真空中トライボコーティングによる摩擦の制御^{*1}

足立 幸志^{*2}・加藤 康司^{*2}

(受理1999年3月31日, 掲載決定1999年8月7日)

Tribo-coating for Friction Control in Ultra High Vacuum

Koshi ADACHI^{*2} and Koji KATO^{*2}

^{*2}(Tribology Laboratory, School of Mechanical Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579)

(Received March 31, 1999, Accepted August 7, 1999)

1. 緒 言

地球上と異なり容易にはアクセスし難い宇宙環境下での機械機器では, それらに組み込まれるトライボ部品のわずかなトラブルでも, 数百億円を費やして構築した宇宙機械システムを要求寿命を全うする前に宇宙軌道上の残骸と化してしまう。低摩擦力を長期間保証する潤滑技術が極めて重要な基幹技術といわれる所以である。

従来, それら要素部品の潤滑には金 (Au), 銀 (Ag), 鉛 (Pb), 二硫化モリブデン (MoS_2) 等の固体潤滑剤が用いられている^{1,2)}。しかし, いずれの方法においても一定厚さの固体潤滑膜が摩擦によって失われた時が宇宙機械の寿命になる^{1,2)}。それ故, 宇宙機械用潤滑剤及び潤滑膜形成法の開発の歴史は, これら固体潤滑膜の寿命延長のための開発にあったといえる。

しかし気象衛星「ひまわり3号」の走査鏡の動作不良, 地球資源探査衛星「ふよう」の合成開口レーダの展開不良, 技術試験衛星「きく6号」のアポジエンジンの動作不良などの宇宙機械機器のトライボロジーの問題に起因した事故は, 後を絶たないのが現状である³⁻⁵⁾。

これらは宇宙機械にとって長期間安定な低摩擦力を保証する潤滑法が重要であると同時に現状における潤滑法はまだ多くの問題点を含んでいることを実証している^{1),6)}。

以上の理解に基づき, 著者らは, 宇宙機械に代表され

Fig. 1 Possibility for endless life in lubrication by “Tribo-Coating”⁷⁾.

る真空環境下の機械機器のための永久的かつ信頼性のある新しい潤滑法として「トライボコーティング法 (摩擦支援型蒸着法)」を提案し⁷⁾, この方法による半永久寿命の可能性を実験的に示している (Fig. 1)⁷⁾。

本報ではトライボコーティング法の宇宙機器への適応の可能性を摩擦係数の観点より検討すると同時に, トライボコーティングによる摩擦の制御の可能性を明らかにする。

2. トライボコーティングシステムの基本概念と基礎実験装置

トライボコーティング法とは, その場で修復が可能な摩擦支援潤滑膜形成法と言い換えられる。その原理として期待される効果は以下のように整理される。

^{*1}「トライボロジスト」第44巻第1号 (1999) 39-45より転載, 一部, 加筆修正。

^{*2} 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01)

Fig. 2 Schematic diagram of friction apparatus with tribo-coating system⁷⁾.

- (1) 摩擦は超高真空中で行われる。この際摩擦する表面は、洗浄以外の特別な前処理(コーティングなど)は行わない。
- (2) 超高真空中で摩擦された面は機械的に汚染膜が除去され活性化される。
- (3) 超高真空中の摩擦新生面に、軟質金属を数分蒸着させることによりナノメートルスケールの厚さの付着力の強い蒸着膜が形成される。
- (4) 適量供給された蒸着膜は、摩擦面のなじみ過程における潤滑剤として有効に機能すると同時に直ちに次の摩擦を受けることにより、より強固な付着力を有するトライボコーティング膜(摩擦支援蒸着膜)を形成する。
- (5) このようにして軟質金属の薄い蒸着膜が潤滑膜として摩擦表面に強く付着することにより、摩擦面の下地材料同士の凝着による荒れを防止し、軟質金属薄膜として可能な低摩擦を実現する。
- (6) 蒸着膜をその場で簡便に供給するシステムのため、再蒸着即ち潤滑膜のその場修復が容易であり、潤滑が対象となっている摩擦部分の半無限の寿命を確保することが出来る。
- (7) このような潤滑膜の供給信号は、地上から発信することが可能であり、地上から宇宙機械機器の摩擦の制御が可能となる。

このような原理を実行すべく製作した基礎実験装置の概略を Fig. 2 に示す⁷⁾。ピン-オン-ディスク型摩擦試験機がディスク摩擦面を下向きにして取り付けられ、モリブデンヒータ (Mo heater) の巻かれたアルミナ坩堝 (Al_2O_3 Crucible) が、その直下に設置されている。任

Table 1 Mechanical and physical properties of pin and disk specimens⁷⁾

	Disk	Pin
Material	SUS 440C	Si_3N_4
Surface roughness R_y , μm	0.02–0.10	0.02
Vickers hardness H_v , kgf/mm^2	800	1650
Fracture toughness K_{Ic} , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	—	5.2
Elastic modulus E , GPa	204	320
Poisson's ratio	0.3	0.27
Density ρ , $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	8.00	3.24
Thermal conductivity λ , W/mK	29	28
Thermal diffusivity a , $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	12.2	10.1

意のタイミングにおいて Mo ヒータを通電加熱することにより、坩堝に内在する軟質金属の蒸着膜を摩擦面に供給することが可能となる。

垂直荷重は板ばねを介して与えられ、摩擦力とともに板ばねに取り付けられたひずみゲージにより測定される。ピンとディスク材料として熱処理を施したステンレス鋼 (SUS440C) と窒化ケイ素 (Si_3N_4) を用いた。それらの特性値を Table 1 に示す⁷⁾。さらに被膜材料として軟質金属であるインジウム (In) を用いた。これらは、より優れた摩擦特性を与え得るものとして確認されている材料組み合わせである¹⁾。

Fig. 3 Representative friction properties of tribo-coating film of indium⁹⁾.

Fig. 4 SEM images of friction surface of pin (a) and disk (b) observed at stable friction condition. The arrows indicate the relative sliding directions of counter faces⁹⁾.

3. 実験結果

3.1 トライボコーティング膜の典型的な潤滑特性

摩擦初期におけるピンとディスクの直接接触を避けるためにピンとディスクの摩擦前に1分間、トライボコーティング膜形成のために摩擦中に1分間の計2分間のみ摩擦初期における被膜を供給する⁷⁾。この時の典型的な摩擦係数の変化をFig. 3に示す⁹⁾。摩擦初期に摩擦係数の上昇が見られるが、徐々に減少し安定した低い摩擦係数が得られる。この摩擦係数がトライボコーティング膜の潤滑特性を表す一つの指標となる。また、 2×10^5 回転における摩擦係数の急増が、初期に形成したトライボコーティング膜の寿命を意味する。

Fig. 4に、Inのトライボコーティングを施した時の定常摩擦状態におけるピンとディスク表面のSEM写真を示す⁹⁾。被膜材であるInはSEMによって、ディスク表面には観察されず、EDXによっても確認できないほどである。これに対し、ピン表面にはInの移着膜を明確に観察することができる。このピン上に移着したIn

Fig. 5 Friction coefficient of tribo-coating of indium with various conditions of contact pressures and sliding velocities⁹⁾.

Fig. 6 Comparison of friction properties of Ag, Pb film formed by ion-plating and In film formed by tribo-coating⁹⁾.

膜が、この系における潤滑剤の供給源であり、良好な潤滑特性を与えるトライボコーティング膜と考えることができる。

3.2 トライボコーティング膜の潤滑特性に及ぼす接触圧力とすべり速度の影響

宇宙用機械機器のしゅう動部に要求される接触圧力とすべり速度条件範囲にあるそれぞれ3種類の条件下でのトライボコーティング潤滑における定常時の摩擦係数をFig. 5に示す⁹⁾。いずれの条件下においても、0.15以下の摩擦係数を示しており十分実用に耐え得る潤滑法であることが分かる。

3.3 トライボコーティング膜とイオンプレーティング膜の潤滑特性の比較

本摩擦試験機において同一摩擦条件下で得られたInのトライボコーティング膜と従来、真空用ベアリングの固体潤滑膜として利用されているAg, Pbのイオンプレ

Fig. 7 Effect of in-situ tribo-coating on friction properties of tribo-coating film of indium⁹⁾.

ーティング膜の潤滑特性を Fig. 6 に示す⁹⁾。In のトライボコーティング膜が、より低い摩擦係数を示していることが分かる。一般に、軟質金属被膜を用いた場合の摩擦係数は0.07~0.15を示すといわれており、軟質金属である In のトライボコーティング膜が、非常に低い摩擦係数を示すことが分かる。

この結果より、トライボコーティング法は低摩擦を実現するための潤滑膜形成法として有効であるといえる。

4. 考 察

ピン上に形成された In のトライボコーティング膜は、従来の軟質金属被膜と比較し、非常に低い摩擦係数を与え得ることが明らかにされた。ここでは、トライボコーティング膜による低摩擦発現機構を検討するとともに、トライボコーティング法の可能性を以下の2つの観点から考察する。

4.1 その場供給の効果

摩擦初期に In のトライボコーティングを施した後、摩擦係数が上昇傾向を示した時に1回1-2分の In のトライボコーティングを繰り返して蒸着した場合の摩擦係数の変化の一例が Fig. 1⁷⁾である。本方法により、安定した低い摩擦係数を半無限的に維持させることが可能であることを実証する結果である。

これに対して摩擦初期に In のトライボコーティングを施した後、安定な摩擦状態時に1回1-2分の In のトライボコーティングを間欠的に繰り返した場合の摩擦係数の変化の例を Fig. 7 に示す⁹⁾。トライボコーティングを繰り返すことにより、定常時の摩擦係数をより小さくすることが可能であることが分かる。Fig. 8 に、ディスクの初期表面あらさを变化させた時の1回目と2回目の In のトライボコーティング後の摩擦係数の変化を示す

Fig. 8 Improvement of friction coefficient of tribo-coating films by second-tribo-coating¹⁰⁾.

Fig. 9 Effect of assisted friction force by changing of normal load during evaporation of indium on friction properties¹²⁾.

す¹⁰⁾。いずれのディスクにおいても、やはりトライボコーティングを繰り返すことにより、摩擦係数を減少させることが可能であることが分かる。

この効果の利用により0.02を下回る非常に低い摩擦係数を得ることが可能となる。同時に、トライボコーティングの繰り返すことにより1回の供給で形成されるトライボコーティングの寿命が増加することも実験的に確認されている¹¹⁾。

これらの結果は、地上からの信号により必要なときに宇宙機械機器のしゅう動部に固体潤滑膜を供給し潤滑膜を補修することが可能な本トライボコーティングシステムが、「半永久的な低摩擦係数の持続」を保証し得る可能性を示すと同時に「より低い摩擦を与える新しい潤滑膜形成法」として有効であることを示すものと考えられる。

4.2 摩擦支援の効果

In のトライボコーティング膜の摩擦繰返し数にとも

Fig. 10 X-ray diffraction of evaporated indium film (a) and transferred indium film on the pin surface formed during friction under 1 GPa (b) and 2 GPa (c).

なう摩擦係数の変化に及ぼすトライボコーティング時の負荷荷重（負荷摩擦力）の影響を Fig. 9 示す¹²⁾。この図においてコーティング時の荷重が 0 N の時は、In の蒸着膜に相当する。蒸着膜形成時の摩擦支援により摩擦係数及び被膜寿命が飛躍的に改善されていることが分かる。わずか 2 分間の摩擦支援方法によりトライボコーティング膜の潤滑特性を大幅に改善させることが可能である。

Fig. 10 に In の蒸着膜と 1 GPa, 2 GPa の接触状態で形成されたトライボコーティング膜の X 線回折結果を示す⁹⁾。蒸着面においては、ほとんどインジウムの (101) 面で構成されているのに対し摩擦力の負荷されたトライボコーティング膜は In の主要なすべり面である (110) 面が増加していることが分かる。これは、摩擦力の負荷による動的再結晶化の結果と考えられる¹³⁾。In のせん断強度の低下がトライボコーティング膜の低摩擦の要因の一つであると考えられる。

これらの結果は、潤滑膜形成時における「摩擦支援」が良好な潤滑膜形成に対し極めて有効であり、かつ被膜形成時の摩擦支援の方法により形成されたトライボコーティング膜の潤滑特性をさらに改善できる可能性を示すものである。

5. 結 言

(1) In のトライボコーティング膜は、従来の成膜法による軟質金属被膜の与える摩擦係数 (0.07~0.15) の約 1/5~1/2 の低い摩擦係数を与え得る。

(2) 摩擦安定時における再トライボコーティングにより、摩擦係数をより低減させることが可能である。2 回目のトライボコーティングにより摩擦係数は約 30~50% 減少する。

(3) In のトライボコーティング膜は宇宙機械において実用条件とされる接触圧力 (0.5~0.2 GPa) とすべり速度 (5~65 mm/s) 範囲において十分有効な低摩擦係数 ($\mu < 0.15$) を与え得る。

謝辞

本研究の遂行に当たりご協力いただきました東北大学 福来金已技官及び当時学生の高田圭司君、小山田具永君に感謝の意を表します。さらに、試験片のご援助をいただきました光洋精工(株)に感謝申し上げます。

【文 献】

- 1) R. L. Fusaro: J. of the American Society of Lubrication Engineers, **51**, 3 (1995) 182.
- 2) E. W. Roberts: Tribology International, **23**, 2 (1990) 95.
- 3) M. T. Freeman: IEEE AES System Magazine, April (1993) 3.
- 4) 西村 明: 学術シンポジウム, 新しいトライボロジーと表面科学の接点, 予稿集 (1993) 41.
- 5) 木村好次: トライボロジスト, **40**, 11 (1995) 889.
- 6) 藤原孝誌: 潤滑, **19**, 11 (1974) 804.
- 7) 加藤康司, 金 亨資, 足立幸志, 古山秀之: 日本機械学会論文集 (C 編) **62**, 600 (1996) 3237.
- 8) 金 亨資, 加藤康司: トライボロジー会議予稿集 (盛岡1992) 609.
- 9) K. Adachi, K. Kato and T. Oyamada: Proc. Int. Symp. for High Performance Tribosystems, Teagu, South Korea, (1998) 61.
- 10) 足立幸志, 加藤康司, 小山田具永: トライボロジー会議予稿集 (東京1995) 165.
- 11) 金 亨資, 加藤康司: トライボロジー会議予稿集 (福岡1991) 223.
- 12) 足立幸志, 加藤康司, 黒田圭司: トライボロジー会議予稿集 (金沢1994) 665.
- 13) M. S. Bednar, B. C. Cai and D. K. Wilsdorf: LUBRICATION ENGINEERING, **49**, 10 (1993) 741.