

荷重振動が反応系添加剤含有オイル中摩擦に及ぼす影響

Effect of load variations on friction in additive-contained oil

東北大・工（院）*太田 優志 東北大・工（正）足立 幸志 東北大・工（正）村島 基之

Masashi Ota*, Adachi Koshi*, Motoyuki Murashima*

*Tohoku University

1. 緒言

近年、環境への負担軽減のため、内燃機関の燃費改善や効率化が求められている。部品の一部であるクランクシャフトでは、摩擦低減のため細軸化や、燃焼効率改善のためのロングストローク化が行われている。一方、これらの設計の影響により剛性が低下し、振動が増加するという課題も見えてきている。しかしながら、このような振動が機械のしゅう動特性に与える影響は詳細には明らかになっておらず、その解明が強く望まれる。

そこで本研究では、システム剛性の変化が荷重振動や反応系添加剤含有オイル中での摩擦特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。そのために、垂直荷重を印加するばねの剛性を変化させる機構を備えた摩擦試験機を構築した。そしてこの試験機を用いて、エンジンオイル中でアルミニウム合金と SUJ2 球を用いた摩擦試験と表面分析を実施した。

2. 実験方法

システム剛性を変化させる機構を備えた、潤滑油浸漬式のボールオンディスク型摩擦試験機の概略図を Fig. 1 に示す。システム剛性調整機構は、試験機のアームに設置した垂直荷重印加用のばねのばね定数を変化させることで剛性を調整する仕組みになっている。

本試験では、Al-Si-Ni-Cu-Mg 系アルミニウム合金 (AC8A-T6) に超短パルスレーザーによる表面改質処理を施したディスク試験片 (AC8A-laser) と、高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) 製のボール試験片を用いて、潤滑油中での摩擦試験を実施した。潤滑油には、MoDTC と ZnDTP が添加されたエンジン油を用いた。システムの剛性を変化させるために、ばね定数が異なる 3 種類のばね ($k=10, 100, 213 \text{ N/mm}$) を用いた荷重印加法と、ばねを用いず重りによって荷重を印加する手法 (dead weight) の 2 通りの方法で垂直荷重を加えた。荷重は試験中に振動するため、平均荷重が目標値となるように調整し試験を行った。すべり速度、潤滑油温度、滑りサイクル数は 0.5 m/s , 80°C , 5000 cycles に統一した。

3. 実験結果および考察

3.1 摩擦試験の結果と摩耗痕断面積

ばね定数 $k=213$ のばねを用いて荷重を印加した際の、エンジン油中における SUJ2/AC8A-laser の摩擦特性を Fig. 2 に示す。この図より、荷重および摩擦係数はそれぞれおよそ $16\text{--}29 \text{ N}$, $0\text{--}0.1$ で振動していることがわかる。

次に、システム剛性が摩耗および摩擦特性に及ぼす影響を明らかにするために、摩耗量測定を実施した。ディスクに関しては接触式粗さ計を用いて試験後のディスクの異

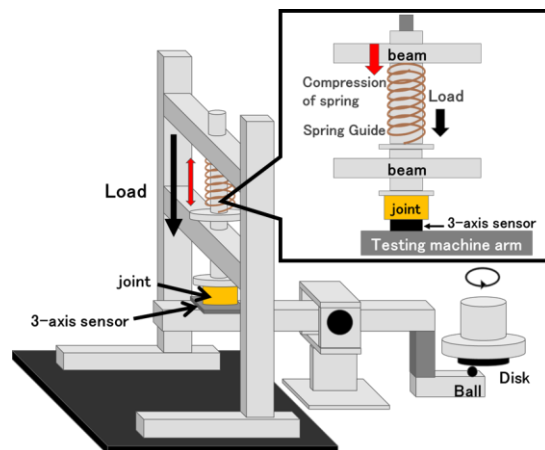


Fig. 1 Schematic of friction tester with the system-stiffness adaptation mechanism.

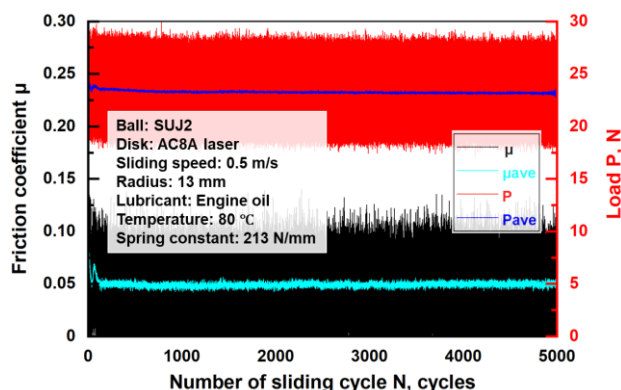


Fig. 2 Friction and load evolutions of SUJ2/AC8A-laser in engine oil using a spring with stiffness $k = 213 \text{ N/mm}$.

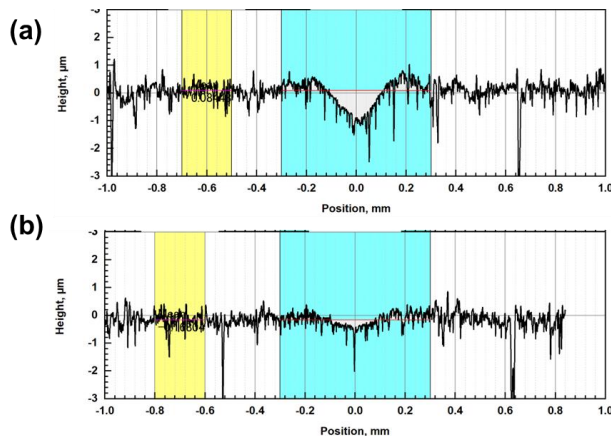


Fig. 3 Cross-sectional profile of the wear track on the AC8A-laser treated disk; (a) $k=10 \text{ N/mm}$ and (b) $k=213 \text{ N/mm}$

なる4点で断面曲線を取得し、ボールに関しては共焦点顕微鏡を用いて取得した。ディスク摩耗痕 profile を Fig. 3 に、ボール摩耗痕 profile を Fig. 4 にそれぞれ示す。Fig. 3 から $k=10$ のディスクのくぼみの方が大きいことが確認できる。一方、Fig. 4 からはボール側では、 $k=213$ の方が摩耗が大きいことが確認できる。また、この摩耗痕 profile からディスクのくぼみ部分の面積 (Concave area A) とボールの摩耗面積 (Ball wear area) をそれぞれ算出した。くぼみ面積は、異なる4測定点における摩耗痕断面積を積分したものの平均値である。それぞれの試験条件における、算出された Disk くぼみ面積および Ball 摩耗面積を Fig. 5 に示す。ばね定数が大きくなると Disk くぼみ面積が小さくなる傾向が確認された。これに対し、ボールに関してはばね定数を大きくすると摩耗面積が大きくなることが確認できる。

3.2 SEM による表面分析と考察

摩擦面の違いを比較するために $k=10$ と $k=213$ のディスクとボールに関して、ディスク摩耗痕中心部、ディスク摩耗痕の端部、ボール摩耗痕中心部の3か所に対して SEM 表面観察を行った (Fig. 6)。ディスク摩耗痕に関しては、 $k=10$, 213 のどちらもレーザー加工による地割れ状の表面が確認され、明確な摩耗の痕跡は確認できなかった。このことから、Al ディスク側で観察された表面形状の変化は、材料が除去されていくようなものではなく、レーザー加工された硬質な表面の下層に存在する軟質な Al 合金下地の塑性変形により生じていることが考えられる²⁾。また、ボール摩耗痕に関しては凝着摩耗由来と思われる表面形状が観察されたが、試験条件による違いは確認できなかった。EDS 定量分析の結果も二つの試験条件による明確な違いは観察されなかった。このことから、材料的な要因ではなく、試験条件がおよぼす力学的な違いが二つの摩耗形態の違いを生じさせていると考察し、振動特性を分析した。様々なパラメータと比較した結果、加わった荷重の上位 10% の平均値とボール摩耗面積に相関がみられた (Fig. 7)。これらの結果を包括的に考えると、ある閾値以上の荷重が加わった場合にボール摩耗が進行し、それが面圧の低下を招き、最終的に Disk 側の摩耗量 (変形量) が低減したというプロセスが考察される。この結果は、材料の組み合わせが同じであったとしても、加わる振動条件により大きな影響を受ける摩擦材料が変化することを示しており、摩擦面の力学特性を考えることの重要性を示すものである。

4. 結言

システム剛性を変化させる機構を備えた潤滑油浸漬式のボールオンディスク型摩擦試験機を構築し、システム剛性がエンジン油中の SUJ2/AC8A-laser の摩擦・摩耗特性に影響を及ぼすことを明らかにした。

1. システム剛性を変化させるために垂直加重を加えるばね定数を高くしたところ、Disk くぼみ面積が小さくなり、ボールの摩耗面積が大きくなった。
2. SEM による表面観察の結果では試験条件による大きな違いは見られなかった一方で、振動特性の解析からは、印加荷重の上位 10% 平均値とボール摩耗面積に相関があることが示された。

文献

- 1) 宮澤昌也, 望月計, 近藤孝: 細軸とロングストロークを追求したクランク軸系の振動軽減検討, 自動車技術会論文集, 47, 6, 11(2016)1387-1392.
- 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, 5(2025)52-53.

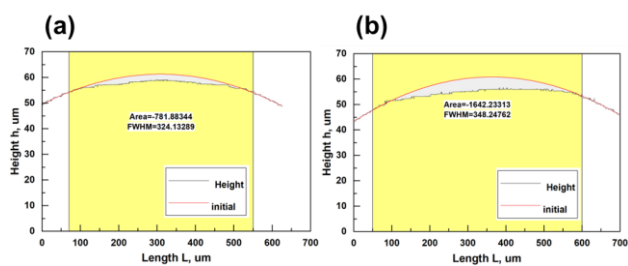


Fig. 4 Cross-sectional profile of the wear scar on the ball in SUJ2/AC8A-laser in engine oil.

(a) $k = 10$ N/mm (b) $k = 213$ N/mm

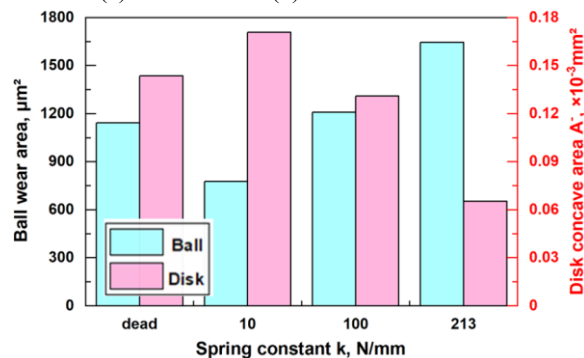


Fig. 5 Ball wear area and disk concave area.

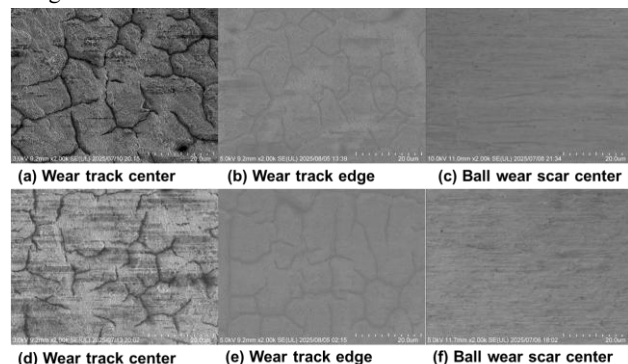


Fig. 6 SEM micrographs of the surfaces.

((a)-(c): $k = 10$ N/mm; (d)-(f): $k = 213$ N/mm)

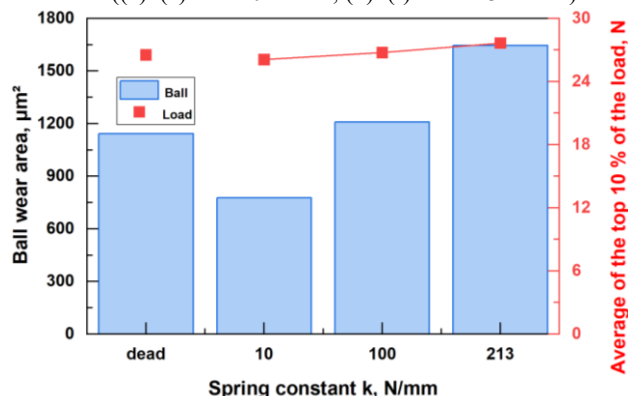


Fig. 7 Effect of spring constant on ball wear area and average of the top 10% of the load.