

## 1. 研究背景

物体 (object) を構成する物質 (substance/matter) は原子から構成されている。その構造 (structure) や物性 (properties) 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 (materials) と呼ばれる。NIMS が推進する物質・材料研究とは、物質の構造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、原子の集合体である組織 (texture) を制御し、表面形態 (surface topography) を加工することにより有用な機能 (functionality) を発現する材料を創製することである。一つの次元が 100 nm 以下の物質・材料やデバイス、典型的にはカーボンナノチューブや量子ドットなどはナノスケールの物体、すなわちナノ物体 (nano-object) である。また、ナノスケールで表面構造や内部構造を組織制御・形態制御された物質材料はナノ構造化マテリアル (nanostructured materials) である。ナノスケールの物質・材料は表面効果、量子効果などのナノサイズに起因した特有の機能や物性を生じる可能性がある。このようなナノ物質・材料研究を効果的に推進するためには、“ナノ創製技術” とともにナノメーター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・材料分野の研究開発 (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、微小スケール探針 (ナノプローブ) を表界対象と近接相互作用させることにより、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”の研究開発と応用を担当する。表面ナノプローブテクノロジーでは、手法として走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy, SPM) を用いる。SPM によるナノプローブテクノロジーが TEM や SEM などのナノスケール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表界面構造やナノ機能を原子スケールの空間分解能で計測する手法であると同時に近接相互作用を用いてナノスケールで表界面を加工・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“計測に最適環境”で行われるのが通常であった。社会ニーズの高い環境・エネルギー材料の多くは多様な環境場で機能を発現する材料である。例えば、太陽光発電材料は制御された光照射場において光電変換機能が最大限に発現されることが望まれる。光触媒材料の超撥水や超親水機能発現メカニズムを解明するためには光照射場における表面電子状態の計測が有効である。ナノ粒子の触媒作用を理解するためには温度可変場かつガス雰囲気制御場における吸着子と表面の相互作用の解析が重要である。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たが、さらに原子・分子レベルでの機能発現メカニズムを明らかにするためには「ナノスケールでの動的イメージング計測」が望まれている。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場に適合可能なナノイメージング計測を実現する上で優位性を有する。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、ナノ計測とナノ創製の連携・融合が求められている。

ナノメーター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、①創製技術と計測・

評価技術の融合、②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、③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元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①②③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重要機能や新規物性が発現する場を“アクティブ操作”として計測スペースに付加しながら、ナノスケールの計測や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)。

ナノ計測機能を高度化するのみならず、再現性や定量性を高める努力も必要である。ナノマテリアルがその有用性を発揮して部材としてもしくは製品として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ナノ製品(nano-products)の安全性の検証が不可欠である。そのためにはナノマテリアルの計測と評価を定量的かつ統一的に行う必要があり、国際的な合意に基づく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]。

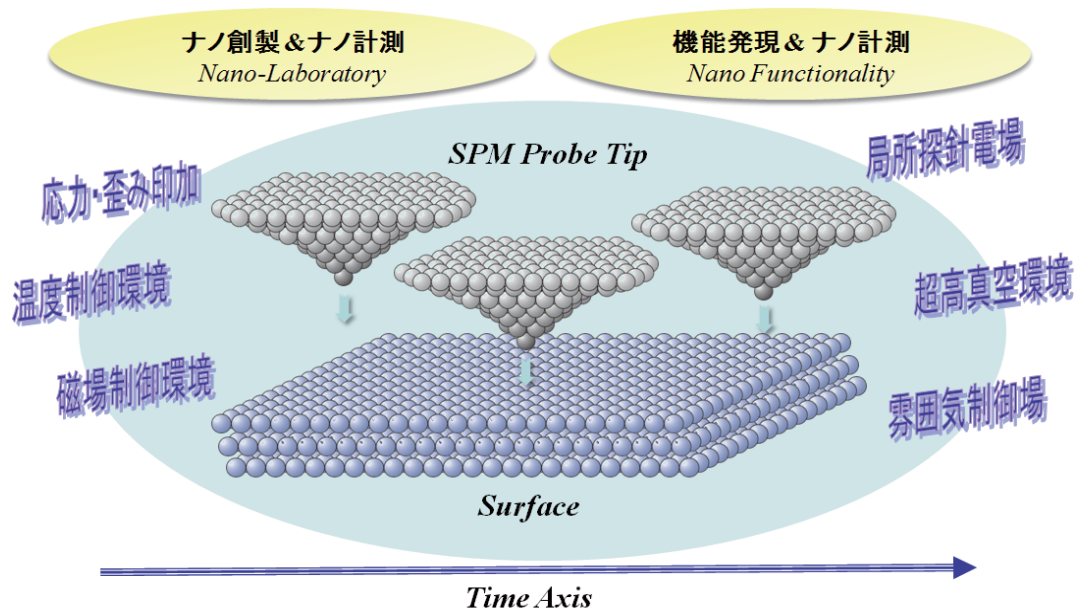


図1. ナノテクノロジーを活用した物質・材料研究の基盤となるべき「制御された環境場における表面ナノプローブ計測技術」の提案。ナノ創製とナノ計測の融合、機能発現のためのナノ計測が重要。材料の創製環境、機能発現環境における高分解能・多機能ナノ解析を目指す。

## 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物質材料研究 (nanotechnology- driven materials science)」である。ナノスケールの構造を有する新しいナノ構造化材料やナノスケールの寸法を有するナノ物体を創製し、ナノサイズ効果に由来する新しい機能を探るというニーズ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”とそのナノ物質材料研究への応用を主要な研究目標とする。ナノ創製技術と融合した表面ナノ計測解析、人工的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ならびに計測手法の標準化を先導することは、公的役割を担う研究独法としての固有ミッションとして取り組む。

これらのターゲットを実現するために、“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と考えられる。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ている。計測すべき材料特性としては、表面の構造、ナノ物体の形状寸法、電子状態(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、電気伝導特性などが重要である。これらの多様な計測機能をナノプローブ技術として融合しつつ、制御された環境場(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・手法の開発とナノマテリアル応用により、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機能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。三次元形状、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研究を継続的に推進する。主として、①多元的な表面ナノプローブ技術の高度化、ならびに②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③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①②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、④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20年度の成果

平成20年度は、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を行うと共に、ナノ材料の機能物性ならびに構造に関する研究への応用を展開した。グループ間、NIMS内ユニット、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 [3,4]。電界放射領域での STM 計測の可能性を探り、Si(111)再構成表面において電界放射領域での原子分解能計測を達成するとともに電界放射共鳴状態での複雑なモザイク様イメージを観測した(図2)[5]。そのモザイクパターンの起源を探索する研究において、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  $7 \times 7$  ハーフユニットセル内でのセンターアダトム (center adatom) 原子の電子注入による移動現象を明らかにした。平成 20 年度においては、さらに center adatom 原子の STM 誘起移動現象を詳細に解析し、ハーフユニットセル内の電子状態 (LDOS) を人工的に制御することが可能な新たなタイプの STM 原子操作法であることを実証した [6]。

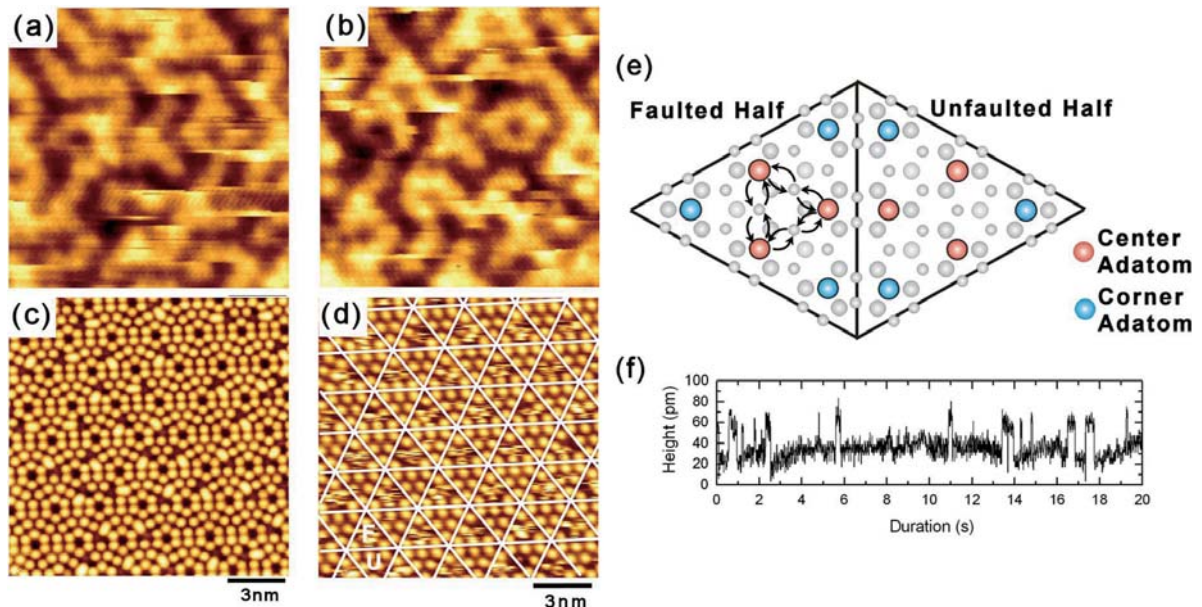


図 2. (a)(b) 電界放射共鳴状態における連続した STM トポ像 ( $T = 79 \text{ K}$ ,  $I = 0.1 \text{ nA}$ ,  $V_s = +5.06 \text{ V}$ ). (c) 同一領域における通常バイアスでの STM トポ像 ( $V_s = +1.0 \text{ V}$ ). Faulted Half (FH) におけるセンターアダトムの多くが定常サイトから変位しアダトム空孔を生じている。(d) センターアダトムの変位発生閾値電圧直上での STM トポ像 ( $I = 0.1 \text{ nA}$ ,  $V_s = +2.5 \text{ V}$ ). FH でセンターアダトムの変位が見られる。(e) DAS 構造の模式図。(f)  $V_s = +5.0 \text{ V}$  の電界放射共鳴状態でセンターアダトム上にて計測された  $z$  ピエゾ高さの時間異存性。2つの高さ状態が存在することはセンターアダトムが2種のサイト間で変位することに対応する。

表面のスピンに関する電子状態 (磁気モーメント) を明らかにするために、表面スピン偏極電子の 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た。例えば、強磁性体の超薄膜により被覆された STM 探針を再現性よく作成するための超高真空環境での STM 探針蒸着機構の整備を行った。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行った。一方、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。そのため、UHV-STM 用の超高真空電子ビーム試料加熱機構の改造を行い、 $\sim 2000^\circ\text{C}$  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。反強磁性体の Cr(100) 表面におけるスピン偏極 STM 測定の結果を図 3 に示す。Cr(100) 表面ではテラス毎にスピンの向きが反転している。また、スピン偏極像とともに表面二次元電子の定在波が観測された。

## (2) トンネル誘起光子計測の要素技術の開発

UHV 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) により誘起された光子を高空間分解能マッピングもしくは分光解析するための要素技術開発ならびに発光材料への応用を行っている。20 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) 計測を中心に行った [6,7]。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、直流マグネトロンスパッタ法による Au/ITO 複合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、その特性を評価した。p 型 GaAs(110) 表面ならびに Au(111) 表面における STM ルミネッセンス計測により、Au/ITO 複合薄膜被覆探針は STM-TL 計測に適していることを確認した [8]。また、紫色レーザー (波長 405 nm) を用いた光照射機構を試作し、キセノンランプからのモノクロ化された光照射と併用して、導電性光ファイバー STM 探針による光励起

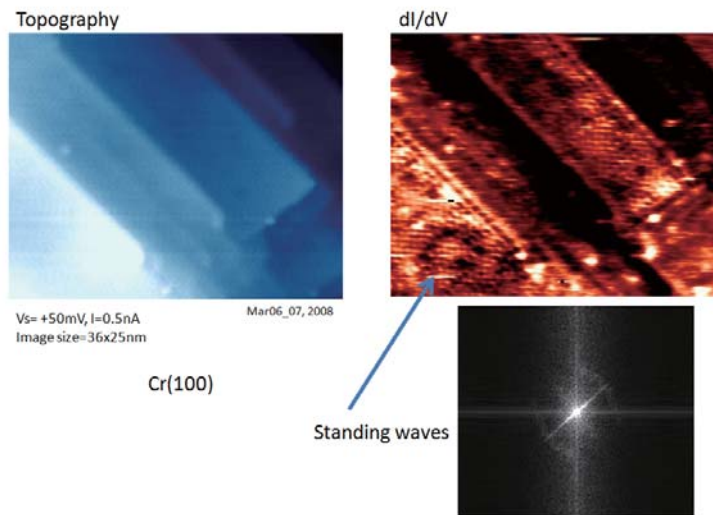


図 3. (a) 低温 STM により Cr(100) 表面上にて観測された STM トポグラフィ像 (左) ならびにテラス毎に反転するスピン状態を示す dI/dV 像 (右)。表面定在波の存在を示す dI/dV 像の FFT 像 (右下)。

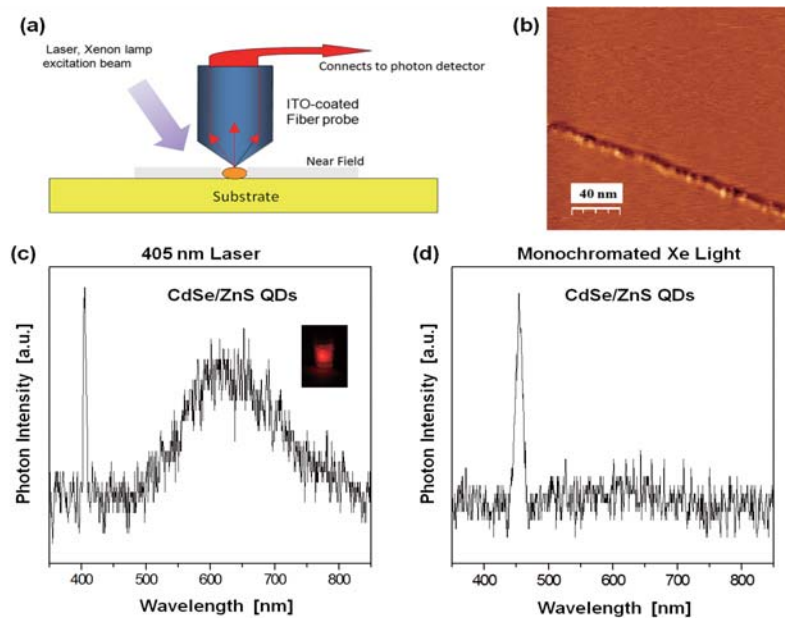


図 4. (a) レーザー光照射系と光ファイバー STM 探針を用いた近接場 PL 計測の模式図。(b) HOPG 基板表面上にて観測された CdSe/ZnS コアシェル量子ドットの STM トポ像。(c) 405nm 紫色レーザー照射により誘起された CdSe 量子ドットからの発光スペクトル。(d) キセノンランプ単色化光(450nm)照射により誘起された CdSe 量子ドットからの発光スペクトル。

発光 (photoluminescence, PL) 計測が可能になった (図 4 (a))。試作した 405nm レーザー照射による PL 測定を HOPG 基板上的 CdSe/ZnS コアシェル量子ドットに応用した結果を図 4 (c) に示す。キセノンランプ照射の場合に比較して 600nm 近傍における量子ドットからの PL 発光をより効果的に励起できることが実証された。

### (3) ナノ創製とナノ計測の融合技術の開発

表面ナノ加工過程の時空間計測ならびにボトムアップ型ナノプローブ (ナノ構造創製+ナノ構造制御) の開発を行った。超高真空温度可変型 SPM は、高温ナノ創製、例えば、原子線照射による表面再構成、半導体酸化薄膜の還元分解、ナノグラフェン創製などのナノ材料創製メカニズムに関わる知見を得るうえで有効である。例えば、半導体ゲート絶縁層としての SiO<sub>2</sub> 薄膜の高温安定性評価では高温場その場ナノ観測技術の確立が重要である。測定対象が絶縁性であることから、高温場非接触原子間力顕微鏡 (NCAFM)

ならびに STM の多元的計測が効果的である。しかしながら 800K 以上での高温 NCAFM 計測の場合、カンチレバー探針では熱的影響により共振振幅の減少により測定困難となる。共振周波数が高い 1MHz クラスの水晶振動子型探針 (Needle sensor) を用いた AFM 計測が有効である。

Si(111) 表面に存在する自然酸化膜 ( $\text{SiO}_2$  薄膜) は  $\sim 1400\text{K}$  程度の高温フラッシュにより還元分解・昇華され、清浄再構成表面である  $(7 \times 7)$  表面を形成する。酸化雰囲気中での酸化膜成長は  $\text{SiO}_2$  薄膜の還元と酸化の競合プロセスである。 $\text{SiO}_2$  薄膜の熱的安定性を知ることは極薄酸化膜形成や表面清浄化過程を理解するうえで有意義である。この観点から高温場での  $\text{SiO}_2$  超薄膜膜 (2nm)/Si(111) の NCAFM/STM その場計測を試みた。 $\text{SiO}_2$  薄膜は絶縁体であるから、導電性探針を用いた NCAFM による電流同時計測を行い、清浄表面の露出による導電性発現段階において STM 計測を開始した。図 5 に  $(7 \times 7)$  ドメインが露出開始した段階における高温場 NCAFM トポ像ならびに電流像を示す。中央部分に出現した凹部は  $\text{SiO}_2$  薄膜が還元分解されて生じた Si(111) ドメインである。トポ像では判断が困難な  $\sim \text{nm}$  スケールの微小ドメインも電流像から判別できる。原子分解能イメージングから凹部内表面では  $(7 \times 7)$  再構成表面の形成が明らかになった。清浄化ドメイン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が明らかになった。 $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiO}$  が昇華する [8]。 $(7 \times 7)$  表面が露出すると清浄表面上 Si 原子が移動しやすいため、清浄面 Si が優先エッチングされ、余剰 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と考えられる。ナノ突起は導電性があり、オージェ計測から Si と判断される。このような余剰 Si は時間経過とともに成長しラフニングが進行する。さらに高温場での NCAFM 計測を実現することによりグラフェン等の超薄膜創製過程やナノマテリアルの高温安定性の評価法として期待できる。

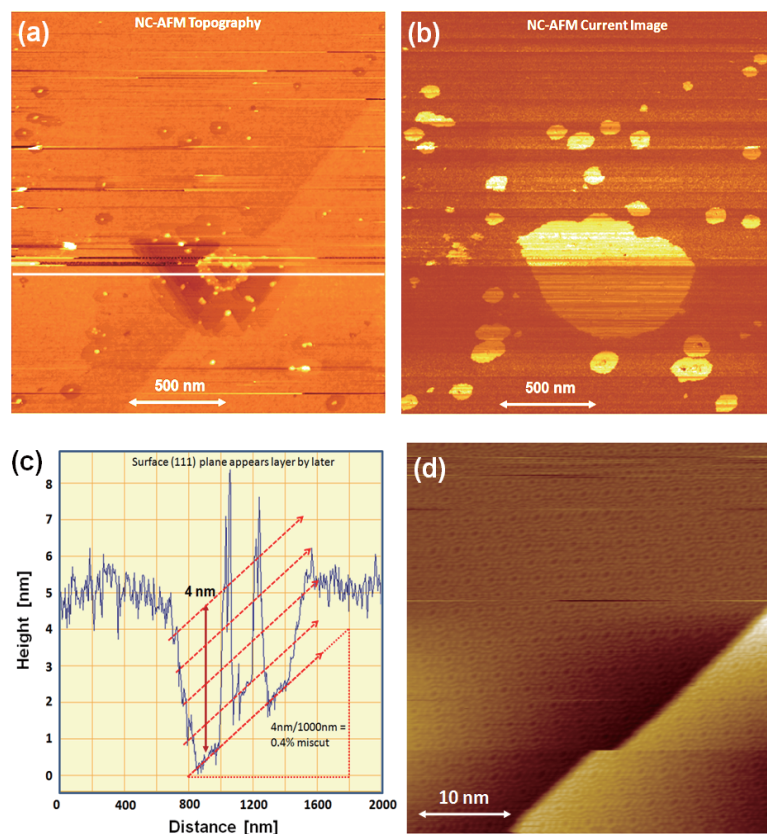


図 5. (a) 高温 ( $\sim 1100\text{K}$ ) 保持した  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$  表面の NCAFM トポ像 (7 days). (b) NCAFM 同時計測電流像.  $\text{SiO}_2$  の還元分解により Si(111) 清浄表面が露出. (c) (a) のトポ像のラインプロファイル. Si(111)- $7 \times 7$  清浄表面においてエッチングが Layer-by-layer に進行すると同時に Si 再析出によるナノ突起構造が成長. (d) 酸化膜が還元清浄化されたドメインで観測された STM 像. 高温場 ( $\sim 1000\text{K}$ ) にても  $7 \times 7$  再構成を原子分解能計測できる。

#### (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。20年度は、16T の高磁場を発生可能な超伝導マグネットを超高真空システムと融合するためのシステム開発を行った。試料表面清浄化処理、半導体表面の水素終端処理、スピン偏極測定用探針表面への磁性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行い、本体への組み込みを行った (図6)。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) 表面における表面二次元電子状態の定在波、二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 [9-11]。

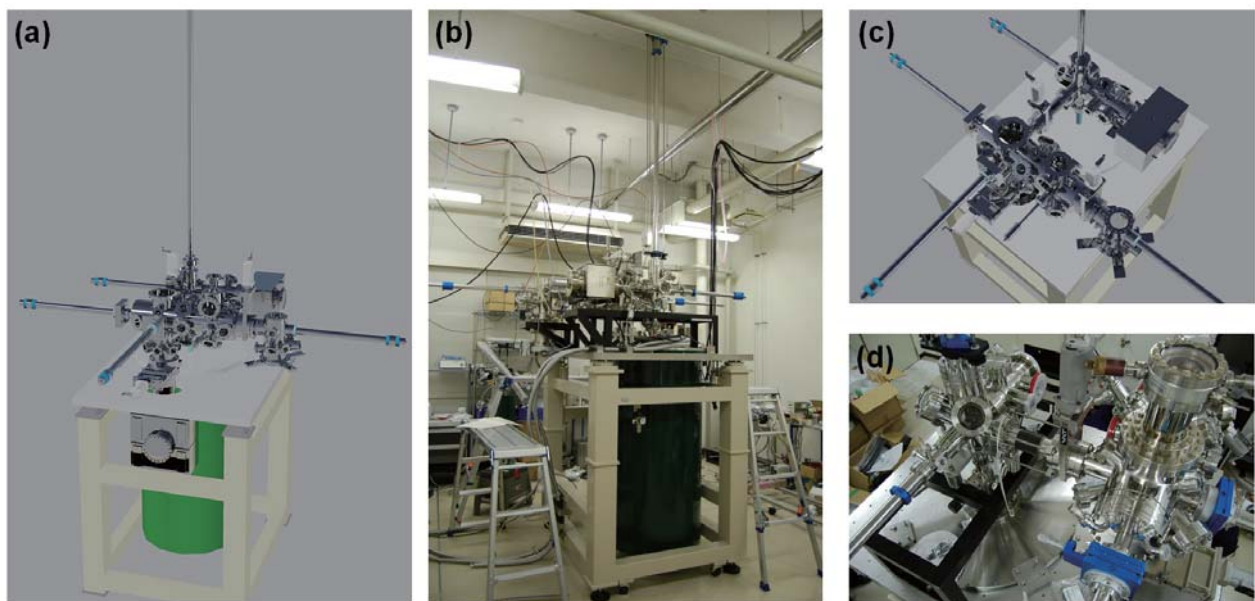


図6. (a) 超高真空場+極低温場+可変高磁場を複合させた極限場 STM/STS 計測システムの全体概要図。(b) 組み立てられた極限場 STM/STS 計測システム。(c) 装置上面からの概要図。(d) 試料準備室と STM/STS 計測室。準備室では成膜や LEED/AES 解析が可能。

#### (5) 応力場 SPM 計測技術の開発

制御環境場における表面ナノプローブ技術の高度化として、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 計測を実現するための基盤要素技術の開発を行った。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、一軸引張応力 (歪) を試料表面に発生させることができる。試料温度制御により、弾力的な歪を与えることができる。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、NCAFM モードでの高分解能計測は未だ実現されていなかった。周波数変調 (FM) 検出法による NCAFM において原子分解能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。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、さらに探針先端状態が最適化された場合、Si(111) 表面 ( $7 \times 7$ ) 再構成超構造の原子分解能イメージングが可能である (図7)。応力印加状態における応用としては、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検討し、学術論文として報告した [12]。

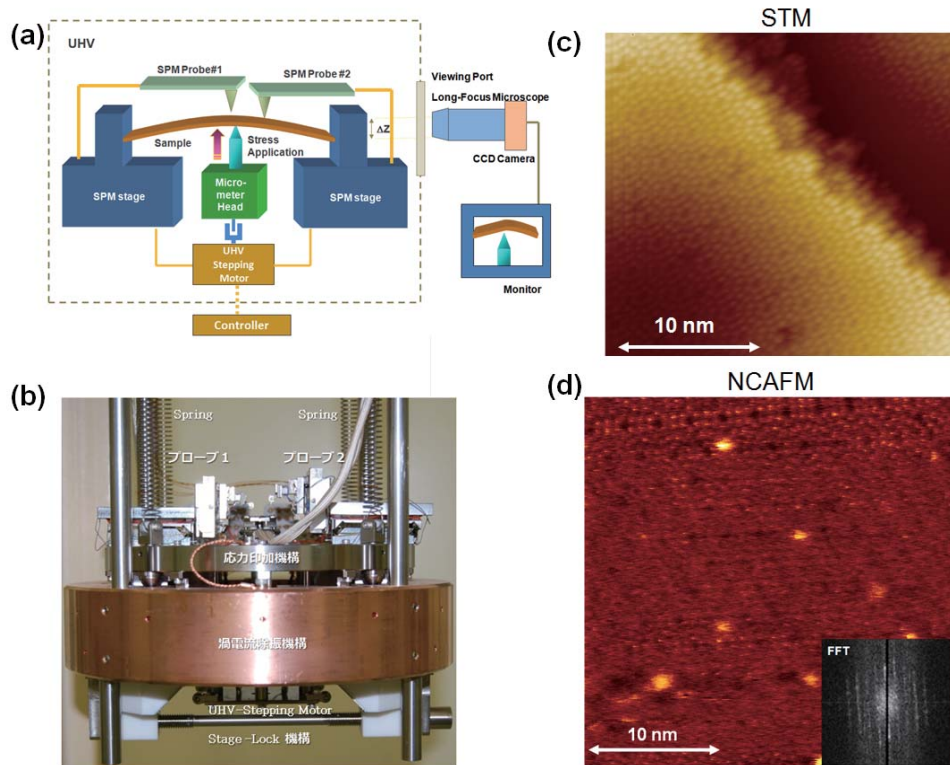


図7 (a) 応力/歪印加可能な UHV-SPM 模式図. (b) 応力印加 2 探針 UHV-SPM ヘッド. (c) Si(111) 表面の応力歪み場印加時の STM 像. (d) Si(111)-(7 × 7) 表面の周波数変調 NCAFM 像

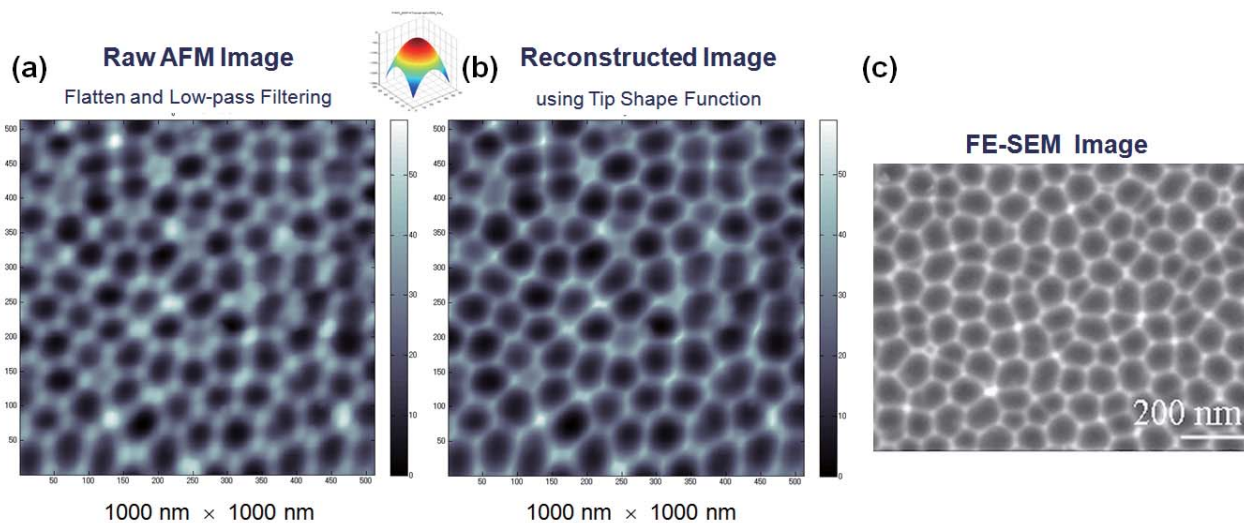


図8. (a) ナノスケールのポアと突起構造を有するポーラスアルミナ表面の NCAFM トポ像. (b) 実測された探針形状関数により再構成された像. (c) 高分解能 FE-SEM 像. 原 AFM 像は探針形状関数により膨張しているが再構成された像は高分解能 SEM 像とよく一致する。

#### (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。標準化としては、SPM データ転送フォーマットの仕様設計ならびにデータ処理プログラムのプロトタイプを試作した。ナノマテリアル三次元形状の定量計測技術としては、プローブ先端形状を標準試料から測定するためのプロトコルならびに抽出された探針形状関数 (tip shape function) に基づく AFM 画像再構成プログラムを試作した。本手法は探針形状関数の AFM 計測評価に基づいているため、調整パラメータは不要であり、一意的に補正画像が得られる。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、標準球形ナノ粒子により探針三次元形状を抽出可能であることを示した [13]。半導体微細加工による三次元ナノスケールライン&スペース構造、ポーラスアルミナナノポア構造、ポリスチレン標準球形ナノ粒子、フラーレンナノウィスカーなどの定量的な三次元形状計測へ応用している (図8参照) [14,15]。探針形状評価に基づいて AFM 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、SPM トポグラフィー計測を“より定量的に”補正できることが期待される [16]。

#### 4. 今後の方針

本テーマはプロジェクトの目指す表面・表層・固体内部における「ナノ物質・材料研究のための高度ナノ計測基盤技術」において、最表面における高度ナノ計測技術として位置づけられる。従来の静的かつ通常環境における計測技術から脱却し、ナノマテリアル研究のための動的かつ制御環境場におけるナノ計測技術を目指しており、プロジェクトの中心的理念を実現するうえで重要な役割を果たしている。先端的な物質材料の創製や機能発現に関連する極限的な環境場を計測空間に創製し、原子レベルの高空間分解能で多様なナノ機能を計測する試みは「ナノマテリアル研究開発を推進するキーテクノロジー」として期待されている。世界トップのベンチマーク的な研究機関やグループの多くは新たな物性科学の探索と創成を追求しており、材料研究を主体とした研究機関は少ない。一方、当グループは材料表面におけるナノマテリアル計測に実績がある。原子レベルでのマテリアル創製と極限環境計測を融合する研究分野ではナノ材料研究を主体とする研究機関としての強みを発揮している。

平成21年度は“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、研究開発ロードマップに従って以下の研究開発項目を実施する (図9)。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。

- 前年度までに開発した基盤要素技術や開発パーツを統合化し、世界最高水準の極限場環境における STM/STS ナノプローブ計測装置を構築する。極限場環境での STM/STS 動作を達成し、原子分解能の実現に注力する。また、基盤要素技術として開発したスピン偏極計測技術を組み込むことによりスピ

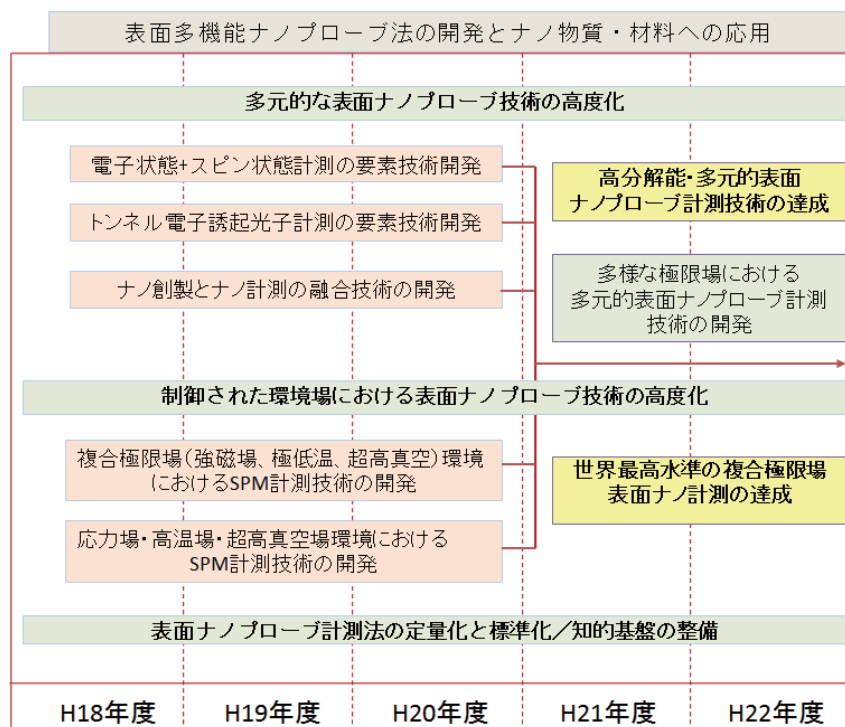


図9「表面多機能ナノプローブ法の開発とナノ物質・材料への応用」研究開発ロードマップ

ン偏極計測の極限場環境における達成を目指す。

- ・ 前年度までに開発した応力歪場 SPM における走査型トンネル顕微鏡モード (STM) ならびに非接触原子間力顕微鏡 (NCAFM) モードでの原子分解能イメージングの安定性と再現性の向上に注力する。応力歪み場環境で構造や機能に顕著な変化が期待できる物質・材料の単結晶表面に応用する。
- ・ 表面多機能ナノプローブ法によるナノ物質・材料の創製と計測の連携技術を更に進化させ、多様な物質・材料研究へ応用するとともに計測データ / 計測プロトコル / プログラムの知的基盤整備を行う。

## 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] K. Sagisaka and D. Fujita, submitted for publication (2009).
- [7] X. L. Guo, D. Fujita and K. Onishi, submitted for publication (2009).
- [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] Y.-H. Yu, K. Sagisaka and D. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 47, 6096 (2008).
- [10] Y.-H. Yu, K. Sagisaka and D. Fujita, *Surf. Sci.*, 603, 723 (2009).
- [11] Y.-H. Yu, K. Sagisaka and D. Fujita, *Phys. Rev. B*, 79, 235427 (2009).
- [12] D. Fujita, M. Kitahara, K. Onishi and K. Sagisaka, *Nanotechnology* 19, 025705 (2008).
- [13] K. Onishi and D. Fujita, *J. Vac. Soc. Jpn*, 51, 165 (2008)
- [14] M. Xu, D. Fujita, K. Onishi, and K. Miyazawa, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 9, 6003 (2009)
- [15] M. Xu, D. Fujita and K. Onishi, *Rev. Sci. Instrum.*, 80, 043703 (2009).
- [16] D. Fujita, K. Onishi, M. Xu, *J. Phys. Conf. Ser.* 159, 012002 (2009).