

ナノスケールの振動板を使って量子現象をみる

アンドリュー・クレランド

きわめて小さい“飛び込み板”のような振動板を使うと、原子1つひとつを直接観察することができる。さらには力学的な量子効果さえ、みえる可能性がある。

力学的な振動を利用する計測は、昔から科学の研究に用いられてきた。たとえば、18世紀後半にはクーロン(Charles Augustin de Coulomb)がねじれ天秤の振動を用いて静電気力の研究を行い、“クーロンの法則”を確立した。キャベンディッシュ(Henry Cavendish)は同様のねじれ天秤を力学的に共振させて、その当時としてはきわめて高い精度で重力の値を測定した。現代でもさまざまな種類の力学的共振器が、物理的な測定に用いられている。長さ4 kmにも及ぶ力学的共振器が、LIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)*¹に用いられている(バリッシュ(Barry Barish)とワイス(Rainer Weiss)によるPhysics Today 1999年10月号44ページの記事を参照)。小さいものでは、単一電子のスピン、さらに究極的には1個の原子核のスピンによる磁気力を検出する力学的共振器が開発されている。

その極微の力学的共振器では、カン

チレバーとよばれるものが振動する。それは一端を固定された微小な梁のような振動板である。このナノメートルスケールの振動板がどのような性質をもつのかを理解するには、日常的な大きさの振動板と比較して考えてみるとよい。たとえば、飛び込みプールに突き出ている長さ2 m程度の“飛び込み板”を思い出してみよう。いま、体重50 kgのダイビング選手がその飛び込み板の先端に立ち、そのために板の先端が5 cm下がったとする。このことから、この飛び込み板はおよそ 10^4 N/mのばね定数 k をもつ弾性体とみなせることがわかる。ダイビング選手が飛び込み板からジャンプしてプールに飛び込むと、この飛び込み板は力学的共振周波数 ν で振動する。プールサイドで観察していると、 ν は数ヘルツ程度である(1秒間に数回振動する)ことがわかる。そうすると、この振動板の有効質量 m_{eff} は、単振動の式を使うと $m_{\text{eff}} \equiv k/(2\pi\nu)^2$ と書いて、およそ100 kgと計算できる。

この飛び込み板を百万分の1に小さくした状況を想像してみよう。そうすると、その振動板は、長さ(L)が $2\mu\text{m}$ 、厚さ(t)が20 nm、幅が200 nm程度になる。質量は体積に比例するから、プールサイドの飛び込み板の 10^{18} 分の1、すなわち 10^{-16} kg程度になる。オイラー-ベルヌーイの薄板理論によると、片持ち振動板の共振周波数は t/L^2 に比例するので数百万ヘルツにもなる。そうすると、振動板のばね定数 $k = m_{\text{eff}}(2\pi\nu)^2$ は 10^{-2} N/m程度になる。このようにメートルサイズの振動板をナノメートル程度まで縮小すると、共振周波数が桁違いに高くなり、加えて有効質量とばね定数が非常に小

さくることがわかる。この特性は、振動板が微弱な力で敏感に曲がることを意味している。

1個の原子をみる

1 mmにも満たないカンチレバーが原子間力顕微鏡(atomic force microscope, AFM)の心臓部であり、それによって原子1つひとつを観察できる分解能が達成されている(ルーガー(Daniel Rugar)とハンスマ(Paul Hansma)によるPhysics Today 1990年10月号23ページ[パリティ 1991年4月号8ページ]の記事を参照)。原子分解能を得るため、長さがおよそ $100\mu\text{m}$ のカンチレバーの先端に、〈図1〉に示すように、非常に鋭く上がった突起部をとり付けている。観察したい物体の表面をこの突起部でなぞりながらカンチレバーを動かすと、試料表面からの力によってカンチレバーがわずかにたわむ。そのたわみをレーザービームを使って検出する。あるいは、カンチレバー先端の突起を観察対象物の表面からほんのわずかに浮かせて動かす場合もある。このときでも観察試料の表面に接触していないにもかかわらず、微弱な力を受けてカンチレバーがわずかにたわむ。試料表面上に存在する電荷による静電気力や、局所的な電気双極子のゆらぎに起因するファンデルワールス力などを感じることができるのである。じつは、上述の飛び込み板と同じように、このカンチレバーを共振周波数で振動させているが、試料表面から受ける力によってカンチレバーの実効的なばね定数が変化し、その結果、共振周波数が変化するのである。だから、カンチレバーを共振周波数で振動させながら、その先端突起を観察対象

長谷川修司 訳

The versatility of nanoscale mechanical resonators

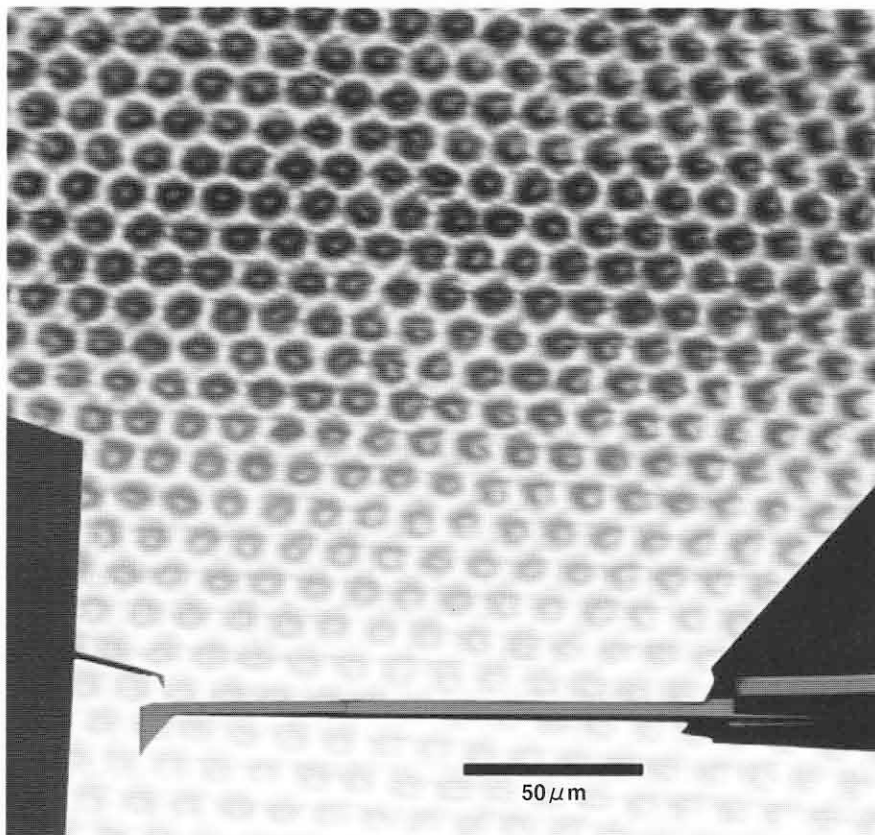
Andrew N. Cleland

Andrew Cleland is a professor of physics at the University of California, Santa Barbara.

Physics Today Vol. 62 No. 1
© 2009 American Institute of Physics

*1 [訳注]重力波による時空のわずかな歪みを、レーザー干渉計によって検出する装置。レーザー光を直交する二方向に分け、それぞれの長さがたとえば4 kmのアームを往復させる。重力波によって、一方のアームが伸び、他方が縮むことをレーザー干渉縞の変化から検出する。アームの長さが地球と太陽までの距離だったとしても、重力波による歪みはわずかに原子1個分程度である。測定感度を上

げるため、干渉計の鏡の熱振動や機械的振動などを避ける工夫がなされている。



〈図1〉カンチレバーとグラファイト

前面写真に示した比較的大きなカンチレバーは、原子間力顕微鏡 (AFM) の心臓部となる部品である。これによって原子分解能が達成できる。背景の写真は、そのAFMで撮ったグラファイト表面の格子像である。前面左の写真は、通常のカンチレバーの10分の1ほどの大きさで超軽量のカンチレバーである。共振周波数は9 MHzであり、通常のカンチレバーの共振周波数300 kHzよりはるかに高い。これによって、はるかに迅速な走査イメージングが可能となり、そのうえ熱雑音の影響を抑えることができる。(Courtesy AFM manufacturer Asylum Research, Santa Barbara, CA, USA. カラー画像は目次ページを参照。)

物の表面上すれすれで走査していくと、試料から受ける力が場所によって変わるので、共振周波数が変わり、それによって表面力の分布を描き出すことができる。そのようにして得た力の分布図は、物質表面の原子1つひとつを見分けられるほど分解能の高い顕微鏡像となる。

静電気力やファンデルワールス力だけが、このカンチレバーで検出できる力ではない。磁気共鳴力顕微鏡とよば

れる顕微鏡では、特別なカンチレバーが使われている。それによって物質最表面に存在する電子スピンや核スピンから受ける力を検出して、その力分布図を描くことができる。非常に小さな磁石をカンチレバー先端にとり付けると、観察物の表面上に存在する個々のスピンによる磁気モーメントが作り出す磁場さえ感じることができるのである。そのためにも、きわめて小さなばね定数をもつカンチレバーが必要で

ある。それには非常に長くて厚さの薄い、ぺらぺらのカンチレバーにすればよい。実際、カンチレバーの特性と励振条件を最適化して、1個の電子または数個の原子核によるきわめて微弱な磁気モーメントを検出して、スピン密度分布を顕微鏡像として描き出すことに成功している。たとえば、IBM研究所のルーガーと共同研究者たちは、単一電子のスピンを検出し、25 nmの空間分解能を達成している。究極的には磁気共鳴力顕微鏡によって、物質表面上にある個々の原子の磁気モーメント分布を描き出せるようになるかもしれない。そうすると、個々の原子がみえるだけでなく、磁気モーメントの大きさによって、観察している個々の原子の種類も同定できるようになるだろう。そうすると、たとえばたんばく質やDNA分子鎖の塩基配列などを直接的に決定できるかもしれない。

非常に小さな有効質量をもつナノメートルサイズのカンチレバーを使うと、きわめて微量な物質の質量を測ることができる。カンチレバーの先端に物質を付着させると、その共振周波数がわずかに変化するので、それを測定すればよい。この手法によって、ジェンセン (Kenneth Jensen) とツェトル (Alex Zettl) および共同研究者たち (カリフォルニア大学バークレー校) は、1本のカーボンナノチューブでつくったカンチレバーを用いて、金原子1個の質量を測定した。

その次によく使われている、別のタイプのナノスケール力学的共振器を紹介しよう。カンチレバーのように一端が固定された振動板ではなく、両端が固定されている振動板である。オイラー-ベルヌーイの薄板理論によると、

*2 [訳注]物質の種類が異なると、仕事関数の違いによって両者の間に電位差が生じてしまい、それによる静電気力が働いてしまうので、それを防ぐのである。

両端が固定された振動板の共振周波数は、同じ大きさと材質でできた片持ち振動板の共振周波数のおよそ6倍となる。共振周波数が高いと、積分回路のタイミング素子や通信でのフィルター素子として有用性が増す。このように両端が固定されたナノスケールの振動板は、片持ちタイプのカンチレバーより製作および測定が容易なので、さらに汎用性が高いと考えられている。

この両端が固定された振動板は、バイオリンの弦と同じように考えることができる。つまり、共振モードの形が、まっすぐに張られた弦の共振モードにそっくりなのである。ただし、振動板はその物質の硬さ(ばね定数)で振動特性が決まるが、弦の場合には弦を張っている張力によって振動モードと振動数が決まるところが違う。そのため、じつは振動板と弦は非常に異なる振動体なのである。実際、振動板の共振周波数は $1/L^2$ に比例して変わるが、弦の場合は $1/L$ に比例する。

量子物理を観測する

以上述べてきたように、AFMによってきわめて微弱な力を計測することができるが、ここで興味深い実験を紹介しよう。はじめにAFMカンチレバーの突起部と観察試料の表面を同じ物質でコーティングして、両者をまったく同じ電位にする*2。そして、カンチレバーの突起部を試料のごく近くまで接近させる。非常に接近させるとカシミール力とよばれる一風変わった力が両者の間に働き、それを検出できるようになる。この力は、カンチレバーの突起部と試料表面の間にだけ局在している電磁場モードの量子力学的零点振動に起因している(Physics Today

*3 [訳注]振動を量子化すると、調和振動子の振動準位のような量子化エネルギー準位となる。

2007年2月号40ページ[パリティ2007年8月号4ページ]と2007年3月号16ページを参照)。このようにして測定されたカシミール力は、量子力学から予言される大きさとおよそ一致していることがわかったが、まだ未解明の興味深い問題もいくつか残っている。

このような力学的計測法によって量子力学的な効果を計測しようとする努力もなされており、ナノスケールの力学的共振器はそのための有効な手段の1つと考えられている*3。たとえば、そのような共振器の量子状態の重ね合わせや干渉といった現象を探索するという研究が考えられる。しかし、そのような現象を観測するには、いくつかの課題を解決しなければならない。その1つが熱効果である。温度 T での熱エネルギー $k_B T$ (k_B はボルツマン定数)の数倍の大きさの広がりをもって、共振器の量子化準位が占められることになる。そうすると、量子効果がぼやけてしまう。このような熱効果は、 $h\nu \gg k_B T$ を満たすならば抑えられる(h はプランク定数)。つまり、非常に高い共振周波数 ν をもつ共振器を、可能な限り低い温度 T に保つ必要がある。ギガヘルツ以上の共振周波数をもつ共振器ができれば、1ミリケルビン弱の温度でこの条件を満たすことができる。

別の課題として、測定を行えるだけ十分に長い時間、共振器がそのエネルギーおよび量子コヒーレンスを維持しなければならないということもある。量子コヒーレンスとは、2つの量子状態の間の複素振幅が、干渉性を失わずに重なっている状態を意味する。十分長いエネルギー準位の寿命をもつ共振器はすでに存在しているだろうが、量

子コヒーレンスの寿命はまだ測定されたことがない。いずれにしてもこのような新しい試みは、若い研究者たちを“共振”させて進展することになるだろう。

参考文献

- 1) オイラー-ベルヌーイの梁方程式(モールの定理)については、http://en.wikipedia.org/wiki/Euler-Bernoulli_beam_equation 参照。
- 2) A. N. Cleland: *Foundation of Nanomechanics: From Solid-State Theory to Device Applications*, Springer, New York (2003), sec. 9.7.
- 3) A. Cho: "Research Race to Put the Quantum into Mechanics," *Science* **299**, 36(2003).
- 4) D. Rugar *et al.*: "Single Spin Detection by Magnetic Resonance Force Microscopy," *Nature* **430**, 329(2004).
- 5) S. Chao *et al.*: "Nanometer-scale Magnetic Resonance Imaging," *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 1175(2004).
- 6) K. L. Ekinci, X. M. Huang, M. L. Roukes: "Ultrasensitive Nanoelectromechanical Mass Detector," *Appl. Phys. Lett.* **84**, 4469(2004).
- 7) K. Jensen, K. Kim, A. Zettl: "An Atomic-Resolution Nanomechanical Mass Sensor," *Nature Nanotech.* **3**, 533(2008).