

微粒子ピーニングによって化学組成を改質したアルミ合金表面における トライボフィルム形成と摩耗挙動に関する検討

Tribofilm formation and wear behavior on fine particle peened aluminum alloy
with modified chemical composition

都市大（正）*亀山 雄高 都市大（非）島崎 棟太 都市大（院）（学）立沢 隼弥

都市大（非）佐藤 秀明 都市大（非）眞保 良吉

Yutaka Kameyama*, Ryota Shimazaki*, Jun-ya Tachizawa**, Hideaki Sato*, Ryokichi Shimpo*

*Tokyo City University, **Graduate Division, Tokyo City University

1. 緒言

実用上重要な潤滑油添加剤であるジアルキルジチオりん酸亜鉛（ZnDTP）およびモリブデンジチオカーバメート（MoDTC）の作用メカニズムとして、基材表面にZnDTP由来のりん酸系トライボフィルムが形成されて耐摩耗性を発揮し、さらにその表面へMoDTC由来の二硫化モリブデン皮膜が生成して摩擦低減に寄与することが、よく知られている。これらの知見は、しゅう動部材が鉄系材料である場合の検討に基づいている。しゅう動部材が非鉄金属から構成されている場合、トライボフィルムの形成機構や特性は、鉄系材料におけるそれとは異なる可能性も推察される。例えば、アルミニウム表面に形成されたZnDTP由来トライボフィルムは容易に摩耗するとの報告¹⁾もある。このように、非鉄金属に対してZnDTPやMoDTCがその効果を十分に発揮できていない可能性は否定できない。

これを踏まえ著者らは、非鉄金属製しゅう動部材における潤滑油添加剤の作用をより効果的に発現させることをねらいとした表面改質を提案している²⁾。その具体的な内容は、鋳造アルミニウム合金の表面へ微粒子ピーニング（Fine Particle Peening: 以下FPPと略記）を施すことによって、その表面に鉄成分を付与するというものである。これによって、鉄系しゅう動部材と同様なトライボフィルム形成が実現され、摩擦摩耗特性が改善されるのではないかという仮説を立てている。本稿では、表面改質を施した鋳造アルミ合金におけるトライボフィルム形成について、時系列的な推移を詳しく分析した結果について論じる。その結果に基づき、移着させた鉄成分が摩擦摩耗特性に及ぼす影響について、ZnDTPの作用によるトライボフィルム形成挙動と関連付けながら考察した。

2. 実験方法

内燃機関ピストンの素材としても用いられる鋳造アルミ合金AC8A材を供試材とした。同材の表面を研磨したのち、炭素鋼粒子（材質S60C相当、粒径約100μm）を用いてFPPを施した。投射条件は、投射距離15mm、粒子供給レート2g/s、投射時間30s、投射圧力0.5MPa、投射角度90°である。この処理によって、鋼粒子表面から試験片表面に鉄成分（主に酸化鉄と考えられる）が移着する。移着物は、Fig.1に示すように試験片表面のほぼ全面にわたって分布する。

以上で述べたFPP試験片（以下Fe材と称する）に加えて、FPP未処理（研磨状態のまま）の試験片（以下Smooth材と称する）に対し、ボールオンディスク往復しゅう動式摩擦摩耗試験を行った。試験の際には、基油（PAO6）にZnDTPをP換算で800ppm、MoDTCをMo換算で300ppmそれぞれ添加した潤滑油を、試験開始前に0.06mL、追加として往復しゅう動回数500回ごとに0.02mLずつ、しゅう動部へ供給した。相手材には、FPPによる移着物以外の鉄成分がしゅう動面へ供給されないようにするため、φ3mmのアルミナ球を選定した。試験は350往復、1000往復、2000往復の3通りの条件で行い、試験終了後の摩耗面を元素分析してトライボフィルム形成の有無を考察した。そのほかの試験条件は、ストローク5mm、すべり速度500mm/min、垂直荷重2.94Nで、試験環境は室温大気中である。

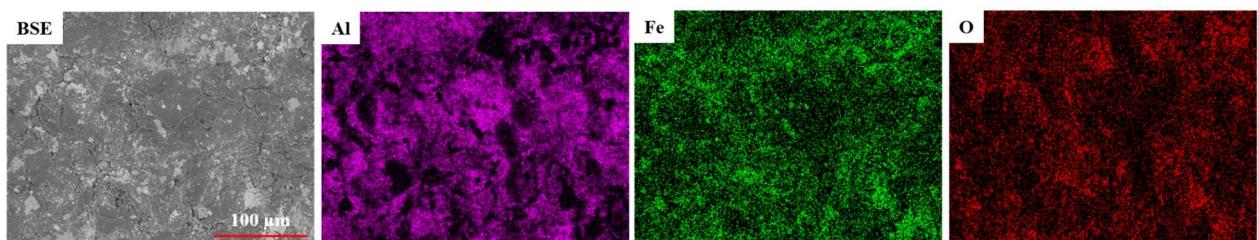


Fig.1 Elemental maps of Al, Fe and O obtained from FPP-treated surface: Fe series.

3. 実験結果および考察

まず、しゅう動回数2000往復まで摩擦摩耗試験を行った際に記録された摩擦係数および摩耗痕の観察結果をFig.2に示す。Fe材の場合、複数回試験を実施したところ、試験条件は同一であったにもかかわらず、摩擦係数が0.1~0.12程度の概ね一定の値を維持し、摩耗量も少なくなる場合（図中Type A）と、試験開始後およそ10分までの間に摩擦係数が増加に転じ、その後未処理アルミ材よりも高い摩擦係数のまま推移し、摩耗量が比較的多くなる場合（図中Type

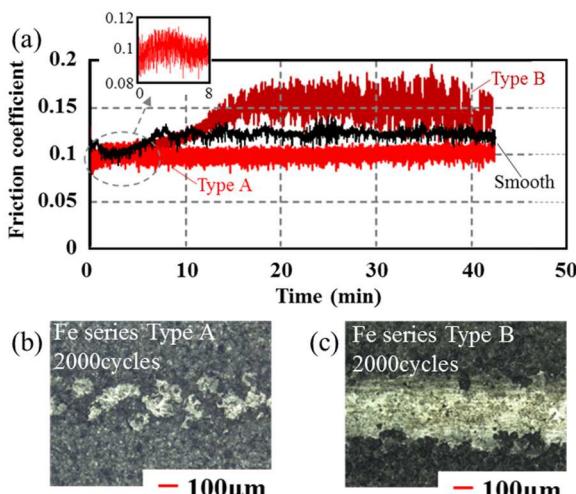


Fig.2 Friction coefficient as a function of sliding time (a), appearance of wear track of Fe series Type A (b) and Type B (c).

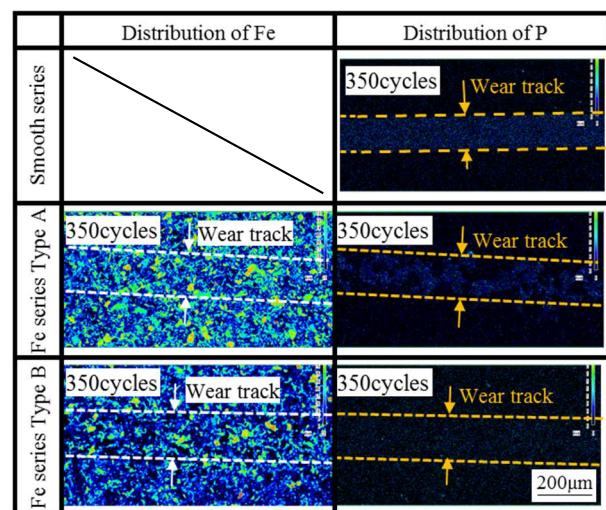


Fig.3 EPMA elemental maps obtained from wear tracks.

B) とがあった。なお Type A の挙動を示した場合には、試験開始直後およそ 5 分の間に、一度摩擦係数が微増した後に減少するという過程を経ていた（図中拡大部）。

以上を踏まえて摩擦摩耗試験を再度行い、350 往復、1000 往復時点で打ち切って、摩耗痕を電子線マイクロアナライザ (EPMA) で面分析した。これらの試験時の摩擦係数の結果は本稿には示していないが、値、推移とも Fig.2 中の Type A または B いずれかと、よく合致していた。得られた分析結果のうち、試験初期にあたる 350 往復後の Fe, P の元素マップを Fig.3 に示す。Fe 材 Type A については、摩耗痕に沿って P が分布している様子が観察された。また、Fe は摩耗痕のほぼ全面から検出されており、しゅう動面には FPP によって付加した鉄成分が維持されていたことがうかがわれた。なお、1000 往復の試験後にも、摩耗痕上には Fe と P が存在しているという結果であった。また、鉄成分を付与していない Smooth 材についても、摩耗痕に沿った P の分布が認められた。このことから、Fe 材 Type A の場合と Smooth 材の場合には、しゅう動面における ZnDTP の吸着あるいはそれに追随したりん系皮膜の形成反応が、摩耗試験の比較的早い段階で生じていたことが示唆された。

一方の Type B では、350 往復の時点で摩耗面に対応する部位に P が偏在している様子が明瞭には認められない。そして摩耗痕上には、Fe が検出されない部位が点在していることがわかる。そして結果では示していないが、1000 往復まで試験を行うと、Fe 欠乏部の個数が増加した反面、摩耗初期とは対照的に摩耗痕に沿って P が検出されるようになった。以上の事実より、Type B のしゅう動面においては、とくに摩耗初期段階ではかかるトライボフィルムが十分には形成されていなかったことが考えられる。一方、摩耗によって鉄成分が減少した試験中盤以降には、アルミ材上にトライボフィルムが形成されていたことも示唆された。Smooth 材でもアルミ材表面へのトライボフィルム形成は認められたが、試験初期の段階からその形成が進んでいた点が Fe 材 Type B とは異なる。Fe 材 Type B では、試験初期でのトライボフィルム形成が不十分だったことが、以降の摩擦係数や摩耗量の増大につながったものと推察した。

ここで、試験初期における Type A, B のトライボフィルム形成挙動の差異は、しゅう動面上の鉄成分の有無によって影響を受けていたものと推察する。Mittal ら¹⁾は、Al-Si 合金表面における ZnDTP 由来トライボフィルムの形成は、Al 相よりも Si 相の位置で顕著に生じたことを報告しており、その理由として Si 相の部位での接触応力が相対的に高くなることを挙げている。FPP によって粒子から移着した Fe 相も、アルミ母材と比較して高い硬さとヤング率を有していることから、これと同様のメカニズムによってトライボフィルム形成を促す因子として作用したことは十分に考え得る。一方、鉄成分の化学的な作用に起因したトライボフィルム形成促進の可能性についてもさらなる検討が必要である。

4. 結言

FPP によって鉄成分を付与された鋳造アルミ合金の摩擦摩耗挙動は、しゅう動面上に鉄成分が残存した状態かつ摩耗が軽微で摩擦係数が低くなる場合と、大きな摩耗量と高い摩擦係数を示し、試験の比較的初期段階で鉄成分がしゅう動面の一部で欠乏状態となっている場合とがあった。さらに後者の場合、試験初期における ZnDTP 由来トライボフィルムの形成が十分ではなかった可能性が見出され、しゅう動面上に鉄成分が乏しかった点との関連がうかがわれた。さらに、試験初期のトライボフィルム形成挙動が長期的な摩擦摩耗現象に影響していたものと考察された。

本研究は科研費(課題番号 18K03917)を受けて行われた。また、使用した油剤は EMG ルブリカンツ合同会社・小野寺康様、森田美穂様にご提供頂いた。関係各位に謝意を表する。

文献

- 1) P.Mittal, Y.Majthani, J.P.Singh, N.N.Gosvami: Tribology International, 151 (2020), 106419.
- 2) 立沢隼也, 亀山雄高, 佐藤秀明, 真保良吉: トライボロジー会議 2021 春東京予稿集 (2021) B6.