

アルミ合金と軸受鋼を用いたエンジン油中摩擦システムにおける レーザー照射による摩擦低減

Friction Reduction by Laser Irradiation

for a Friction System Using Bearing Steel and Aluminum Alloy in Engine Oil

東北大（現 三菱重工業）（正）*伊原 健人 東北大・工（正）足立 幸志

Kento Ihara*, **, Koshi Adachi*

*Tohoku University, ** Mitsubishi Heavy Industries

1. 緒言

アルミ合金は軽量であるため、主軸受等の自動車エンジン内しゅう動部材として用いられている。一方、軟質ゆえに相手面への凝着が生じやすく、過酷な境界潤滑領域における耐摩耗や低摩擦発現のための添加剤による安定した境界膜が形成されにくいという課題が指摘されている。

本研究では、この課題に対し、表面テクスチャの創製と表面改質が可能なレーザーを用いた表面処理法を提案し、アルミ合金の凝着抑制と添加剤由来の潤滑膜形成の両立が可能であることを実証する。

2. 実験方法

超短パルスレーザー加工機を用い、アルミ合金 SA162 ディスクに対して 100 μm 間隔で同心円状にレーザーを照射した。レーザー照射により、溝の形成とともにその両端が隆起し、それらは酸化されていることがわかる（図 1）。また照射スポット直径は 6.3 μm であるため、レーザーが直接照射されていない非照射部が存在する。走査速度と照射パワーより決まる照射スポット内のエネルギー密度 E (354~28,300 J/cm^2) を照射パラメータとした。

軸受鋼 (SUJ2) ボールとレーザー照射 SA162 ディスクを用いた潤滑油中の Ball-on-Disk 型摩擦試験を行った。試験条件はすべり速度 0.1 m/s, 荷重 15 N, 油温 80°C で統一し、潤滑油には摩擦調整剤モリブデンジチオカーバメイト (MoDTC), 耐摩耗剤ジアルキルリン酸亜鉛 (ZnDTP), カルシウム清浄剤 (Ca Salicylate) を含むエンジン油を用いた。

3. 実験結果及び考察

未照射及びエネルギー密度 2,830, 14,100 J/cm^2 でレーザー照射したアルミ合金と軸受鋼とのエンジン油中での摩擦特性を図 2 に示す。非照射、2,830 J/cm^2 条件では摩擦の低減は見られず、ともに摩擦係数 0.1 程度の値を示すのに対し、高エネルギー密度 14,100 J/cm^2 条件では試験開始後 70~110 m にかけて摩擦が急激に低減し、その後の定常状態では摩擦係数 0.07 を示すことがわかる。次に、全摩擦試験における定常時の摩擦に及ぼす照射スポット内のエネルギー密度の影響を図 3 に示す。エネルギー密度 4,040 J/cm^2 以上のレーザー照射により摩擦低減が発生し、定常時の摩擦係数は 0.06~0.08 を示す。この結果は、摩擦低減のためのレーザーエネルギー閾値 ($E_c: 4,040 \text{ J/cm}^2$) の存在を明示している。以後、摩擦が低減せず高摩擦を維持する挙動を Mode-I, 初期の高摩擦期間を経て摩擦が低減する挙動を Mode-II と定義し、Mode の遷移に及ぼすレーザー照射

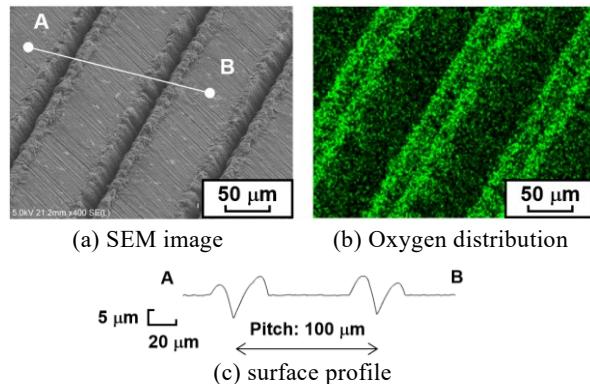


Fig. 1 (a) An SEM image, (b) oxygen distribution in the SEM image, and (c) a surface profile of the laser-irradiated aluminum disk.

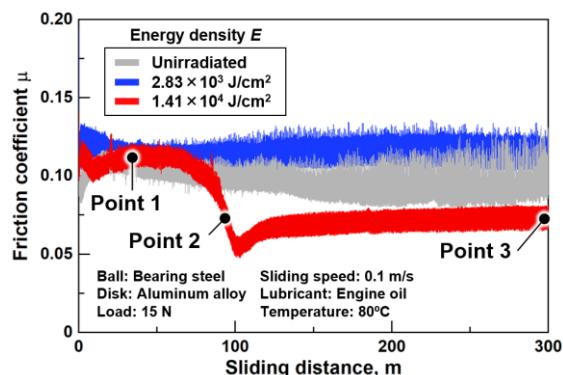


Fig. 2 Friction properties of laser-unirradiated and irradiated aluminum alloys sliding against bearing steel in fully formulated engine oil.

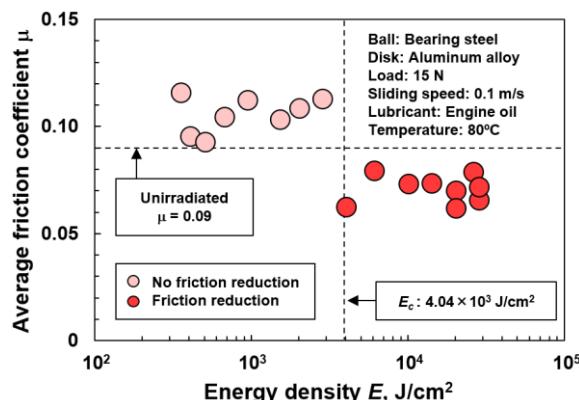


Fig. 3 Effect of laser energy density on average friction coefficient and friction behavior of the laser-irradiated aluminum alloy.

の役割を考察する。

摩擦低減を示した Mode-II における軸受鋼ボール摩耗面の SEM 像、Al 及び S の分布を図 4 に示す。ここで point 1 ~3 は図 2 に記載する摩擦低減前、摩擦低減中、摩擦低減後の地点を意味する。摩擦低減前はアルミが凝着しているのに対し、摩擦低減に伴いアルミの凝着量が減少し、摩擦低減後には S を含む潤滑膜がボール摩耗面全域に形成されることがわかる。本文未記載であるが Mode-I では常にアルミの凝着が確認されており、摩擦モードの遷移は、摩擦試験初期に生じるアルミの凝着挙動に起因するといえる。

Mode-II におけるアルミディスク摩耗面の SEM 像、O 分布、表面形状を図 5 に示す。初期に存在する酸化状態にある溝とその両側の隆起部は摩擦低減前の時点で既に摩滅しレーザー非照射部も軸受鋼と接触した状態といえる。これは摩擦初期のアルミの凝着は主にレーザー非照射部より生じたと考えられるとともに摩擦モードの遷移に対し非照射部の変化が重要な意味を有することを示している。

摩擦前のレーザー非照射部の平均硬さに対するレーザー照射エネルギー密度の影響を図 6 に示す。摩擦低減のためのレーザーエネルギー閾値 E_c 近傍から非照射部の平均硬さが増加する。X 線回折法 (XRD) による分析結果に基づくと、 E_c 以上のエネルギー密度条件では、アルミ合金表面のアモルファス/ナノ結晶化が生じており、レーザー照射の熱拡散による急速な加熱・冷却がそれらを引き起こし硬度の変化として現れたものと考えられる。次に Mode-I、Mode-II におけるレーザー非照射部の P 検出量変化を図 7 に示す。Mode-II ではレーザー非照射部の P 検出量が摩擦低減中に急増しており、X 線光電子分光法 (XPS) による分析に基づき ZnDTP 由来のポリリン酸化合物に起因するものであると判断した。すなわち、エネルギー閾値 E_c 以上のレーザー照射により形成された高活性なアモルファス/ナノ結晶^{1,2)} がレーザー非照射部での ZnDTP の反応を誘起し、ZnDTP 由来のポリリン酸加工物がレーザー非照射部上に形成された結果、アルミの凝着が抑制されるとともに潤滑膜が形成され Mode-II へ遷移したと推察される。

4. 結言

軸受鋼 SUJ2 とレーザー照射アルミ合金 SA162 のエンジン油中摩擦システムにおいて、閾値 E_c : 4,040 J/cm² 以上のエネルギー密度条件でのレーザー照射によりアルミの凝着抑制と添加剤由来の潤滑膜形成が実現されることを明示した。またレーザー照射によるアモルファス/ナノ結晶化が ZnDTP の反応を誘起し、ZnDTP 由来のポリリン酸被膜の形成がアルミの凝着抑制と潤滑膜形成の起点となる。

文献

- Wang, M., Zhang, M., Song, W., Zhou, L., Wang, X. and Tang, Y., Heteroatom-Doped Amorphous Cobalt-Molybdenum Oxides as a Promising Catalyst for Robust Hydrogen Evolution, Inorganic Chemistry, 61, 12, 2022, 5033–5039.
- Tonotsuka, K., Todaka, Y., Adachi, N., Horii, M., Toda, K., Mitsuhashi, M., Iwasaki, M., Shiihara, Y., Umeno, Y., Nishida, M. and Nakashima, H., Effect of Lattice Defects on Tribological Behavior for High Friction Coefficient under TCP Added PAO Lubrication in Nanostructured Steels, ISIJ International, 60, 6, 2020, 1358–1365.

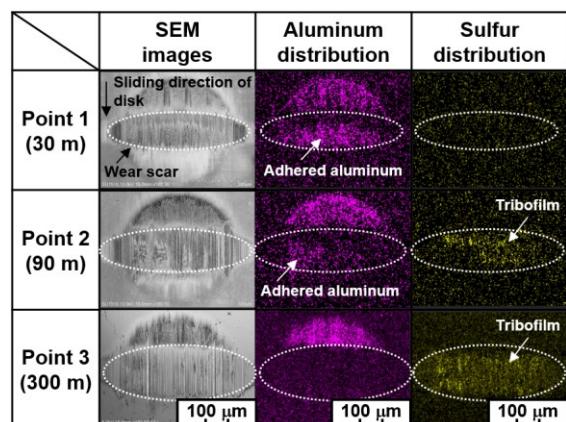


Fig. 4 SEM images and distribution of aluminum and sulfur in steel ball wear scars in mode-II.

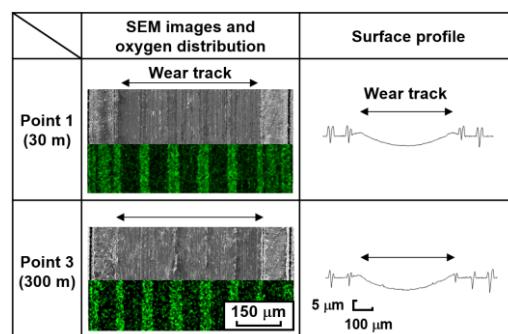


Fig. 5 SEM images, oxygen distribution, and surface profiles of aluminum disk wear tracks in mode-II.

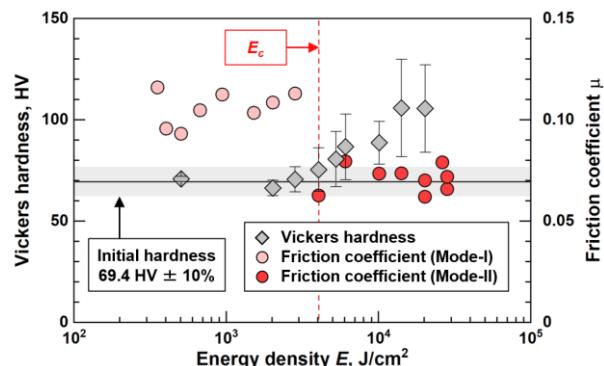


Fig. 6 Effect of energy density on Vickers hardness of the unirradiated area before friction tests and friction coefficient.

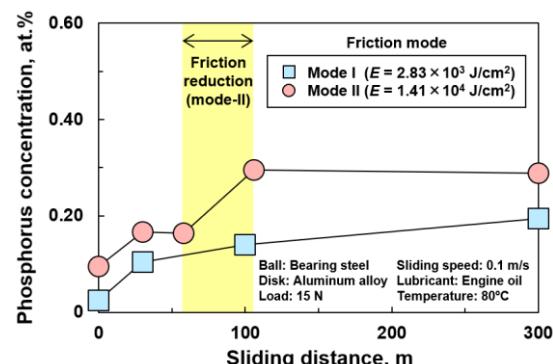


Fig. 7 Evolution of phosphorus concentration in unirradiated area of the disk wear tracks in mode-I and mode-II.