摩擦低減装置の開発 (超音波振動する金属への微小掘り起こし時の摩擦変化)

Development of Friction Reducer (Friction while Nano-Scratching to Supersonic vibrating Surface)

○学 久富 寛 (岐阜大学)

正 藤井 洋 (岐阜大学)

Hiroshi KUTOMI,

Hiroshi FUJII,

Antanas DAUGELA,

Thomas J. WYROBEK, HYSITRON, Inc. 5251 W. 73RD ST. Minneapolis, MN 55439, USA

Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193

Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193

HYSITRON, Inc. 5251 W. 73RD ST. Minneapolis, MN 55439, USA

トーマス ウィロベック (ハイシトロン)

アンタナス ダウゲラ (ハイシトロン)

1. 序論

本研究では、これまでに工作機械案内面の摺動部に超音波応力振動を与えることによって、摺動面の摩擦を大幅に低減できること、また位置決め精度を向上できることを示した。しかし、振動による摩擦低減の機構はいまだによく分かっておらず、現状では摩擦低減装置を摺動装置にあわせて最適化するためには実験を繰り返すしかない。本論文では振動による摩擦低減機構解明の第一歩として、摩擦力発生原因の一つである掘り起こし力と応力振動との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 摩擦低減理論と実験方法

無潤滑摺動面の真実接触部分では容易に金属間凝着を起こす。摩擦力はその凝着を断ち切る力と、硬い方の表面の凸部がもう一方を削る掘り起こし力の合力と考えられている。この二面どちらか一方に応力振動を与えたとき、振動によって凝着が妨げられ摩擦が低減することは容易に予想される。しかし、摩擦のもう一つの成分である掘り起こし力も振動で低減するであろうか。非金属や凝着がほとんどないと考えられる異種表面の摩擦も振動によって低減されることを考えると何らかの影響があることは確実であるが、その程度もメカニズムも不明である。

そこで本実験では、凝着摩擦が全くなく掘り起こし力だけが存在する金属間摩擦を再現し、このときの掘り起こし力に与える応力波の影響を論じることとした。そのためダイヤモンドのインデントでステンレス材表面をスクラッチする事を考えた。このときダイヤモンドの押し込み深さを50nm~300nmのごく小さい値に押さえれば、凝着摩擦が全くなくしかも金属の凸部が食い込んで掘り起こす程度の接触を実現できる。

実験は Hysitron 社製の Triboscope で行った。インデントをダイヤモンドチップとし、超音波振動するサンプルに微小なスクラッチを施し、そのときの垂直力と水平力を測定する。Triboscope はナノメートルレベルのスクラッチをすることができ、さらに原子間力顕微鏡(AFM)の機能も備えているので実験後にスクラッチ痕を観察することも可能である。ダイヤモンドチップでスクラッチすることにより、繰り返し実験しても条件が変わらず、摩擦現象の掘り起こし成分だけを擬似的に再現できると考えられる。

3. 実験装置

Fig.1に本実験装置を示す。ナノスクラッチには Hysitron, Inc.製の Triboscope と専用のコントローラを使用した。この装置は数 10~数 100 μ N の垂直力で 20 μ m を越える距離のナノスクラッチが可能であり、ナノインデントによって材料の硬さやヤング率を測定することもできる。Triboscope を AFM として使用する場合のサンプル微動には DI 社製の AFM スキャナと NanoScopeE を使用した。

サンプルは一辺 10mm のステンレス (SUS303)の立方体で、側面に厚さ 1mm の PZT をエポキシ樹脂で貼り付けた。この PZT は Stanford 社製の発振器によって 1Hz~3MHz, 0~10V の範囲で電圧および周波数が変更可能である。

4. 実験結果と考察

4-1. サンプルの振動特性について

最初にサンプルの共振周波数特性を調べた結果を Fig. 2 に示す。図から最大ピークは 214kHz にあることがわかる。またその付近にも小ピークがある。次にサンプル表面にきめの細かい砂を撒き PZT を振動させたときの砂の動きを観察することによって表面の振動を可視化した。その結果を Fig. 3 に示す。観察の結果、3つの周波数で明確なパターンを得た。そのときの周波数は Fig. 2 の図中の I~III に対応している。

Fig. 3 の I と III では、表面の振動の方向が違うことがわかる。次項のナノスクラッチの実験はスクラッチできる方向が一方向に限られているが、このモードの違いを利用すればスクラッチ方向に対し平行な振動を与えたときと直角な振動を与えたときについて実験することができる。可視化したときの振動の節の部分では、表面が垂直に振動しているはずであり、スクラッチに対して垂直方向の振動があるばあいについてもテストできる。スクラッチをする部分は a~d の 4 力所とした。

4-2. ナノスクラッチの結果

Fig. 3 の a~d をスクラッチしたとき得られるデータの一例を Fig. 4 に示す。このような結果を整理し Fig. 5(a)~(d) を得た。インデントに働く垂直力 F_n と水平力 F_h の比を摩

Fig.1 Schematics of experimental setup

擦係数 μ として示す。これはミクロ的には切削加工に近いが、掘り起こしに起因する摩擦とみなし摩擦と呼ぶことにする。Fig. 3 の a-d の場所に垂直力を 250 μ N~1500 μ N, PZT に印加する電圧を 2~10V の各条件でスクラッチを行った。PZT に印加する電圧が大きいほどサンプルの振動も大きくなる。押し込み深さは当然垂直力 F_n に比例して増加するが、スクラッチを始めるとその深さは変化する。初期深さ D は $D \approx 5 \times F_n$ [nm] であり、本実験の場合は $F_n=250\sim1250\mu$ N であったので、約 50nm~300nm の範囲である。

Fig.5 から摩擦力は振動の向きに関わらず低減することが

Fig.2 Resonance modes

Fig.3 Wave pattern and directions

Fig.5 Results

わかる。スクラッチに対し直角方向の振動を与えた場合(b)振動振幅、垂直荷重がともに大きくなるような条件では摩擦は徐々に増加する傾向がある。また、垂直方向の振動を与えた場合(a),(d)においても同様の傾向があった。

スクラッチ痕を調べてみた結果(Fig.6), 印加電圧と垂直力がともに大きい場合にスクラッチ痕は大きく、スクラッチ溝の両脇の盛り上がりも非常に大きくなっていた。このような条件下では掘り起こす量が多くなり、見かけの摩擦係数が増加したと考えられる。

5. まとめ

摩擦の掘り起こし成分に関して、振動によって摩擦が低減することが確認できた。そのとき振動の方向に関係なく摩擦は低減する。振動によって同じ垂直力でも掘り起こし量は大きくなる。これは振動が大きくなるほど掘り起こしも大きく、特にスクラッチに対して直角な振動や垂直な振動を与えた場合には影響が大きく、強すぎる振動は逆効果になりうるということが分かった。振動はスクラッチと同じ方向が最も良いことが分かった。

6. 謝辞

本実験、研究に際し多大なご協力を頂きました Hysitron, Inc. の社員の皆様、ご指導を頂きました藤井研究室の加藤隆雄助教授、佐瀬直樹助手、桑原稔助手および藤井研究室のみなさんに感謝します。

7. 参考文献

- (1) H. Kutomi, N. Sase, and H. Fujii, Development of Friction Controller, *Proc.Int.Conference AMPT'99*, (1999), Vol.1, pp.605-612
- (2) Bhushan, Bharat, Handbook of Micro/Nanotribology (Mechanics and Materials Science) 2nd edition, :CRC, (1998)
- (3) F. P. Bowden and D. Taor, 曾田範宗 訳, 固体の摩擦と潤滑, 丸善株式会社, 昭和 36 年
- (4) Bo N. J. Presson, Sliding Friction (Physical Principles and Applications), Springer, (1998)

Fig.4 AFM image and sliced topography