

アルミ合金を用いたエンジン油中摩擦システムにおける レーザー表面処理による耐焼付き性の制御

Seizure Resistance Control by Laser Surface Treatment In Engine Oil Friction System Using Aluminum Alloy

東北大・工（院）＊井上 翔太 東北大・工（院）山名 哲夫
東北大（正）村島 基之 東北大（正）足立 幸志

Shota Inoue, Theo Yamana, Motoyuki Murashima, Koshi Adachi
Tohoku University

1. 緒言

燃費向上や摩擦損失削減のため、自動車エンジンしゅう動部へのアルミ合金に代表される軽量金属及び低粘度エンジン油の導入が進んでいる。それ故、流体膜による潤滑が困難な境界潤滑における、アルミ合金の相手材への凝着抑制とエンジン油中添加剤に由来する摩擦化学反応促進による低摩擦発現のための技術が求められる。これに対し、著者らは、アルミの凝着抑制と添加剤由来の境界膜形成を両立させ境界潤滑での低摩擦を実現することが可能なアルミ合金へのレーザー表面処理法を提案している^{[1][2]}。

一方、実機のように摩擦界面が高面圧・高すべり速度の条件にさらされると、界面の凝着により、しゅう動が完全に停止する「焼付き」と呼ばれる現象を引き起こすことが懸念されており、厳しい接触状態における耐焼付き性向上のための表面処理技術の確立が急務の課題となっている。

そこで本研究では、耐焼付き性向上のためのレーザー表面処理の可能性を明らかにするとともに、レーザー表面処理の際の表面設計指針を提案する。

2. 実験方法

Table 1 に本研究で実施したピンオンディスク及びボールオンディスク試験の実験条件を示す。ピン及びボール試験片には軸受鋼 (SUJ2)、ディスク試験片にはアルミ合金 (Al-Sn-Si 合金) を用い、ベースオイル及びモリブデンジチオカーバメート (MoDTC)、ジアルキルジチオリン酸亜鉛 (ZnDTP)、カルシウム清浄剤等を含むエンジン油を試験片表面に塗布することで貧潤滑下での摩擦試験を行った。また、本研究における「焼付き」は、摩擦係数が 0.2 以上急上昇することと定義した。ピンオンディスク試験では、荷重 25 N、すべり速度 0.05 m/s で 10 分間なじみ運転をさせた後、荷重 45 N、すべり速度を 0.5 m/s から 0.1 m/s ずつ焼付きが発生するまで増加させる本試験を行った。また、ボールオンディスク試験では、荷重 25 N、すべり速度 0.5 m/s で 120 分間摩擦試験を行った。アルミ合金ディスクには、超短パルスレーザー加工機を用いて、同心円状にライン集光を用いた全面照射によるレーザー処理を施した。また、照射エネルギー密度は 0 (未照射)、269, 1347, 2425, 5540, 6287 J/cm² の 6 段階で変化させた。

3-1. 耐焼付き性に及ぼすエネルギー密度の影響

Fig. 1 (a), (b) に 269, 6287 J/cm² のエネルギー密度でレーザー処理を施したアルミ合金及び未処理のアルミ合金と SUJ2 とのベースオイル、エンジンオイル塗布下における摩擦特性をそれぞれ示す。未処理、269 J/cm² ではいずれのオイル塗布下でも焼付きを生じることが分かる。一方 6287 J/cm² ではベースオイル塗布下では試験機最大速度の 2.0 m/s まで達しても焼付きを生じないのに対し、エンジンオイル塗布下では 2.0 m/s で焼付きを生じる。焼付きを生じる際のすべり速度に及ぼすエネルギー密度の影響を Fig. 2 に示す。なお、図中の上矢印は最大速度の 2.0 m/s に

Table 1 Details of seizure test and friction test.

Pin-on-Disk seizure test		
Specimen	Pin	SUJ2
	Disk	Al-Sn-Si alloy
Running in stage		
Load (N)	25	45
Sliding velocity (m/s)	0.05	0.5, 0.6, 0.7... 2.0
Duration (min)	10	5 at each speed
Ball-on-Disk seizure test		
Specimen	Ball	SUJ2
	Disk	Al-Sn-Si alloy
Load (N)	25	
Sliding velocity (m/s)	0.5	
Duration (min)	120	

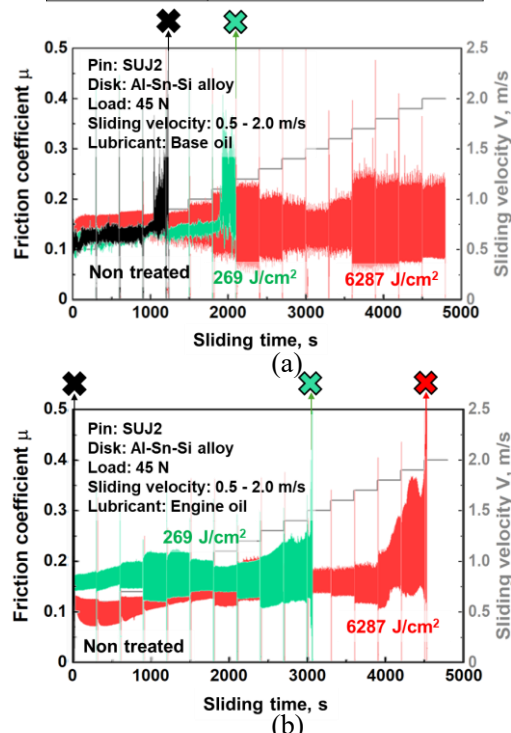


Fig. 1 Seizure resistance in SUJ2 sliding against laser-irradiated Al-Sn-Si alloy in (a) base oil and (b) engine oil.

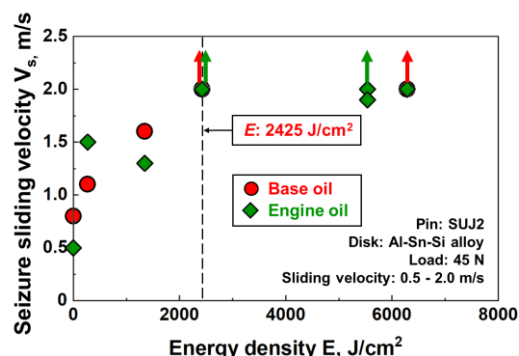


Fig. 2 Effect of energy density on seizure sliding velocity.

達しても焼付きを生じないことを意味している。エネルギー密度の増加に伴い耐焼付き性が向上し、 2425 J/cm^2 以上のエネルギー密度ではベースオイル塗布では焼付きを生じないことが分かる。一方でエンジンオイル塗布では、高エネルギー密度でも焼付きを生じる場合が存在する。

次に、焼付き試験をすべり速度 0.5 m/s の段階で中断したときのピン、ディスク摩耗痕から検出された Al 及び Fe の検出量に及ぼすエネルギー密度の影響を Fig. 3 に示す。エネルギー密度の増加に伴い、母材由来金属の移着方向が、ピンへの Al 移着から、ディスクへの Fe 移着へと遷移することが分かる。すなわち、Fig. 2 中で 2425 J/cm^2 以上の高エネルギー密度で焼付きを生じる場合は、ディスクへの Fe 移着量の増加が焼付き発生要因であると考えられる。

3-2. 摩擦に及ぼす Fe 移着分布の影響

$3462, 5540, 6287 \text{ J/cm}^2$ それぞれのエネルギー密度となる走査速度およびパワーでレーザー表面処理をした際のディスク初期表面粗さを Fig. 4 に示す。同一のエネルギー密度であっても、照射条件によって初期表面粗さが Ra $0.1 \sim 1.1 \mu\text{m}$ の範囲で大幅に変化することが分かる。前節で述べたディスクへの Fe 移着には、表面幾何形状も大きく影響すると考えられるため、エネルギー密度は一定のまま照射条件を意図的に変化させ、初期幾何形状の違いが Fe の移着に及ぼす影響を調査した。

エネルギー密度 5540 J/cm^2 において、走査速度及びレーザーパワーを変化させ、幾何形状が異なる 5 種類のディスクを用いてボールオンディスク試験を行った際の摩擦特性に隣接平均法によるスムージング処理を施したものを Fig. 5 に示す。初期表面が粗いディスクの場合、 0.15 以上まで摩擦係数が急増する不安定な摩擦となるのに対し、滑らかなディスクでは、終始 $\mu=0.1$ 前後の安定した摩擦係数を示す。

試験終了後の典型的なディスク摩耗痕の SEM 像及び Fe の移着分布を Fig. 6 に示す。 $\mu=0.15$ 以上の高摩擦を経験した粗いディスクには塊状の Fe の移着が見られる一方、 $\mu=0.1$ 前後の安定した摩擦を示した滑らかなディスクには塊状の Fe の移着は見られないことが分かる。「焼付き」が母材由来金属の凝着面積の急激な拡大によって生じることを踏まえると、耐焼付き性は、Fe の移着分布の制御により向上させることが可能であり、それはレーザー処理条件の最適化により実現可能であることを示唆している。

4. 結言

軸受鋼 (SUSJ2) とアルミ合金 (Al-Sn-Si 合金) の摩擦においてレーザー表面処理の導入により耐焼付き性を向上させ得ることを明らかにした。具体的な結果を以下に示す。

- (1) 2425 J/cm^2 以上のエネルギー密度でレーザー処理を施すことで、アルミの凝着が防止され、ベースオイル塗布条件では焼付きを生じないことを示した。
- (2) 低エネルギー密度ではピンへの Al の移着、高エネルギー密度ではディスクへの Fe の移着がそれぞれ支配的に起きることを明らかにした。
- (3) 耐焼付き性向上のためには、Fe の移着分布の制御も重要な因子であることを示した。

参考文献

- (1) K. Ihara, K. Adachi, Necessary conditions for low friction between laser-irradiated aluminum alloy and bearing steel in engine oil, Tribology International, 186 (2023) 108607.
- (2) 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 (2022) 335-347.

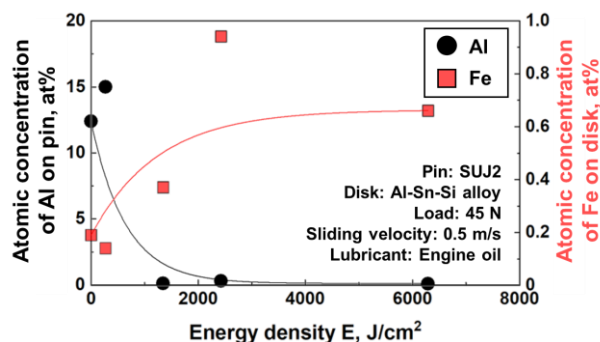


Fig. 3 Effect of energy density on the transfer direction of base metal elements.

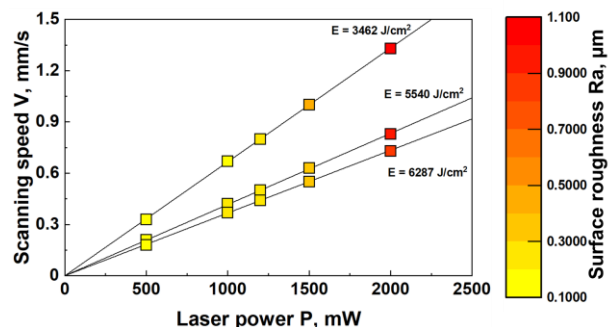


Fig. 4 Effect of laser scanning speed and laser power on the initial roughness of Al-Sn-Si disks.

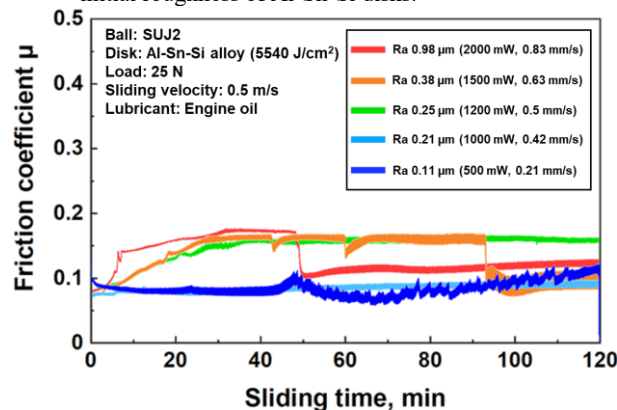


Fig. 5 Smoothed friction behavior when using disks irradiated with five laser irradiation conditions.

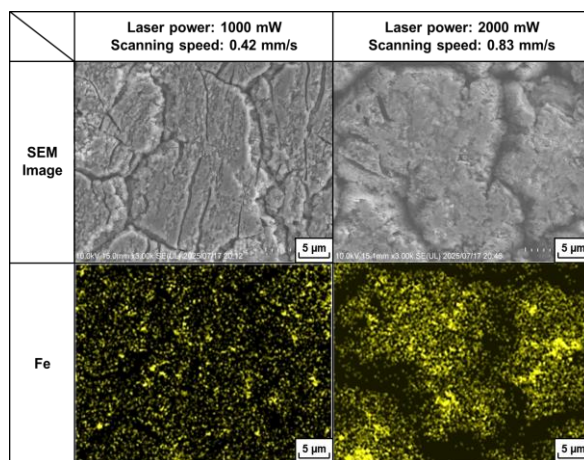


Fig. 6 SEM images and EDX mapping of Fe when friction was unstable (2000 mW, 0.83 mm/s) and when it remained stable throughout (1000 mW, 0.42 mm/s).