

軟質金属膜の摩擦特性に及ぼすフラーレン含有潤滑油の影響

Effects of fullerene suspended oil on friction properties of soft metal films

名城大・院（学）*山本 拓正 名城大・理工（正）**宇佐美 初彦

Takumasa Yamamoto*, Hatsuhiko Usami**

*Graduate student of Meijo University, **Meijo University

1. 緒言

フラーレンは特定の潤滑油剤に分散溶解させることで、特定の金属に対して油膜吸着を促進し油膜破断抑制に寄与する可能性が示唆されている¹⁾。これまでに、鋼やアルミニウム合金に対して高い摩擦摩耗低減効果の発現が確認されている²⁾。また、油剤吸着効果に関して化学反応に依存しないので既存の摩擦調整剤の協奏効果も期待できる。

自動車用エンジン軸受表面にはスズ（Sn）等の軟質金属薄膜が適用されている。青銅表面に Sn と亜鉛（Zn）から構成される薄膜に熱処理を加えることで、単層の被膜よりもさらに摩擦摩耗が低減することも報告されている³⁾。また、酸化亜鉛（ZnO）の自己潤滑性も確認されており⁴⁾、Sn や Zn の成膜は潤滑時の摩擦摩耗低減に寄与する可能性は高い。

前述のように、フラーレン分散油剤の摩擦低減効果は金属材種によって異なるが、軟質金属に対する特性を評価することは、実際の機械要素摺動面への適用拡大に関して有効である。特に、フラーレン分散による油膜保持効果の促進が確認できれば、さらなる摩擦摩耗低減につながる。

本報告では、Sn および Zn、ZnO から構成される金属薄膜に対するフラーレン分散油剤の摩擦低減効果を実験的に検討し、その適用可能性について考察した結果を報告する。

2. 試験片

Figure 1 は試験前の各ディスク試験片の光学顕微鏡像及び断面曲線である。試験片は市販の高炭素クロム軸受鋼（SUJ2、形式 51105、 $\phi 42 \times \phi 25 \times t3$ mm）であり、端面をダイヤモンドスラリーで鏡面（ $<0.01 \mu\text{m Ra}$ ）として鏡面仕上面（Mirror finished）とした。また、鏡面表面に電鍍鍍金で Sn や Zn を成膜した試験片（Sn plating, Zn plating）、Sn を電気鍍金により成膜した後に乾式鍍金により酸化亜鉛（ZnO）を成膜した試験片（Sn plating + ZnO shot）も同様に実験に供した。膜厚は Sn plating 及び Zn plating では約 2~3 μm 、Sn plating + ZnO shot 膜では約 4 μm 程度である。成膜後、密着性の向上を目的とした熱処理（240 $^{\circ}\text{C}$ 、3 h）を電気炉にて行った。

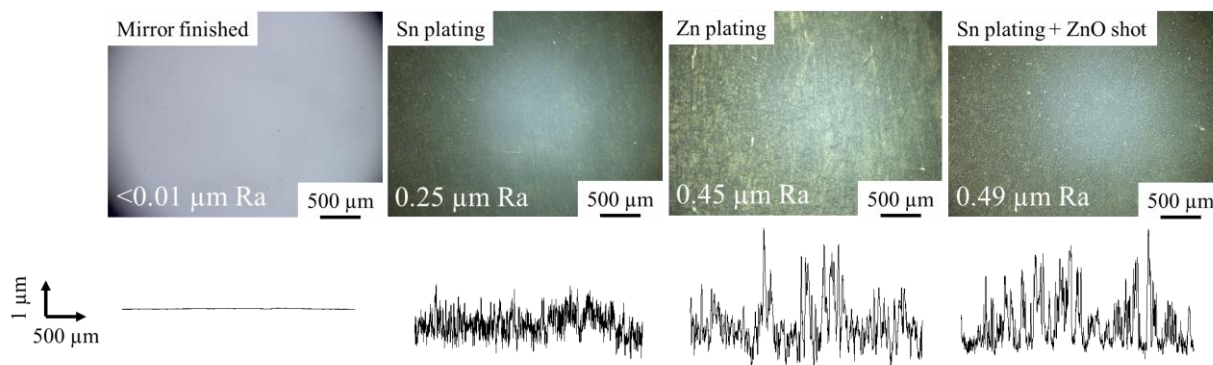


Fig. 1 Optical microscope image and cross sectional profile of treated surface

3. 実験方法

すべり摩擦特性は 3 ボールオンディスク方式の試験装置で評価した。ボール試験片は直径 1/4 インチ（=6.35 mm）の SUJ2 を 3 個用い、接触部を研磨によって直径 2.5 mm の平坦面に加工後、鏡面仕上げを施した。また、ボール試験片は直径 33.5 mm のピッチ円状に等間隔に配置され治具に固定されており、試験装置上部の駆動軸に、ディスク試験片（SUJ2）は下部に固定され、接触荷重はディスク側からエアシリンダによって負荷した。試験条件は負荷荷重を約 150 N（面圧：10.2 MPa）、試験速度は 0.25 m/s、潤滑油には 0W-8 エンジンオイル相当の油剤を使用し、0.2 ml 供給した。フラーレンの添加による潤滑油の粘度に差異はなく、室温大気中（25-28 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 40-65 %）で試験を実施した。

4. 実験結果

4.1 フラーレン未添加潤滑油の摩擦特性

Figure 2 は、フルーレン未添加潤滑油の摩擦係数の経時変化である。軟質金属成膜面の摩擦係数は、鏡面仕上面 (Mirror finished) に比して低減する。実験初期には、Zn 成膜面 (Zn plating) の摩擦係数は 0.01 程度で最小であるが、摩擦距離の増加に伴い段階的に増加する。Sn 成膜面 (Sn plating) の摩擦係数は実験終了時まで 0.05 程度で安定しており、Sn 及び ZnO 成膜面 (Sn plating + ZnO shot) の摩擦係数は摩擦距離の増加に伴い減少していく傾向であった。Figure 3 と Fig. 4 は、試験後の各ディスク試験片及びボール試験片の光学顕微鏡像と断面曲線である。Sn plating 及び Sn plating + ZnO shot では、試験後のボール試験片表面の色調が黒くなっており、Sn がボール側に移着したことが示唆される。Zn plating では、ボール側表面の色調は Mirror finished に比して白いこともわかる。Figure 3 でのディスク表面の断面曲線より、摺動部が試験前よりも平坦化していることから、軟質金属膜がボール側に移着したことが示唆される。また、ディスク軌道面の色調や断面曲線から推測できる摩耗量より、どの試験片においても試験後のディスク表面に軟質金属膜が残存していたことが考えられる。フルーレンが未添加の潤滑油を用いた場合には、試験終了時まで軟質金属膜が表面に残っていたことが、摩擦係数の低減に寄与したと示唆される。

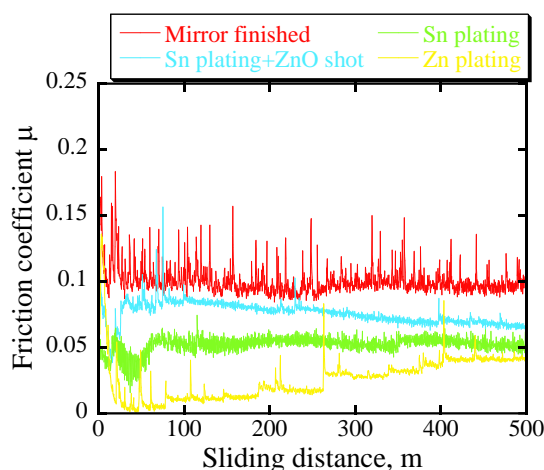


Fig. 2 Friction coefficient of various treated surface (not fullerene suspended oil)

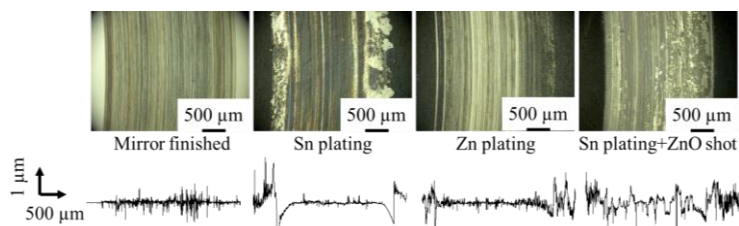


Fig. 3 Optical microscope image and cross-sectional profile of disc surface

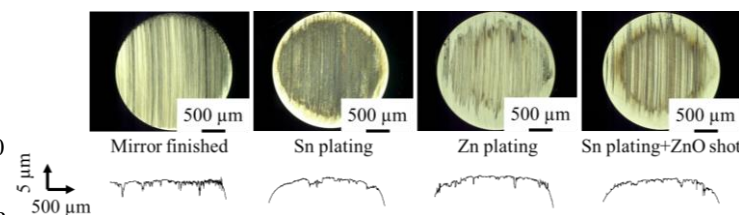


Fig. 4 Optical microscope image and cross-sectional profile of ball surface

4.2 フラーレン含有潤滑油の摩擦特性及びフルーレン有無の比較

Figure 5 は、フルーレン 1000 ppm 添加潤滑油の結果である。鏡面仕上面 (Mirror finished) では、摩擦係数に脈動は発生するものの、摩擦距離が 200 m 付近から終了時までには約 0.05 程度であった。軟質金属成膜面において、Sn + ZnO 成膜面 (Sn plating + ZnO shot) で最も低い摩擦係数が得られ、約 0.02 程度であった。しかし、Sn 成膜面 (Sn plating) および Zn 成膜面 (Zn plating) では Mirror finished に比して増大する結果が得られた。Zn plating では、摩擦距離が 200 m 付近までは Mirror finished と同等の摩擦係数を示していたが、脈動が発生した後に摩擦係数は上昇し、400 m 付近で摩擦力が大きく検出されたため試験を中断した。Sn plating では、摩擦距離が 100 m まではゆるやかに摩擦係数は増大し、その後は試験終了時まで約 0.06 程度で安定していた。Figure 6, 及び Fig. 7 は、試験後における各ディスク試験片及びボール試験片の光学顕微鏡像と断面曲線である。Sn plating + ZnO shot では、ディスク側の色調から薄膜は試験後も残存していることが示唆され、試験中に良好な潤滑状態を維持していたことが摩擦係数の低減に寄与したと考えられる。また、Fig. 7 のボール試験片の断面曲線よりも、Sn plating + ZnO shot では試験後の表面粗さが減少していることがわかる。一方、Zn plating では試験後のディスク側の断面曲線から、2 μm 程度の摩耗が生じており、Sn plating においても 2 μm 程度の凹部が点在している。

潤滑油中のフルーレン有無による摩擦係数を比較すると、Mirror finished 及び Sn plating + ZnO shot ではフルーレン添加による摩擦係数の低減効果が得られ、特に Sn plating + ZnO shot では大きい低減効果が得られた。また、Mirror finished では摩擦係数の低減に加え、摩擦係数の脈動が発生する頻度が減少していることがわかる。しかし、Sn plating ではフルーレンを添加した場合に摩擦係数は 0.01~0.02 程度増大し、Zn plating では 0.04~0.05 程度、摩擦係数が増大する結果が得られた。

Figure 8 は、試験後のディスク試験片軌道面上 (Fig. 6 の赤枠内) における SEM の観察結果である。Sn plating 及び Zn plating では、摺動痕内に Mirror finished と同様に線状の傷が入っているのに対し、Sn plating + ZnO shot では線状のような傷は見られなかった。フルーレンによる固体接触頻度の抑制効果の発現が示唆される。また、Sn, Zn plating では、摺動痕内において太い線のような傷が見られ、特に Zn plating ではよりわかりやすく観察することができた。それに対し、Sn plating + ZnO shot ではそういった太い線のような傷は見られなかった。この観察結果および摩擦係数の低減効果の発現も含め、フルーレンと ZnO 薄膜に相互作用があることが考えられる。

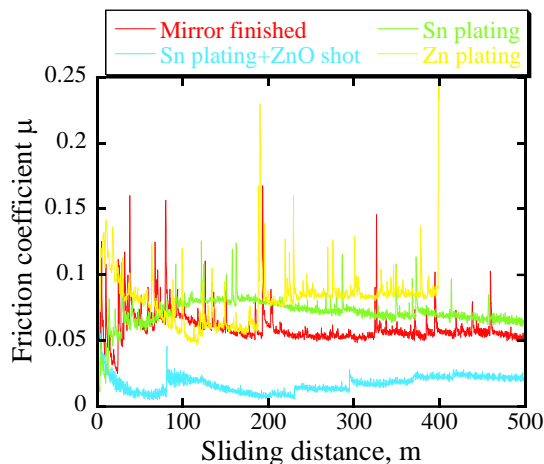


Fig. 5 Friction coefficient of various treated surface

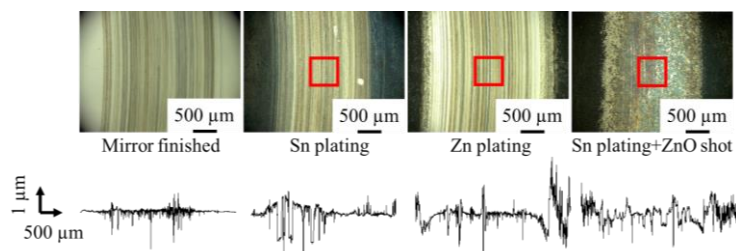


Fig. 6 Optical microscope image and cross-sectional profile of disc surface

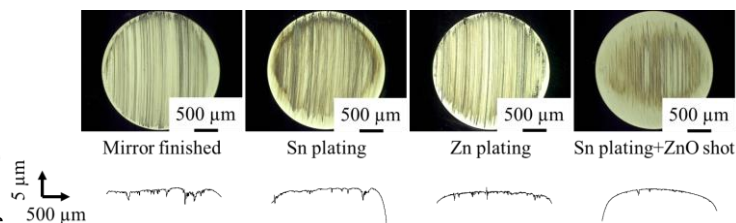


Fig. 7 Optical microscope image and cross-sectional profile of ball surface

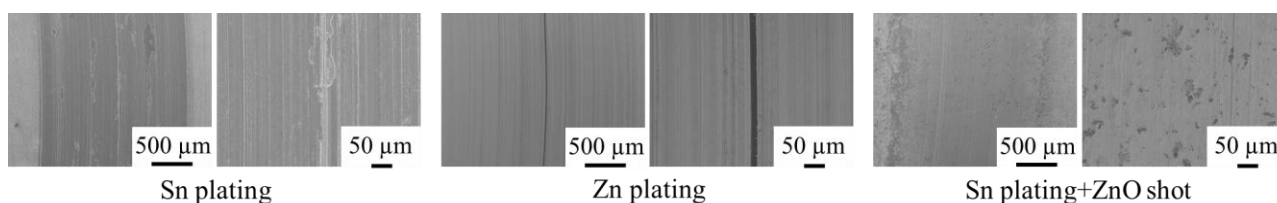


Fig. 8 SEM images of wear track at low (left) and high (right) magnification

5. まとめ

さらなる摩擦係数の低減を目的として、Sn および Zn, ZnO から構成される金属薄膜に対するフラーレン分散油剤の摩擦低減効果を実験的に検討した結果、Sn+ZnO 成膜面ではさらなる摩擦係数の低減効果が発現した。Sn 成膜面、Zn 成膜面では摩擦係数低減効果は得られなかったため、フラーレンと ZnO 薄膜に相互作用があることが考えられる。

参考文献

- 1) 昭和電工株式会社：フラーレン含有溶剤および潤滑剤，特開平，27-201400969 (2015).
- 2) 三田村祐綺・宇佐美初彦：アルミニウム合金におけるフラーレン分散潤滑油剤の摩擦特性，トライボロジー会議 2020 秋 別府 予稿集，(2020) 48
- 3) Minami Yamada・Hatsuhiko Usami：Tribological Properties of Tin-Zinc Hybrid Coating on Bronze in Lubricant Condition, Tribology Online, 17, 1 (2022) 54-58
- 4) F. A. Essa, Qiaoxin Zhang, Xingjiu Huang, Mohamed Kamei Ahmed Ali, Ahmed Elagouz and Mohamed A. A. Abdelkareem: Effects of ZnO and MoS₂ Solid Lubricants on Mechanical and Tribological Properties of M50-steel-Based Composites at High Temperatures: Experimental and Simulation Study, Tribology Letters, 65, 97 (2017) 10
- 5) 園部弘己：ディーゼルエンジン用すべり軸受のオーバーレイ材料の動向，日本マリンエンジニアリング学会誌，46, 5 (2011) 16-17
- 6) 八木渉・本田知己：フラーレンのラジカルトラップ効果による潤滑油自動酸化反応の抑制，トライボロジスト，66, 9 (2021) 726-733
- 7) 垣内孝宏・平田敦：オニオン構造フラーレンの多量生成および潤滑剤への適用，精密工学会誌，67, 7 (2001) 1175-1179
- 8) 岩井邦昭・広中清一郎・大久保佳代子：油境界潤滑におけるナノカーボン粒子の添加効果，石油学会年会・秋季大会講演要旨集，2E14
- 9) 澤田俊之：Sn を添加した硬質微粒子投射材を用いたショットピーニングによる表面改質，Sanyo Technical Report, 23, 1 (2016) 19-26
- 10) 長谷拓海・宇佐美初彦：転がり疲労特性に及ぼす亜鉛成膜の効果，日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集，J07122
- 11) 安井萌恵・榎本和城・宇佐美初彦：Sn 薄膜による鋳鉄の表面改質，日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集，S11508