

その場観察による軟質金属膜の摩擦特性評価

In-situ observation of Tribological Properties for Textured Soft Metal Coating

名城大・院（学）*佐藤 泰紀 名城大・理工（正）**宇佐美 初彦

Taiki Sato*, Hatsuhiro Usami**

*Graduate School of Meijo University, **Meijo University

1. はじめに

摩擦界面の可視化を目的としたその場観察は、摩擦摩耗現象を理解するための有効な手段の 1 つであり¹⁾、移着粒子の生成過程の解析²⁾や焼付き過程の解析³⁾等に応用されている。接触面を背面から直接観察する手法では、片側の摩擦材料にガラスのような透光性材料の使用が前提であるが、摩擦係数等の他の情報と関連付けることで、接触や潤滑の状態を理解するうえで非常に有益である。

潤滑状態におけるその場観察では、油膜の形成挙動の解析にも適用され、油膜厚さの計測⁴⁾やキャビテーションの生成過程の観察⁵⁾にも応用されている。最近では、観察対象となる相手面にテクスチャを付与した場合の事例が報告されているが、ディンプルなどの凹面から構成された事例が多いようである。

ところで、摩擦抵抗の低減安定化に関して薄い油膜で個体接触を回避することが重要である。これを実現するために、表面組織や形状を制御する技術が必要とされている。軟質金属薄膜はせん断抵抗が小さいため摩擦低減に寄与する。軟質であるが故に凝着部の成長が懸念されるが組織を不均質化することで抑制され、摩擦低減に寄与することが報告されている⁶⁾。さらに溝形状テクスチャの場合、潤滑油剤が十分に供給された環境では摩耗粉の排出や油膜の保持に寄与し、油膜が維持される可能性が高い。

本研究では、表面テクスチャとして軟質金属膜および溝加工を付与したアルミニウム合金とサファイアガラスから構成される接触面の潤滑摩擦試験にその場観察を適用した。接触状態と摩擦特性の関係を検討し、溝形状テクスチャを有する軟質金属膜の油膜形成挙動について考察した。

2. 実験方法

2.1 試験片

本実験で使用したピン試験片の模式図が Fig. 1 である。ピン試験片の接触面は $\phi 4$ mm の円形であり、その材質はアルミニウム合金（A5052）である。接触面の表面粗さは $\leq 0.01 \mu\text{mRa}$ に仕上げた。接触面から 2mm 離れた部分を溝入れし、接触面の微細な勾配に追従し片当たりを回避できる構造を付与した。相手材にはサファイアガラスディスク（ $\phi 50.8$ mm \times t 5 mm）を使用した。

ピン試験片に対し、表面改質として軟質金属の成膜および溝加工を施した。成膜には、循環式のショットピーニング装置を使用し、成膜材料には Sn 粉末および Sn 粉末と Zn 粉末を重量比 1:1 に配分した微粉末を使用した。Sn 粉末の平均粒径は 30 μm であり、Zn 粉末の平均粒径は 7 μm である。成膜面の表面粗さはいずれも 0.35 μmRa であった。溝加工にはファイバーレーザー（波長 1064 nm）加工機を使用した。レーザー照射の条件は Table 1 に示す通りであり、交差角が 90°（ひし形 1）と 60°（ひし形 2）となるように加工した。その結果、未成膜面における凸部の面積率は 80% であり、Sn および Sn-Zn 成膜面では 70% であった。このような面積率の差異は、光吸収率や熱伝導率、融点といった材料特性に由来するものである。表面改質後の試験片表面の光学顕微鏡像と粗さ曲線が Fig.2 である。

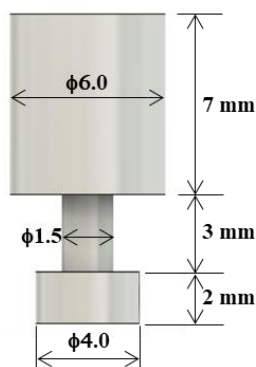


Fig.1 Schematic of pin specimen

Table 1 Laser irradiation conditions

Irradiation time	1
Irradiation speed, m/min	8.3
Laser power, W	30
Cyclic frequency, kHz	30

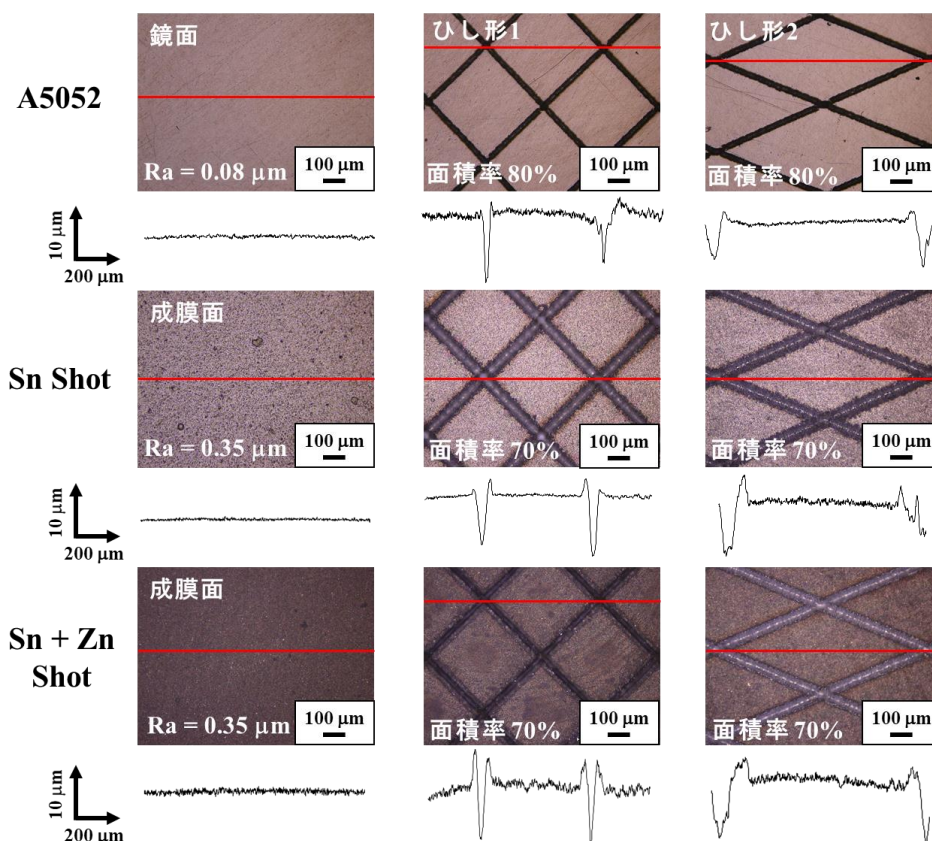


Fig. 2 Optical microscope image and roughness of pin surface before experiment

2.2 その場観察摩擦試験

ピンオンディスク方式のその場観察試験装置を使用した。試験装置全体の概要 (a) と接触部の概要および外観 (b) を Fig.2.3 に示す。ディスクは回転軸に固定され、タイミングベルトを介してブラシレスモーターにより回転される。ピン試験片はディスク上部に設置された梁に固定された力学センサに接続された治具に固定されており、リニアブッシュにより上下に直線駆動される。接触部背面には顕微鏡に接続した高速度カメラを設置してサファイアガラスを通して接触面を観察した。観察時のフレームレートは 50 fps である。

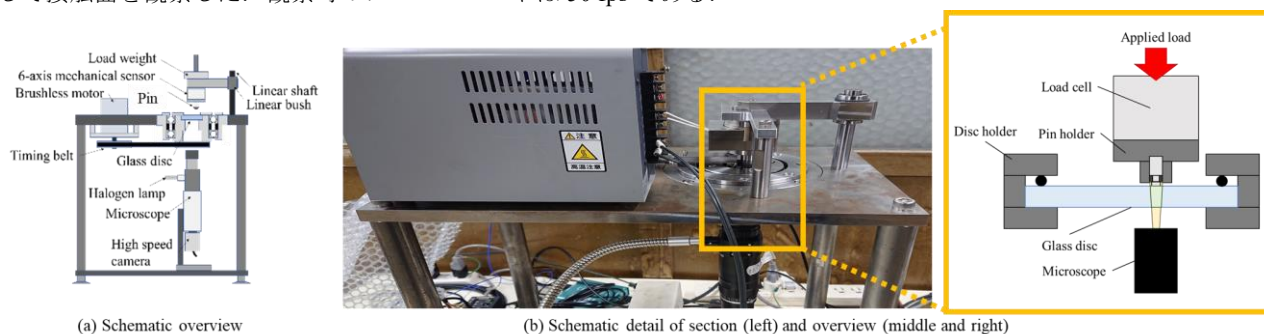


Fig. 3 Schematic overview (a), photograph (b) and schematic of testing section of In-situ observation apparatus

実験条件は Table 2 に示す。接触面圧は負荷荷重をと接触面積の関係から 4.0 MPa と算出された。粘度指数 0W-8 相当のエンジン油を使用した。

Table 2 Test condition

Applied load, N	50
Sliding speed, m/s	0.05
Sliding distance, m	100
Lubricating oil amount, ml	0.2
Lubricating oil temperature, °C	20

3. 実験結果および考察

A5052 摩擦面の結果が Fig. 4 である。鏡面の摩擦係数は 0.06 から 0.08 の間で変動し、摩擦距離の増加に伴い僅かに増加する傾向にある。その場観察結果からは実験開始直後から条痕が形成され、これが成長しその数も増加する。交差角 90° のひし形テクスチャ（ひし形 1）の場合、摩擦係数は初期から低く、摩擦距離の増加に伴い最初は低下し、最終的には 0.04 以下となった。その場観察結果では実験初期の条痕形成は見られないものの、摩擦距離 8m 付近で前方部に条痕が形成され成長していくが、図の赤丸内のようにテクスチャの存在によってその成長が抑制されている。交差角 60° のひし形（ひし形 2）のテクスチャ面では、摩擦係数は実験初期には鏡面と同等でありその後は不安定であるが、0.05 程度であり鏡面に比して摩擦が低減している。その場観察結果では摩擦距離 10m 付近から緑色枠内の前方部が損傷し、テクスチャの溝を超えて成長している。以上のように、A5052 面にテクスチャを付与した場合には摩擦低減および損傷抑制効果が発現したが、溝の配向性によって摩擦係数と損傷挙動に差異が生じた。

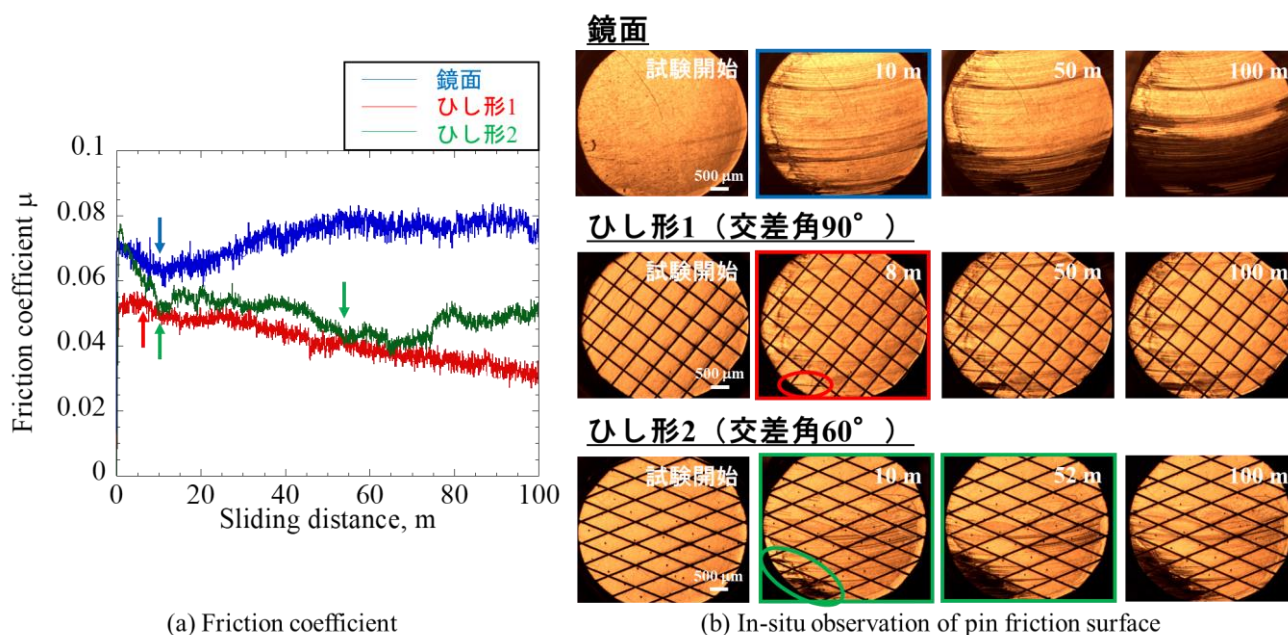


Fig. 4 Friction test results of A5052 specimen

スズ(Sn)成膜した表面の摩擦特性およびその場観察結果が Fig. 5 である。未テクスチャ面の場合、摩擦係数は高く大きな変動を伴う。その場観察結果では、摩擦面の光沢は高いが、これは Sn 膜がショットピーニングにより成膜されたため実験前の表面粗さは大きい、非常に軟質（約 7Hv）なため摩擦距離の増加に伴い平坦化されたことに起因すると推定される。また、条痕の形成とその変動が確認される。テクスチャ面（ひし形 1）の場合、摩擦係数は実験開始直後には一旦増加し、ただちに減少し次第に増加するが、未テクスチャ面に比して低い。その場観察結果では、実験開始直後の画像では摩擦面は不明瞭であるが、次第に明瞭となり、微細溝も確認できるが、セグメント間でコントラストが異なる。テクスチャ面（ひし形 2）の摩擦係数は同 1 に比して全体に高いものの、未テクスチャ面に比して変動も抑制されている。その場観察結果はテクスチャ面（ひし形 1）と同様な傾向であるが、明度の高い領域が狭いようである。以上のように、未テクスチャ面においては、A5052 面に比して摩擦係数の変動が大きく、高い値を示したが、テクスチャを付与することで摩擦係数は低減安定化した。また、テクスチャ面のその場観察結果では、セグメント間でコントラストの差が激しいことも確認された。

Sn-Zn 混合粉末が成膜された表面の摩擦特性とその場観察結果が Fig. 6 である。いずれの結果も摩擦係数は低く安定しており、テクスチャの付与によりさらに低減することから、テクスチャと軟質金属膜の相乗効果が発現したと判断される。その場観察結果では、Sn 膜と同様に接触面内のコントラストの差異が大きく、セグメントにより区分されるようである。この Sn-Zn 膜面においても摩擦係数の低い状態では明度の低い領域の割合が高い。

Sn-Zn 膜の硬さは 30Hv 程度であり、Sn 膜に比して硬質である。また、初期の表面あらさも鏡面に比して大きい、硬質なサファイアとの接触によって表面は平坦化され、2つの表面が接近した領域の明度が高まる。この Sn-Zn 膜で特徴的なことは、未テクスチャ面でも接触面の明度が低い（暗い）領域が摩擦進行後でも残存していることであり、テクスチャ面でも区分されたセグメントを跨いで暗部が残存している。この暗部が流体膜の存在による油膜形成領域とすると、Sn-Zn 膜の場合、油膜が形成されやすく、結果として摩擦を低減している可能性が示唆された。

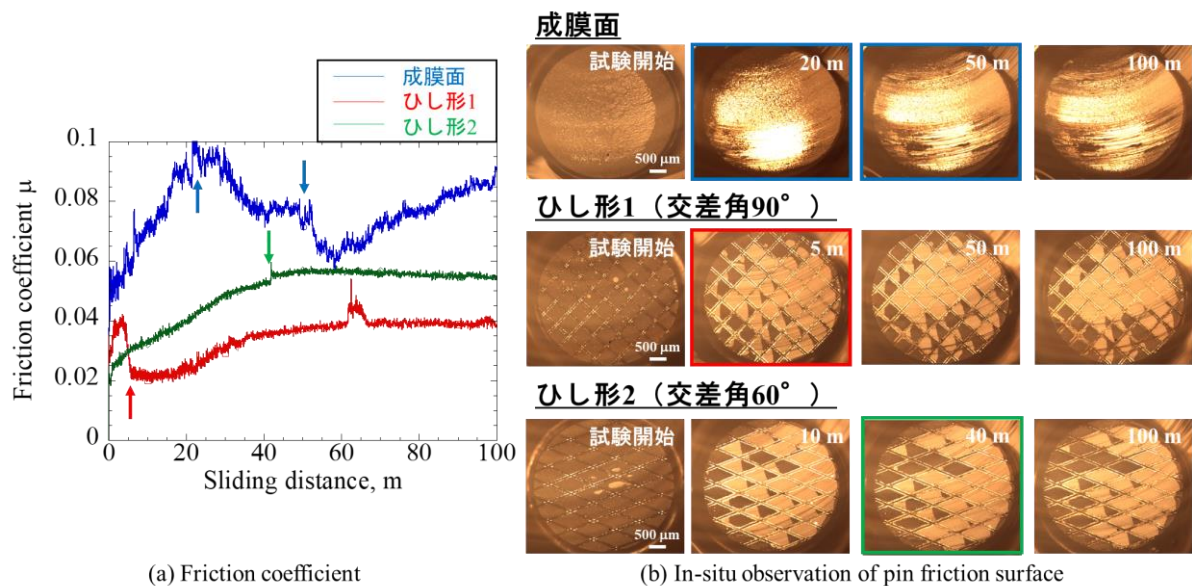


Fig. 5 Friction test results of Sn coating

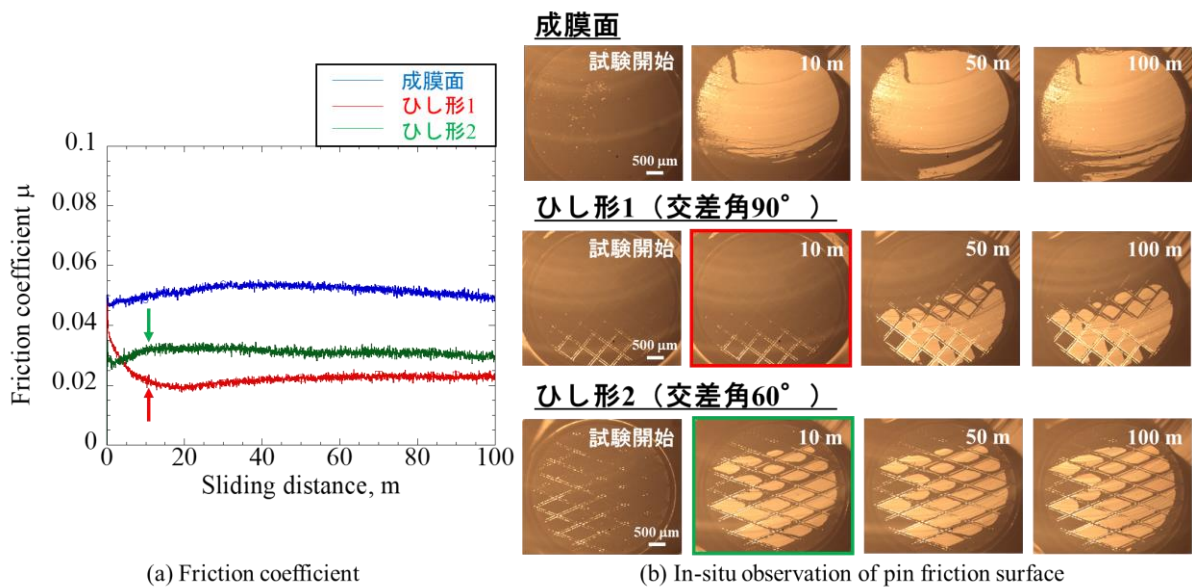


Fig. 6 Friction test results with Sn-Zn coating

4. 結言

溝テクスチャを有する軟質金属薄膜を付与したアルミニウム合金とサファイアガラスの接触面における潤滑摩擦試験にその場観察を適用し、摩擦特性と接触状態を整理した結果、軟質金属薄膜を付与することで、表面損傷に起因する摩擦係数の変動が抑制され、摩擦の低減安定化が確認された。また、Sn-Zn膜では、接触面の暗部がSn膜に比して多く残存していたことから、油膜が形成されやすく摩擦を低減する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 長谷：摩擦・摩耗メカニズム理解のための摩擦界面その場観察, MATERIAL STAGE, 17, 5 (2017) 23-25.
- 2) 長谷・三科：摩耗現象の可視化技術, トライボロジスト, 59, 5(2017), 283-289.
- 3) 八木：各種その場観察法による焼付き過程の理解, トライボロジスト, 64, 5(2019), 294-301.
- 4) 山田・梅原・野老山・村島・佐藤・大原・羽生田：二液分離油の反射分光摩擦面その場観察装置を用いたしゅう動部油膜その場分析, 日本機械学会論文集
- 5) 坪井：流体潤滑下におけるテクスチャ表面の潤滑液流れの可視化, 大同大学紀要, 51(2015), 7.
- 6) S. Mezlini, M. Ben Tkaya, M. El Mansori, H. Zahouani, Ph. Kapsa, "Correlation Between Tribological Parameters and Wear Mechanisms of Homogeneous and Heterogeneous Material", Tribol let No. 33 (2009), PP. 153-15