

研究種目：基盤研究 (C)	
研究期間：2007～2008	
課題番号：19560133	
研究課題名 (和文)	固体表面接触部のナノ観察と同定に関する研究のナノ位置決めシステムへの応用
研究課題名 (英文)	Effects of Surface Roughness on Application of Micro Displacement Characteristics to Nano-positioning
研究代表者	
川口 尊久 (KAWAGUCHI TAKAHISA)	
宇都宮大学・大学院工学研究科・助教	
研究者番号：60234043	

## 研究成果の概要：

本研究では、摩擦を利用した駆動機構として、接触する二面間に接線力を作用させたときの微小変位特性を利用して、ナノメートルオーダーの分解能をもつ位置決め機構について検討を行った。その結果、種々の表面粗さを有する二面間の繰り返し微小変位特性を用いた精密送りを分解能 1nm で実現できる可能性が得られた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・トライボロジー

キーワード：位置決め, 摩擦, ナノスケール, 固体表面, セラミックス

## 1. 研究開始当初の背景

近年、マイクロエレクトロニクスをはじめとする様々な分野でナノオーダーの位置決めが要求されるようになってきている。これには圧電素子の利用が主流であるが、特に安定性の点から摩擦力を利用した方法もしばしば試みられている。

例えば、ピニオンローラとスライダー間のトラクションを利用したもの、ボールねじの転がり出し特性を用いたもの、圧電素子によるインパクト駆動で数ナノの精度で位置決めしているものがある。しかしながら、接触

駆動であるため温度や振動に弱く、再現性が優れず安定性にも問題がある。これに対してサイクル変位特性を用いる本研究の駆動方法は、これらの問題を克服するのみならず、簡便性、操作性の点でも優れた性能を発揮することが期待できる。

この研究で扱う送り機構の基本原理は、リニアモーターなどの非接触駆動方式により一方の面に繰り返し接線駆動力を与え、さらにこの駆動力にオフセット力を与えることで、簡単に正負方向の微小駆動を得るものである。

## 2. 研究の目的

粗さをもつ固体表面間に接線力が働いた場合に生じる微小変移特性を明らかにすることにより、「摩擦駆動方式によるナノオーダー位置決めシステムの開発」の検討をすることである。

位置決めシステムについては、これまでの研究において、種々の鋼やセラミックスの接線力による接触面間の微小変移特性について検討し、これらの摩擦面の特性を用いて、摩擦駆動方式によるナノメートルオーダーの位置決めへの適用が可能であると考えている。しかしながら、接触面間の微小変移特性は表面の粗さの大きさや異方性などの表面形状によって変化する真実接触部の状態に影響を受けると考えられる。そこで、摩擦駆動の精度を考えるために、摩擦面の材質や表面粗さなどを変化させて微小変位特性と位置決め精度について検討した。

## 3. 研究の方法

### (1)位置決め原理

接触している粗い面と平面との間に接線力が加わるとき、微小な変位が生じる。このとき、接線力が物体間の静摩擦力より大きくなると巨視的なすべりが生じる。ここで、この巨視的すべりが始まる接線力の値を  $f_0$  とする。

いま、巨視的すべりを起こさない範囲の最大接線力  $F$  を  $f_1 (< f_0)$  まで増加させた後、逆方向の接線力  $-f_1$  まで  $F$  を減少させ、再度  $F$  を  $f_1$  まで増加させることを考える。このとき、接線力  $F$  と変位  $\delta$  の関係は図 1(a) のようになり、 $f_0$  より小さい  $f_1$  の接線力では物体間の摩擦力より小さいため、この接線力の範囲で何度サイクルを繰り返しても物体はどちらにもすべり出すことはない。すなわち、変位  $\delta$  もゼロを中心として正負の方向に同じ大きさで振幅するだけである。

次に、接線力サイクルの中心をゼロから  $\Delta f$  だけシフトさせることを考える。まず、図 1(b) のように接線力サイクルの中心をゼロから  $\Delta f$  にシフトさせると接線力サイクルの最大振幅が  $f_0$  より小さいと、同図(a)と同様に物体がすべり出すということはない。しかしながら、

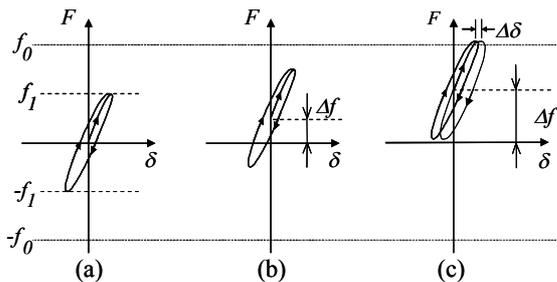


図 1 接線力による変位曲線

図 1(c) のように接線力サイクルの中心をゼロから  $\Delta f$  にシフトさせると同図(a),(b)と同じ大きさの接線力の振幅にもかかわらず、その最大値が  $f_0$  を越えれば 1 サイクルごとに、たとえば  $\Delta \delta$  の微小変位を生じる。

ここでは、この微小変位  $\Delta \delta$  を利用することにより、微小送りを実現することを考える。

### (2)実験装置

まず発振器で一定の振幅をもつ電圧を、アンプ、ドライバを介してスピーカに印加する。それによりボイスコイルが発生する振動をボイスコイルに芯棒を介し取り付けられている試料に作用させる。そして生じる変位を変位センサが計測し、レコーダにて記録する。電圧は発振器を用いて正負の両方向に加えられるようになっており、さらに実験中は  $\Delta f$  を負荷するために一定の電圧を印加した。

### (3)試料

試料としては、セラミックスと黄銅を用い、滑らかな平面の試料には、セラミックスを  $3\mu\text{m}$  のダイヤモンドスラリーを用いたラッピングにより約  $0.1\mu\text{mRz}$  に研磨して用いた。粗い面の試料の接触面（見かけ接触面積  $85.2\text{m}^2$ ）を表面粗さが約  $1\mu\text{mRz}$  となるよう、#400 のアルミナ砥粒を用いたサンドブラストにより等方性粗さに、#800 のエミリペーパーにより異方性粗さ（接線力方向に対して直行および平行な粗さ）になるように仕上げた。それぞれの試料の機械的性質を表 1, 2 に示す。

### (4)実験方法

主に次のような実験を行った。

①表 1 に示した等方性の粗さ面の試料と滑らかな面の試料を組合せてセラミックス材の

表 1 セラミックス試料を用いた実験

	材 料	表面粗さ $\mu\text{mRz}$	硬さ HV	ヤング率 GPa
粗い面の試料	ジルコニア	1.17	1300	196
	窒化ケイ素	1.01	1630	300
滑らかな面の試料	ジルコニア	0.07	1300	196
	窒化ケイ素	0.14	1630	300
	炭化ケイ素	0.13	2800	400

表 2 異方性粗さ試料を用いた実験

試料	材 料	表面粗さ $\mu\text{mRz}$	硬さ HV	ヤング率 GPa
等方性粗さ面	黄銅	0.95	90	100
平行粗さ面		0.91		
直交粗さ面		1.09		
滑らかな面	ジルコニア	0.07	1300	196

種類による検討を行った。

②表 2 に示した粗い面の黄銅試料と滑らかな面のジルコニア試料を接触させて、異方性粗さ面による検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) セラミックス試料の組合せの場合

実験は表 1 に示した試料で 5 種類の試料の組合せで行ったが、ここでは粗い面のジルコニアと滑らかな面の窒化ケイ素を組合せた実験結果について示す。

まず、巨視的すべりを起こさない範囲の最大接線力  $f_0$  を求めるために測定した接線力-変位曲線を図 2 に示す。これより、図 1(a) で示した接線力サイクルの振幅（繰り返し接線力）の大きさを、巨視的すべりを起こさない範囲の最大接線力  $f_0=0.170\text{N}$  の半分の大きさを目安に、 $f_i=\pm 0.085\text{N}$  とした。また、接線力のシフト量  $\Delta f$  を  $0\text{N}$ 、 $0.088\text{N}$ 、測定時間を 16 秒、周波数は  $5.0\text{Hz}$  とした。ここで、 $f_i/f_0$ 、 $\Delta f/f_0$  をそれぞれ  $f_i^*$ 、 $\Delta f^*$  とすると実験条件は  $f_i^*=\pm 0.5$ 、 $\Delta f^*=0$ 、 $0.52$  となる。なお、実験は無潤滑で行った。

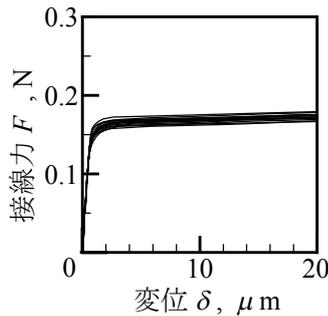
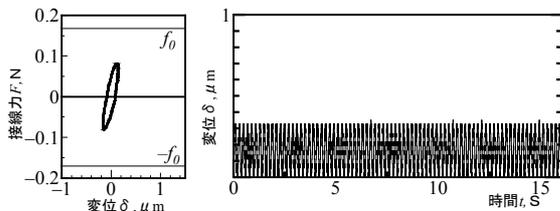


図 2 接線力-変位曲線

$f_i^*=\pm 0.5$ 、 $\Delta f^*=0$  で実験を行なった結果を図 3 に示す。(a)は変位と接線力の関係、(b)は時間と変位の関係をそれぞれ表している。この場合、2.で述べたとおり  $f_i$  と  $\Delta f$  を合わせた



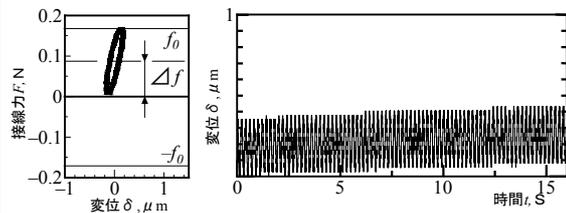
(a)変位と接線力 (b)時間経過による変位の変化

図 3 繰り返し接線力と変位特性

( $f_i^*=\pm 0.5$ 、 $\Delta f^*=0$ )

最大値が  $f_0$  を超えていないので、正負の方向に同じ大きさの変位を繰り返すだけで、すべりによる変位が生じていないことがわかる。

つぎに、 $f_i^*=\pm 0.5$ 、 $\Delta f^*=0.52$  で実験を行なった結果を図 4 に示す。(b)の時間経過と変位曲線から、明らかにサイクル毎に滑りによる微小変位  $\Delta\delta$  が生じていることがわかる。これは、シフト量を含んだ接線力サイクルの最大値が、すべり出しを起こす摩擦力  $f_0$  を超えていることによるものと判断される。ここで、測定時間 16 秒の間に 80 回の振幅を繰り返し、その間に  $84\text{nm}$  の滑りが生じている。つまり、1 サイクルで生じる微小変位  $\Delta\delta$  は、平均  $1\text{nm}$  となった。



(a)変位と接線力 (b)時間経過による変位の変化

図 4 繰り返し接線力と変位特性

( $f_i^*=\pm 0.5$ 、 $\Delta f^*=0.52$ )

また、その他の組合せによる 1 サイクルで生じる微小変位  $\Delta\delta$  を図 5 に示す。

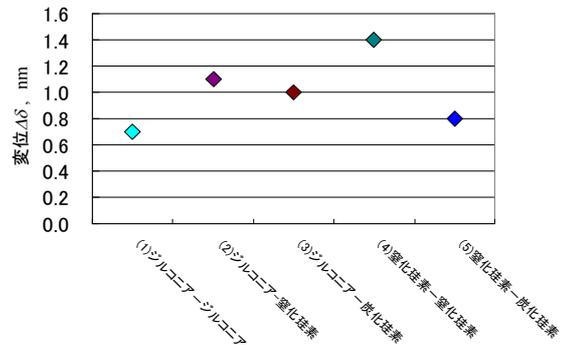


図 5 サイクル当たりの変位  $\Delta\delta$  の比較

(セラミックス材の組合せの場合)

##### (2) 異方性粗さ面試料の場合

実験は表 2 に示した試料を用いて異方性粗さについて検討を行った。

まず、(1)の場合と同様に、巨視的すべりを起こさない範囲の最大接線力  $f_0$  を求めるために測定した接線力-変位曲線を図 6 に示す。これより、最大接線力  $f_0$  を求め、 $f_0$  の半分の大きさを目安に接線力サイクルの振幅の大きさを求めた。また、接線力のシフト量  $\Delta f$  は  $f_i$  を

加えたときに $f_0$ をわずかに超える( $f_1 + \Delta f > f_0$ )ように決定した。また、測定時間を16秒、繰返し接線力の周波数は5.0Hzとし、無潤滑で行った。

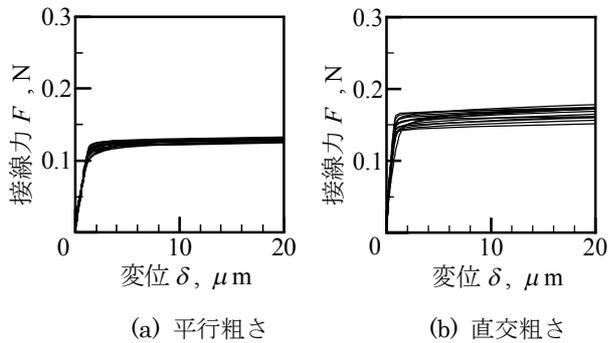


図6 接線力-変位曲線

接線力方向に平行な粗さ面と滑らかな面の組合せで実験を行なった結果を図7に示す。(a)は変位と接線力の関係、(b)は時間と変位の関係をそれぞれ表している。(b)の時間経過と変位曲線から、明らかにサイクルごとにすべりによる微小変位 $\Delta\delta$ が生じていることがわかる。この場合、図1(C)で述べたとおり、繰返し接線力 $f_1$ とシフト量 $\Delta f$ を合わせた最大値がすべり出しを起こす摩擦力 $f_0$ を超えていることによるものと判断される。ここで、測定時間16秒の間に80回の振幅を繰り返す、その間に167nmの変位が生じている。つまり、1サイクルで生じる微小変位 $\Delta\delta$ は、平均2.1nm

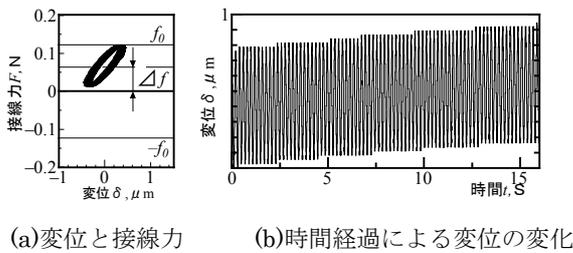


図7 繰返し接線力と変位特性 (平行粗さ)

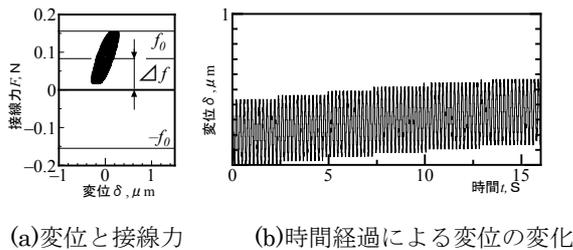


図8 繰返し接線力と変位特性 (直交粗さ)

となった。

接線力方向に直交な粗さ面と滑らかな面の組合せで実験を行なった結果を図8に示す。平行粗さの場合と同様に、サイクルごとにすべりによる微小変位 $\Delta\delta$ が生じていることがわかり、その値は平均2.0nmとなった。

また、等方性粗さで表面粗さが約 $1\mu mRz$ と約 $5\mu mRz$ の場合に生じた1サイクルごとの微小変位 $\Delta\delta$ を図9に示す。

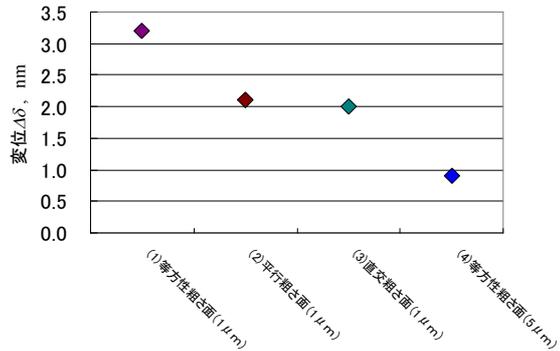


図9 サイクル当たりの変位 $\Delta\delta$ の比較 (異方性粗さ面の場合)

本研究は、粗い面と滑らかな平面の間に働く接線力による微小変位特性の精密位置決め機構への応用について、実験的検討を行なったものである。その結果、接線力による非線形な変位特性を利用したナノ位置決め機能を持つ微小送り機構の開発について、その可能性のあることがわかった。

今後も、摩擦面や実験条件の選定、実験装置の高精度化を図ることにより、高精度な位置決めを実現できるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計6件)

- ① T. Hatazawa and T. Kawaguchi, Tribological Performances of Needle Roller Thrust Bearings, 2nd International Conference on Advanced Tribology, Singapore, 2008
- ② 川口尊久, 畑沢鉄三, 小林正陽, 接線力による固体表面間の微小変位特性のナノ位置決めへの応用について, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会'08 おやまー講演論文集, 151-152, 2008
- ③ 川口尊久, 畑沢鉄三, 宇藤要輔, スパッタ薄膜による微細接触部の検出について, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会

- ー'08 おやまー講演論文集, 149-150, 2008
- ④野澤勇樹, 畑沢鉄三, 川口尊久, 線接触における油膜厚さについて, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会ー'08 おやまー講演論文集, 161-162, 2008
- ⑤川口尊久, 畑沢鉄三, 中村慧佑, 微小変位特性のナノ位置決めへの応用, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 81-82, 2007
- ⑥畑沢鉄三, 川口尊久, スラスト針状ころ軸受の摩擦トルクについて, 2007年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 915-916, 2007

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川口 尊久 (KAWAGUCHI TAKAHISA)  
宇都宮大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60234043

### (2) 研究分担者

畑沢 鉄三  
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30114169

藤本 隆士  
弓削商船高専・電子機械工学科・教授  
研究者番号: 30332076