

摩 擦 力 顕 微 鏡

— ミクロな摩擦力の解釈 —

森田清三・菅原康弘*・藤沢 悟*

大田昌弘*・上山仁司*

広島大学理学部附属微晶研究施設 ☎739 東広島市鏡山 1-3-1

*広島大学理学部物理学科 ☎739 東広島市鏡山 1-3-1

(1995年5月31日受理)

Frictional Force Microscopy

— Explanation of Microscopic Frictional Force —

Seizo MORITA, Yasuhiro SUGAWARA*, Satoru FUJISAWA*,
Masahiro OHTA* and Hitoshi UHEYAMA*

Laboratory of Crystal Physics, Faculty of Science,
Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739

*Department of Physics, Faculty of Science,
Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739

(Received May 31, 1995)

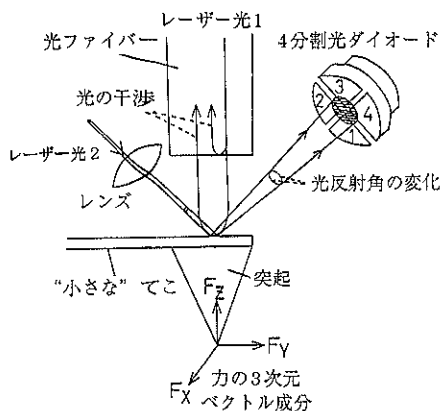
《力の単原子観察》を期待して開発された原子間力顕微鏡 (AFM) は、つい最近まで、「AFM で何を見ているのか?」「何が見れるのか?」さえ不明の状態であった。ここでは、原子レベルの接触 (斥力) 測定の場合、光干渉方式の AFM ではてこの《Z 変位》つまり真の凹凸測定が可能だが、光てこ方式の原子間力 / 水平力顕微鏡 (AFM / LFM) では、AFM 機能でてこの《たわみ》が LFM 機能でてこの《ねじれ》が測定可能で、結果的には、2 次元の摩擦力ベクトルを測定できる 2 次元摩擦力顕微鏡 (2D-FFM) となることを紹介する。また、光干渉方式の超高真空 AFM を用いて、InP(110) へき開面の原子レベルの欠陥が観察できたことより、非接触 (引力) 測定では真の力の単原子観察が可能なることも明らかにした。さらに光てこ方式の AFM / LFM つまり 2 次元摩擦力顕微鏡を用いて、ミクロな摩擦を原子レベルで研究した結果、原子レベルでの摩擦の原因は原子間の凝着で、凝着点は格子位置に 2 次元的にかつ不連続に分布しており、この凝着点へのスティック (凝着) とスリッパ (滑り) が交互に起きるスティック・スリッパモデルで、周期や波形だけでなく、摩擦力による (変位) 振幅が定量的に予想可能で実験的にも定量的な一致が得られることを紹介する。

1. 原子間力顕微鏡は何を見るか?¹⁾

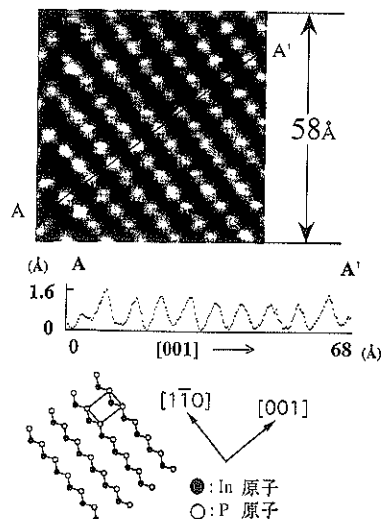
図 1 は、てこの変位を光で測定する光方式の AFM を示す。レーザー光 1 はファイバー端面とてこ背面からの光の反射光の干渉を測定する光干渉方式の AFM で、てこ背面の Z 方向の距離変化《Z 変位》を測定する。他方、レーザー光 2 は、てこ背面の光の反射角の変化を 4 分割の光ダイオードで測定する。光てこ方式の原子間力 / 水平力顕微鏡 (AFM / LFM) で、光の反射角の上下の変化を測定する AFM 機能でてこの《たわみ》を測定でき

るだけでなく、光の反射角の左右の変化を測定する LFM (水平力顕微鏡) 機能でてこの《ねじれ》も測定できる。

AFM のてこの先端の突起に働く力 F は、一般に図 1 に示すように、3 次元ベクトルである。したがって、光干渉方式の AFM や光てこ方式の AFM / LFM では「測定している力のベクトル成分は何か?」「力の X や Y や Z 成分がてこにどのような変位を起こすのか?」を考える必要がある。具体的には、力の Z 成分 F_z はてこの《Z 変位》と《たわみ》を引き起こすが、力の Y 成分 F_y はてこの《たわみ》のみを引き起こし、力の X 成分 F_x はてこの

図1 光方式の代表的な原子間力顕微鏡のモデル図¹⁾

《ねじれ》のみを引き起こす。結果として、光干渉方式のAFMでは、《Z変位》を引き起こす力のZ成分 F_z のみを測定するので、AFM出力は $V_{AFM}=aF_z$ となる。他方、光てこ方式のAFM/LFMでは、AFM機能で《たわみ》を引き起こす力のZ成分 F_z と力のY成分 F_y を測定するので、AFM出力は $V_{AFM}=aF_z+bF_y$ となる。また、LFM機能では、《ねじれ》を引き起こす力のX成分 F_x を測定するので、LFM出力は $V_{LFM}=cF_x$ となる。他方、原子的に平坦な表面をもつ試料の接触(斥力)測定では、抗力 N は垂直方向を向くのでZ成分 N_z のみとなるが、摩擦力 f は水平方向を向くのでXY成分(f_x, f_y)のみとなる。したがって、AFMのてこ先端の突起に働く力 F のベクトル成分は、(f_x, f_y, N_z)となる。その結果、光干渉方式のAFM出力の変化は $\Delta V_{AFM}=a \Delta N_z$ となり、抗力の変化 ΔN_z のみを測定できるので真の凹凸測定が可能となる。他方、光てこ方式のAFM/LFMでは、AFM出力の変化は $\Delta V_{AFM}=a \Delta N_z+b \Delta f_y$ となり、LFM出力の変化は $\Delta V_{LFM}=c \Delta f_x$ となる。したがって、光てこ方式のAFMによる接触測定では、抗力の変化 ΔN_z 以外に摩擦力のY成分の変化 Δf_y も寄与するので、 $|a \Delta N_z| \gg |b \Delta f_y|$ の場合以外は、真の凹凸測定は非常に困難となる。逆に、 $|a \Delta N_z| \ll |b \Delta f_y|$ を満足すれば、AFM出力の変化は $\Delta V_{AFM} \approx b \Delta f_y$ となり、LFM出力の変化は $\Delta V_{LFM}=c \Delta f_x$ なので、光てこ方式のAFM/LFMは、2次元の摩擦力ベクトルの変化を測定できる2次元摩擦力顕微鏡(2D-FFM)となる。なお、現実には、凹凸変化に伴う抗力の変化 ΔN_z は荷重によらないが、摩擦力の変化 Δf_y は荷重とともに増加する傾向があるので、 $|a \Delta N_z| \ll |b \Delta f_y|$ をかなり広範囲の荷重下で満足する。

図2 光干渉方式のUHV-AFMによるInP(110)へき開面の接触測定による格子像と[001]方向の断面図と原子配置のモデル図²⁾

2. 原子間力顕微鏡による力の単原子観察¹⁾

AFMは、小さなてこ先端の1個の原子と試料表面の1個の原子の間に働く原子間力を測定する、原子間力顕微鏡として開発された。つまり『トンネル電流の単原子観察』を行う走査型トンネル顕微鏡(STM)に対して、『力の単原子観察』を期待してAFMは開発された。最近、AFMによる力の単原子(または数個の原子による)観察について、以下のような進歩が見られた。

接触(斥力)測定でも、真の凹凸測定が可能な光干渉方式のAFMを超高真空排気装置に組み込んだUHV-AFMを開発して、化合物半導体へき開面を接触(斥力)測定した結果、ダングリング・ボンドの存在する清浄表面でも格子像や原子像が得られることが判明した。図2は、接触測定で得たInP(110)へき開面のAFM像であるが、格子像が明瞭に得られている²⁾。この実験で、ダングリング・ボンドをもつ半導体清浄表面の接触(斥力)測定でも格子像や原子像を得ることが可能なことが示されたことは非常に重要で、AFMの超高真空中でのサイエンス・ツールとしての応用への道を拓くものである。他方、このような接触測定では、原子レベルの欠陥が観察されないで、「真の単原子観察が実現されているのか？」については疑問が残った。そこで、つぎに非接触で測定する方法が検討された。具体的には、硬いてこを用いて、試料表面から10Å以内にてこ先端が近づくようにてこを共振させた状態で、FM(周波数)変調による測定を行う。図3は、光干渉方式のUHV-AFMを用いたFM変調によるInP(110)へき開面の非接触(引力)測定

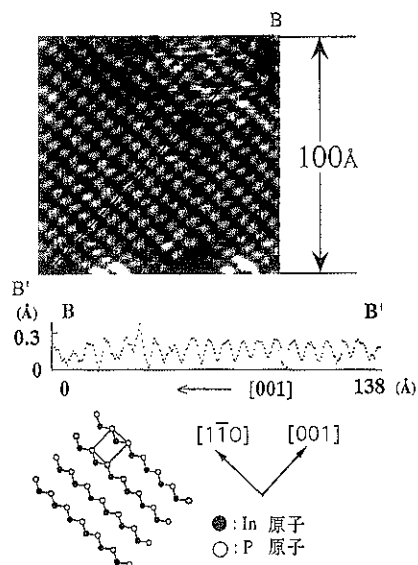


図3 光干渉方式のUHV-AFMによるInP(110)へき開面の非接触測定による格子像と[001]方向の断面図と原子配置のモデル図³⁾

の結果である³⁾。図3では明瞭な格子像が全面に見えるだけでなく、画面の下側に原子レベルの欠陥や吸着物が明瞭に画像化されており、まさに『AFMによる真の単原子観察の実現』といえる。この方法では、表面が非常に活性な材料でも原子分解能を得ることが可能なので、今後、AFMの応用分野は急速に発展・拡大すると期待される。他方、同じInP(110)へき開面の[001]方向の凹凸が、接触(斥力)測定した図2と非接触(引力)測定した図3で、それぞれ1.3Åと0.2Åと非常に異なるが、この事実はAFMの画像化機構と関連した非常に重要な問題と思われる³⁾。

3. 2次元摩擦力顕微鏡による摩擦力の格子像¹⁾

光てこ方式のAFM/LFM, すなわち、2次元摩擦力顕微鏡(2D-FFM)を用いて測定したMoS₂へき開面での、摩擦力のX成分(f_x)とY成分(f_y)の像を図4に示す。ここで、 f_x は f_x によるこの《ねじれ》を、 f_y は f_y によるこの《たわみ》を光の反射角の変化として測定した。また、図4(a)はてこの長さ(Y)方向に、図4(b)はてこの長さと同直交する(X)方向に(高速)走査を行った場合の摩擦力の2次元像である。測定は、 $\sim 1.8 \times 10^{-7}$ Nの大きい荷重を掛けた斥力領域で行っている。

図4(a)と(b)の摩擦力像は、図4の左側のモデル図に示したような格子像となっており、格子軸の並びがX方向になるように試料を固定していることがわかる。測

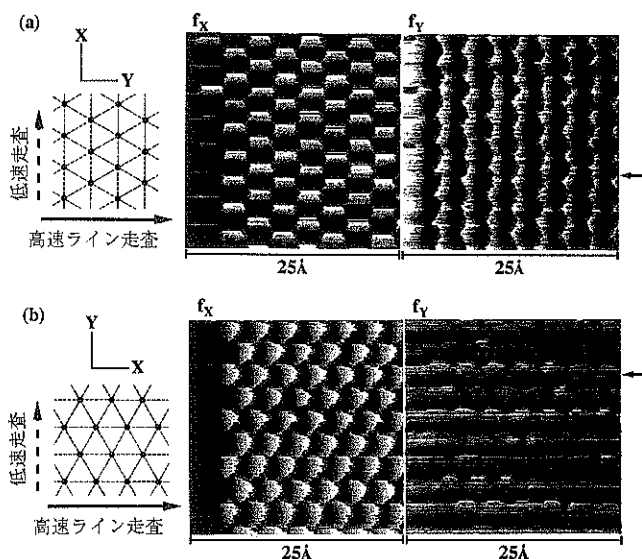


図4 2次元摩擦力顕微鏡によるMoS₂へき開面の摩擦力の格子像¹⁾
(a) Y走査と(b) X走査の f_x と f_y の格子像と格子のモデル図(左側)¹⁾

定したMoS₂格子像の周期は 3.1 ± 0.3 Åで、格子定数3.16 Åとはほぼ一致しており、対称性もMoS₂へき開面の構造とはほぼ一致している。また、走査方向が異なる図4(a)と(b)では、走査方向の違いにより、格子の並び方が90°異なって見えていることが、左側の格子モデルの図との比較でわかる。図4の結果は、原子レベルの摩擦力が格子周期をもっていること、すなわち、空間的に格子周期に量子化された摩擦力(量子摩擦)が原子レベルで働いていることを意味している。

4. 格子周期で2次元的に変化する摩擦力¹⁾

図4のように摩擦力が格子像となる原因、つまり、格子周期で摩擦力が変化する原因を解明するため、図4の矢印部分の走査方向の代表的波形の検討を行った。図5(a)のY走査方向の f_y 出力には、ノコギリ波形をもつ摩擦特有のスティック・スリップ[静止摩擦力によるスティック(付着または凝着)とスリップ(滑り)が交互に起こる摩擦現象]が観測されている。この事実は、測定した高荷重条件下では、AFM/LFMが2次元の摩擦力顕微鏡として働いていること、すなわち、AFM出力も摩擦力のY成分(f_y)像となっていることを意味する。実線は、左から右への走査のデータである。このノコギリ波の間隔は、約2.7 Åで、図5(c)の格子モデル図のY方向の格子間隔5.48 Åの約半分の値となっている。他方、走査方向と直交するX方向にも f_x 出力が観測されている。 f_x 出

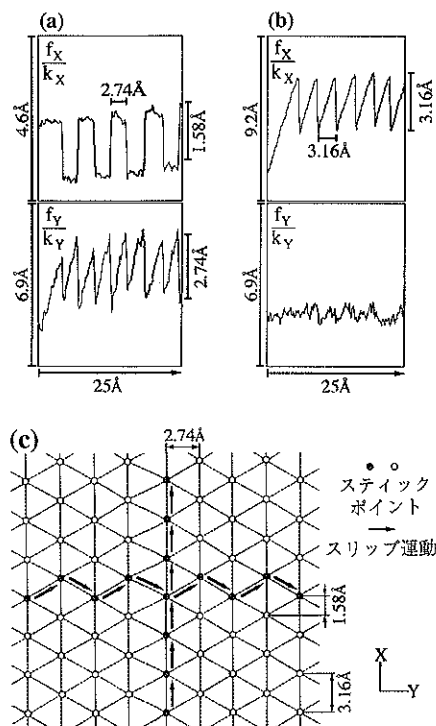


図5 (a) Y走査と (b) X走査の、図4の矢印位置での代表的な f_x と f_y の摩擦力波形¹⁾ (c) 白丸と黒丸で示した凝着点の格子分布モデルと黒丸で示したY走査とX走査に対応した2次元のスティック・スリップモデルによる凝着点の軌跡¹⁾

力は、摩擦力のX成分そのものなので、単純に考えると、この事実は、走査方向はY方向なのに、走査方向と直交するX方向にも摩擦力が発生していることを示す。 f_x 出力の波形は矩形波で、その周期は約5.5 Åで、ほぼ図5(c)のY方向の格子間隔5.48 Åと一致している。つまり、同期はしているが、矩形波の周期はノコギリ波の周期の2倍である。

図5(b)は、X方向への走査の代表的な波形だが、走査方向の f_x 波形には、摩擦特有のスティック・スリップ波形(ノコギリ波)が観測される。このノコギリ波の間隔は、約3.1 Åで、図5(c)の格子モデル図のX方向の格子間隔3.16 Åの値とほぼ一致している。他方、走査方向と直交するY方向の f_y 出力の走査による変化は、ノイズ・レベル以下である。

5. 凝着点の空間的量子化と量子ジャンプ¹⁾

図5(a)と(b)の実験結果を説明するために、図5(c)のような『2次元のスティック・スリップのモデル』を考えた。図5(b)のX方向の走査では、 f_x 像のノコギリ波の間隔が格子定数3.16 Åと一致したことより、凝着点

(スティック・ポイント)の間隔は格子定数と同じであると考えた。つまり、原子レベルでは『凝着点は格子間隔で空間的に量子化』されていると考えた。さらに、走査方向と直交するY方向の出力、つまり f_y 像の走査波形は走査により変化しないことより、AFMでこの先端の《たわみ》つまり突起先端の凝着点のY位置はX走査により変化しないと考えた。その結果、図5(c)のX方向に真っすぐ並んだ●の《凝着点の軌跡》のように、X方向の走査では、格子間隔で凝着点が分布しており、その凝着点を格子間隔で真っすぐ直線状にスティック・スリップつまり『量子ジャンプ』を繰返していくというモデルにたどりついた。

他方、図5(a)のY方向の走査では、 f_y 像のノコギリ波の間隔がY方向の格子間隔5.48 Åの半分となっている。したがって、てこが動く凝着点のY方向の間隔は、格子間隔5.48 Åの半分の2.74 Å間隔で分布していると考えた。一方、走査方向と直角の摩擦力 f_x の走査波形の間隔は、格子間隔と一致している。したがって、格子間隔の周期でAFMでこの先端のねじれ、つまり突起先端の凝着点のX位置はY走査により変化していると考えた。このような考え方に合う《凝着点の軌跡》として、図5(c)のY方向の●に示すように、Y方向の走査により2.74 Åの間隔で凝着点のX位置がY走査方向と直角方向に動く、量子ジャンプが『ジグザグ・ジャンプ』となる2次元のスティック・スリップモデルを考えた。このモデルだと、ノコギリ波の周期が格子間隔の周期の半分となり、同期して凝着点が走査方向と直角方向に交互に動くので、格子間隔の周期で走査方向と直交する方向に矩形波の摩擦力が出現することも説明できる。

6. 2次元スティック・スリップモデルの定量的検証¹⁾

格子周期の摩擦力の理論的な予測を、図5(c)の2次元スティック・スリップモデルで考えると、Y方向の走査では、ノコギリ波の周期 ΔY の間はスティック(付着)状態でバネがたわみ続けるとすると、ノコギリ波の高さを決める《たわみ》の原因となるY方向の移動距離つまり振幅は $\Delta Y = f_y/k_y = 2.74 \text{ Å}$ となる。また、矩形波の高さを決める《ねじれ》の原因となるX方向の移動距離つまり振幅は $\Delta X = f_x/k_x = 1.58 \text{ Å}$ となる。他方、X方向の走査では、ノコギリ波の周期 ΔX の間はスティック(付着)状態でバネがねじれ続けるとすると、ノコギリ波の高さを決める《ねじれ》の原因となるX方向の移動距離つまり振幅は $\Delta X = f_x/k_x = 3.16 \text{ Å}$ となる。他方、測定で得られる電圧出力を、摩擦力の原因となる移動距離に校正すると、《たわみ》出力 V_{AFM} から移動距離 ΔY が、《ねじれ》

表1 MoS₂での2次元のスティック・スリップモデルの定量的検証結果

			理論値 (Å)	実験値 (Å)
Y方向へ走査 [図5(a)]	f_x 矩形波	周期	5.48	5.4±0.6
		振幅	1.58	1.6±0.2
	f_y ノコギリ波	周期	2.74	2.7±0.3
		振幅	2.74	2.7±0.3
X方向へ走査 [図5(b)]	f_x	周期	3.16	3.1±0.3
	ノコギリ波	振幅	3.16	3.1±0.3

出力 V_{LFM} から移動距離 ΔX が求まる⁴⁾。その結果も、表1の実験値の振幅欄に表示した。両者を比較すると、摩擦力の出力すなわち振幅も、2次元スティック・スリップモデルの予言とフィッティング・パラメータなしに完全に一致することが明らかで、この結果は、2次元スティック・スリップモデルの正しさを定量的に証明するものである。

7. 原子レベルの面摩擦と単原子摩擦¹⁾

図4のMoS₂へき開面のような、層状物質での摩擦力像は、10⁻⁶N程度の大きな荷重でも格子構造を示す。他方、1個の原子で支えられる荷重つまり《単原子荷重限界》は数nN以下であり、10⁻⁶N程度の大きな荷重は、摩擦に寄与する接触原子数が数百個の規模であることを意味する。この場合、格子構造が観察されるには、同じ結晶構造と同じ格子定数をもつ同じ材料のコメンシュレイトな摩擦が起こっていることが必要となる。したがって、AFMでこによる高荷重下での接触測定時に、層状物質がへき開して小さなフレーク（へき開切片）ができると推定できる。その結果、測定時にはフレークがAFMでこと一緒に動いて層状物質のフレークと試料とのコメンシュレイトな面摩擦が起こり、格子周期をもつ《原子レベルの面摩擦》が発生して、大きな荷重下でも摩擦力の格子像が観測可能となっていると推測される。

そこで、原子レベルの面摩擦ではなく、AFMでこ側の1個の原子と試料側の1個の原子との《単原子摩擦》の観測を目指して、層状物質と比較してへき開しにくい3次元物質であるアルカリハライド結晶の2次元摩擦顕微鏡による摩擦力測定を行った。その結果、NaF(100)面でも格子周期をもつ摩擦力像が得られ、摩擦波形がノコギリ波や矩形波を示すことと、周期や波形だけでなく振幅も2次元のスティック・スリップモデルで説明可能なことを確認した。なお、格子周期をもつ摩擦力像が得られる荷重領域は約10nN以下であることより、接触原子数が数個以下の単原子摩擦に近い摩擦が3次元物質で起こっていることも確認されている⁵⁾。

8. ミクロな摩擦とマクロな摩擦^{1,5)}

マクロな巨視的摩擦でも、摩擦の原因は接触面の凹凸ではなく、接触面の凝着であると考えられており、その素過程は原子間の凝着力（または付着力）であると信じられている。ただし、マクロな摩擦では、摩擦を起こす物体つまり固体を連続体と考えており、その結果、摩擦は接触面に沿って物体を動かそうとする力と逆方向に働くと考えてきた。つまり、マクロな摩擦では、摩擦の原因は凝着力だが、摩擦現象を1次元的に考えてきた。

他方、ミクロな微視的摩擦でも、摩擦の原因は接触面の凹凸ではなく原子間の凝着であることを、今回の実験結果は示している。ただし、原子レベルでは《物体は格子周期をもつ不連続体》であり、原子レベルの小さい荷重では原子間の凝着力が外部荷重と同じ程度の大きさとなるので《凝着力が荷重と同じ意味をもつ》ことになる。また、凝着は格子周期をもつ原子間に起こるので、《凝着力には接触面上の2次元的方向性があり》、外部からの物体を動かそうとする力の方向と異なる方向に凝着力つまり摩擦力が働く場合がある。この場合は、マクロな場合の、『摩擦は接触面に沿って物体を動かそうとする力と逆方向に働く』という摩擦の基本原則すら破れてしまう。このように、ミクロな摩擦はマクロな摩擦と基本原則ですら異なっているが、原子レベルの摩擦の研究により、素過程からの物理的理解が進めば、マクロな摩擦の制御や抑制が自由にできる可能性があり、原子レベルの摩擦や摩耗や潤滑の研究の今後の発展が期待される。

なお、原子間力顕微鏡で、原子レベルの振幅の理論的予想と実験結果が、任意性を残さず完全に一致したのは、この摩擦測定が初めてであり、また、摩擦においても摩擦による原子レベルの変位の理論的予想と実験結果が完全に一致したのは初めてであることに注目して欲しい。

文 献

- 1) 森田清三：“原子間力顕微鏡のすべて” Kブックシリーズ 108 (工業調査会, 1995)。
- 2) M. Ohta, Y. Sugawara, F. Osaka, S. Ohkouchi, M. Suzuki, S. Mishima, T. Okada and S. Morita : J. Vac. Sci. Technol. **B 13**, 1265 (1995).
- 3) 大田昌弘、上山仁司、菅原康弘、森田清三：応用物理 **64**, 583 (1995).
- 4) S. Fujisawa, E. Kishi, Y. Sugawara and S. Morita : Appl. Phys. Lett. **66**, 526 (1995).
- 5) 森田清三、藤沢 悟、岸 栄吾、菅原康弘：表面 (広信社) **33**, 201 (1995).