

### 3.1 表面多機能ナノプローブ法の開発とナノ物質・材料への応用

先端プローブ顕微鏡グループ 藤田 大介

#### 1. 研究背景

物質は原子から構成されており、その構造や物性は原子レベルでの配列(構造)と化学結合の様式に起因している。物質のなかで有用な機能を有するものは材料と呼ばれる。物質・材料研究とは物質を原子レベルで理解し、その物性を探索することから始まって、組織を制御し、形態を加工することにより有用な機能を発現する材料を創製することである。このような物質・材料の研究を効果的に推進するためには、“ナノ創製技術”とともにナノメートルスケールでの構造と物性を解析する技術(“ナノ計測技術”)が研究基盤として重要な役割を果たしている。一方、情報通信分野などの先端産業、例えば半導体集積回路などのエレクトロニクスデバイスやハードディスクなどの磁気デバイスのサイズは二桁ナノ(数十ナノメートル)へ到達し、将来的には一桁ナノ(数ナノメートル)のスケールでの加工が求められている。このような先端的なナノスケール素子の研究開発においてもナノ創製技術とともにナノ計測技術が基盤として重要な役割を果たしている。このようにナノテクノロジー・材料分野のR&Dを推進するキーテクノロジーとして、“ナノ計測技術”には一層の高度化が望まれている。

ナノスケールの計測としては大別して表面ナノ計測とバルクナノ計測に分けられる。当グループは微小なプローブ(ナノプローブ)を表面に存在する微小対象と直接的に相互作用させて構造や機能を解析する手法である“表面ナノプローブ技術”の研究と応用を担当する。表面ナノプローブテクノロジーは走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用いた計測技術であり、他の計測手法と異なる特徴としては、ナノ創製とナノ計測の両方の研究基盤として重要な役割を果たしていることである。例えば、ナノプローブ技術は構造や機能を計測する手法であると同時に対象をナノスケールで加工・創製・操作する手法としても用いられる。

一方、従来からナノ構造材料の評価は“材料を創製する環境”あるいは“機能が発現する環境”とは異なる計測装置の“計測に最適な環境”で行われるのが通常であった。このような環境場を制御した計測技術は“その場計測技術”として開発されてきており、SPMヘッドのコンパクト性から表面ナノプローブ技術は多様な環境に適合させるうえで優れている。先端的なナノスケール部材の研究開発においては“ジャンプアップ的なイノベーション”が望まれており、ナノ計測と創製技術とに環境場の制御を通じて連携や融合が求められている。

ナノメートルスケールで材料を開発する立場からの要請としては、上記のように、創製技術と計測・評価技術の融合、機能発現環境や物性探索環境での計測・解析が求められる。さらに、表面の構造のみならず多様な物性と機能を計測することが求められており、計測機能の多元化(多機能性)が要請されている。第3の要請である“計測機能の多元化”とは、材料の機能や物性を特徴付ける多面的な情報を同一ナノ構造体から計測(多機能ナノ計測)することである。このようなナノテク・材料研究の立場からの要請を実現するナノ計測技術として“制御された環境(場)における表面多機能ナノプローブ技術”の開発を推進している[1]。このような環境場制御ナノプローブ技術では、材料の創製環境や使用環境に近い環境もしくは興味ある物性が発現する環境を“アクティブ操作”として計測スペースに付加しながらナノ計測もしくはナノ加工を行うものである。これによりナノ物質材料の機能発現や創製メカニズムを明らかにすることを目指している(図1参照)。

また、ナノ計測技術の機能を高度化するのみならず、再現性や定量性の面での性能を高める努力も必要である。ナノテクノロジーやナノマテリアルが実際に一般社会へ受容されるためには、それらにより生み出された製品(products)としての流通が不可欠である。そのためにはナノマテリアルの計測と評価に関する国際的な標準化の確立が望まれる。表面ナノプローブ技術の定量性を高め、信頼性のある計測技術とするための研究は中長期的に取り組む必要があり、ナノテク・材料研究の中心的機関の一つであるNIMSが先導することが望まれる。当グループではナノプローブテクノロジーの定量化に関わる研究をナノ計測技術の基盤を固める上で重要と考えている[2]。

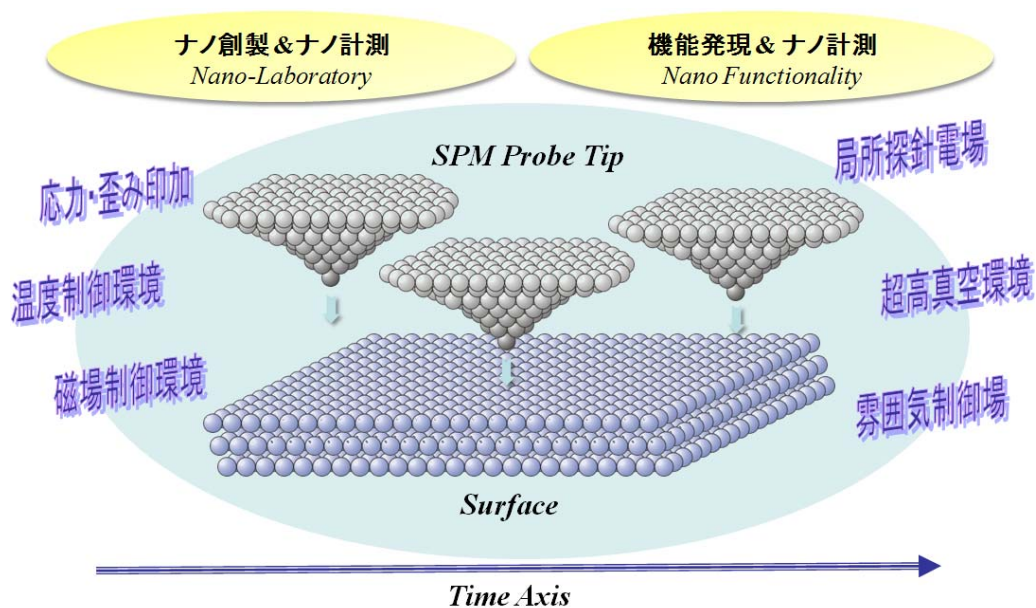


図1. ナノテクノロジーの基盤技術となるべき環境場を制御した表面ナノプローブ計測技術の提案。ナノ創製とナノ計測の融合、機能発現のためのナノ計測が重要。材料の創製環境、機能発現環境における高分解能・多機能ナノ解析を目指す。

## 2. 研究目的

NIMSの重要なタスクの一つは、ナノテクノロジーを活用した先端物質・材料の研究である。ナノスケールの構造を有する新しい材料(ナノマテリアル)を創製し、ナノスケールのサイズに起因する新しい機能を探索する目的に則した表面ナノプローブ計測技術の確立が求められている。このような観点から、“多様な環境場操作と融合した表面多機能ナノプローブ計測技術の開発”とその物質・材料研究への応用を主要な研究目的とする。ナノ創製技術と融合したナノ解析、外場からの刺激と応答によるナノ構造の制御、多様な環境場におけるナノ機能の探索などをターゲットとする。さらに表面ナノプローブ計測手法の普及と発展を図るため、再現性や信頼性のある定量的計測法の確立することならびに計測手法の標準化を先導することは重要なミッションである。

このミッションを実現するために、“制御された多様な環境場”において多元的計測が可能な走査型プローブ顕微鏡技術を開発することが重要である。求められる計測機能としては、原子スケールでの表面構造や局所状態密度などの実空間計測が第一に必要である。さらに、対象となる表面ナノ構造体の3次元形状(寸法)を定量的にイメージング計測することが求められる。計測すべき材料特性としては、構造、形状寸法、局所状態密度のみならず、原子レベルでのスピン状態、発光特性、電気伝導特性などを実現することが重要である。これらの多様な計測機能を融合しつつ、制御された極限的な環境場(超高真空場、応力場、照射場、温度可変場、電場、磁場など)を計測空間に複合付加できる技術を開発する。このような装置・測定手法の開発とナノマテリアルへの応用により、物質・材料研究に資する表面ナノプローブ法の実現を目指す。

## 3. 研究の計画

本サブテーマにおいては、多様な環境(高温、低温、磁場、真空、応力/歪み場など)において、表面ナノ構造体の創製メカニズムやナノ物性を高分解能で計測できる走査型プローブ顕微鏡を中心とした表面多機能ナノプローブ技術を開発する。3次元形状、表面の原子構造、局所状態密度、光学的特性、磁気的特性などの多元的な表面ナノ機能と物性の計測を実現することを目指す。さらにナノプローブを用いたアクティブ操作による表面ナノ創製技術の開発を行う。さらに、このような表面多機能ナノプローブ技術を興味ある物質・材料の研究へ応用する。また、ナノプローブ計測技術の定量化と標準化のための基盤的な研究を継続的に推進する。

主として、多角的な表面ナノプローブ技術の高度化、ならびに 制御された環境場における表面ナノプローブ技術の高度化、に関する研究を重点的な研究開発項目としている。並行して、社会的ニーズへの対応を図る基盤的研究として 表面ナノプローブ計測法の定量化と標準化の整備を促進したい。前半3年間において に関する基盤要素技術の開発を推進し、プロジェクト後半においては、要素技術の統合により、多様な環境における表面ナノプローブ計測を実現する装置と手法の開発を行う予定である。

#### 4. 平成 19 年度の成果

平成19年度は、多様な環境場における多角的な表面ナノプローブ計測技術の開発を行うと共に、先端的なナノ物質・材料の機能・物性ならびに構造に関する研究への表面ナノプローブ法の応用を積極的に展開した。センター内のグループ間、NIMS内の他のユニット、さらに外部研究機関との共同研究等により、金属、半導体、フラーレン、CNT、ナノカーボン、グラフェン、量子ドット、金ナノ粒子などの多様なナノ物質材料への応用を行った。

##### (1)電子状態 + スピン状態計測の要素技術開発

固体表面ナノ構造の電子状態を原子分解能で計測するための精密走査型トンネル分光法(STS)の基盤要素技術の開発を引き続き行い、様々な材料への応用を行った。主に液体窒素温度( $\sim 77\text{K}$ )近傍での超高真空環境を用いて精密な原子分解能STS計測技術の向上を行っており、その有用性をいくつかの興味ある表面ナノ構造に対して実証している。例えば、半導体産業における基盤材料であるSi(001)ウェハー表面では、その電気伝導性を担うキャリアはドーパントにより生み出されている。半導体素子(CMOS FET)の微細化が進むにつれ、1個のFETのゲート長は既にナノスケールに到達している。伝導パスに存在するドーパントの分布やその周囲の電子状態を詳細に知ることは次世代ナノエレクトロニクス素子の開発にとって重要な知見となる。このような観点からSi(001)表層に存在するドーパントならびにその周囲の電子状態を低温精密STSイメージング計測により原子分解能で明らかにする研究を行っている。また、低温STMによる原子スケールでのナノスケール構造創製技術を利用してSi(001)ダイマー列上に作製された人工一次元量子井戸構造に閉じ込められた電子状態を明らかにするために[3]、詳細なSTSイメージング計測によるエネルギー毎の詳細なLDOSの分布を報告した[4]。図2のSTMトポグラフィ像ならびにエネルギー毎のSTS像(LDOS像)に示されるように、2つの原子(タングステン)ドットにより挟まれたダイマー列内において電子波は1次元内に閉じ込められていることが分かる。その詳細な解析から閉じ込めポテンシャルの形状や1次元電子波の有効質量に関する有用な情報を得ることができる。

また、従来困難であったワイドギャップ半導体や絶縁体膜のイメージングを可能にする計測法として電界放射領域でのSTM計測の可能性を探り、Si(111)表面において電界放射領域での原子分解能計測を達成した。電界放射領域における低温STM計測からSi(111)表面におけるadatom原子の移動現象を明らかにし、新しい電子状態形成のための単原子操作法であることを実証した[5]。

一方、スピンに関する電子状態を明らかにするために、スピン偏極電子のSTSイメージング計測のための基盤要素技術の開発を行っている。例えば、強磁性超薄膜被覆STM探針の作成のための超高真空探針蒸着機構の整備を行い、表面スピン状態を敏感に計測可能な探針作製条件の最適化を試みている。また、スピン偏極計測を行う対象としての磁性表面ナノ構造を作製するためには、その基板となる高融点金属単結晶表面の清浄化が不可欠であることから、超高真空電子ビーム試料加熱機構の改造を行い、 $\sim 2000$  までの高温試料加熱による高融点金属表面の清浄化を可能にした。

##### (2)トンネル誘起光子計測の要素技術の開発

超高真空かつ温度可変環境においてSTM探針より試料表面に注入されるトンネルキャリア(電子・正孔)により誘起されたフォトン単一光子計数かつ高空間分解能でフォトンマッピングするための要素技術の開発ならびに材料への応用研究を行っている。19年度は、計測対象としては劈開GaAs(110)表面におけるキャリア再結合発光現象のトンネル誘起発光(TL: Tunneling Electron Induced Luminescence)計測を中心

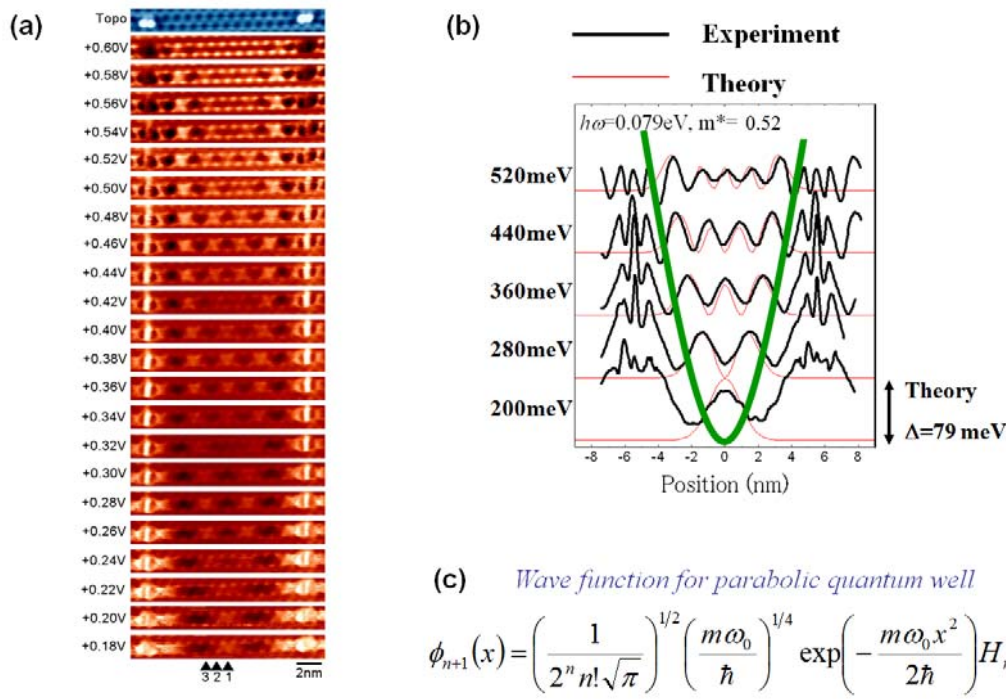


図2. (a)低温STMによりSi(001)表面上の1本のダイマー列上に作製された人工一次元閉じ込め構造のSTMトポグラフィイー像ならびに局所状態密度に対応するエネルギー毎のSTSイメージ。(b)各々の量子化状態に対応するLDOSプロファイルと一次元調和振動子モデルとの比較。(c)一次元放物線ポテンシャルに閉じ込められた一次元波動関数の表式。

に行った[6,7]。フォトン検出探針の改良を目指して、直流マグネトロンスパッタ法によるPt薄膜被覆を施した光ファイバー導電性透明プローブを試作し、導電性と光透過性能を両立するように膜厚を制御した。安定かつ高空間分解能のトンネル発光イメージングを実現するために試みたものである。n型ならびにp型のGaAs(110)表面におけるキャリア再結合発光現象のルミネッセンス計測を行い、Pt薄膜被覆探針による発光特性は十分であることを確認した。また、Si(111)-(7×7)表面のSTMイメージング特性はPt薄膜被覆により安定化していることが判明し、探針長寿命化を助長する保護被膜として期待できる。

応用面では、超高速現象計測グループとの共同研究として、金ナノ粒子のトンネル誘起発光現象の計測を目指した技術開発を進めた。グラファイト基底面(HOPG)へ分散された金ナノ粒子のAFM/STMならびにFE-SAMによるキャラクタリゼーションを行った。ナノスケールのメタルナノ構造からのSTM発光は探針誘起プラズモン発光と考えられ、ITO探針もしくはPt被覆探針では量子効率には十分ではない。さらに量子効率を向上させるために探針表面へプラズモン発光効率の高い金属薄膜被覆を試みる。

### (3) ナノ創製とナノ計測の融合技術の開発

ナノ創製とナノ計測の連携と融合を実現するために、超高真空環境における温度可変(高温場)環境における表面ナノ構造の創製過程の時空間計測技術ならびにボトムアップ型ナノ創成(ナノ構造創製+ナノ構造制御)技術の開発を行った。超高真空における温度可変型SPM計測は、高温環境でのナノ創製、例えば、金属蒸着原子による表面再構成構造の創製、シリコン酸化薄膜の還元過程、表面析出カーボンによるナノ構造の創製、などのナノ材料の創製メカニズムに関わる情報を得るうえで有効である。特に半導体産業において重要な絶縁性薄膜であるシリコン酸化膜の高温分解過程に関する情報は重要であり、時空間その場観測には、温度可変環境における非接触原子間力顕微鏡(NCAFM計測)ならびにSTM計測の併用技術が効果的である。以下、研究成果の代表例を示す。

### 【高温場環境におけるSiO<sub>2</sub>薄膜分解昇華過程その場計測】

Si(111)表面に存在する数ナノメートル未満の自然酸化膜(SiO<sub>2</sub>薄膜)は通常1300~1400K程度までの高温フラッシュにより昇華され、清浄再構成表面である(7×7)表面を形成する。SiO<sub>2</sub>薄膜は超高真空環境においては高温保持により熱分解されることから、酸化雰囲気中でのシリコン酸化膜の成長はSiO<sub>2</sub>薄膜の分解過程と酸化過程の競合プロセスであると考えられる。SiO<sub>2</sub>薄膜が熱的にどの程度安定であるかを知ることは極薄シリコン酸化膜形成過程やSOIにおける酸化膜清浄化過程を理解するうえで有意義である。このような観点から高温保持状態でのSiO<sub>2</sub>薄膜/Si(111)試料のNC-AFM/STM計測を試みた。SiO<sub>2</sub>薄膜は絶縁体であり、一般にSTM計測は不可能であるため、導電性探針を用いたNC-AFMによる電流同時計測を行い、導電性が確認された段階、すなわち清浄表面が露出し始めた段階でSTM計測を行った。図3に清浄(7×7)表面露出段階におけるNC-AFMトポ像ならびに電流像を示す。中央部分に出現した三回対称性を有する凹部はSiO<sub>2</sub>薄膜が還元分解されて生じた清浄Si(111)ドメインである。トポ像では判断が困難な~nmスケールの微小な清浄表面ドメインも電流像からは容易に判別できる。また、STM原子分解能イメージングから凹部の内表面では(7×7)再構成表面が形成されていることが明らかになった。興味深い知見としては清浄化表面の中央部分に微結晶が析出成長すると同時に清浄面のエッチングが進行することである。SiO<sub>2</sub>薄膜が表層を覆っている段階では、反応式 $\text{Si} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{SiO}$ に従って表面からSiOが昇華するものと考えられる[8]。(7×7)表面が露出すると清浄表面上のSi原子がより移動しやすいため、清浄面のSiが優先的にエッチングされ、余剰となったSi原子が再結合、核形成することにより、ナノ突起状に成長するものと考えられる。このナノ突起構造は導電性であり、オージェ計測からSiのみしか検出されないことから、Siによるものと判断できる。このような余剰Siは時間経過とともに成長し、表面から酸化膜が除去されるとともにラフニングが進行する。高温その場NC-AFM計測技術は、SOIウェハー酸化膜還元分解過程やHigh-K薄膜の温度可変高温場における安定性評価への応用が期待できる。

## UHV High Temperature NC-AFM/STM Study on Decomposition of SiO<sub>2</sub> on Si(111) at 950 K

After 48 hrs

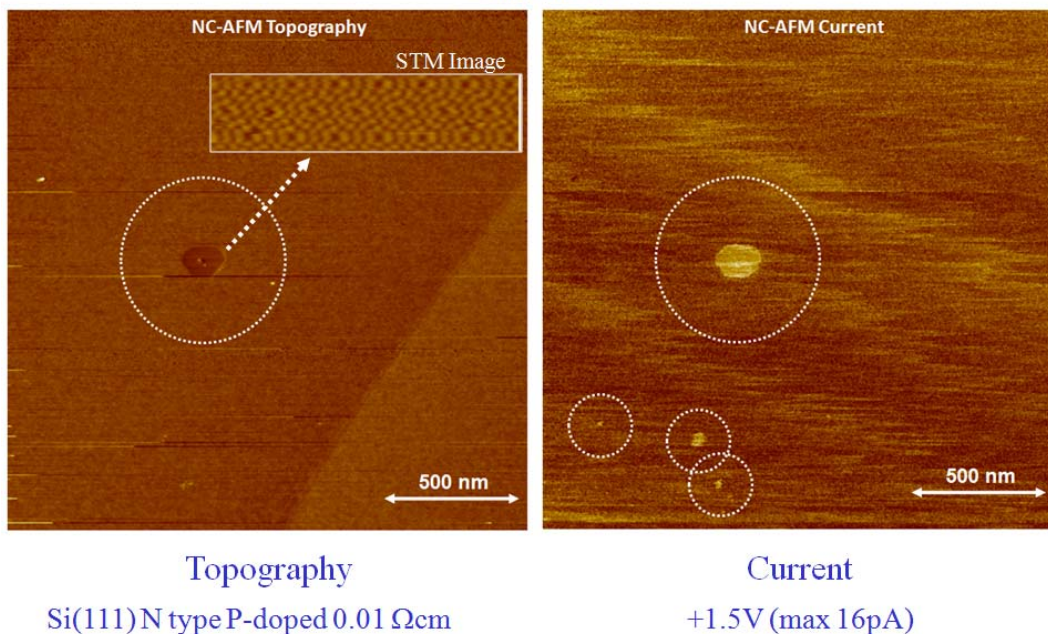


図3. (a)超高真空中~950Kに保持(2days)したSiO<sub>2</sub>薄膜/Si(111)試料表面のNC-AFMトポグラフィー像。(b)同時計測された電流像。SiO<sub>2</sub>薄膜が還元分解されSi(111)清浄表面が露出したことが電流像から判明。

#### (4)複合極限場 SPM 計測技術の開発

本プロジェクトでは超高真空場 + 極低温場 + 可変高磁場を複合させた極限場STM/STS計測システムの開発を目指している。これまでに、可変高磁場環境(0 ~ 11T)、超高真空環境( $P \sim 10^{-9}$ Pa)、極低温環境(0.5K ~ 77K)における原子分解能STM/STS計測のための基盤要素技術の開発を行ってきた。既存の複合極限場UHV-STM/STS装置に比較して、さらに高磁場環境でのUHV-STM装置の開発を目指している。19年度は、高磁場発生マグネットを整備するとともに、試料表面清浄化処理、半導体表面の水素終端処理、探針表面への超薄膜成膜処理などの表面ナノ構造の観察を可能にするための試料準備室の改造と整備を引き続き行った。これらの整備と改造により、表面ナノ構造における低次元性電子波の引き起こす新たな機能の探索や“スピン偏極電子状態”の高磁場環境における高分解能計測を可能にすることを目指している。実際の系への応用としては、FCC貴金属(Cu)や合金(Cu-Al)の最密(111)表面における表面2次元電子状態の定在波、2次元バンドマッピング、表面超構造による電子状態の変化などを行った。また、スピン偏極STSの実現に向けて、強磁性薄膜被覆探針の作製技術ならびに反強磁性Cr(100)表面の清浄化技術の確立を進め、スピン偏極イメージングに関する予備的実験を行った。反強磁性によるテラス毎のスピン方向の反転に対応したSTSイメージング計測に成功した。

#### (5)応力場 SPM 計測技術の開発

“制御された環境場における表面ナノプローブ技術の高度化”の一つとして、超高真空場 + 温度可変高温場 + 応力・歪み場を複合させたSTM/AFM計測技術を実現するための基盤要素技術の開発を行った。19年度は、応力場印加状態における非接触原子間力顕微鏡(NC-AFM)イメージングの高度化、特に、周波数変調方式による原子分解能NC-AFMイメージングを可能にする計測基盤技術の開発を行った。また、Si(100)表面などの応力場誘起による表面ナノ構造変化の詳細について報告を行った[9]。

応力場印加としては、短冊状試料に対して楔形ジグ(石英製)にて上方変位を与えることにより実現し、一軸引張り応力(歪)を試料表面に発生させることができる(図4(a)(b))。試料温度制御により、弾性的な歪を与えることができる。応力場UHV-SPMは独立制御電源を有する2探針STM/AFMである(図4(c)(d))。STMモードでの原子分解能イメージングは実現されていたが、応力場SPMにおけるNC-AFMモードでの高分解能計測は未だ実現されていなかった。19年度は周波数変調(FM)検出法によるNC-AFMを実現するためのカンチレバーホルダーの改良ならびに制御系の整備を行った。実際にSi(111)清浄表面においてステップとテラス構造を明瞭にイメージングすることができ(図4(e))、さらにカンチレバー探針の状態の最適化により、Si(111)表面の(7×7)超構造の原子分解能イメージングに成功した(図4(f))。

応力印加状態における応用としては、19年度は、従来から研究されている“Si(001)表面構造における一軸性引張り応力の効果”を応力場STMによる実空間計測データから詳細に検討し、国際会議ならびに学術論文として報告した[9]。

Si(001)表面は、初期の清浄化後ではダブルドメイン構造を示す(図5(a))。二つの直交するドメイン((1×2)と(2×1)相)が同等の確率で表面に発現する。このようなダブルドメイン構造を有する表面に対して、一方の相のダイマー列方向に沿って一軸性の引張り応力を印加することにより、特定相を不安定化させることができる。ダイマー列方向と直交する方向への引張り応力はダイマー間のボンド距離を大きくさせる方向であり、対応する相である(2×1)相を不安定化させるものと考えられる。実際、応力印加により、ダブルドメイン構造からシングルドメイン((1×2)相)的に変化することを原子分解能STM観察により検証した(図5(b))。さらに、外部応力/歪み場によって表面ナノ構造が変化する物質系を探索し、応力場誘起表面構造変化のメカニズムの解明を試みるとともに、歪み場による電子状態の変化の計測に対しても対応できるように、STS測定に適した探針の開発や制御系の改良を進める予定である。

#### (6)表面ナノプローブ計測法の定量化と標準化 / 知的基盤の整備

走査型プローブ顕微鏡法の標準化を先導するために、校正、使用方法、定量化に関する基盤要素技術の開発を行った。19年度は、AFMを用いてナノマテリアルの三次元形状を定量的に計測するための基盤

### 応力/歪場2探針UHV-SPM

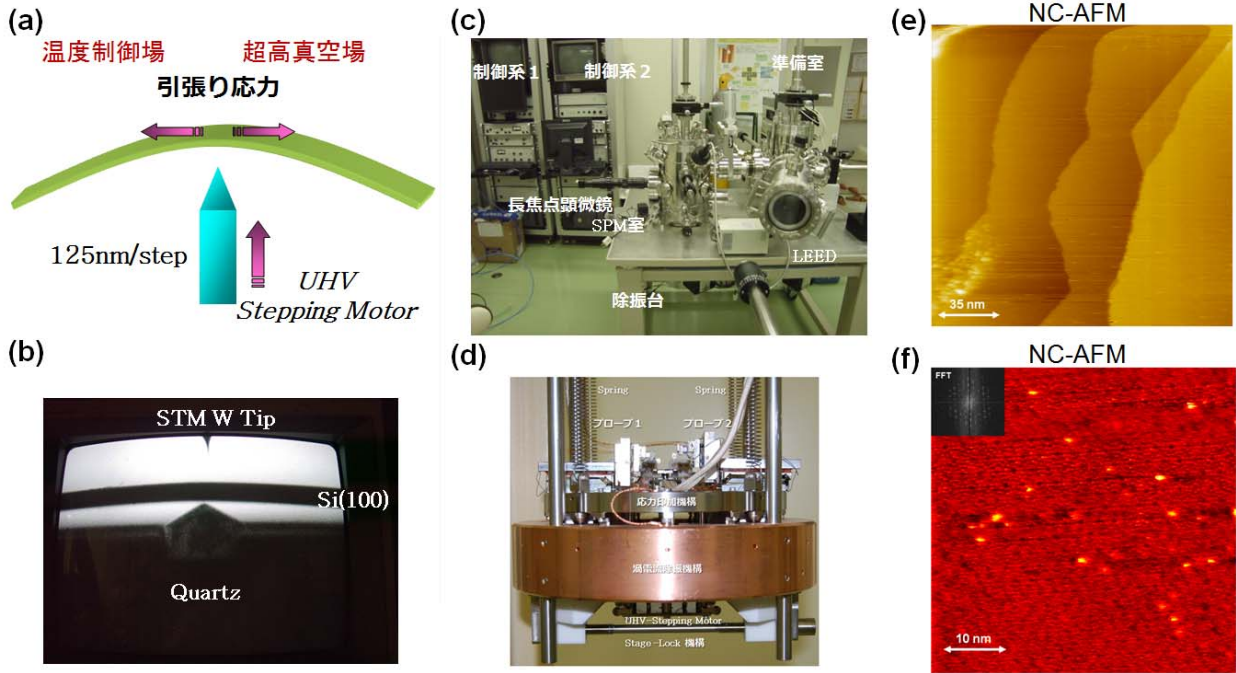


図4. 応力/歪み場環境におけるUHV-SPMの開発。(a)外部から一軸性の引張り応力を試料表面上に印加するメカニズム。(b)くさび形構造の一軸応力印加用ジグによりSi(001)短冊試料に引張り応力を印加している状態。(c)応力印加2探針UHV-SPMの全体写真。(d)応力印加2探針UHV-SPMヘッドの写真。(e)Si(111)表面のNC-AFM像。テラス/ステップ構造を明瞭に可視化。(f) Si(111)-(7×7)表面の周波数変調方式NC-AFM像。原子分解能イメージングを実現。

### Si(100) 微斜面の応力場印加STM計測

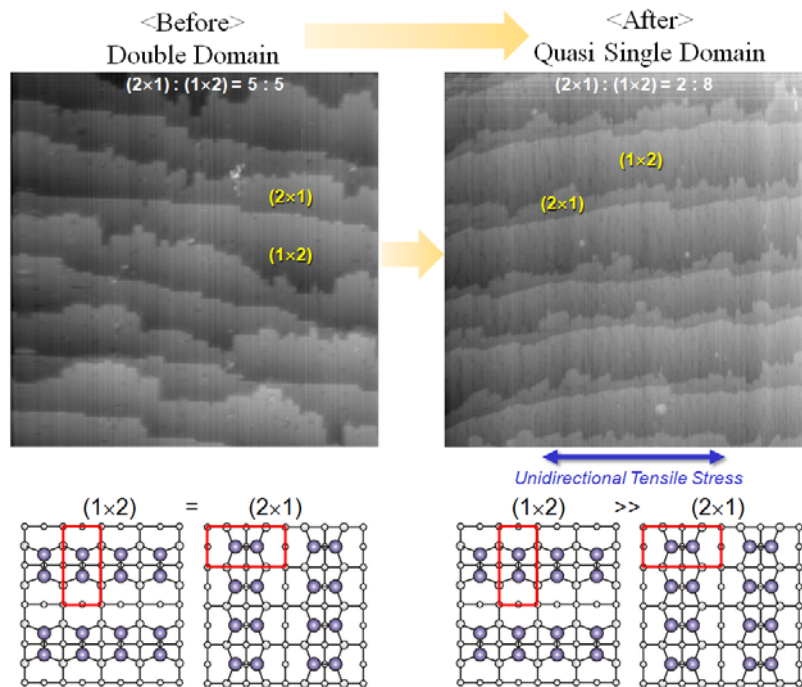


図5. 応力場STMによるSi(001)表面における表面ナノ構造制御の実例。(左)Si(001)清浄表面のSTM像。(1×2)相と(2×1)相のダブルドメイン構造。(右)一軸性引張り応力印加後のSTM像。(1×2)相が優勢な擬シングルドメインへ構造変化。

## AFM画像補正用アルゴリズムの設計

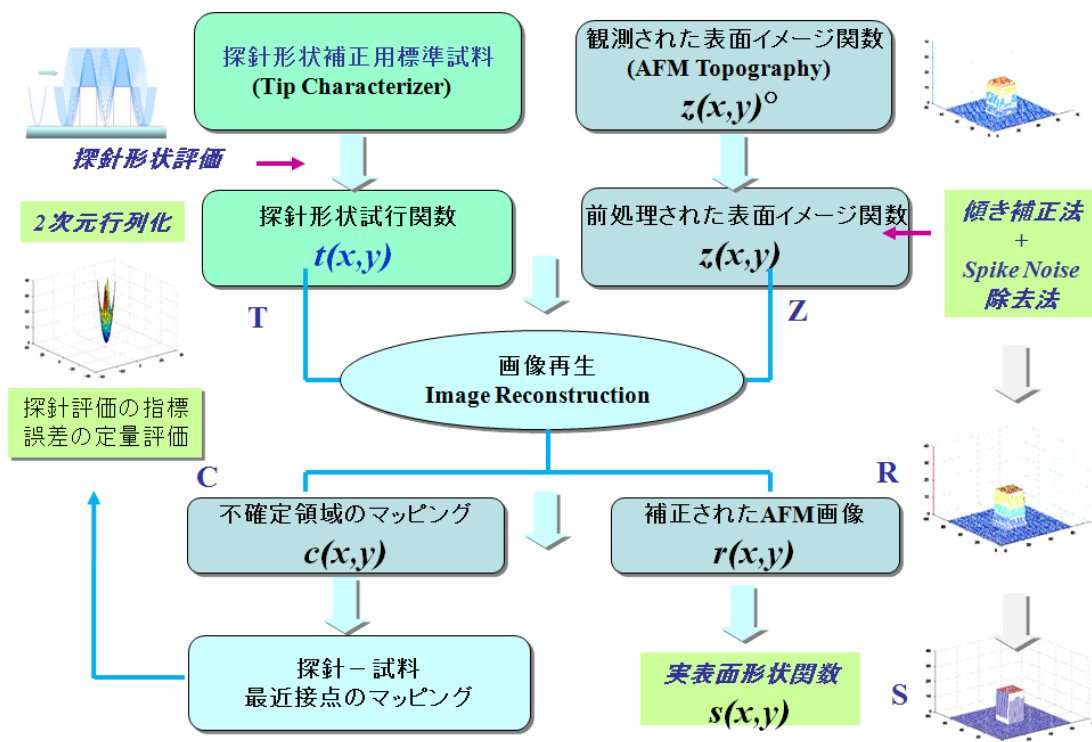


図6. 実測された探針形状関数を用いたAFM画像の再構成アルゴリズム。

要素技術として、最適なプローブ形状測定手順ならびに探針形状関数に基づく画像再構成プログラムを試作し、様々なナノ材料に応用した。実測された探針形状関数に基づいてAFM測定画像を再構成するためのプロトコルを図6に示す。

この補正法は探針形状関数のAFM計測評価に基づいているため、任意性のあるパラメータはなく、一意的に補正画像が得られる。既に半導体微細加工による3次元ナノトレンチ構造、ポーラスアルミナのナノポア構造、球形ナノ粒子、フラレンナノウィスカーなどの定量的な3次元形状計測へ応用している。また、探針形状の評価に適した参照試料の探索を行っており、19年度には標準球形ナノ粒子により探針3次元形状を抽出可能であることを示した[10]。このように、探針形状評価に基づいてAFM測定画像を補正するためのプロトコルを標準手法として確立することにより、AFMのみならず一般のSPMトポグラフィ計測を“より正確に”補正できることが期待される。

### 5. 今後の方針

平成20年度は、19年度に引き続き“多様な環境場における多元的な表面ナノプローブ計測技術”の開発として、図7に示す研究開発ロードマップに従って、以下の研究開発項目を行う。センター内での連携ならびに外部グループとの共同により先端的なナノ物質・材料研究への応用研究を実施する。応用すべき物質・材料としては、金属表面および合金表面の低次元電子系、半導体表面超構造、セラミックス(酸化物)等の無機材料の表面ナノ構造のみならず、フラレンナノウィスカー、カーボンナノワイヤ、グラフェン、有機分子薄膜などのナノ材料を対象とする予定である。さらに、表面ナノプローブ計測法の定量化に必要な基盤要素技術の開発、参照物質の探索、標準的な手法の普及を推進する。

#### 【多元的な表面ナノプローブ技術の高度化】

(1)電子状態+スピン状態計測の要素技術開発：表面ナノ構造のスピン・電子状態を原子分解能で計測する



ための基盤要素技術の開発を行う。特に、超高真空環境におけるスピン偏極探針のその場作成技術を確認し、低温かつ超高真空環境での表面磁性ナノ構造のスピン偏極STM/STS計測を行う。

- (2)トンネル誘起光子計測の要素技術開発：トンネル電子誘起ルミネッセンス / STM同時計測における空間分解能ならびにイメージング安定性を向上させるための金属超薄膜被覆プローブの試作を行うとともに、半導体ならびに金属ナノ粒子等のナノマテリアルへの応用を行う。
- (3)ナノ創成とナノ計測の融合技術の開発：温度可変場と組み合わせたSTM/AFM表面ナノ構造創製技術の開発を行い、半導体表面における酸化膜還元による清浄化過程のその場解析、金属原子や超分子蒸着による新規性低次元ナノ構造体創成への応用を行う。また、Si(111)再構成表面の7×7超構造におけるadatom位置操作による表面ナノ状態制御に関する基礎的知見の集積を行い、メカニズムの解明を目指す。

【制御された環境場における表面ナノプローブ技術の高度化】

- (1)複合極限場STM計測技術の開発：高磁場・極低温・超高真空の複合された極限場として世界トップ水準の可変高磁場(～16T)の環境を実現するため、新たな超高真空チャンバーならびに架台システムの整備を行うとともに、安定した原子分解能計測に必要な基盤要素技術の開発を行う。
- (2)応力場SPM計測技術の開発：応力場・超高真空・高温環境における原子間力顕微鏡(AFM)計測の高分解能化を目指した基盤要素技術の開発研究を行うとともに、新たな応力場誘起表面ナノ構造変化を生じる系へ応用する。また、応力・歪み場が印加された表面における電子状態の変化を計測可能なSTS計測技術の確立を目指す。

【表面ナノプローブ計測法の定量化と標準化 / 知的基盤の整備】

- (1)SPM計測の定量化：SPM探針先端形状の精密3次元計測プロトコルならびにSPMトポグラフィーに及ぼす探針形状効果の定量的な補正を可能にする実用的なソフトウェアを開発する。それ以外のアーティファクトである走査速度やゲインの最適化などの使用方法に関わる定量化のための基盤要素技術の開発を進める。
- (2)SPM法の高度化：カンチレバーを応用した高感度応力・吸着センサーに関する開発を行う。

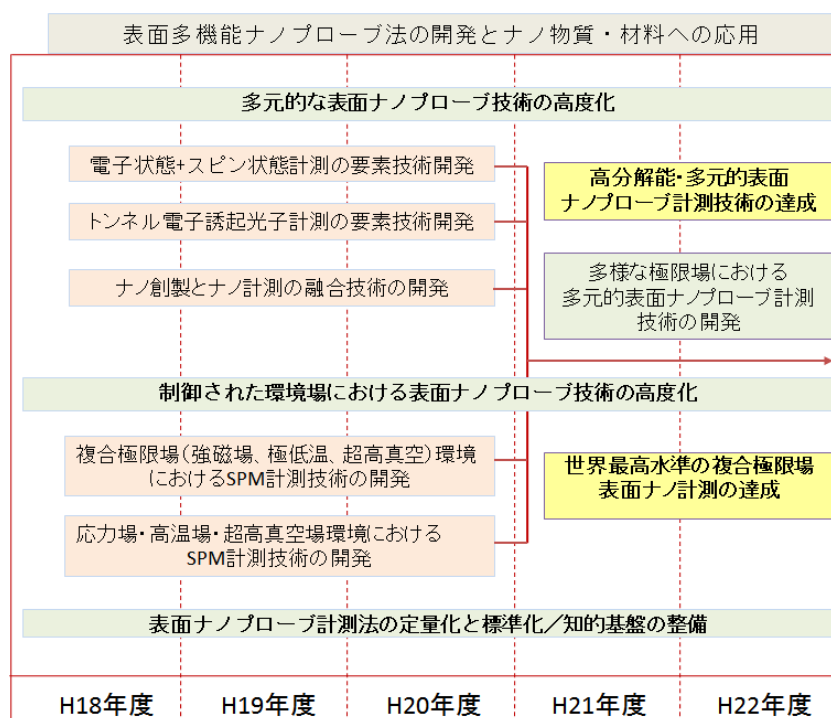


図7. 「表面多機能ナノプローブ法の開発とナノ物質・材料への応用」研究開発ロードマップ。

## 参考文献

- [ 1 ]D. Fujita and K. Sagisaka, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 9, 013003, (2008)
- [ 2 ]D. Fujita, H. Itoh, S. Ichimura and T. Kurosawa, *Nanotechnology*, 18, 084002, (2007)
- [ 3 ]K. Sagisaka and D. Fujita, *Applied Physics Letters*, 88, 203118, (2006)
- [ 4 ]K. Sagisaka and D. Fujita, *Journal of Physics: Conference Series* 100, 052002, (2008)
- [ 5 ]K. Sagisaka and D. Fujita, *Phys. Rev. B*, 77, 205301, (2008)
- [ 6 ]X. L. Guo, D. Fujita, N. Niori, K. Sagisaka and K. Onishi, *Nanotechnology*, 18, 195201, (2007)
- [ 7 ]X. L. Guo, D. Fujita, N. Niori, K. Sagisaka and K. Onishi, *Surf. Sci.*, 601, 5280, (2007)
- [ 8 ]P.Zhang, E. P. Nordberg, B-N. Park, G. K. Celler, I. Knezevic, P. G. Evans, M. A. Eriksson and M. G. Lagally, *New J. Phys.*, 8, 200, (2006)
- [ 9 ]D. Fujita, M. Kitahara, K. Onishi and K. Sagisaka, *Nanotechnology*, 19, 025705, (2008)
- [10]K. Onishi and D. Fujita, *J. Vac. Soc. Jpn*, 51, 165, (2008)(in Japanese)