

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560152

研究課題名(和文) 摩擦を利用したナノ位置決めと接触部ナノ観察に関する研究

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・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60234043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、接線力の下で接触面の間で接線の微小変位特性を用いてナノスケールの位置決めシステムを開発の検討を行なうため、粗い表面の黄銅試料と滑らかな表面のセラミック試料の組み合わせで種々の周期の接線力をあたえる実験を行った。

その結果、接線力の最大値が巨視的なすべりが生じる摩擦力を越えた時に、1サイクルごとに約1nmの移動量が得られた。このことより、微小変位を利用することで、ナノスケールの送り機構の実現の可能性が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, using the tangential micro-displacement characteristics between the contact surfaces under a tangential force, a basic idea is proposed for developing the nanoscale positioning system. To confirm this idea, the experiments were carried out by measuring the differential displacement between a rough brass surface and a smooth ceramic surface under various forms of cyclic tangential force.

When maximum of the tangential force exceeds the critical friction force, effective micro-displacement was obtained as about 1nm after every cycle of tangential system. It may be expected from the result that this system is able to realize a nanoscale positioning system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械要素・トライボロジー

キーワード：位置決め 摩擦 ナノスケール 微小変位特性 固体表面 真実接触面積

1. 研究開始当初の背景

マイクロエレクトロニクスやオプトエレクトロニクスなどの様々な分野でナノオダ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。

本研究で扱う送り機構の基本原理は、接触する二面間の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。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タオダの位置決めが可能な精密位置決め機構の開発の可能性を示すことを目的としている。

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ダ位置決めシステムの検討をすることである。

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タオダ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 δ 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 Δf 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 Δf 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(c) のように接線力サイクルの中心をゼロから Δf 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 Δ の微小変位を生じる。

ここでは、この微小変位 Δ 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。

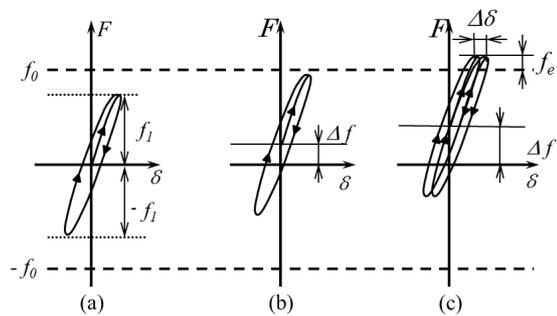


図 1 接線力による変位曲線

(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た試料に作用させる。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 Δf 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 $1\mu\text{m}$ および $3\mu\text{m}$ 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 90mm^2)を表面粗さが約 $1\sim 13\mu\text{mRz}$ 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、#100~#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 に示す。

表 1 試料の機械的性質

試料		材料	粗さ μmRz	硬さ HV	ヤング率 GPa
粗い面 (駆動試料)	等方性	黄銅	1, 2, 3	90	100
		ジルコニア	2	1300	200
滑らかな面 (固定試料)	異方性	黄銅	5, 13	90	100
		ジルコニア	0.07	1300	200
		窒化ケイ素	0.07	1400	290
		炭化ケイ素	0.05	2400	430

(4)実験方法

主に次のような実験を行った。

まず、表 1 に示した試料のジルコニアに等方性の粗さを付けた試料と各種セラミックス材の滑らかな面の試料を組み合わせ実験を行った。

次に、黄銅の異方性の粗い面試料とジルコニアの滑らかな面の試料を組合せて検討を行った。

それぞれの実験は、荷重 5.0, 10.6N で接触させ、繰り返し負荷する接線力 f_i の振動数を 1, 3, 5Hz と変化させて行った。

初めに接線力を一定の速度で増加させる実験を 15 回行い、その結果より、巨視的すべりを始めるときの接線力 (最大接線力) f_0 を求める。次に、図 1 で示した接線力のオフセット量を Δf 、接線力サイクルの振幅 (繰り返し接線力) f_i を $f_i + \Delta f = f_0 + f_e$ の関係となるように設定した。なお、 f_e は f_0 を超えている接線力の大きさで超過量とする。今回は、この超過量が f_0 の 0.001~0.10 の割合になるようにした。また実験は、測定時間 25 秒で、無潤滑で行った。

4. 研究成果

(1)異方性粗さ面試料の場合

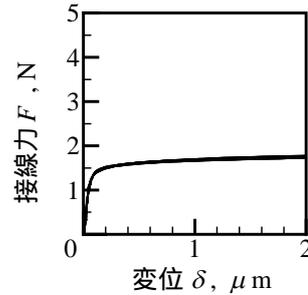
実験は表 1 に示した黄銅の異方性粗さとジルコニアの滑らかな面の組み合わせで検討を行った。

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、最大接線力を $f_0 = 1.52N$ とした。求めた最大接線力 f_0 から繰り返し接線力 (振幅) f_i を 1.33N とした。また、超過量 f_e が f_0 の 0.001~0.1 の割合になるように接線力のシフト量 Δf を決定した。なお周波数が 1, 5Hz とした。

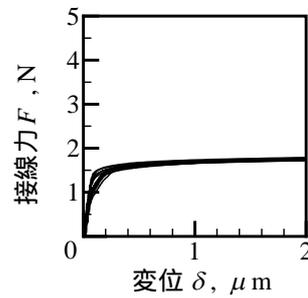
接線力方向に平行な粗さ面と滑らかな面の組合せで実験を行なった。周波数が 1Hz で $f_e = 0.001 f_0$ の結果を図 3 に、同じく 5Hz の場合を図 4 に示す。(a)は変位と接線力の関係、(b)は時間と変位の関係をそれぞれ表している。(b)の時間経過と変位曲線から、明らかにサイクルごとにすべりによる微小変位 Δ が生じていることがわかる。この場合、図 1(C)で述べたとおり、繰り返し接線力 f_i とシフト量 Δf を合わせた最大値がすべり出しを起こす摩擦力 f_0 を f_e 超だけえていることによるものと判断

される。ここで、1 サイクルで生じる微小変位 Δ の平均を求めると、1, 5Hz それぞれ 45nm, 1nm 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 5, 図 6 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 Δ が生じている

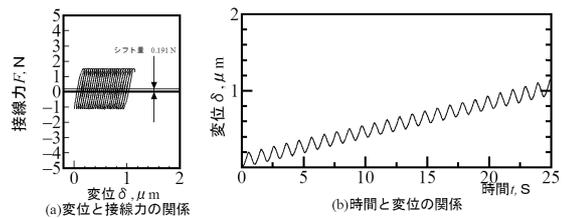


(a) 平行粗さ



(b) 直交粗さ

図 2 接線力 - 変位曲線

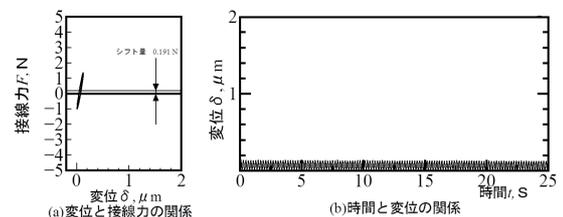


(a) 変位と接線力

(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

(平行, $f_e = 0.001 f_0$, 1Hz)

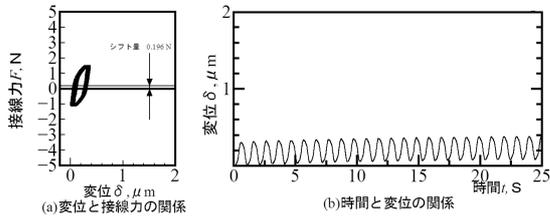


(a) 変位と接線力

(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

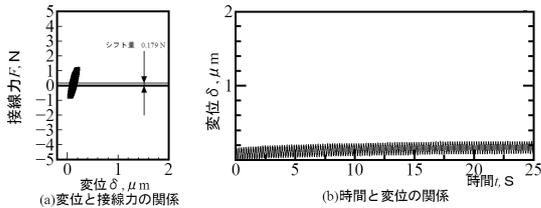
(平行, $f_e = 0.001 f_0$, 5Hz)



(a)変位と接線力 (b)時間経過による変位の変化

図5 繰り返し接線力と変位特性

(直交, $f_e = 0.001 f_0$, 1Hz)



(a)変位と接線力 (b)時間経過による変位の変化

図6 繰り返し接線力と変位特性

(直交, $f_e = 0.001 f_0$, 5Hz)

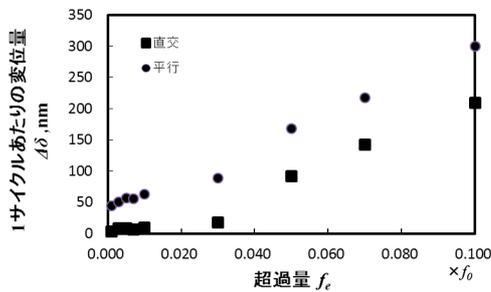


図7 超過量と微小変位(1Hz)

ことがわかり, その平均値はそれぞれ 4nm, 2nm となった.

また, 超過量 f_e (最大接線力 f_0 との割合) と 1 サイクル当たりの変位量 $\Delta\delta$ の関係を表面粗さごとにまとめたものを図 7 に示す. これより, 超過量を大きくしていくほど 1 サイクルごとの変位 $\Delta\delta$ の値がほぼ線形的に大きくなる傾向があることがわかった.

(2) 等方性粗さでセラミックス試料の組合せを変化させた場合

ここでは粗い面のジルコニアと滑らかな面の炭化ケイ素を組合せた実験結果について示す.

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 8 に示す. これより, 巨視的すべりを起こさない範囲の最大接線力 $f_0 = 3.40\text{N}$ とした. 求めた最大接線力 f_0 から繰り返し接線力 (振幅) f_1 を 2.98N と

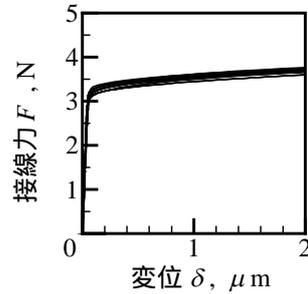


図8 接線力 - 変位曲線 (ZrO₂/SiC)

した. また, f_e が f_0 の 0.01~0.10 の割合になるように接線力のシフト量 Δf を決定した.

周波数が 1Hz で $f_e = 0.001 f_0$ の場合の時間と変位の関係を図 9 に示す. この図からも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. ここで 1 サイクルで生じる微小変位 $\Delta\delta$ の平均は 1 nm となった.

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 10 に示す.

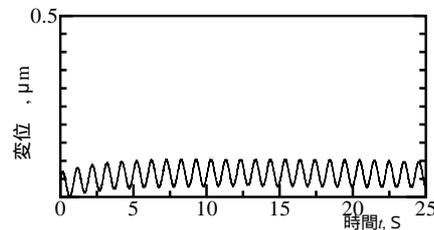


図9 時間と変位特性
(等方, $f_e = 0.001 f_0$, 1Hz)

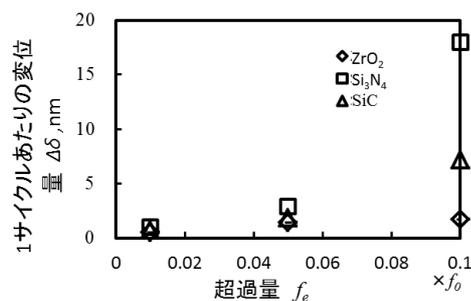


図10 サイクル当たりの変位 $\Delta\delta$ の比較
(セラミックスの組み合わせ, 対ジルコニア)

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)

川口尊久, 畑沢鉄三, 石橋達也, 微小変位特性を用いた精密位置決めに関する研究 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 265-266, 2012.

畑沢鉄三, 川口尊久, スラスト針状ころ軸受のトルクについて 転送面テクスチャの影響, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 室蘭, 277-278, 2012.

T. Hatazawa and T. Kawaguchi, TORQUE AND THRUST OF NEEDLE ROLLER BEARING, 2013 STLE Annual Meeting & Exhibition, Detroit Detroit, Michigan, USA, 2013.

T. Hatazawa and T. Kawaguchi, World Tribology Congress, Torino, Italy, 747, 2013.

川口尊久, 畑沢鉄三, 微小変位特性のナノ位置決めへの応用 - 超過量の影響 -, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議予稿集, 福岡, C42, 2013-10.

T. Hatazawa and T. Kawaguchi, Performances of needle roller thrust bearing -Effects of raceway texture-, ASIATRIB -2014, Agra, India, TSI914647, 2014.

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