

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760116

研究課題名(和文)高配向CNT膜による低静止摩擦・高動摩擦材料の開発

研究課題名(英文)Development of low static friction and high kinematic friction material

研究代表者

月山 陽介(TSUKIYAMA, Yosuke)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：00533639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：静止時からの動き出しをスムーズに行い精密な位置決めを行うためには、動摩擦係数に対し低い静止摩擦係数を実現するような材料が望ましい。しかし、一般的には逆の性質を示すことが多い。そこで表面に特殊な構造を付与することにより、低静止摩擦および高動摩擦係数の特性を発現させることを目的とし、カーボンナノチューブ膜を用いて静止摩擦からなめらかに動摩擦状態に推移することを明らかにした。またその特性について、真実接触免観察、変形時の表面観察、ナノインデンテーション試験等によりCNTの変形の影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For smooth movement from static state, it prefers that kinetic friction coefficient is higher than static one. But the usual material shows opposite frictional property. The objective of this project is to develop a surface which performs smooth transient from static state to kinetic sliding state. We developed a nano-structured surface with densely-packed and vertically-aligned carbon nanotubes. The "brush" structure shows smooth transient from static to kinetic state. And this property is explained by concerning the bending of each carbon nanotubes from the results of observation of real contact area, surface morphology measurement, and nano indentation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

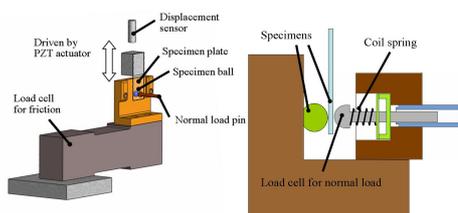
キーワード：CNT トライボロジー 接触 案内面 動摩擦係数 マイクロ・ナノトライボロジー

1. 研究開始当初の背景

携帯電話などの電子機器では小型化・高機能化が進んでいる。そこに用いられる材料(例えば、小型のレンズなど)の3次元形状を高精度に作製するにはその工作装置の位置決め精度が重要である。一般に静止時に働く摩擦力は、動いている時の摩擦力よりも大きいため、「静止状態からわずかに動かす」という動作が必要な場合、静止時から動き出し時の摩擦力の変化は好ましくなく、スムーズに動き出すような工夫が求められている。そこで、静圧気体軸受を用いて表面同士の接触をそもそも防ぐことが最も効果的であるが、装置が大がかりになり小型の機械には向かない。そのため、表面に微小凹凸パターン(表面テクスチャリング)を加工し摩擦特性を改善するための研究が盛んに行われていた。また、カーボンファイバーブラシを用いると相手材料に依らず静止摩擦係数と動摩擦係数が近い値を示すことが明らかとなっていた。また、カーボンファイバーの約100~1000分の位置の細さのカーボンナノチューブ(CNT)が緻密なブラシ様に整列した材料で、摩擦試験をおこなうと、良好な摩擦特性が見られることが判明していた。

2. 研究の目的

低静止摩擦、高動摩擦を実現する新しい摩擦材料として、CNTが表面に緻密にブラシ状



(a) 荷重負荷部 (b) しゅう動部



(c) 雰囲気制御用チャンバー

図1 微小往復荷重試験装置概略

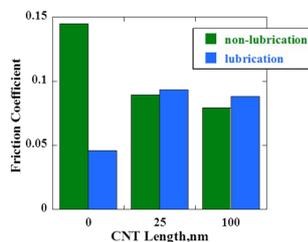


図2 摩擦試験結果

(無潤滑・潤滑下における動摩擦係数)

に配向した材料を用いることで、摩擦低減効果、ブラシ構造により静止摩擦低減効果、CNTの粘性に伴う粘性変形抵抗による高動摩擦が期待できる。本課題では、摩擦係数について焦点を当てて実験的に低静止摩擦・高動摩擦材料CNTを用いて開発することを目的とする。

3. 研究の方法

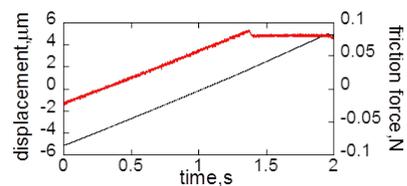
本課題は、ナノ材料であるCNTを用いた材料の製作、その摩擦特性を明らかにするための微小荷重制御が可能な摩擦試験装置の製作および試験、さらに摩擦係数に影響を及ぼすCNTの変形に関する実験的検討を行った。

(1) 試験片の準備

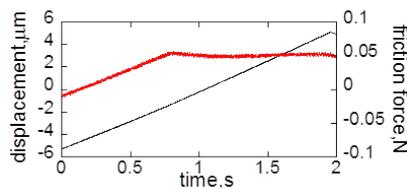
SiC単結晶基板を真空炉中で1700℃に加熱すると、SiCの熱分解に伴いCNTが表面から内部方向に配向して生成される。処理条件・加熱時間などを調整し、25nm~1500nmのCNT長を有する試験片を作成した。

(2) 雰囲気制御および微小荷重負荷が可能な往復型摩擦試験機の製作および摩擦試験

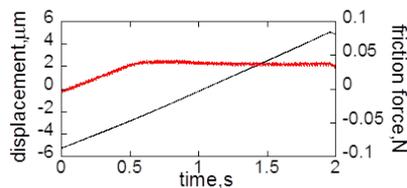
図1(a)に示すようにロードセルに荷重計測が可能な荷重負荷機構を用いて、 piezoelectric elementsを用いた数μm程度の微小往復摩擦中の摩擦力および垂直荷重を計測した。図2(b)に示すようにしゅう動部では対向する2球で接触面を挟んでいる。また、図2(c)に示すような雰囲気制御チャンバー内で試験をおこない、25℃、50%RHの雰囲気中で試験をおこなった。なお、無潤滑および潤滑下(1%ステアリ



(a) CNT 0nm (SiC 基板)



(b) CNT 25 nm



(c) CNT 100 nm

図3 摩擦試験結果

(静止から動摩擦遷移時の摩擦挙動)

ン含有タービンオイル)を表面に塗布して実験を行った。

(3) CNTの変形に関する実験的研究

図4に示すような光学方式の顕微鏡を用いてガラス平滑球面(平凸レンズ)をCNT膜に落ち着けたときの表面粗さによる微小平均すき間を干渉法により明らかにする手法を開発し、実験的にCNT膜の変形による微小ギャップの変化を明らかにした。

(4)電界放出型電子顕微鏡(FESEM)および原子間力顕微鏡(AFM)を用いた高解像度な表面観察でも摩擦痕および変形後の表面を観察しCNTの変形挙動を明らかにする。

(5)ナノインデンテーション試験によりCNT膜表面に微小圧子を押したときの荷重-変位曲線からCNTの機械的特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 摩擦特性について

① 実験結果(代表結果のみを抜粋)

図2に示すように、CNT 0nm(SiC基板そのもの)の表面では、潤滑により摩擦係数の減少が見られたが、CNT膜が25nmおよび100nm厚で存在すると、潤滑の影響を受けずに一定した摩擦力を示す。また、図3(a)に示すように動き出し時には、CNT0nm厚の試験片では静止摩擦力が動摩擦力を上回っている事を示す、鋭いピークが観察されたが、図3(b)および(c)に示すCNT膜の試験片ではスムーズな動摩擦への遷移が観察された。

② 実験結果が示す成果

全体的により低い摩擦係数を実現させる必要があるものの、低静止摩擦および高動摩擦力な摩擦特性をCNT膜が発現することが明らかとなった。前述のカーボンファイバーの例のように、ブラシ構造がその原因である可能性と、もう一つの要因として、潤滑の有

無が摩擦力に影響を及ぼさないことから、静止時の油切れが静止摩擦力上昇に結びつかなかった点が挙げられる。今後、この特性をより顕著に発現させるための最適条件を明らかにするための、より詳細な検討が必要である。

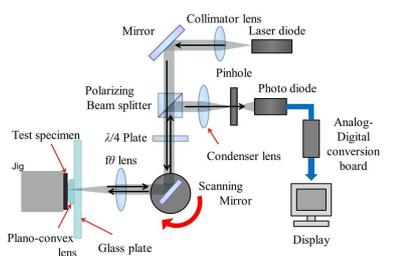
(2) ブラシ構造CNT膜の変形について

① 実験結果(代表結果のみを抜粋)

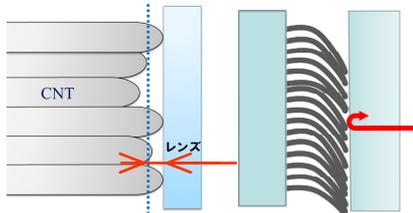
図4(b)および(c)に示すようにCNT膜上にレーザーを照射し、その時のCNTの変形を干渉法の原理を応用して平均すき間を計測した。図5に示す結果は、反射高強度を示し、およそ300MPa付近までは、最大接触圧力が増加するのに伴い、反射光強度が低くなる事が観察された。このことは、平均すき間が徐々に減少していることを示す。即ち、CNTが変形することにより、表面に存在したすき間が減少したと考えられる。しかし、300MPaを超過すると急激に反射光強度が上昇した。詳細は後述するが、CNTが大きな変形を起こす圧力に相当する。

② 実験結果が示す成果

CNTが荷重に伴い変形を起こすが、CNT膜が大きく変形を起こすのが300MPa付近であることが明らかとなった。粗さのある表面では、高い微小突起の先端に荷重が集中するため、このような高い圧力(もしくはそれ以上)下にあるCNT膜を用いる場合には相手面に適度な粗さがあった方がCNT膜の変形を促進する。CNTの変形が因子として低静止摩擦係数および高動摩擦係数な表面を開発していく上で重要な知見を得た。



(a) 観察装置概略図

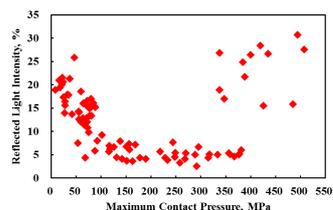


(b) 平均すき間

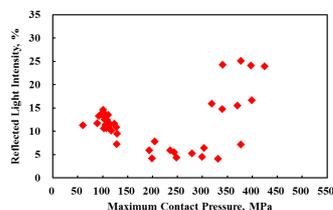
(c) CNTの変形

図4 真実接触面積測定装置

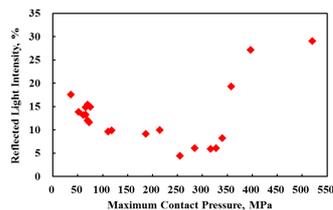
(光強度は平均面間距離を示す)



(a) CNT 長 500nm



(b) CNT 長 1000nm



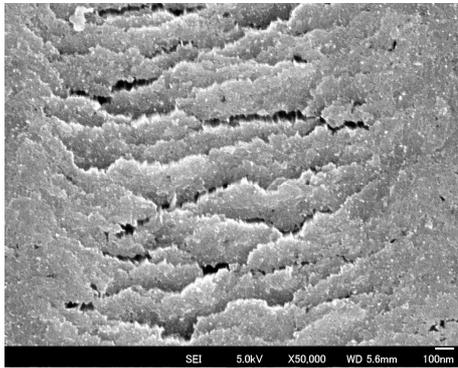
(c) CNT 1500 nm

図5 真実接触面積計測結果

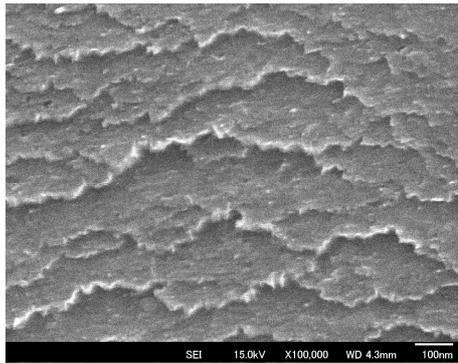
(3) 電子顕微鏡および原子間力顕微鏡による表面観察結果について

①実験結果(代表結果のみを抜粋)

電界放出型電子顕微鏡(FESEM)により変形を起こした後のCNT膜表面を観察した結果、図6(a)のようにCNTが摩擦後には摩擦方向に倒れ込むように変形していること、図6(b)のように押しつけ後も同様な変形をしていることが明らかとなった。摩擦時は約280MPaの接触圧力であったが、摩擦力による接線力が作用していたため、垂直方向の押しつけ(b)よりも傾倒の度合いが大きかったと考えられる。また図7に示すように原子間力顕微鏡によって、倒れ込むことによって生じた表面の粗さを計測したところ、約20~40nm程度の段差がCNTが倒れ込むことによって生じていることが明らかとなった。CNT個々がばらばらに変形するのではなく、ある



(a) 摩擦試験部



(b) 真実接触観察(押しつけ部)

図6 CNT膜表面のFESEM像

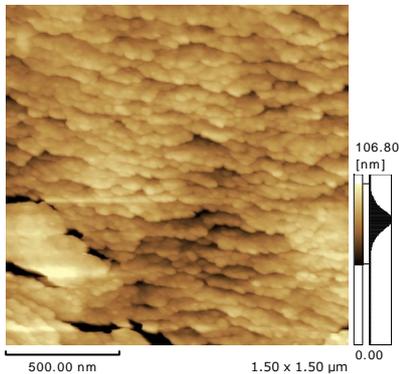


図7 CNT膜表面変形部のAFM像

塊となって変形することが明らかとなった。

②実験結果が示す成果

CNT膜は倒れ込むことで、相手面に追従することが可能であると考えられる。今回の変形の挙動の結果から、相手表面の最適形状を設計する上での重要な知見が得られたと言える。

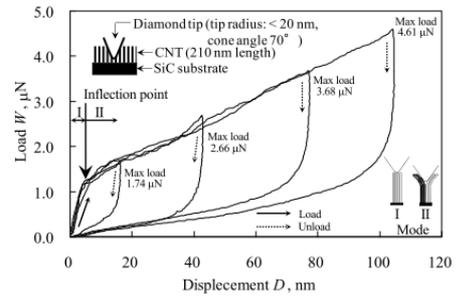
(4)微小押し込み試験結果について

① 実験結果(代表結果のみを抜粋)

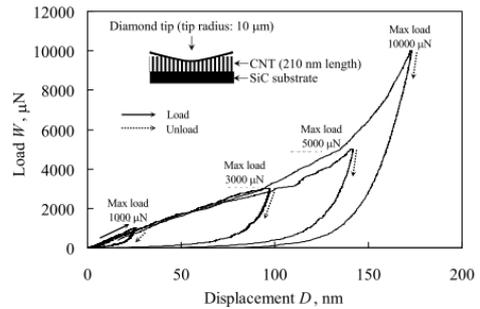
微小押し込み試験によりCNT膜表面に圧子を押したときの荷重変位曲線を計測した結果、図8(a)および(b)に示すように、押しつける圧子の先端径の大小により異なる力学的応答を見せた。そこで、CNT膜の圧子押しつけ時の剛性率をこのデータから求めた結果、図8(c)に示すように、先端が微小な圧子を押したときにCNT膜は低いヤング率を示すことが明らかとなった。

② 実験結果が示す成果

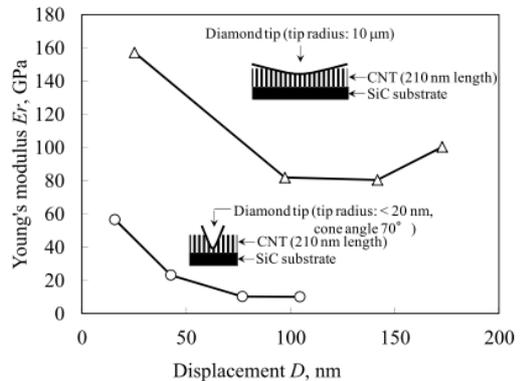
CNT膜の変形について、微小な圧子を押し



(a) 微小先端径の圧子



(b) 球状圧子



(c) 圧子形状によるヤング率の違い

図8 微小押し込み試験結果

つけた場合には図8のイラストにあるようにCNTをかき分けるように圧子が押し込まれたためであり、その結果、CNTの変形による剛性の低下が観察された。これは大きい真実接触面積でのすべりにつながるため、動摩擦係数を高める要因として摩擦力によるCNTのかき分けおよび傾倒が影響を及ぼしたと考えられる。

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)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 若山幹晴, 月山陽介, 野老山貴行, 上坂裕之, 梅原徳次, カーボンナノチューブの押し込みにおけるヒステリシス発生メカニズムの解明, 日本機械学会論文集C編, 査読有り, 79(801), 2013, 1821-1826

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① Yosuke Tsukiyama, Naoya Fukuda, Isami Nitta, Wataru Norimatsu, Michiko Kusunoki, Observation of the real contact area of carbon nanotube film, 5th World Tribology Congress 2013 (Torino, Italy), 2013年9月11日
- ② 佐藤真平, 月山陽介, 新田勇, 乗松航, 楠美智子, 高配向カーボンナノチューブ膜の接触熱抵抗に及ぼす接触条件の影響, 日本機械学会 2013年度年次大会, 2013年9月9日
福田直哉, 月山陽介, 新田勇, 乗松航, 楠美智子, 真実接触面観察による高配向カーボンナノチューブ膜の微視的変形挙動の解明, 日本機械学会 2013年度年次大会, 2013年9月9日
Yosuke Tsukiyama, Naoya Fukuda, Isami Nitta, Wataru Norimatsu, Michiko Kusunoki, Noritsugu Umehara, Contact Behavior of Vertically Aligned Carbon Nanotube film, ICMDT2013 (The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (釜山, 韓国), 2013年5月24日
月山陽介, 佐藤真平, 新田勇, 楠美智子, 乗松航, 接触熱抵抗に及ぼす高配向カーボンナノチューブ膜の変形の影響, トライボロジー会議 2013春東京, 2013年5月22日~5月23日
月山陽介, 小嶋傑, 新田勇, 乗松航, 楠美智子, 高配向カーボンナノチューブ膜の真実接触面観察, トライボロジー会議 2012春東京, 2012年5月14日~5月16日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計 0 件)
- 取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://tribo.eng.niigata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

月山 陽介 (TSUKIYAMA, Yosuke)

新潟大学自然科学系・助教

研究者番号: 00533639