

## VII-4 表面物性グループ

助教授 新井 豊子

講師 東山 和幸

### 【1】電圧印加非接触原子間力分光法の開発 (新井 豊子)

非接触原子間力顕微鏡 (nc-AFM) は、試料が導電体でも絶縁体であっても、表面形状を原子スケールで描きだせる走査型プローブ顕微鏡である。本研究代表者は、原子スケールの分解能をもった超高真空 nc-AFM を独自に開発し、探針-試料間に特定の電圧を印加して表面を走査すると、探針が試料表面の特定な原子上来たときに強い引力がはたらくことを見いだした。この発見にヒントを得て、探針先端原子と試料表面原子の化学結合を印加電圧で評価、あるいは制御できるのではないかと着想した。例えば、Pauling は「孤立した 2 原子が同じエネルギー準位を持つ場合、両者が接近すると量子力学的共鳴が起こり化学結合する」とする化学結合論を打立てた。この考えを電圧が印加された探針-試料系に当てはめると、両者が接近して両者の表面電子波動関数が重なっても、それらのエネルギー準位が異なると共鳴的結合は起きない。しかし、印加電圧を変化させ（探針と試料のフェルミ準位を静電的にシフトさせ）、両者の表面電子エネルギー準位を一致させると、量子力学的共鳴に基づく化学結合を形成できることになる。原子レベルで先鋭化した nc-AFM 探針と試料間に電圧を印加し、探針先端の波動関数と試料表面の波動関数が量子力学的に共鳴する印加電圧を探針が受ける力の変化から探す力学的分光手法を電圧印加非接触原子間力分光法(nc-AFS)と名付けた。

#### (1-1) ナノピラー探針の作製

本研究で用いたカンチレバーは市販の piezo 抵抗型カンチレバーである (図 1)。一般に、カンチレバーの変位測定にはレーザー照射を必要とする光てこ法や光干渉法などが利用されているが、自己検出型カンチレバーではレーザー照射は不要である。したがって、探針や試料中に光

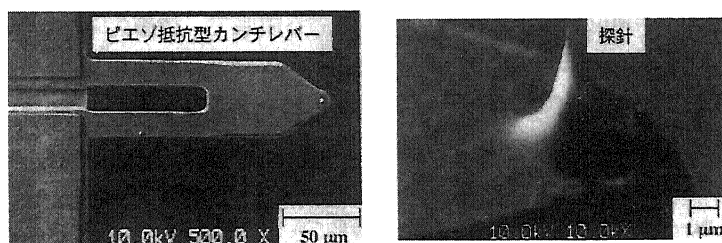


図 1. ピエゾ抵抗カンチレバーの SEM 像

(a) カンチレバー全体 (b) 探針部

照射によってキャリアを不用意に励起することはない。用いた piezo 抵抗型カンチレバーにはカンチレバー部および探針先端部にボロンがドーピングされており、カンチレバーの根本から探針先端まで導電性がある。一般に市販されているシリコンカンチレバーと同様に、本カンチレバーも Si(001) ウェハからマイクロプロセスによって作製されているため、探針は [001] 方位の単結晶 Si である。nc-AFM/AFS の分解能を決めるキイは探針先端の構造にあり、相互作用分光のためにはより構造の安定な探針が必要となる。通常、市販のカンチレバー・探針には有機汚染物が付着し、自然酸化膜が形成されている。アルゴンイオンスパッタにより探針先端の付着物を除去し、UHV チャンバーに高純度の酸素ガスを  $10^{-5}$  Torr 程度導入し、探針を熱酸化した。熱酸化により酸化膜内部に鋭利な Si 探針が形成される。この清浄な酸化膜は UHV 中で 600 度程度に加熱すると除去される。加熱後、徐冷することにより、探針は清浄で先鋭かつ熱的に安定な構造となる。このシリコン探針上に再生可能な単結晶シリコンナノピラー成長にも成功した。図 2 にシリコンナノピラー成長法の概念図を

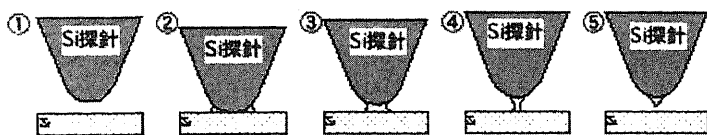


図2.シリコンナノピラー成長概念図

示す。超高真空 nc-AFM のサンプル位置にシリコンウェハーを配置し、約 600 度に加熱する。清浄化なシリコン探針を、加熱されているシリコンウェハーにソフトに接触させ、引き離す。これにより、シリコン探針の先端にシリコンナノピラーが成長する。図3は成長させたシリコンナノピラーのTEM像である。上部が元のシリコン探針であり、中央下に向かってシリコンナノピラーが約 10 nm 成長している。シリコンナノピラーは単結晶であり、結晶方位はシリコン探針から連続している。

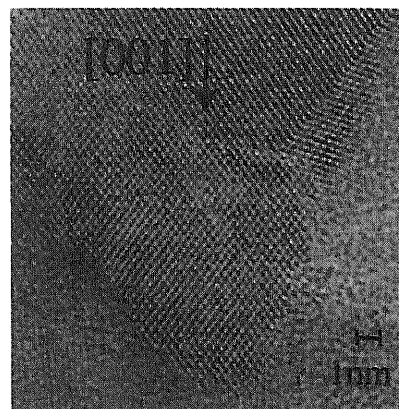


図3.シリコンナノピラーTEM像

### (1-2) 電圧印加非接触原子間力分光法

試料は n 型 Si(111)ウェハー片、探針にはピエゾ抵抗カンチレバー端の[001]方位 Si 探針を用いた。走査型相互作用分光顕微鏡で観察された Si(111)7x7 再構成表面の nc-AFM 像を図4に示す。輝点の1つ1つがダングリングボンドをもつ Si 吸着原子に対応し、12 個の吸着原子からなる菱形の領域が 7x7 単位胞である。明るく描き出された6個の原子からなる正三角形形状の半単位胞は下層に積層欠陥がある領域で、積層欠陥がない半単位胞に比べて電子がやや過剰な状態であることが知られている。この像に描きだされたコントラストの差異から、積層欠陥半単位胞内の Si 吸着原子が非積層欠陥層の半単位胞内の Si 吸着原子より化学活性が高いことが類推される。

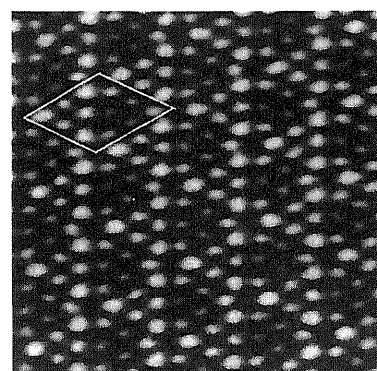


図4. Si(111)7x7 再構成表面の nc-AFM 像。

走査範囲: 12 nm x 12 nm.  $\Delta f = -40$  Hz ( $f_0 = 192$  kHz). 試料印加電圧  $V_s = -0.6$  V. 菱形に囲った領域が 7x7 単位胞。

nc-AFM スペクトルは、STM に基づいて開発された STS (current imaging tunneling spectroscopy) 法を模倣して、印加電圧変化に対する共振周波数変化 ( $-\Delta f$ ) を計測することで取得する。図4で示した Si(111)7x7 表面上で、加振している探針先端-試料表面間の最接近距離を 1.5, 0.43, 0.33, 0.3 nm (注: 相対的な接近変化量は確度が高いが、絶対値はトンネル電流の増大からの推定値である。)と近づけつつ nc-AFM 像を観察し、多数点 (図4の約 1/4 の領域で 16x16=256 点) で nc-AFS スペクトルを取得した (図5)。探針が試料面から 1.5 nm 以上離れているときは、すべての測定点で、相互作用引力は接触電位差 ( $V_c = -0.27$  V) に相当する印加電圧で極小値を取り、印加電圧の増大とともに2次関数的に強くなった。この変化は古典的静電気学で説明できる現象である。

一方、探針-試料間距離を 0.43 nm に接近させると、すべての測定点で 0 V 近傍にやや幅広なピークが出現した。さらに 0.33, 0.30 nm と近づけると、複数の測定点で 0 V 近傍のピークが非対称に鋭くなった。図6に、Si(111)7x7 表面の積層欠陥半単位胞 Si 吸着原子上で得られた nc-AFS スペクトルの探針-試料間距離に対する依存性を示す。図6(a)では探針-試料間最接近距離 1.5, 0.43, 0.33, 0.3 nm での各 nc-AFS スペクトルを重ねて描き、(b)では距離、印加電圧、相互作用力 ( $-\Delta f$ ) の関係を3次元的に描いている。ここで得られた nc-AFS スペクトルには探針-試料間に働くすべての力、長距離相互作用である静電引力と van der Waals 力、および近距離相互作用 (結合力) が含まれている。そこで、(4)式で表される  $(V-V_c)^2$  に比例する静電引力の寄与を印加電圧の高い領域での曲線から外そ

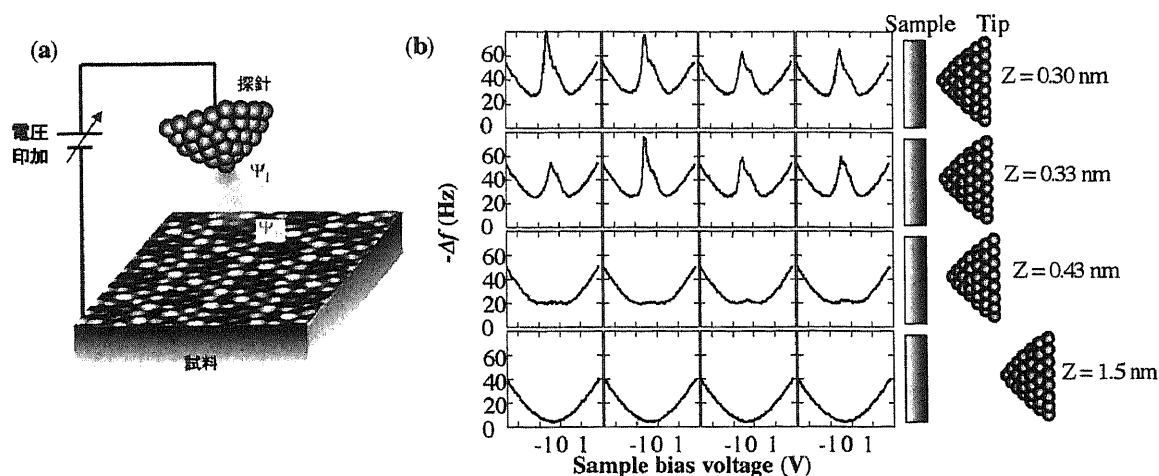


図5. (a) 電圧印加非接触原子間力分光法概念図. (b) Si(111)7x7 の電圧印加非接触原子間力分光スペクトル. 探針と試料間を 1.5, 0.43, 0.33, 0.3nm と近づけながら、試料表面上を走査しつつ 256 点でスペクトルを取得した. 縦軸は相互作用力によるカンチレバーの周波数シフト量であり、大きいほど引力が強いことを示す. それぞれの距離で走査開始後に取得した 4 点でのスペクトルのみを表示した.

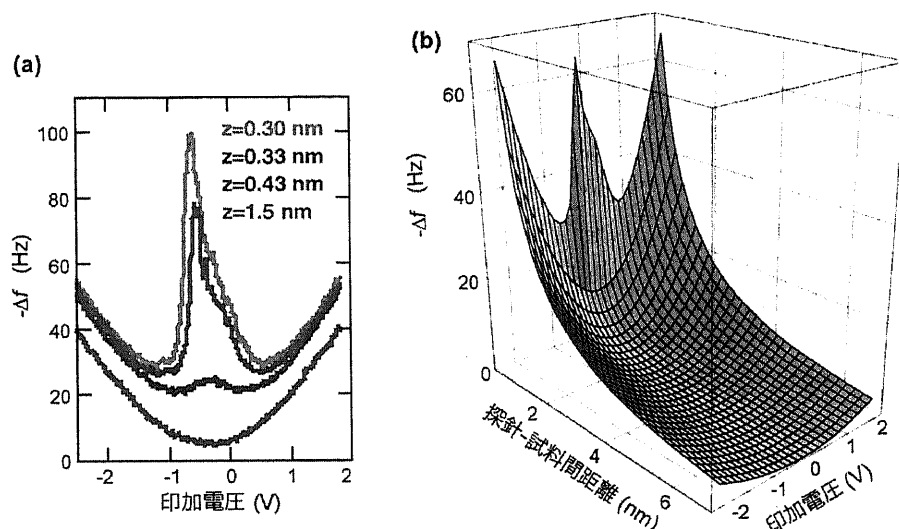


図6. Si(111)7x7 の表面吸着原子上の nc-AFS スペクトル

(a) 探針-試料間距離 : 1.5, 0.43, 0.33, 0.3nm (b) 周波数シフトと探針-試料間距離、試料印加電圧との関係

うして求め、さらに印加電圧に依存しないと考えられる van der Waals 力の寄与 ( $V=V_c$  での  $-\Delta f$ 、あるいは、静電引力に起因した二次曲線の最小値に対応する量) を求め、それらを測定された nc-AFS スペクトルから引き、近距離相互作用からの寄与のみを抽出する。図7に距離 0.33 nm での試料面上の 3 カ所 (表面 Si 原子が存在しない領域、積層欠陥層 Si 吸着原子上、積層欠陥層 Si レスト原子上) での近距離相互作用スペクトル (nc-AFS スペクトルから静電引力と van der Waals 力の寄与を引いたもの) を示す (図中の薄いグレーの曲線が近距離相互作用スペクトルである)。これらのスペクトルが複数のガウス型曲線が重なっていると仮定して、数値的にスペクトル分解を試みた。赤と青の曲線は近距離相互作用スペクトルを分解したガウス曲線である。試料表面上のすべての測定点で、中央値 = -0.27 eV、半値幅約 0.35 eV のほぼ同じピーク (図中の赤の曲線) が見いだされている。また、吸着原子上のスペクトルには、この半値幅 0.35 eV というやや幅広のピークの他に、特定電

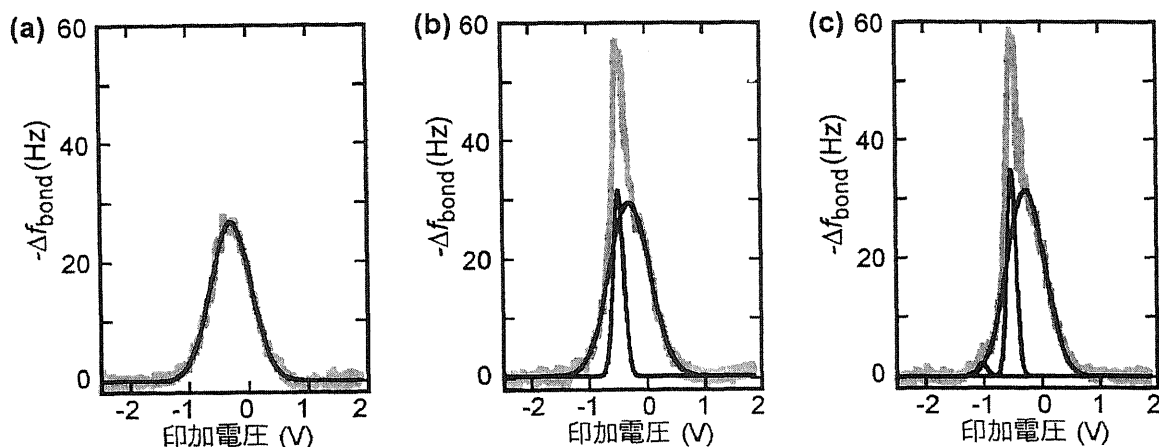


図7. 近距離相互作用スペクトル

(a)表面 Si 原子が存在しない領域 (b)積層欠陥層 Si 吸着原子上 (c) 積層欠陥層レスト原子

図中のグレーの曲線は、計測されたnc-AFSスペクトルから長距離相互作用の寄与をひいた曲線で、nc-AFSスペクトルの近距離相互作用の寄与分が抽出されている。グレーの曲線を複数のガウス曲線に分解した

圧で非常に鋭い（半値半幅：約 0.1 eV）ピーク（図中の青の曲線）も含まれている。鋭いピークの中央値は各原子サイトにより若干異なる。例えば、Si 吸着原子上ではフェルミ準位より -0.4 eV のエネルギー準位に現れる。また、積層欠陥層を持つ半単位胞内の Si レスト原子上では -1.0 eV のエネルギー準位にピークが現れる。これらの値は、光電子分光・トンネル分光法で測定された値や、密度汎関数法によって求められた Si(111)7x7 表面のそれぞれの Si 原子の電子状態が持つエネルギー準位によく一致する。

### （1-3）印加電圧に依存する相互作用力の考察

接近した 2 つの物体間の相互作用は、物体表面の原子がもつ電子状態に密接に関連している。量子力学的に考えれば、両表面の波動関数が近接したことにより空間的に重なりだし、また、その波動関数で表される電子状態がエネルギー的に近ければ近いほど結合に係わる相互作用は強くなる。このような状態は量子力学的共鳴であると表現できる。もちろん、両方の電子状態が電子で充満されていたり、完全に空状態であれば、波動関数が重なって混成状態を形成し得ても、電子系のエネルギーは得をしないので結合には寄与しない。一方、それぞれが程良く電子で占有されていたり空状態であれば、軌道混成によって電子系のエネルギーが下がり系として得となり、すなわち、化学結合が形成される。これは所謂、(本実験の場合、シリコンの) 共有結合であり、また、HOMO-LUMO 軌道が化学結合の主役として寄与しているともいえる。一方、固体同士の結合の場合、表面電子準位がどこまで電子で充填されているかが結合を考えるうえで重要である。この点は、固体表面上に原子・分子が化学吸着するときに議論されること（接近してくる原子・分子の電子軌道の HOMO-LUMO 軌道の準位が固体のフェルミ準位より高いか低いかにによって電子の授受がおきること）と類似している。電氣的に絶縁され、接触電位差がある（即ち異なるフェルミ準位を持つ）固体同士の場合は、近接（トンネル効果など）によって適当な電子の授受が起こり、表面電荷の変化で静電的ポテンシャルエネルギーが変化し、両者のフェルミ準位は究極的には一致する。そのとき、表面電子状態が混成しエネルギー低下が起これば化学結合となる。

それでは、本研究のように 2 つの物体の間に電圧を印加した場合にどうなるかを考察する。改めていうまでもなく、電圧を印加するということは 2 物体のフェルミ準位を静電的・相対的に意図的にシフトさせるということである。図 8 に本測定の場合に予想されるエネルギーダイアグラムを示す。試料は、Si(111)7x7 再配列表面で P をドーブした n 型半導体であり、Si のバンドギャップ (1.1 eV)、

電子親和力(4.0 eV)、および、よく知られている金属的な表面電子状態を反映させてある。表面の金属的な特性は、おもに表面 Si 原子のダングリングボンド 1 本に 1 個の電子が占有されていることに起因している(ダングリングボンドが電子で半分占有された状態)。一方、Si 探針のエネルギーダイアグラムは解析された例がほとんどない。しかし、探針が[001]方位の単結晶 Si であること、本実験では探針の清浄化処理を十分に施していること、piezo抵抗効果を得るために B をイオン打ち込みしたものであることから、探針は p 型半導体であり、先端は Si(001)2x1 (厳密には非対称ダイマーによる c(4x2)再配列構造)で、表面でエネルギーギャップ(約 0.8 eV)を持つと仮定する。探針と試料が 1 nm 以上離れていて等電位 (0 V 印加) の場合、図 8 (a) の状況になっていると推定される。両者間にはトンネル障壁となる真空ギャップが存在する。両者の接触電位差に対応する電界が真空ギャップ中央部で発生し、またイメージ電荷による鏡映力の効果を考え、図中央で真空準位を斜めの線とし、探針と試料の近傍で緩やかな曲線として描画した。次に探針が試料に 1 nm 以下にまで接近したとする (図 8 (b))。両者間のトンネル障壁が静電ポテンシャルの重ね合わせの効果で崩壊し始める。また、電子を固体内へ閉じ込めている真空-表面領域のポテンシャル変化がさらに緩やかになるので、ダングリングボンドは等価的に真空側にわずかに突きだしていく。このときトンネル電流は急激に増大を始める。STM において、トンネル障壁幅を変調させたときのトンネル電流を検出し見かけの仕事関数を算出する方法は、この障壁高さの変化を含めて計測していることになる(さらには試料表面、探針に誘起される原子配列の歪みも問題になる)。さらに接近させていけば (図 8 (c))、試料と探針の波動関数の空間的な重なりはますます大きくなる。ここで試料と探針間の印加電圧を変化させる (図 8 (d))。試料側のおもに表面 Si 吸着原子に起因するダングリングボンド(電子が約半分充填された電子状態)と探針側の空準位(探針先端の Si ダイマーのうちバックリング・ダウンした Si 原子に局在した表面電子状態)のエネルギーが一致し始めると、両者の軌道混成による電子系のエネルギーの得が増え、強い化学結合が生じると考えられる。この

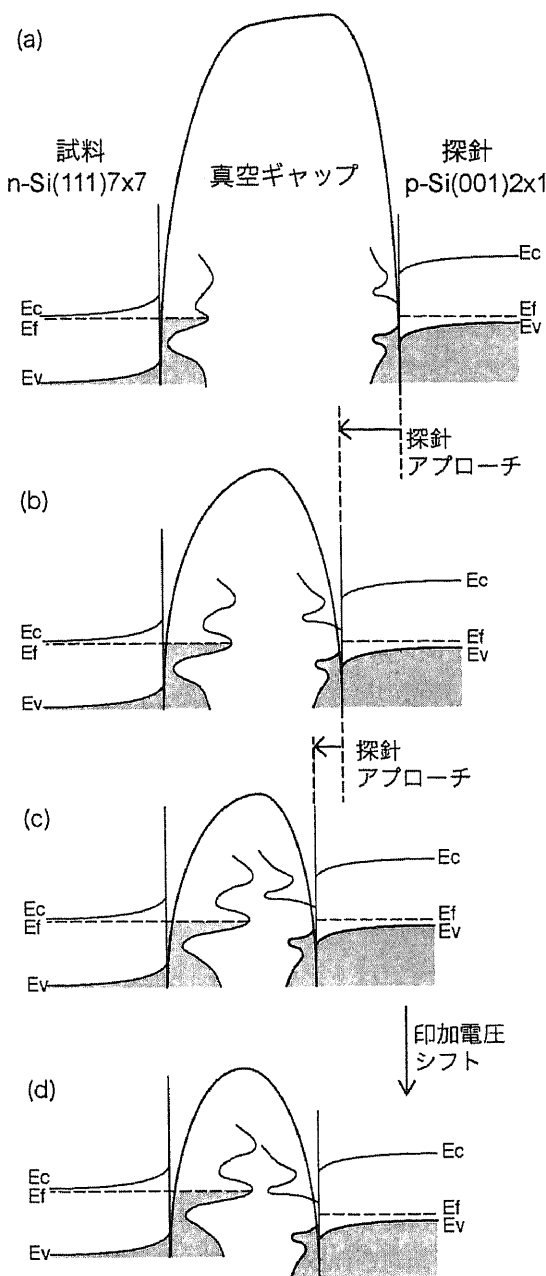


図 8 近距離で対向した探針と試料のエネルギーダイアグラム

試料は n 型 Si(111)7x7 再構成表面、探針は p 型 Si(001)2x1 再構成表面と同じ表面電子状態であると仮定した。

- (a) 探針-試料間距離 = 1 nm 程度、印加電圧 = 0 V.
- (b) 探針-試料間距離 = 0.4 nm、印加電圧 = 0 V.
- (c) 探針-試料間距離 = 0.3 nm、印加電圧 = 0 V.
- (d) 探針-試料間距離 = 0.3 nm、印加電圧 = -0.4 V.

化学結合形成の印加電圧依存性が nc-AFS で捉えられた鋭いピークであると推定している。また、このとき探針側に正の電圧を印加しているので、探針先端の Si ダイマーのバックリング・ダウン(空準位)した Si 原子は、負に印加された試料側に引っ張られバックリングが弱まり対称ダイマーに近づいている可能性がある。Si 対称ダイマーの場合、エネルギーギャップは消失することが知られている。したがって、探針側の Si ダイマーによる表面エネルギーギャップは探針側への正電圧印加によって小さくなり、結果として、試料のダングリングボンドの電子状態とエネルギー的に重なる印加電圧範囲は小さくなるであろう。このような効果を含め、試料の Si 表面原子上の nc-AFS スペクトルで鋭いピークが捉えられたと考えている。一方、逆電圧を印加すると、探針のバックリングアップした電子軌道に与える効果は逆になるので探針側のエネルギーギャップは広がり、試料 Si 表面原子のダングリングボンドと探針側の占有状態との混成に対応する nc-AFS のピークは広がる可能性がある。 $-0.2\text{ V}$  から $+0.8\text{ V}$  の範囲に見られる複数のノイズのような小さな連続分布ピークがこれに相当しているかもしれない。また、Si レスト原子上での約 $1\text{ eV}$  の小さなピークや、積層欠陥層と非積層欠陥層の Si 吸着原子で測定されるわずかなピークの違いも、以上と同様に、表面電子のエネルギー状態の違いとして説明できる。

次に、試料表面上のすべての測定点で検出されたやや幅広のピークを考察する。このピークは、鋭いピークに比べてやや離れた探針-試料間距離(推定距離: 約 $0.5\text{ nm}$ )から検出され始めた。この距離ではトンネル障壁の低減化・狭小化が始まっていることが STM の測定などから予想される。トンネル障壁の高さと厚みが減ると、電子はトンネル抜けしやすくなり探針と試料の電子は両側に帰属されるようになる。たとえば、試料から探針へトンネルした電子は探針表面の原子ポテンシャルで散乱され、一部はそのまま進行し、残りは後方散乱され、その一部は試料側に再度トンネルし、さらにはその一部が後方散乱され探針側へまたトンネルするであろう。このような障壁の低減・狭小化によって増加する探針-試料表面間の電子散乱は、トンネル障壁を挟んだ一つの電子状態の形成と捉えることもできる。言葉を換えれば、トンネル障壁を含めたマフィンティン・ポテンシャルのなかで突出した障壁が消失することによって形成される金属結合であるとも解釈できる。探針と試料が接近すればトンネル障壁の低減・狭小化は試料表面の至る所で起こりうるが、この点はやや幅広のピークが試料表面のあらゆる領域で検出されたことと対応する。印加電圧が高くなると、トンネル抜けした電子はバリスティックに表面より内部まで進行し、表面近傍の原子ポテンシャルの散乱を受けにくくなる。したがって、低減・狭小化したトンネル障壁を挟んだ探針-試料間に広がる共鳴的電子状態を形成しにくくなる。その結果、nc-AFS スペクトルは接触電位差が補償される印加電圧(本測定の場合、印加電圧約 $-0.27\text{ V}$ 、トンネル障壁の中央で真空準位の傾きが水平になり、探針と試料に対してその傾きが対称的なトンネル障壁となる電圧)のときを中心として、やや幅広のピークが観察されると解釈できる。また、固体物理の教科書にしばしば記述されているように、孤立した Si 原子同士が接近するときの s、p 軌道の混成を考えると、接近によって縮退が解けていくときの p 軌道に含まれる電子系のエネルギー低下は金属結合的であり、さらに接近したときの sp 混成は半導体としての共有結合状態であると表現できる。すなわち、金属的結合は共有結合が形成されるより遠方で出現するわけで、本測定で捉えられたピークの距離依存性と対応している。以上の考察は、本測定結果を十分に定性的に説明していると考えるが、今後、理論計算などによって詳細な研究が進むことを期待したい。とくに、トンネル障壁が消失する領域における電子のダイナミックな挙動はかなり複雑なものであろうし、そもそも電子流入を伴う非平衡状態の変化を原子尺度で測定しているわけである。

## 【2】固体表面の物性研究（東山）

固体表面と外来原子との間の相互作用の結果生じる微視的過程、具体的には吸着、再構成、結晶成長などを走査トンネル顕微鏡 (STM)、低速電子回折 (LEED)、エネルギー損失分光 (LEELS)、X線光電子分光 (XPS) を用いて研究している。

### (1) Na 吸着による Ni(110) 表面の再構成

アルカリと遷移金属はバルクでは合金を作らない。そのため、アルカリで修飾した遷移金属表面は、吸着過程を研究する上でのモデルシステムとして注目を集めてきた [1]。

吸着したアルカリの挙動に関しては、1968 年に Gerlach と Rhodin が提唱した一次元鎖模型が広く受け入れられてきた [2]。この模型では、Na は下地の Ni(110) 表面と化合物は作らず、アルカリ固有の格子定数で一次元鎖状に配列する。これとは対照的に、栃原と水野は、Li が Cu(100) 表面上で安定な二次元合金相を形成することを報告している [3]。彼らは、合金化が下地を Al や Au にした場合も、また、Na を吸着させた場合も生じることを見いだしている。

遷移金属表面に吸着したアルカリの構造に関しては、どちらのモデルが有望なのか、また、そのような画一的な見方がはたして可能なかどうか、現段階では判断できない。これは多分にデータが不足しているからであるが、それだけではなく、従来の研究が間接的手法、たとえば LEED など、に依存してきたことも関係している。STM を用いた直接観察が強く望まれる研究対象である。

昨年度は、LEED と LEELS による Na 吸着 Ni(110) 表面の研究例を報告した [4]。LEED 図形の解析から、このシステムが  $1 \times 2$  に再構成すること、Na を飽和吸着させると、バルクの格子定数  $3.6 \text{ \AA}$  の間隔で一次元的に配列することを確認した。これは LEELS で得られた仕事関数の変化の様子ともつじつまが合う。今回は、LEED を用いて Na 吸着による Ni(110) 表面の再構成を詳しく観察したので報告する。実験は市販の超高真空装置（到達真空度  $5 \times 10^{-11} \text{ mbar}$ ）を用いて行った。特に、Na のデイスペンサーは蒸着時に  $2 \times 10^{-10} \text{ mbar}$  を超えないレベルまで脱ガスした。

図 1 に Na 吸着による表面構造の変化の様子を、図 2 に代表的な LEED 図形を示す。表面が室温の状態では Na を蒸着、室温蒸着後にアニール、 $300^\circ\text{C}$  に保持して蒸着、の 3 通りを試してみたが、いずれの場合も  $1 \times 2$  構造が出現する。一方、 $1 \times 3$  構造は表面をアニールして活性化した場合のみ観測される。これは以前報告した K/Pd(110) 表面の様子とよく似ている [5]。比較のため、K 吸着 Pd(110) 表面の STM 像を図 3 に示す。 $1 \times 3$ 、 $1 \times 2$  いずれも消失原子列型構造をとる。 $1 \times 3$  構造に関しては、単位胞あたりの表面原子密度が  $1/3 \text{ ML}$  と  $2/3 \text{ ML}$  の 2 種類が考えられるが、STM によって  $2/3 \text{ ML}$  であることがわかる。図 3(c) では、消失原子列の周期性は 2 倍でも 3 倍でもなく、ランダムである。この不規則性が LEED 図形のストリークを生じさせていると考えられる。同様の不規則性は図 3(d) に示す K 一次元鎖でも観測される。これが LEED 図形でみられる線構造の起源と考えられる。Na/Ni(110) 表面の STM 像は大筋で K/Pd(110) と似ているが、原子分解されていないため、詳しいことはいえない。今後の課題である。

## 参考文献

1. *Physics and Chemistry of Alkali Metal Adsorption*, edited by H. P. Bonzel, A. M. Bradshaw, G. Ertl (Elsevier, Amsterdam, 1989).
2. R. L. Gerlach, T. N. Rhodin ; *Surface Science* vol.10, 446 (1968).
3. 栃原浩、水野清義；*日本物理学会誌*、第 52 巻、第 5 号 (1997).
4. 平成 16 年度年次報告
5. 平成 15 年度年次報告

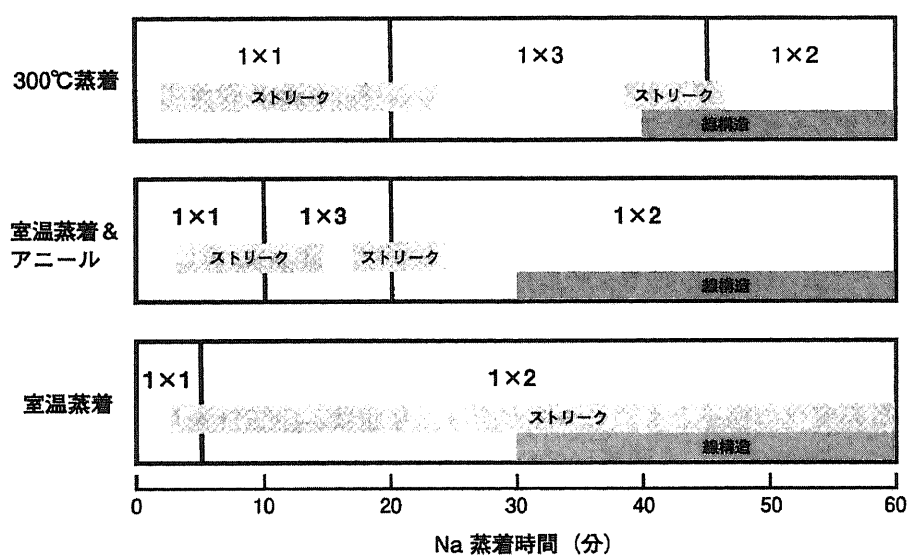


図 1 : Na 吸着 Ni(110) 表面の相図. 観察はすべて室温. Na 蒸着量は積算値で示している.



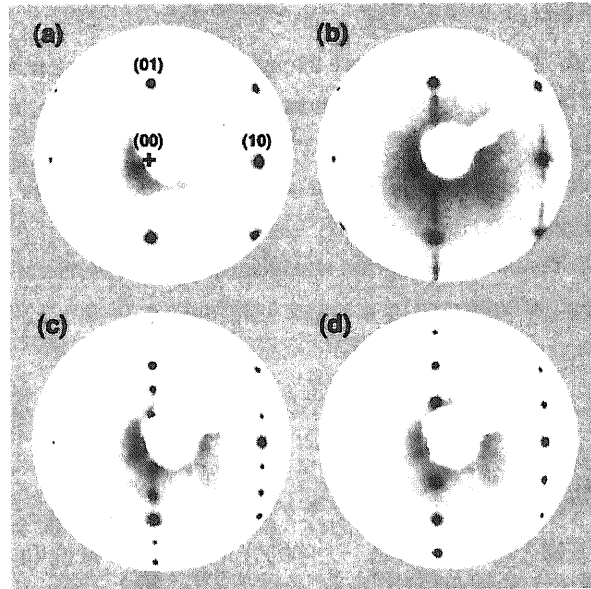


図 2 : Na 吸着 Ni(110) 表面の代表的な LEED 図形. 加速電圧は 80 eV. (a) 1×1、(b) ストリークを伴った 1×1、(c) 1×3、(d) 1×2. (a) のプラス記号 (+) は鏡面反射の位置を示している.

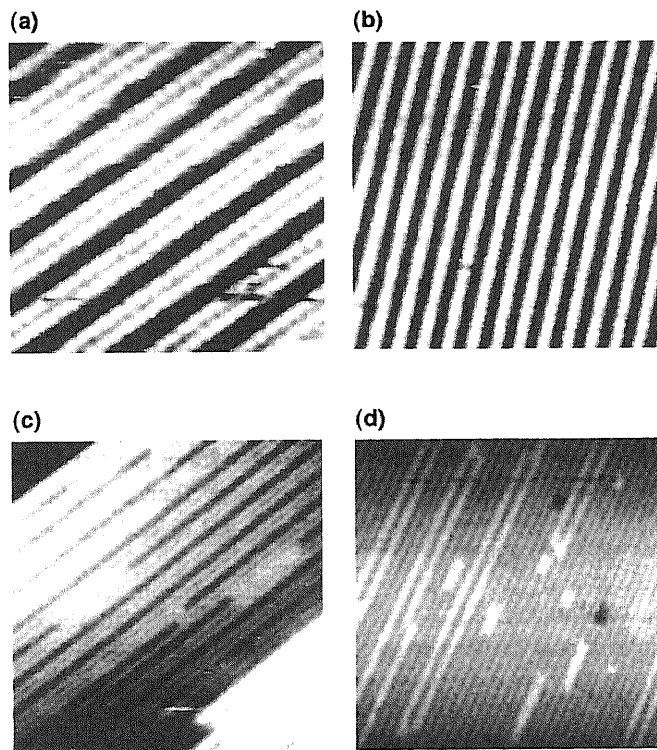


図 3 : K 吸着 Pd(110) 表面の STM 像. (a) 1×3 ( $60 \text{ \AA}^2$ )、(b) 1×2 ( $100 \text{ \AA}^2$ )、(c) 1×1 と 1×3 の共存領域 ( $150 \text{ \AA}^2$ )、(d) 1×2 表面上に成長した K 一次元鎖 ( $240 \text{ \AA}^2$ ).

## 〈論文〉

1. T. Arai and M. Tomitori, "Electric conductance through chemical bonding states being formed between a Si tip and a Si(111)7x7 surface by bias-voltage noncontact atomic force spectroscopy", Phys. Rev. B, **73**, 073307-1-073307-4 (2006).
2. T. Arai and M. Tomitori, "A Si nano-pillar grown on a Si tip by AFM in UHV for a high-quality scanning probe", Appl. Phys. Lett. **86**, 073110 (2005).
3. Z.A. Ansari, T. Arai, M. Tomitori, "Hexagonal arrangement of Ge clusters self-organized on a template of half unit cells of Si(111)-7 x 7 observed by scanning tunneling microscopy", Surf. Sci. Lett. **574**, L17-L22 (2005)

## 〈著書〉

1. 富取正彦、新井豊子 (分担執筆)「実践ナノテクノロジー・走査プローブ顕微鏡と局所分光」第3章 各種分光法の基礎と応用 3・2 力学的分光 3・2・4 散逸 (非保存力) (裳華房、2005)
2. 富取 正彦、新井豊子: 「最近の研究と技術 "電圧印加非接触原子間力顕微鏡 法を利用した探針-試料間の相互作用力分光法」、顕微鏡 40 (3), pp193-195 (2005)
3. 新井豊子、富取 正彦: 「電圧印加非接触原子間力分光法による量子力学的共鳴相互作用の測定」、固体物理 40 (8), pp581-590 (2005)

## 〈講演〉

### 国際会議

1. Toyoko Arai, Masahiko Tomitori: Bias voltage noncontact atomic force spectroscopy simultaneously measured with current, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4), ソニックシティ, 大宮, 14 Nov. 2005.
2. A. Itabasi, T. Arai, M. Tomitori, H. Murata: Vertically Aligned p-Conjugated Molecules Directly Attached to Silicon Surface via Covalent Bond, JAIST International Symposium on Nanotechnology 2005, ハイテク交流会館, 石川県, 15 Sep. 2005.
3. Toyoko Arai, Masahiko Tomitori: Bias voltage noncontact atomic force spectroscopy with measuring current, 8th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy, Bad Essen, Germany, 18 Aug. 2005.
4. Masato Hirade, Toyoko Arai, Masahiko Tomitori: Energy Spectra of Electrons Backscattered from Sample Surfaces with Hetero Structures using Field Emission Scanning Tunneling Microscopy, 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/ Spectroscopy and Related Techniques (STM05), 札幌コンベンションセンター, 札幌, 7 July 2005.
5. Z.A. Ansari, T. Arai, M. Tomitori: Self-Assembled Ge Nano-Clusters Grown on Si(111)-7x7 at Elevated Temperatures, 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques (STM05), 札幌コンベンションセンター, 札幌, 7 July 2005.
6. M.M. Rahman, T. Yamagishi, Toyoko Arai, Masahiko Tomitori: Electron Standing Wave Analysis in an STM Vacuum Gap for Nano-Structure Fabrication on Si Surfaces, 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques (STM05), 札幌コンベンションセンター, 札幌, 5 July 2005.
7. Toyoko Arai, Masahiko Tomitori: Bias-Voltage Dependence of Chemical Bonding Force Detected by Noncontact Atomic Force Microscopy/Spectroscopy (invited), 13th International Conference on Scanning

Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques (STM05), 札幌コンベンションセンター, 札幌, 4 July 2005.

#### 国内学会

1. 新井 豊子、富取 正彦：非接触原子間力分光法による極近接状態の相互作用力とコンダクタンスの測定、日本物理学会第61回年次大会、松山大学、松山 2006.3.30.
2. 新井 豊子、富取 正彦：清浄 Si 探針と Si 表面の相互作用力と電流の電圧印加-非接触原子間力分光法による測定、第53回応用物理学関係連合講演会、東京理科大学、野田、2006.3.25.
3. 田中 倫子、古家 真之介、新井 豊子、富取 正彦、渡邊 聡：探針-試料間に誘起する変位電流によるジュール熱の第一原理計算、日本物理学会2005年秋季大会、同志社大学、京田辺、2005.9.19.
4. 新井 豊子、富取 正彦：電圧印加非接触原子間力顕微鏡／分光法による探針-試料間相互作用の解析、日本物理学会2005年秋季大会、同志社大学、京田辺、2005.9.19.
5. 新井 豊子、富取 正彦：電圧印加非接触 AFM による原子-原子間相互作用力の分光計測、第66回応用物理学学会学術連合講演会、徳島大学、徳島、2005.9.8.
6. 平出 雅人、新井 豊子、富取 正彦：電界放射 STM を用いた Al/Si(111)からの後方散乱電子エネルギースペクトルの測定、第66回応用物理学学会学術連合講演会、徳島大学、徳島、2005.9.7.
7. 新井 豊子：電圧印加非接触原子間力顕微鏡/分光法の開発（招待講演）、日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会 第39回研究会、東京工業大学、横浜、2005.7.27.
8. 富取 正彦、新井 豊子：原子間力顕微鏡の探針先端制御と電圧印加ナノ力学分光、日本顕微鏡学会第61回学術講演会、エポカルつくば、つくば、2005.6.1.

#### 〈受賞〉

##### 1. ナノプローブテクノロジー賞

新井 豊子

授与機関：日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会

業績名：電圧印加非接触原子間力(顕微鏡)分光法の開発