

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610061

研究課題名(和文)原子間力顕微鏡による未知の力探査

研究課題名(英文)Search for an unknown force with an atomic force microscope

研究代表者

三尾 典克(MIO, Norikatsu)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任教授

研究者番号：70209724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートンの逆2乗法則には理論的に破れを示唆するものがあり、実験的な検証が進められてきた。本研究では、マイクロメータ領域での測定限界がどこまで下げられるか、そして、未知の力が存在するかを実験的に確かめることを目的とした。そこで、原子間力顕微鏡を用いて、表面近傍での力の状態を精密に測定することを行った。厚さ1mmの白金板および、シリコン基板上に厚さ100nmと200nmの白金薄膜を付けたものを試料とし、フォースカーブ測定を実施した。その結果、薄膜試料での力の測定から、膜厚によらず10pN程度の精度で一致していることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Breaking of Newton's inverse-square law has theoretically been suggested, and experimental verification has been progressed. In this research, we aimed to experimentally confirm to what extent the measurement limit in the micrometer range can be lowered and unknown force exists. Therefore, using the atomic force microscope, we precisely measured the state of force near the surface. A force curve measurement was carried out using a platinum plate with a thickness of 1 mm and a platinum thin film with a thickness of 100 nm and 200 nm on a silicon substrate as samples. As a result, it was found from the measurement of the force in the thin film samples that they agreed with accuracy of about 10 pN irrespective of the film thickness.

研究分野：精密計測

キーワード：原子間力顕微鏡 未知の力探査

### 1. 研究開始当初の背景

重力の逆 2 乗法則はニュートン以来、多くの重力にかかわる現象を説明し、アインシュタインの一般相対性理論が構築されても、その地位は変わるものではなかった。しかし、理論的には、逆 2 乗法則の破れを示唆するものがあり、実験的な検証が進められてきた。例えば、重力には湯川ポテンシャルで表される項も存在し

$$\phi = -\frac{GM}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

のような形で力が決まるという理論が提案されている。この時、 $\lambda$  は力の到達距離で、現在の知見では、 $\lambda$  が  $1\mu\text{m}$  の場合、 $\alpha < 10^9$  と言われている。ただ、重力は大変に弱い力のため、測定そのものが難しい。特に、数マイクロメートル以下の短い距離での力の測定は、相互作用できる質量が極めて小さく、重力以外の力が支配的となってしまう、はっきりした結果が得られていなかった。

### 2. 研究の目的

重力は大変に弱い力のため、測定そのものが難しい。特に、数マイクロメートル以下の短い距離での力の測定は、相互作用できる質量が極めて小さく、重力以外の力が支配的となってしまう、はっきりした結果が得られていない。特に、1 マイクロメートル以下の領域では、ほとんどの実験で、重力の効果を観測できない ( $10^9$  倍くらいの大きさが実験の上限を与えている)。本研究では、その領域での重力の測定限界がどこまで下げられるか、そして、未知の力が存在するかを実験的に確かめることを目的とする。そこで、通常は、表面の力を測定する原子間力顕微鏡を用いて、表面近傍での力の状態を精密に測定することを行う。このとき、通常は表面力が大変に大きな影響を持つので、その影響を取り除くために、異なる物質でできた基板に同じ物質でコーティングを施し、表面力が同じにして、コーティングの下の基板物質からの力の影響が見えるかどうかを測定する。さらに、コーティングの厚さを変えることで、この力の到達距離も知ることが可能である。

### 3. 研究の方法

2 つの層からなるサンプルの表面に働く力を原子間力顕微鏡により精密に測定する。力を表面からの距離の関数として表したもの (フォースカーブ) を測定すると、通常は表面力は  $1\text{ nm}$  程度の距離の範囲で  $0.01\text{--}1\text{ nN}$  程度の力が働くことわかるが、これは表面の状態によって決まってしまう。そこで、表面層の厚さの異なるサンプルを測定し、その差をとることで、表面力の影響を除き、ここで探索している未知の力を探す。この方法が、有効に働

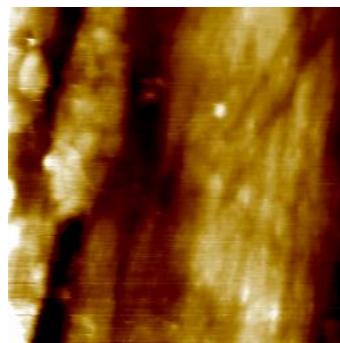
くためには、表面力を常に同じ状態で再現できるかにかかっている。そのため、初年度は、サンプルを構成する材料の特性の評価、原子間力顕微鏡におけるフォースカーブ測定の再現性を検証する。

まず、表面力測定の基準となるサンプルを用意する。サンプルの材料としては、白金、とシリコンの組み合わせをもちいた。次に材料の表面の加工精度 (表面粗さ) などの影響も同時に調べる。複数の厚さのコーティングを行ったサンプルを用意した。

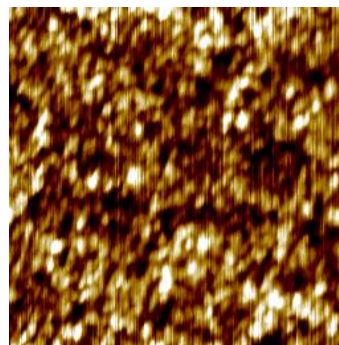
フォースカーブの測定を行い、異なるサンプル間でのフォースカーブの差を計算し、表面力の効果を取り除くことで、第 1 層からの力の効果を探る。

### 4. 研究成果

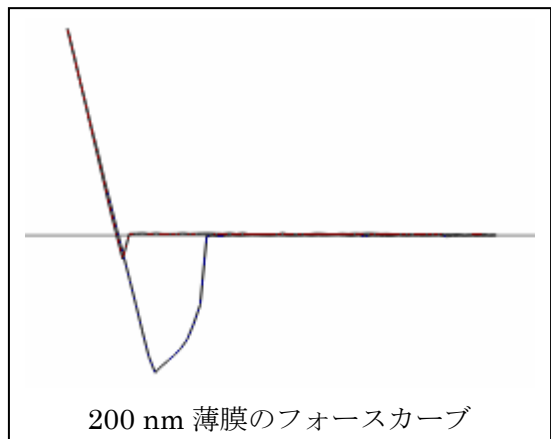
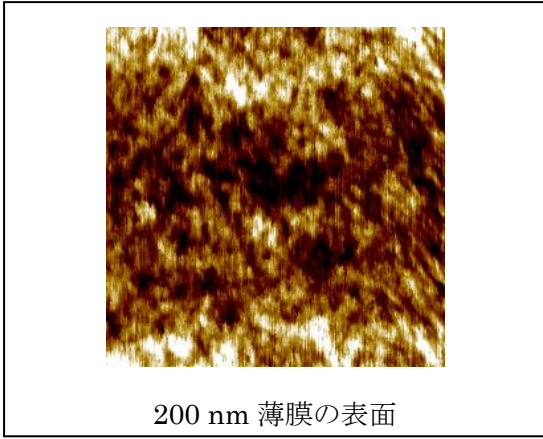
最初に、サンプルを用意した。サンプルは、厚さ  $1\text{ mm}$  の白金板および、シリコン基板上に白金薄膜を付けたもので、白金膜の厚さが  $100\text{ nm}$  と  $200\text{ nm}$  のものを作成した。これらの表面の状態を、原子間力顕微鏡で観察した。観察した領域は、 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  のエリアである。その結果を以下に示す。



白金板の表面



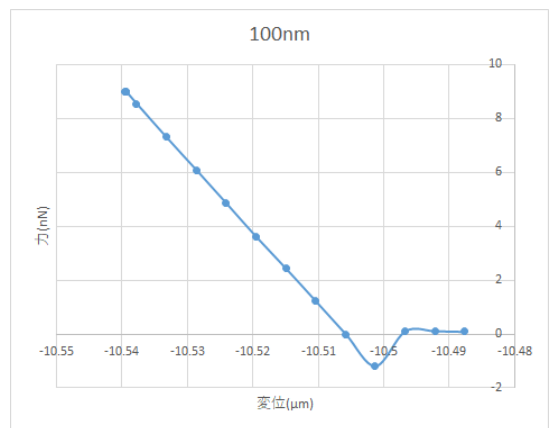
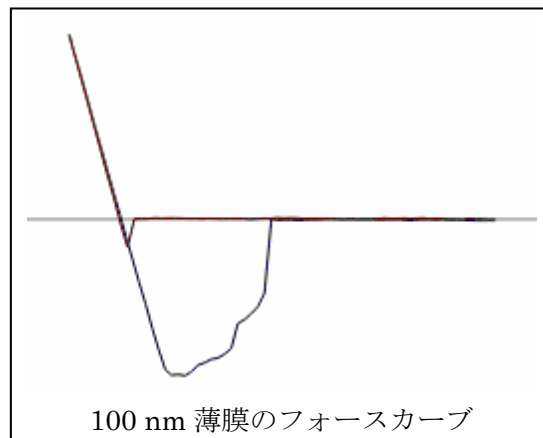
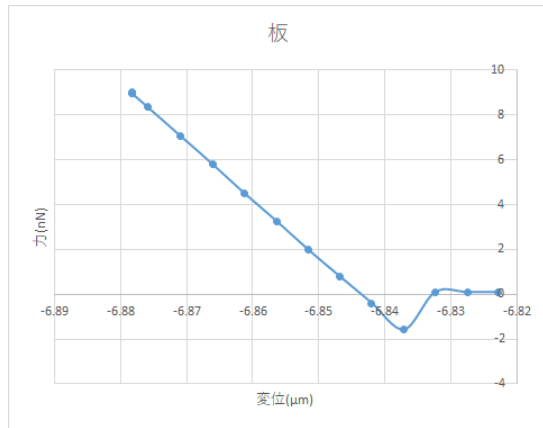
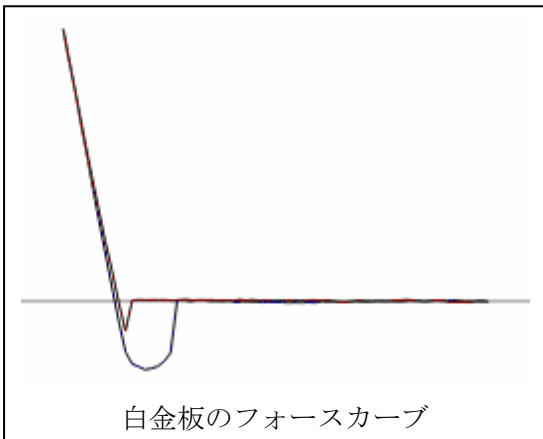
100 nm 薄膜の表面

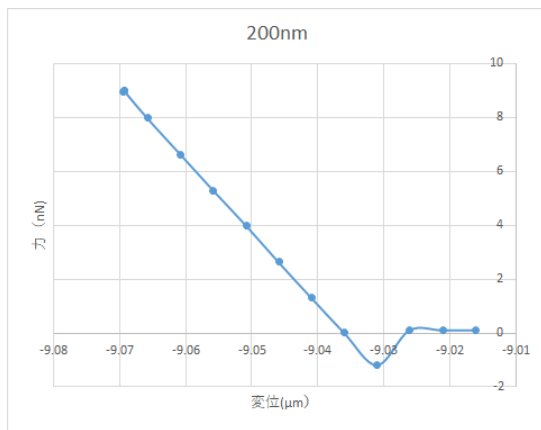


これらの状態を比べると、白金板の表面の粗さの空間スケールとシリコン基板の薄膜の表面粗さでは、大きな違いが見られる。これは、白金板は、サンプルを材料として入手した状態のまま測定したので、板状に加工刺した際の表面の大きなうねりが残っているのに対して、薄膜では、面のよく出たシリコン基板に成膜したため、基板の状態が反映されているものと思われる。

次に、この資料に対して、フォースカーブの測定を行った。その結果を下記に示す。

これらのグラフを見ると、探針が試料に近づき、引力領域から斥力領域に入るまでの部分、斥力領域で探針が往復、その後、引力領域に入るが、試料に針が吸着されていて、近づく時よりもはるかに遠くまで、引力が働き、どこかで、どこかで吸着が外れて、もとの戻るといふ経路を示していることがわかる。この時、いったん、吸着してしまった後のふるまいは、3つの試料で大きく異なるため、安定な測定ができないことを示唆している。しかし、最初に引力が働き、試料に吸引されるまで、および、斥力状態の部分は安定していることが見てとれるので、その部分だけを拡大すると、





のような関係が得られ、定性的には、ほぼ同じ特性が得られた。

このデータをもとに、解析を進める。まず、斥力の部分を用いて座標の校正を行う。斥力部分を直線 ( $f = az + b$ ) でフィットする。この時

板：

$$a = -258.1 \pm 1.2, b = -1776.7 \pm 8.4$$

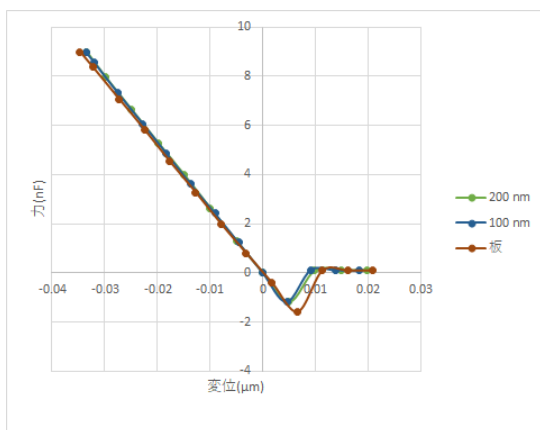
100 nm：

$$a = -266.77 \pm 0.62, b = -2802.6 \pm 6.5$$

200 nm：

$$a = -266.5 \pm 1.5, b = -2408 \pm 13$$

この直線で力が0となる点 ( $z_0 = -b/a$ ) を変位の原点に取り直して、3つのグラフを重ねると



のようになる。これを見ると、100 nm、200 nmの薄膜での表面力は非常によく再現されていることがわかるが、白金板の場合、少し、ずれていることが見える。このことから、薄膜の状態での力の測定を行うことで、再現性の高い測定が可能になることが分かった。

この薄膜2つのデータから、残さを求めると10 pN程度である。この系で働くニュートン重力の大きさは、約  $2 \times 10^{-24}$  N程度とみられるので、重力の効果よりも小さな力を見つけるには、まだ10桁以上の改善が必要で

あるが、湯川項の力のレンジが  $1 \mu\text{m}$  程度の場合の制限が  $10^9$  程度であり、これと比較すると、全体の測定の精度を改善することで新しい制限が得られる可能性が見えたと考えている。特に、 $\lambda$  が  $1 \mu\text{m}$  よりも小さな領域ならば、本方法が有効に働くと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三尾典克 (MIO, Norikatsu)

東京大学・大学院工学系研究科・特任教授

研究者番号：70209724