

トンネル現象や原子間力のメカトロニクスへの応用

Applications of Tunneling and Atomic Force Detection to Machines and Scientific Instruments

川 勝 英 樹*

Hideki KAWAKATSU

本解説ではその発明からおよそ10年を数える走査型トンネル顕微鏡 (STM)¹⁾と原子間力顕微鏡 (AFM)²⁾の研究を取り上げる。この分野の研究を大別すると、(1)理論、(2)観察対象に関心のあるもの、(3)観察方法や新しい制御方法、(4)作動原理を応用して新しい機能を得ようとするもの、などにわけられる。本解説では、上記の(3)、(4)を中心に、メカトロニクスの分野から興味のあるものを紹介する。

1. ま え が き

走査型トンネル顕微鏡 (scanning tunneling microscope, STM)¹⁾と原子間力顕微鏡 (atomic force microscope, AFM)²⁾はその発明から約10年を数える。これらの顕微鏡はその非常に高い分解能のために原子オーダーの表面分析器として今日非常に重要なものとなっている。

STMやAFMは探針の機械的な走査によって原子オーダーの像を得ている。このことは、サブナノメートルオーダーの領域に置いて、位置決め、力検出、変位、などが制御対象となることを実証したといえる。そのため、STMやAFMの開発に刺激され、ナノメートルオーダーの研究が80年代に活発に行われるようになった。

研究の例を挙げると、(1)加速度検出、(2)測長、(3)位置決め、(4)力検出、(5)ナノトライボロジ、(6)加工、(7)重力波検出、などである。以下に順を追ってそれらの研究を紹介する。

2. 加 速 度 検 出

探針と試料の間隔をナノメートルオーダーに設定し、その間に数mVの電位差を与えると、トンネル電流が流れる。トンネル電流の値は間隙の関数として定まるため、逆にトンネル電流の変化から間隙の変化を知ることができる。Baskiらは、探針を支えたカンチレバーの変位をトンネル電流の変化から検出する装置を考案した³⁾。これによって、加速度が検出される。Kennyらは、この原理を用いた加速時計を開発し、従来の方式の加速度計との性能比較を行っている⁴⁾。探針の劣化によるトンネル信号の変化の問題に関しては、3ヵ月間同一の探針で作動が可能であったこと、走査を行わないので一般のSTMほど

探針の状態への要求は大きくないことが報告されている。加速度計の小形化の試みとして、上記のBaskiらはカンチレバーをシリコンの加工で作製したものを用いている。ただし、探針の制御は従来のピエゾ素子を用いている。一方、Fujitaらは、静電アクチュエータを用いてトンネルギャップを制御する研究を進めており、この原理を応用したオンチップ加速度計の実現が期待されている⁵⁾。

3. 測 長

STMやAFMを用いて観察物の測長を行うという研究が行われている。STMやAFMの探針の走査には一般的にピエゾ素子が用いられている。ピエゾ素子の電圧に対する変位特性は測長の基準として用いるには問題がある。そのため、測長への応用では、なんらかの方法で探針の変位を校正したものが用いられている。研究の例を挙げると、Emchらは、生体関連物質の観察を目的としたSTMを開発し、その校正にレーザ干渉計を用いている⁷⁾。また、Fujiiらは、AFMの探針の変位をXYの2軸に関してレーザ干渉計で校正したものを開発している⁸⁾。Kawakatsuらは、トンネルユニットを2個有するSTMを開発し、一方のSTMで観察されるグラフアイトの結晶像を用いて他方のSTMの像のスケールを校正する研究を行っている⁹⁾。本方法は、高い分解能での校正を可能とするが、レーザと比較すると広い走査範囲を校正することがやや困難であるという問題を有す。

回路のパターン幅を正確に測定し、線幅の規格化を行うための研究が行われている¹⁰⁾。それらの研究では、レーザ干渉計で校正されたXYステージに試料を載せ、電子顕微鏡で試料の観察を行っている。この研究では、線の端部を正確に検出することが課題の1つとされている。STMやAFMを用いて同様の測定をする場合も、走査方向や探針形状などの影響を考慮した端部検出が必要にな

*東京大学生産技術研究所 第2部

ると考えられる。

4. 位置決め

STMやAFMでは、走査に先だって探針を試料の近傍に位置決めする必要がある。しかも、位置決めの際して、探針を試料に接触させてはならない。この要求から、さまざまな位置決め機構が開発された。なかにはSTMよりも以前から存在するものもあるが、例を列挙すると、(1)インチワーム、(2)ラウス、(3)てこによる減速、(4)ネジによる減速、(5)衝撃力を探針の粗動位置決めに使った例は多く、Pohl¹¹⁾、Corb¹²⁾、Ph. Niedermann¹³⁾、Stupian¹⁴⁾、Anders¹⁵⁾、Kawakatsu⁹⁾などによる応用例がある。

STMやAFMの作動原理そのものを位置決めに応用したのものとしては、Pohlらのトラッキングトンネルマイクロスコープ¹⁶⁾、Kawakatsuらの結晶格子を基準に用いてXYテーブルを位置決めする研究がある¹⁷⁾。

5. 力検出

AFMはその名前が示すように、力を検出する顕微鏡である。AFMは当初トンネルギャップの変化とカンチレバーのバネ定数から力を検出するものであったが²⁾、その後、レーザ干渉計を用いてカンチレバーの変位を検出するものや、光てこを用いるものが開発されている^{18)~20)}。現在、市販されているAFMの多くは光てこ式である。光てこ式を提唱したMeyerとAmerは、カンチレバーのたわみとねじれの両方を一度に検出する光学系を用いて、走査面方向の力を検出できる装置を開発している²¹⁾。結晶ステップを乗り越えるときに、ほぼ一定の仕事(17eV)が必要であったと報告されている。他の力検出に関する研究の例としては、接触力²²⁾、ファンデルワールス力²³⁾、磁力²⁴⁾、静電力²⁵⁾などを測った例が挙げられる。上記の実験では、たとえば磁力の測定には探針に微小な磁石を用い、静電力の測定の場合は探針の電荷と試料の電荷の力を検出している。

6. ナノトライボロジ、マイクロトライボロジ

ナノメートルオーダのトライボロジがSTM、AFMから派生している。例としては、Kanekoらの行った実験が挙げられる^{26),27)}。この研究では、STMのように探針の走査を行って、探針に加わる走査方向の力を検出するものである。ほかの研究で探針と試料の摩擦力の検出に着目した研究として、Eraldson、Mateらによる研究が挙げられる^{28),29)}。

第5節で述べたAmerによる2方向検出AFMは、原子オーダの分解能を有するナノトライボロジの実験機器であるといえる。

7. 加工

光を用いた観察や加工では、光の波長によってその分解能は制限される。これに対し、機械的な作動原理を持つSTMやAFMは、波長の制約を受けない。そのため、これらの顕微鏡を非常に微小な加工に用いることは、STMが開発されて間もない内から注目されていた。例として、電流を用いて試料を溶かしたり探針の一部を試料に飛ばすもの、探針を試料に直接押しつけて圧痕を残すもの、探針を加工用のバイトとしても用いて試料を切削するもの、探針を用いて原子をハンドリングするもの、などが報告されている^{30)~33)}。

8. 重力波検出

Binnigらは、トンネル電流のトンネルギャップの変位に対する高い感度を利用して、重力波を検出する装置を開発している³⁴⁾。

9. あとがき

以上、項目別に列挙を行った。はじめに記したように、本解説では、観察対象に着目した研究よりも、STMやAFMの作動原理から派生した研究に着目した。取り上げた研究が多岐にわたっていることや、研究の数から、STMやAFMの研究がいかに優れた萌芽の研究であったかがうかがえる。

(1991年8月7日受理)

参考文献

- 1) G. Binnig and H. Rohrer, *Helev. Phys. Acta* 55, 726 (1982).
- 2) G. Binnig, C. Quate, and Ch. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* 56, 930 (1986).
- 3) A.A. Baski, T.R. Albrecht and C.F. Quate, *J. Microsc.* 152, 73 (1988).
- 4) S.B. Waltman and W.J. Kaiser, *Sensors and Actuators* 19, 201 (IEEE 1989).
- 5) T.W. Kenny, S.B. Waltman, J.K. Reynolds, and W. J. Kaiser, in *Proceedings of the 3rd IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Napa valley, Calif. USA, (IEEE 1990).
- 6) Personal communications. *Inst. Ind. Sci., Univ. Tokyo* (1991).
- 7) R. Emch, P. Descouts, and Ph. Niedermann, *J. Microsc.* 152, 85 (1988).
- 8) T. Fujii, M. Suzuki, M. Miyashita, M. Yamaguchi, T. Onuki, H. Nakamura, and T. Matsubara, H. Yamada and K. Nakayama, *J. Vac. Sci. Technol.* B9, Mar/Apr, 666, (1991).
- 9) H. Kawakatsu, and H. Higuchi, *J. Vac. Sci. Technol.* A8, 319 (1990).
- 10) M.T. Postek, W.J. Keery, and S. Jones, in *Proceedings of SPIE*, 1087, 38 (1989).
- 11) D.W. Pohl, *Rev. Sci. Instrum.* 58, 54 (1987).

- 12) B.W. Corb, M. Ringger, and H.-J. Guntherodt, *J. Appl. Phys.* **58**, 3947 (1985).
- 13) Ph. Niedermann, R. Emch, and P. Descouts, *Rev. Sci. Instrum.* **59** 368 (1988).
- 14) G.W. Stupian and M.S. Leung, *J. Vac. Sci. Technol.* **A7**, 2895 (1989).
- 15) M. Anders, M. Thær, and C. Heiden, *Surf. Sci.* **181**, 176 (1987).
- 16) D.W. Pohl and R. Möller, *Rev. Sci. Instrum.* **59**, 840 (1988).
- 17) H. Kawakatsu, Y. Hoshi, T. Higuchi, and H. Kitano, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**, Mar/April (1991).
- 18) N.M. Amer and G. Meyer, *Bull. Am. Phys. Soc.* **33**, 319 (1988).
- 19) G. Meyer and N.M. Amer, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 1045 (1988).
- 20) S. Alexander, L. Hellemans, O. Marti, J. Schneir, V. Elings, P.K. Hansma, M. Longmir and J. gurley, *J. Appl. Phys.* **65**, 164 (1989).
- 21) G. Meyer and N.M. Amer, *Appl. Phys. Lett.* **57** 2089 (1990).
- 22) G. Binnig, Ch. Gerber, E. Stoll, T.R. Albrecht, and C.F. Quate, *Europhys. Lett.* **3**, 1281 (1987).
- 23) Y. Martin, C.C. Williams, and H.K. Wickramasinghe, *J. Appl. Phys.* **61**, 4723 (1987).
- 24) H.J. Mamin, D. Rugar, J.E. Stern, B.D. Terris, and S.E. Lambert, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 1563 (1988).
- 25) J.E. Stern, B.D. Terris, H.J. Mamin, and D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 2717 (1988).
- 26) R. Kaneko, *J. Microsc.* **152**, 363 (1988).
- 27) R. Kaneko, K. Nonaka, and K. Yasuda, *J. Vac. Sci. Technol.* **6** 291 (1988).
- 28) R. Eraldson, G.M. McClelland, C.M. Mate, and S. Chiang, *J. Vac. Sci. Technol.* **A6**, 266 (1988).
- 29) C.M. Mate, G.M. McClelland, R. Eraldson, and S. Chiang, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 1942 (1987).
- 30) U. Staufer, R. Weisendanger, L. Eng, L. Rosenthaler, H.R. Hiber, H.-J. Guntherodt, and N. Garcia, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 244 (1987).
- 31) Y.Z. Li, L. Vazquez, R. Piner, R.P. Andres, and R. Reifenberger, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 1421 (1989).
- 32) D.W. Abraham, H.J. Mamin, E. Ganz, and J. Clarke, *IBM J. Res. Develop.* **30**, 492 (1986).
- 33) T.R. Albrecht, M.M. Dovek, M.D. Kirk, C.A. Lang, C.F. Quate, and D.P. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1727 (1989).
- 34) presented at STM/AFM '89, Oarai, Ibaraki, Japan (1989).