トライボコーティング法による真空用玉軸受の摩擦制御

足立 幸志*1・鈴木 論道*2・渋谷 裕行*3

加藤 康司*4・小原 新吾*5

Tribo-coatings for Friction Control of Ball Bearings in Ultra High Vacuum

Koshi ADACH*1, Rondo SUZUKI*2, Hiroyuki SHIBUYA*3,
Koji KATO*4 and Shingo OBARA*5

*1School of Mechanical Engineering, Tohoku University Aramaki-aza-aoba 6-6-01, Aoba-ku, 980-8579 Sendai

*2Tokyo Electric Power Company, Futaba-gun, 979-0402 Fukushima

*3NS Solutions Corporation, Chuo-ku, 104-0033 Tokyo

*4Nihon University, 963-8642 Koriyama

*5Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen, 305-8505 Tsukuba

(Received February 15, 2008, Accepted May 10, 2008)

Lubrication is one of the most important key technologies for reliable and durable machines in ultra high vacuum. Solid lubricants, which are pre-coated before operation by a certain amount thickness, are commonly used for the system. The life of present system is, therefore, determined by the wear life of the coating of lubricant.

To extend its lifetime, a new lubrication method for in-situ and on-demand restoration of the lubricants called as “Tribo-coating” had been introduced, and its effectiveness as practical solid lubrication method for sliding element has been clearly shown.

This paper introduces the unique advantage of excellent tribological performance of tribo-coating film for ball bearings, and the usefulness of the tribo-coating for friction control of ball bearings in ultra high vacuum is clearly shown.

1. 緒 言

宇宙機器に代表される真空環境下における機械機器のしゅう動部の多くは、高い飽和蒸気圧、優れた保存性と清浄性の観点から金 (Au)、銀 (Ag)、鉛 (Pb)、二硫化モリブデン (MoS_2) 等の固体潤滑膜により潤滑される¹⁻³⁾。しかし固体潤滑は、液体を用いた潤滑と比較し「高摩擦」であり、いずれも事前に被覆した一定厚さの被膜の摩耗による「寿命」が存在するなどの本質的に避けられない欠点を有している⁴⁻⁶⁾。

これに対し、従来使用されている軟質金属薄膜より低い摩擦係数を半永久的に持続することのできる固体潤滑法として「In-situ トライボコーティング潤滑法 (摩擦支援型蒸着法)」が提案され⁷⁾、すべり摩擦試験においてその有効性が実証されている⁷⁻¹⁰⁾。

本論文では、インジウムのトライボコーティングを施した玉軸受の摩擦特性に及ぼす軸受構造とトライボコーティング条件の影響を明らかにし、トライボコーティングにより 0.005 以下の安定した低い摩擦係数を得るための必要条件を明らかにする。さらに、それらの結果にもとづき真空用玉軸受に対するトライボコーティング法の有効性を明らかにする。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置：玉軸受のためのトライボコーティングシステム

トライボコーティング法とは、摩擦支援下で真空蒸着を行なう成膜法である⁷⁻¹⁰⁾。真空蒸着中に摩擦を負荷することにより母材との付着力の強い優れた潤滑性を有する被膜が形成されるところに最大の特徴がある。真空蒸着システムを有する玉軸受摩擦試験機 (玉軸受のトライボコーティングシステム) の概略を **Fig. 1** に示す。スラスト荷重は錘によって外輪のみに与られ、軸受の内輪はモータにより駆動される。軸受に発生する摩擦力は外輪の回転を抑える板ばねに貼り付けたひずみゲージの出力から算出される。潤滑剤 (インジウム: In) を内蔵しモリブデン (Mo) 線を巻きつけたアルミナ製の坩堝が玉軸受の下部に設置され、モリブデン線に通電加熱することにより摩擦中に任意のタイミングで潤滑材料を蒸発させ、玉軸受にトライボコーティング膜を形成させることが可能である。これらの装置は、 10^{-6} Pa の真空下に設置され実験が行なわれる。

2.2 試験片

本実験には、保持器の有無及び球の材質を変化させた 3 種類の深溝玉軸受を使用した。内外輪はすべて SUS440C であり保持器は SUS304、球は窒化ケイ素 (Si_3N_4) 及び SUS440C の 2 種類を用いた。また摩擦特性の相対比較のため、従来真空用玉軸受として使用されている PTFE の保持器を有し MoS_2 のスパッタリング膜を施した深溝玉軸受を用いた。

2.3 トライボコーティング膜の摩擦特性の評価

インジウムのトライボコーティングが施された玉軸受 (球: Si_3N_4 , 内外輪: SUS440C) の典型的な摩擦係数の変

*1 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

*2 東京電力㈱ (〒979-0402 福島県双葉郡広野町下北迫二ツ沼58)

*3 新日鉄ソリューションズ㈱ (〒104-0033 東京都中央区新川 2-20-15)

*4 日本大学 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1)

*5 宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

Fig. 1 Schematic illustration of friction apparatus for ball bearings with tribo-coating system.

Fig. 2 Representative friction curve of ball bearing lubricated by tribo-coated In film.

Fig. 3 In-situ and on-demand restoration of lubrication property of the ball bearing lubricated by tribo-coating.

化を Fig. 2 に示す. ここで図中における矢印はトライボコーティング膜形成のための蒸着のタイミングを示している. 摩擦係数は初期に急増するもののすぐに減少し安定した低い値を示す. 一定期間の安定した摩擦を示した後, 摩擦係数が急増する. この安定時の摩擦係数と摩擦係数が急増するまでの期間によりトライボコーティングを施した玉軸受の摩擦係数と寿命を評価した.

3. 実験結果及び考察

3.1 再トライボコーティングによる潤滑性能の修復

Fig. 2 に示すように 1 回の潤滑剤供給で形成されるトライボコーティング膜の寿命は有限である. この寿命に達した瞬間に真空蒸着を再び行なった場合の摩擦特性を Fig. 3 に示す. トライボコーティング膜の再形成により, 上昇した摩擦を再び低摩擦に修復することが可能であることが確認できる. この結果は, 再トライボコーティングにより玉軸受の低摩擦の修復が可能であり, 半永久の低摩擦の持続が原理的に可能であることを示している.

3.2 トライボコーティング膜の摩擦特性に及ぼす軸受構造の影響

Fig. 4 に保持器付玉軸受にインジウムのトライボコーティングを施した時の摩擦特性に及ぼす球材質の影響を示す. SUS440C 球を用いた場合には, 摩擦係数の上昇時に焼付きが発生し, 再トライボコーティングを施しても低摩擦は実現しない. これに対し Si_3N_4 球を用いた場合には, 定常状態における摩擦係数も相対的に安定しており Fig. 3 に示すとおり再トライボコーティングにより上昇した摩擦を再び低減させ得ることが分かる. 以上より耐焼付性に優れるセラミック(Si_3N_4) 球を有する玉軸受においてトライボコーティング潤滑法の有効性が発揮されるといえる.

この結果にもとづき以後すべての実験においては, Si_3N_4 球を有する玉軸受を使用した.

3.3 トライボコーティングを施した玉軸受の寿命に及ぼす軸受構造と成膜条件の影響

Fig. 5 に 2 種類の蒸着速度でトライボコーティングを施した玉軸受の摩擦特性を示す. また Fig. 6 に保持器の有無

Fig. 4 Effect of ball material on friction properties of ball bearings lubricated by tribo-coated In film.

Fig. 5 Effect of coating speed on friction properties of ball bearings lubricated by tribo-coated In film.

の違いを有する2種類の玉軸受にトライボコーティングを施した場合の寿命に及ぼす蒸着時の回転速度の影響を示す。トライボコーティングを施した玉軸受の長寿命を実現するためには、高い蒸着速度と蒸着時の低い回転速度が有効であることが分かる。これは、摩擦面において球により摩擦が負荷される前に摩擦面に供給される膜厚が厚いほど長い寿命を与ええることに対応する。そこで、内外輪のある1点において、球と球が通過する間に供給される蒸着膜の膜厚 h_c を(1)式で定義し、 h_c 値とトライボコーティングを施した玉軸受の寿命の関係を Fig. 7 に示す。

$$h_c = \frac{h}{V_c N} \quad (1)$$

ここで、 h は蒸着速度、 V_c は蒸着時の回転速度、 N は玉軸受の球の個数である。

Fig. 7より h_c 値が0.3–0.4 nm 程度で急激に寿命が増加し、0.4 nm 以上の場合に、トライボコーティングにより十分な寿命が得られることが分かる。即ち、 h_c 値 > 0.4 nm が低摩擦を長期間持続するためのトライボコーティング膜形成のための一つの必要条件となる。さらに Fig. 6, Fig. 7 より保持器付玉軸受と比較し保持器を有しない総玉軸受によって、より長い寿命を与えられることが分かる。即ちセラミックの総玉軸受においてトライボコーティング潤滑法の有効性が発揮されるといえる。

この結果にもとづき以後の実験においては、 Si_3N_4 の総玉

Fig. 6 Effect of rotational speed during tribo-coating process on life of tribo-coated In film.

Fig. 7 Life of tribo-coated In film as a function of supplied coating thickness during one pass of the ball.

軸受を使用し、 h_c 値が0.4 nm 以上となる条件で成膜を行なった。

3.4 トライボコーティングを施した玉軸受の摩擦係数に及ぼす成膜条件の影響

3種類のトライボコーティング時の供給膜厚における玉軸受の摩擦特性及び4種類の荷重条件においてトライボコーティングを施した玉軸受の摩擦特性を各々 Fig. 8, Fig. 9 に示す。トライボコーティング時の供給膜厚及び荷重によって玉軸受の摩擦特性は大きく変化することが分かる。0.005以下の安定した低い摩擦係数、0.01以上の不安定な高い摩擦係数及びそれら中間の摩擦挙動を示す荷重と供給膜厚条件を Fig. 10 に示す。これはトライボコーティングにより安定した低摩擦を得るための必要条件が、最適な荷重と供給膜厚条件として与えられることを示している。

3.5 従来の真空用玉軸受との比較

本実験条件範囲内において、安定した低摩擦を与える最適な成膜条件でトライボコーティングを施した Si_3N_4 の総玉軸受の摩擦特性と従来宇宙機器用玉軸受として用いられている MoS_2 のスパッタリング膜を施した玉軸受の摩擦特性との比較を Fig. 11 に示す。最適条件においてトライボコーティングを施すことにより、従来の真空用玉軸受と同等以下の安定した低い摩擦特性を与え得る玉軸受が実現可能であると結論付けられる。

Fig. 8 Effect of supplied film thickness on friction properties of ball bearings lubricated by tribo-coated In film.

Fig. 9 Effect of thrust load on friction properties of ball bearings lubricated by tribo-coated In film.

Fig. 10 Distribution of friction coefficients of the ball bearing after tribo-coating of In.

3.6 玉軸受におけるトライボコーティング膜

Fig. 12にインジウムのトライボコーティング膜を施した玉軸受において安定した低摩擦が得られた時の玉軸受の球と内輪のSEM写真を示す。球表面には摩擦によって形成されたと考えられる移着膜がほとんど観察されていないのに対し内輪の転送面には、一様な移着膜が形成されていることがわかる。同様の一様な被膜は、外輪の転送面にも形成されていることが観察されている。トライボコーティングを施した玉軸受では、トライボコーティングのための潤滑剤の蒸着は、玉軸受の一部分に行なわれるものの、玉軸受の回転に伴い潤滑剤であるインジウムは、玉を媒体に内外輪の転送面に一様な膜を形成しこれが潤滑膜（トライボコーティング膜）として機能するといえる。

Fig. 13に種々の成膜条件において観察された内輪転送面上のトライボコーティング膜の典型的な3つの形態を示す。供給膜厚が不十分である場合、部分的な島状の膜が形成され (Fig. 13(a)), 供給膜厚が過剰である場合膜が厚く形成され (Fig. 13(c)) 膜の部分的な脱落が発生している事がわかる。これらに対し安定した低い摩擦係数が得られている場合には、均一な移着膜が形成される (Fig. 13(b)) ことがわかる。即ち、Fig. 10において0.005以下の安定した低い摩

擦係数を実現する条件は、トライボコーティング形成過程において内外輪に均一な膜を形成させ得る条件であるといえる。また、このような均一なトライボコーティング膜は、真空中での摩擦に伴うなじみ過程と成膜過程が同時に行なわれることにより自己形成させるものであり、下地との密着性の高いことが期待される。これが、トライボコーティング法の最大の特徴であるといえる。

トライボコーティング膜の低摩擦発生機構、低摩擦を発生

Fig. 11 Friction properties of ball bearings lubricated by tribo-coating film and conventional solid lubricant.

Fig. 12 SEM images of ball (a) and inner race (b) of the ball bearing after tribo-coating of In.

Fig. 13 Three representative films observed on the inner ring and outer ring after tribo-coating of In.

するトライボコーティング膜の形成条件とその形成機構など解明すべき急務の課題は残されている。しかし、玉軸受において0.005以下の摩擦係数を発生し、必要な時にその摩擦性能の修復を可能にする「トライボコーティング法」は、高い信頼性が求められる真空機器用玉軸受にも有効な技術であるといえる。

4. 結 言

インジウムのトライボコーティングを施した玉軸受の摩擦特性に及ぼす軸受構造とトライボコーティング条件の影響を調査し以下の結論を得た。

- (1) 最適なスラスト荷重，トライボコーティング供給膜厚，トライボコーティング時の回転速度においてインジウムのトライボコーティングを施した Si_3N_4 の総玉軸受は，従来の真空用玉軸受と同等以下の安定した低い摩擦係数（0.005以下）を与え得ることを実証した。
- (2) 再トライボコーティングにより上昇した摩擦を再び減少させ得ることを示し，トライボコーティング法により真空玉軸受の0.005以下の低摩擦係数の半永久の持続が原理的に可能であること実証した。
- (3) 最適成膜条件でトライボコーティングを施した玉軸受では，内外輪に様なトライボコーティング膜が自己形成さ

れ，これが潤滑膜として機能することを明らかにした。

謝辞

本研究に際し試験片のご援助をいただきました株式会社ジェイテクトに感謝申し上げます。

〔文 献〕

- 1) E. W. Roberts: Tribology International, **23** (1990) 95.
- 2) M. Nishimura and M. Suzuki: Tribology International, **32** (1999) 637.
- 3) R. N. Bolster, I. L. Singer, J. C. Wegand, S. Fayeulle and C. R. Gosset: Surface and Coatings Technology, **46** (1991) 207.
- 4) E. W. Roberts: Tribology International, **23** (1990) 95.
- 5) M. Nishimura and M. Suzuki: Tribology International, **32** (1999) 637.
- 6) R. A. Rowntree: Tribological Research and Design for Engineering Systems/D. Dowson et al. (Editors), 2003 Elsevier Science B. V., Tribology Series, **41** (2003) 197.
- 7) K. Kato, H. Furuyama and M. Mizumoto: *Proc. of the Japan Int. Trib. Conf.*, Nagoya, Japan, 1990, (1990) 261.
- 8) K. Kato, H. Kim, K. Adachi and H. Furuyama: Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, C, **62** (1996) 3237.
- 9) K. Adachi and K. Kato: Journal of Japanese Society of Tribologists, **44** (1999) 39.
- 10) K. Adachi and K. Kato: Shinku, **42** (1999) 804.