3. 学会等名 AI for Atoms: How to Machine Learn STEM Virtual School, Dec. 7_10, online, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Md Mahamudul Hassan and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Mechanical energy dissipation via a thin mica film on a metal-coated Si substrate measured by frequency modulation atomic force microscopy
3. 学会等名 ICSPM28, Dec. 10_11, online (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Md Mahamudul Hassan and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Observation of mechanical energy dissipation between a conductive tip and a thin dielectric film on a metal-coated Si-substrate by frequency modulated atomic force microscopy
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会、3月16_19日、online
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Keisuke Ishizuka, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Mechanical properties of atomic bonds in Pt atomic chains measured by TEM coupled with a quartz resonator
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会、3月16_19日、online
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gada He, Yoshifumi Oshima, and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 In-situ observation of electro-deposition and stripping of lead using a high-resolution scanning electron microscope with an electrochemical cell
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会、3月16_19日、online
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Islam Mohammad Razzakul and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Development of tow-dimensional mica nanosheets on substrates analyzed by scanning Auger electron spectroscopy and atomic force microscopy
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Applied Surface Science, 17-20 June, Pisa, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kesisuke Ishizuka, Yuki Kobori, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 In-situ measurement of Young's modulus for Au nanocontacts by ultrahigh vacuum TEM with quartz crystal oscillator sensor
3. 学会等名 The 10th International Conference on Materials for Advnaced Technologies, 23-28, June, Marina Bay Sands, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Yuki Kobori, Keisuke Ishizuka, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Mechanical properties of Pt nano-contacts measured by TEM combined with a frequency-modulation force sensor
3. 学会等名 The 10th International Conference on Materials for Advnaced Technologies, 23-28, June, Marina Bay Sands, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, 小堀 雄稀, 石塚 慧介, 富取 正彦, 新井 豊子, 大島 義文
2. 発表標題 TEM-微小振幅FM力勾配測定法によるPtナノ接点の力学測定
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第75回学術講演会、名古屋国際会議場、名古屋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小堀 雄稀、石塚 慧介、見寺 悠伽、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 TEM-微小振幅FM力勾配測定法によるAuナノ接点ヤング率の結晶方位依存性の計測
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第75回学術講演会、名古屋国際会議場、名古屋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyoko Arai, Daiki Kura, Toshiki Tsuji, and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Discrimination of Si and Ge atoms in dissipation energy images on Ge/Si(111)-(5×5) using non-contact atomic force microscopy
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy, 29 July- 2 Aug., Regensburg, Germany (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井 豊子、辻 繁樹、藏 大輝、敷地 汰一、富取 正彦
2. 発表標題 nc-AFMで検出するGe/Si(111)表面原子とSi探針間に働く化学結合力と散逸エネルギー
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会、9月18-21日、北海道大学、札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井 豊子、笈田 浩平、丸山 天悟、富取 正彦
2. 発表標題 nc-AFM/STM用音叉型水晶振動子力センサーのための金属探針の作製と評価
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会、9月18-21日、北海道大学、札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石塚 慧介、小堀 雄稀、見寺 悠伽、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 FM-AFM/TEM法によるAuナノ接点の力学・構造同時測定
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会、9月18-21日、北海道大学、札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Yuki Kobori, Keisuke Ishizuka, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Mechanical properties of Pt atomic chain measured by TEM combined with a frequency-modulation force sensing system
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会、9月18-21日、北海道大学、札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gada He, Yoshifumi Oshima, and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 In-situ scanning electron microscopy observation of lead dendrites grown in an electrochemical cell
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会、9月18-21日、北海道大学、札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Islam Mohammad Razzakul and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Evaluation of the thickness of mechanically exfoliated mica nanosheets affixed on Si substrates by scanning Auger electron spectroscopy
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会、9月18-21日、北海道大学、札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 He Gada, 大島 義文、富取 正彦
2. 発表標題 In-situ scanning electron microscopy observation of electrode-electrolyte interfaces in an electrochemical cell
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会、10月28日-30日、つくば国際会議場、つくば
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang、小堀 雄稀、石塚 慧介、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 Mechanical properties of Pt atomic chain measured by TEM combined with a frequency-modulation force sensing system
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会、10月28日-30日、つくば国際会議場、つくば
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石塚 慧介、小堀 雄稀、見寺 悠伽、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 FM-AFM/TEM 同時測定による Au ナノ接点の力学・構造評価
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会、10月28日-30日、つくば国際会議場、つくば
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 見寺 悠伽、石塚 慧介、大島 義文、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 大気中における金ナノ接点の力学特性と電気伝導特性の相関関係
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会、10月28日-30日、つくば国際会議場、つくば
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shikichi, J.-I. Iwata, M. Tomitori, A. Oshiyama, and T. Arai
2. 発表標題 Energy dissipation due to displacement of a Si adatom on Si(111)-(7×7) with noncontact atomic force microscopy
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 5-7 Dec., Laforet Shuzenji, Shizuoka (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Islam Mohammad Razzakul and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Evaluation of the thickness of exfoliated artificially-synthesized mica nanosheets affixed on silicon substrates and correlations with current-voltage characteristics
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 5-7 Dec., Laforet Shuzenji, Shizuoka (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Kinoshita and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Fabrication and evaluation of single-atom tips for scanning probe microscopy by heat treatment under high electric field
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 5-7 Dec., Laforet Shuzenji, Shizuoka (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiaqi Zhang, Keisuke Ishizuka, Masahiko Tomitori, Toyoko Arai, and Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Mechanical properties of Pt-Pt bond in an atomic chain measured by TEM combined with a frequency-modulation force sensing system
3. 学会等名 第67回応用物理額春季学術講演会、3月12日-15日、上智大学四谷キャンパス、東京（紙上開催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木下 博貴、富取 正彦
2. 発表標題 高電界下での加熱処理による走査型プローブ顕微鏡のための単原子終端探針の作製と評価
3. 学会等名 第67回応用物理額春季学術講演会、3月12日-15日、上智大学四谷キャンパス、東京（紙上開催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Islam Mohammad Razzakul and Masahiko Tomitori
2. 発表標題 Conventional exfoliation method using a hand roller for artificially-synthesized mica nanosheets with a single layer and multi-layers in wide-area and their characterization
3. 学会等名 第67回応用物理額春季学術講演会、3月12日-15日、上智大学四谷キャンパス、東京（紙上開催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ishizuka, T. Murakami, Y. Kobori, M. Tomitori, T. Arai, Y. Oshima
2. 発表標題 Young's modulus of single-nano-scale gold nanowire estimated by TEM-AFM
3. 学会等名 19th International Microscopy Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Arai, D. Kura, R. Inamura, M. Tomitori
2. 発表標題 Surface resistivity change detected by non-contact atomic force microscopy through Joule heat energy dissipation
3. 学会等名 21th International Conference on non-contact atomic force microscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藏 大輝、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 非接触AFMによるジュール熱散逸計測から評価したGe/Si(111)-(7x7)表面の表面抵抗
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋期学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 見寺 悠伽、村上 拓、橋本 遼太、石塚 慧介、大島 義文、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 FM-AFMを利用した金ナノ接点の電気伝導と力学特性の相関解析
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋期学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nogami, A. Fleurence, Y. Y.-Takamura, M. Tomitori
2. 発表標題 Nanomechanical responses of epitaxial silicone on ZrB ₂ (0001) examined by non-contact atomic force microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. He, Y. Oshima, M. Tomitori
2. 発表標題 In-situ scanning electron microscopy observation of electro-plating and stripping of lead dendrites in an electrochemical cell
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. M. Razzakul, M. Tomitori
2. 発表標題 High-temperature treatments of two-dimensional flakes of phlogopite mica on silicon substrates evaluated by atomic force microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ishizuka, T. Murakami, Y. Kobori, M. Tomitori, T. Arai, Y. Oshima
2. 発表標題 Estimation of Young's modulus of Au nanowire by TEM combined with AFM
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Mitera, T. Murakami, R. Hashimoto, K. Ishizuka, Y. Oshima, M. Tomitori, T. Arai
2. 発表標題 Measurements of electronic conductance and mechanical properties of gold point contacts based on frequency modulation atomic force microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Kura, M. Tomitori, T. Arai
2. 発表標題 Surface resistance change of Ge islands grown on Si(111)-(7x7) evaluated by Joule heat energy dissipation in non-contact atomic force microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小堀 雄稀、石塚 慧介、見寺 悠伽、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 長辺振動水晶振動子を組み込んだTEMによるAuナノワイヤの特異的力学特性の観察
3. 学会等名 日本表面真空学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 見寺 悠伽、石塚 敬介、小堀 雄稀、大島 義文、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 周波数変調原子間力顕微鏡を用いたナノ接点の力学特性測定の研究
3. 学会等名 日本表面真空学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 見寺 悠伽、村上 拓、石塚 敬介、大島 義文、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 FM-AFMを利用した金ナノ接点の電気伝導度とバネ定数の相関か遺跡
3. 学会等名 日本物理学会 北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tomitori
2. 発表標題 Advanced material Science and atomic scale observations
3. 学会等名 14th Arab Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. He, Y. Oshima, M. Tomitori
2. 発表標題 Electro-plating and stripping of lead dendrites observed by operandi scanning electron microscopy with an electrochemical cell
3. 学会等名 第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石塚 慧介、小堀 雄稀、見寺 悠伽、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 サブ10nmスケールにおける金ナノ接点の定量的弾性評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小堀 雄稀、石塚 慧介、見寺 悠伽、富取 正彦、新井 豊子、大島 義文
2. 発表標題 TEM-周波数変調法を用いたAuナノワイヤのヤング率方位依存性の測定
3. 学会等名 第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藏 大輝、辻 繁樹、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 nc-AFMで取得したエネルギー散逸像によるSi/Geの識別
3. 学会等名 第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山 天悟、笈田 浩平、藏 大輝、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 金属探針を用いた非接触原子間力顕微鏡による試料表面抵抗測定
3. 学会等名 第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笈田 浩平、丸山 天悟、富取 正彦、新井 豊子
2. 発表標題 炎エッチングによるnc-AFM/STM用金属探針の作製と評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019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	新井 豊子 (Arai Toyoko) (20250235)	金沢大学・数物科学系・教授 (13301)	
研究 分担者	大島 義文 (Oshima Yoshifumi) (80272699)	北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授 (13302)	

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