

アルミニウムを用いた摩擦システムにおける エンジン油中での摩耗抑制のための陽極酸化

Anodization for wear reduction in oil lubricated tribosystem using aluminum

東北大・工（院）*山名 哲夫 東北大・工（院）井上 翔太

東北大（正）村島 基之 東北大（正）足立 幸志

Theo Yamana*, Shota Inoue, Motoyuki Murashima, Koshi Adachi

Tohoku University

1. 緒言

なじみ性が求められる自動車エンジンのすべり軸受には軟質な材料であるアルミ合金が用いられている。一方で、摩擦損失低減のために低粘度油を導入した潤滑システムは境界潤滑に遷移しやすく、その際のアルミの凝着が高い摩擦と摩耗の原因となっている。これに対し著者らはアルミ合金に対するレーザー照射や陽極酸化処理を導入し、それらが移着抑制と油中添加剤による低摩擦発現に有効であることを示している¹⁾²⁾。さらに、より軟質である純アルミにおいても陽極酸化処理を施すことで摺動時に初期表面を保ちつつ添加剤由来のトライボ膜が形成されその耐摩耗性が向上することを明らかにしている²⁾。

本研究では、陽極酸化膜の一つの特徴であるポーラス構造に着目し、純アルミへの陽極酸化処理によるエンジン油中での摩擦摩耗低減機構の解明を試みる。

2. 実験方法

80°C に保温した潤滑油に浸漬させたボールオンディスク型摩擦試験を行った。荷重、すべり速度はそれぞれ 15 N、0.1 m/s とし、潤滑油には基油と ZDDP, MoDTC が添加されたエンジン油を用いた。ボールには軸受鋼球 (SUJ2, Ø8 mm)、ディスクには鏡面研磨後にシュウ酸アルマイト処理によりポア率の異なる厚さ約 20 µm の陽極酸化膜を施した純アルミ (A1050) を用いた。ポア率 P の異なる陽極酸化膜表面の例を Fig. 1 に示す。このポア率は、表面硬度にも影響することが示されており (Ref.: Fig. 7), 陽極酸化表面の幾何特性とともに機械的特性として捉えることも重要となる。

3. 実験結果および考察

エンジン油中において陽極酸化純アルミを用いた場合にみられる 3 つの典型的な摩擦特性 (なじみ特性) を未処理の結果とともに Fig. 2 に示す。いずれの場合も未処理では得られない低い摩擦が発現することが確認される。ここでは、なじみ特性に着目し、初期に $\mu = 0.15$ の高摩擦を示した後に急減し $\mu = 0.05$ の低摩擦を発現する場合 (Fig. 2(a)) を Mode I, $\mu = 0.13$ の高摩擦の後に緩やかななじみが発現する場合 (Fig. 2(b)) を Mode II, 初期から $\mu = 0.05$ の低摩擦を発現する場合 (Fig. 2(c)) を Mode III と定義する。

続いて、エンジン油中および基油中における 10000 cycles 時点の平均摩擦係数とアルミディスクの摩耗量に及ぼすポア率の影響を Fig. 3 に示す。図では、発生する摩擦 Mode も併記している。いずれのポア率の初期表面においてもエンジン油中においては、基油中と比較し 41~67% 摩擦が減少しており、添加剤に起因したトライボ膜がなじみ後の安定時

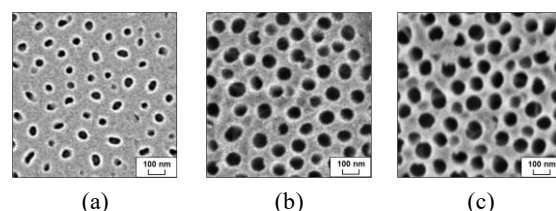


Fig. 1 Surfaces of anodic oxide layer with porosities of (a) 8, (b) 22 and (c) 31 %

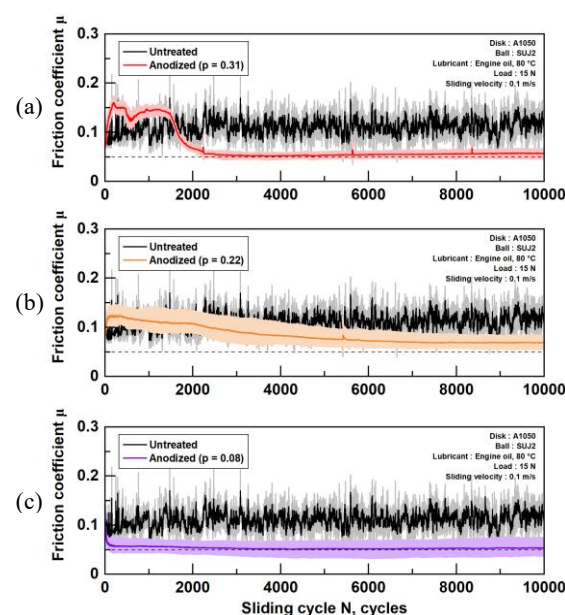


Fig. 2 Three typical running-in modes (a) Mode I, (b) Mode II, (c) Mode III

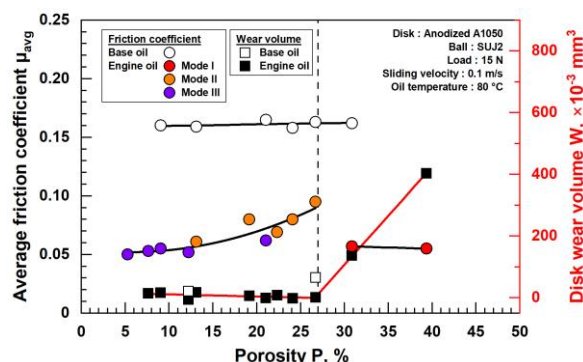


Fig. 3 Effect of additives and oxide layer porosity on friction and wear of anodized aluminum

の低摩擦の主因であることを裏付けるものである。一方、なじみ特性に起因する摩擦 Mode に関しては、ポア率の増加に伴い Mode III から Mode II, Mode I へと変化することがわかる。陽極酸化純アルミの摩擦に注目すると Mode III と Mode II が発生する条件での摩擦量は非常に低い値（数 10^{-3}mm^3 ）を示すものの、摩擦初期に高い摩擦を示す Mode I に遷移するポア率 ($P = 27\%$)以上の陽極酸化純アルミを用いた場合では2桁大きな摩擦を示すことがわかる。

次に陽極酸化純アルミの摩擦が小さいポア率 ($P < 27\%$)の基油中およびエンジン油中での摩擦後の Al と Fe の移着濃度を SUJ2 ボール断面曲線とともに Fig. 4 に示す。基油中では Al と Fe の相互移着とともに相手材の SUJ2 に顕著な摩擦が発生しており、添加剤は、陽極酸化純アルミの相手材に対する摩擦抑制に対し寄与するといえる。

続いて、Fig. 5 に EDS 分析により取得した SUJ2 ボール摩擦部の O 濃度および Mo+S 濃度の比 $O/(Mo+S)$ となじみ後の摩擦係数の関係を示す。 $O/(Mo+S)$ 比の減少に伴い摩擦が線形的に減少しており、Morina らの結果³⁾と同様に酸化物に対する添加剤由来の MoS_2 の割合が摩擦低減の鍵を握ることを明示する結果といえる。

次にトライボ膜の $O/(Mo+S)$ 比に及ぼす陽極酸化純アルミのポア率の影響を Fig. 6 に示す。ポア率の増加に伴う Mode III から Mode II の変化に対し $O/(Mo+S)$ 比は増加し、 $P > 27\%$ の Mode I の発生にともない、 $O/(Mo+S)$ 比が急激に低下し、結果としてより低い摩擦を発現する。Fig. 7 に示す摩擦後の陽極酸化膜のナノインデンテーション硬さに及ぼすポア率の影響を鑑みると、初期に高い摩擦を経験する Mode I では、摩擦が増加する一方で、その過程における表面層の硬化が顕著となりトライボ化学反応を促進すると考えられる。以上の結果から、陽極酸化は純アルミ表面の幾何形状に加え酸化と硬化の制御を可能にし、結果として移着、トライボ化学反応そして変形による摩擦の制御を実現し得るといえる。

4. 結言

陽極酸化膜の一つの特徴であるポーラス構造に着目し、陽極酸化純アルミディスクと SUJ2 球によるエンジン油中での摩擦摩擦低減機構の解明を試みた。主な結果を以下に示す。

(1) なじみ特性は以下の3つに分類され、ポア率の減少に伴いにより Mode I から Mode II, Mode III へと遷移する。

Mode I: $\mu = 0.15$ を示した後に急激ななじみが発生し $\mu = 0.05$ の低摩擦を示す

Mode II: $\mu = 0.15$ を示した後に徐々に摩擦低減を示す

Mode III: 初期から $\mu = 0.05$ の低摩擦を示す

(2) ポア率 $< 27\%$ の陽極酸化純アルミを用いた場合、Mode III, Mode II が発生時し、変形と添加剤効果により SUJ2 球と純アルミディスクともに摩擦が大幅に抑制される。

文献

- 1) K. Ihara, K. Adachi, Friction Reduction by Laser Irradiation for a Friction System Using Bearing Steel and Aluminum Alloy in Engine Oil, Tribology Online, 17, 4 (2022) 335-347.
- 2) 山名哲夫, 井上翔太, 村島基之, 足立幸志, アルミ合金表面における ZDDP 由来トライボフィルム形成, トライボロジー会議 2025 春 東京 予稿集, (2025) A26.
- 3) A. Morina, A. G. Neville, M. Priest, J. H. Green, ZDDP and MoDTC interactions in boundary lubrication-The effect of temperature and ZDDP/MoDTC ratio, Tribology International, 39, 12 (2006) 1545 – 1557.

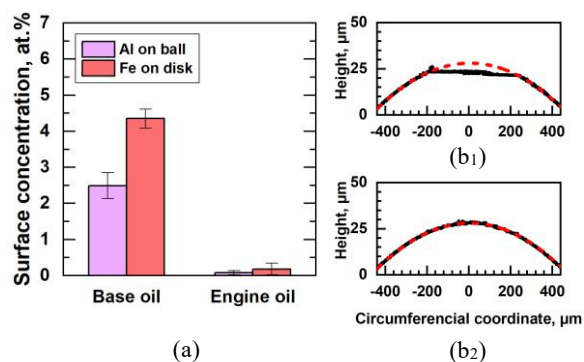


Fig. 4 (a) Effect of additives on adhesive transfer and cross-section profile of steel ball slid against anodized aluminum ($P = 22\%$) (b1) in base oil (b2) in engine oil

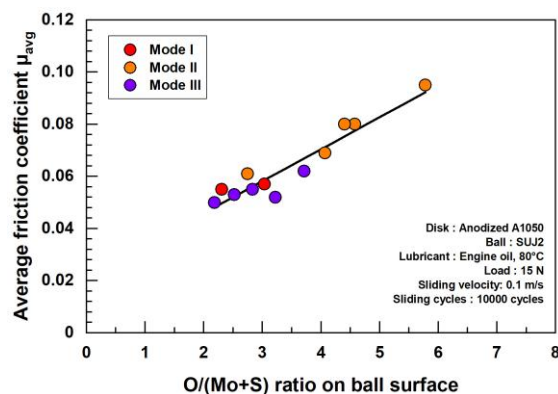


Fig. 5 Relationship between friction coefficient and $O/(Mo+S)$ ratio on ball surface

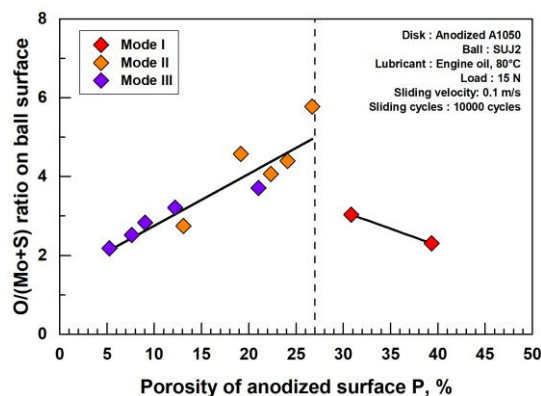


Fig. 6 Relationship between $O/(Mo+S)$ ratio on SUJ2 ball surface and the porosity of anodized surface

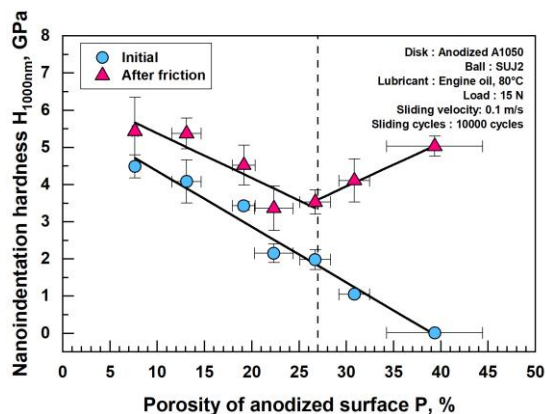


Fig. 7 Anodic oxide layer nanoindentation hardness before and after friction