カーボンナノチューブ薄膜の振動入力による摩擦低減法 -マイクロニュートン荷重における荷重依存性-

Friction reducing method on carbon nanotube films by normal oscillation

-Load dependence under micro newton loads-

○学 蔭山 正敏 (岡山大学), 正 木之下 博 (岡山大学),
横井 悠馬 (岡山大学), ◎正 藤井 正浩 (岡山大学)

Masatoshi KAGEYAMA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530 Japan

Hiroshi KINOSHITA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530 Japan

Yuma YOKOI, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530 Japan

Masahiro FUJII, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530 Japan

Key words: carbon nanotube, micro tribology, MEMS, oscillation, sliding friction

1. 諸言

近年, 機械装置やコンピューター部品の小型化・高性能化に対するニーズから, 微小な電気機械システム (MEMS) が急速に発展している. MEMS は, スイッチやセンサー, 機構部品としての機能を微小な部品として複合したもので, 従来部品の性能を保ちつつ, 容積を大幅に削減できる. しかし, 装置の小型化を進めると, 凝着力がスケール効果によって相対的に大きくなる. そのため, 部品同士が固着して可動・摺動部が動作しなくなる.

カーボンナノチューブ (CNT) 薄膜は μN 荷重においても低凝着力という, MEMS にとって有益な他材料にはない特性を有することが明らかになっている⁽¹⁾. しかしながら, 同時に, μN 荷重では摩擦係数が 1 を超える高摩擦を示すという特徴も備えている. そこで, CNT 薄膜の高摩擦を低摩擦までコントロールできる技術を開発すれば微小機械の凝着・摩擦問題を解決しうる手法になると考えられ, その応用範囲は飛躍的に広がる.

そこで本研究では, 摩擦面に微小振動を与えて摩擦を下げるという手法⁽²⁾⁽³⁾に着目し, CNT 薄膜の摩擦低減を試みた. 実験においては, 荷重を $0\sim 100\mu\text{N}$, 入力する振動周波数を $10\sim 4,000\text{Hz}$, 入力振幅を $0\sim 0.35\mu\text{m}$ とし, 振動と摩擦力の関係を調べた.

2. 実験

2.1 マイクロトライボメータ

本研究で用いたマイクロトライボメータの概略図を図 1 に示す. この試験機では, 試料は振動入力用の圧電素子 (PZT) アクチュエータを介して, 摺動用および荷重制御用の XYZ-PZT ステージに固定されており, カンチレバーに取り付けられた摩擦ボールに対して往復摺動することで摩擦試験を行う. 振動は振動用 PZT アクチュエータに正弦波関数型の電圧を入力することで, 試料表面に対して垂直方向に与えられている.

2.2 測定条件

CNT 薄膜は化学蒸着気相法により生成した長さ (厚さ) 約 $300\mu\text{m}$ のものを用いた. 摩擦相手材は SUJ2 製の $\phi 2\text{mm}$ ベアリング球を使用した. 摺動距離は $90\mu\text{m}$, 摺動速度は $22.5\mu\text{m/s}$ であり, 垂直荷重は $40\mu\text{N}$ とした. また, 振動付与は振幅 $0\sim 0.35\mu\text{m}$, 周波数 $10\sim 4,000\text{Hz}$ の範囲で行った.

3. 実験結果

図 2 は $1,500\text{Hz}$ の振動を入力し, そのときの摩擦力の変化を示したグラフである. 横軸は摺動回数, 縦軸は上側のグラフでは摩擦力, 下側のグラフでは入力振幅を示している. 破線で囲まれている摺動回数範囲 ($4\sim 14$ 回) では $1,500\text{Hz}$ の振動を加えつつ, 1 サイクルごとに試料に対して加える振幅を $0.17\mu\text{m}$ 刻みで増加させている. このグラフから, 振動を加えた摺動回数範囲で摩擦力の値が大きく減少していることが分かる. また, 振動を停止している摺動回数 $2\sim 4$ の範囲と摺動回数 $14\sim 17$ の範囲では, 摩擦力がほぼ同程度の大きさになっている. このことから, 振動を加えた

Fig. 1 Schematic diagram of the micro-tribometer used in this study

Fig. 2 Typical friction data of carbon nanotube film with normal modulation at the input frequency of 1,500 Hz and applied force of 40 μN

際に生じる摩擦力の変化は、振動を停止させると元にもどる可逆的变化であることが分かる。また、摺動回数に対して上下のグラフを対応させてみると、入力振幅が増加するほど摩擦力が減少している。

つぎに、振動周波数が摩擦係数に及ぼす影響を調べるため、周波数を変化させつつ摩擦係数を測定した結果を図 3 に示す。このグラフにおけるプロットは、それぞれ入力振幅 0.02 μm および 0.35 μm における摩擦係数を示している。このグラフより、入力振幅が小さい 0.02 μm の条件では、CNT 薄膜の摩擦係数は周波数によらず 1.3 程度である。これに対し、入力振幅が大きい 0.35 μm のプロットのみ 400 Hz 程度の周波数で摩擦係数が大きく減少し、それ以上の周波数ではほぼ一定の値を示していることが分かる。

図 4 は振動入力および無振動の時に荷重と摩擦力の関係を表したグラフである。白抜きのプロットは振動を加えずに測定した結果で、塗りつぶしのプロットは周波数 1,500 Hz、振幅 0.35 μm の振動を与えて測定した結果である。このグラフから、振動を加えずに測定した結果は荷重 10 ~ 100 μN の範囲において、荷重と摩擦力は比例関係を保って変化している。一方で振動を加えて測定した結果は、60 ~ 100 μN の荷重範囲(グラフ中の点線より右側)では振動を加えていないものと同程度の傾きを保って変化し、10 ~

Fig. 3 The relationship between input frequency and friction coefficient of carbon nanotube film

Fig. 4 The relationship between normal load and friction force of carbon nanotube film with and without oscillation

50 μN(グラフ中の点線より左側)では荷重減少にともなって傾きを減じつつ、摩擦力 0 に漸近していくような挙動を示している。これは、振動を入力しながら摺動を行った場合、荷重に関係なく一定値の摩擦力を軽減し、荷重が低い範囲ではこの摩擦力減少の一定値はその時の摩擦力より大きく、結果的にほとんど摩擦力がゼロになったと考えられる。さらに、これは振動によって荷重を一定値減少させる効果があったとも解釈できる。

以上の結果から、入力する振動の周波数が一定の値をこえたときに摩擦低減効果は発生し、振幅増加にともなって摩擦力を低減する働きを示すことが分かった。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) CNT 薄膜の摩擦力を低減する場合、入力周波数には摩擦低減のためのしきい値のようなものがあった。
- (2) 摩擦力は、試料に入力した振幅増加にともなって減少した。
- (3) 試料に垂直方向への振動を加えながら摩擦試験を行った場合、振幅の増加は荷重を軽減する働きを示した。

5. 文献

- (1) Hiroshi Kinoshita, Ippei Kume, Masahito Tagawa, and Nobuo Ohmae: High friction of a vertically aligned carbon-nanotube film in microtribology, American Institute of Physics, (2004) pp.2780.
- (2) Anisoara Socoliuc, Enrico Gnecco, Sabine Maier, Oliver Pfeiffer, Alexis Baratoff, Roland Bennewitz and Ernst Meyer: Atomic-Scale Control of Friction by Actuation of Nanometer-Sized Contacts, SCIENCE, Vol. 313, (2006) pp.207.
- (3) Robert W. Carpick: Controlling Friction, SCIENCE, Vol. 313, 7(2006) pp.184.