

インピーダンス法によるなじみ状態の可視化

Visualization of the Steady-State Condition Using Impedance Method

宇大院・工（学）*浦野 滉大 宇大・工（正）馬淵 豊

シェルルブリカンツジャパン（正）亀井 厳希（正）羽生田 清志（正）佐川 琢円（正）上田 真央

Kodai Urano*, Yutaka Mabuchi*, Genki Kamei**, Kiyoshi Hanyuda**, Takumaru Sagawa**, Mao Ueda**

*Utsunomiya University, **Shell Lubricants Japan

1. 背景及び目的

摩擦摩耗において、摺動する二面間のなじみ状況を把握する一つの方法として摩擦係数の計測が挙げられるが、表面の接触状態の推移を現象として捉える術は少ない。近年、自動車のエンジンなどにおいて低摩擦化のため、オイル中にグラフェンやフラーレン、ナノダイヤモンドといったナノ粒子を添加することが注目されているが、混合潤滑下においてナノ粒子がその効果を発揮するために、摺動表面のなじみを円滑に進めることが重要であり¹⁾、進行状況の可視化は開発に有効なツールとなり得る。

摺動する二面間の状態監視として交流電圧を付加した際のインピーダンスを用いる方法がある。インピーダンスは交流回路における電流の流れにくさの指標であり、摺動部の油膜厚さの算出にも用いられている²⁾。本研究は2面間のインピーダンスの計測により、潤滑下における接触状態を定量的にとらえることで、なじみの進行状況を監視することを試みた。具体的には異なる温度条件下における鋼/鋼間の摺動において、摩擦係数の計測と同時にインピーダンス Z と位相角 θ を計測して比較を行い、その妥当性を検証した。

2. 実験方法

2.1 試料

試験に用いる鋼球は材質が SUJ2、硬さ HRC62~67、精度 G28、直径 3/8 インチ (9.5mm)、最大表面粗さ 0.05 μm のベアリング球を用いた。ディスクに SCM440、硬さ HRC48~50、直径 31mm、厚さ 3mm、表面粗さ 0.05 μm の仕様を用いた。単純な系でのなじみ状況を調査するため、添加剤を含まない基油ポリアルファオレフィン 4 (PAO4)を用いた。15 $^{\circ}\text{C}$ 密度は 0.856[g/cm³]、40 $^{\circ}\text{C}$ 動粘度は 18.0 [mm²/s]、100 $^{\circ}\text{C}$ 動粘度は 4.0[mm²/s]である。

2.2 実験条件

試験は Figure 1 に示す Ball/Disk 型摩擦試験機を用い、接点が潤滑油に浸漬した状態で試験を行った。絶縁した鋼球と、ディスクからの配線に LCR メーターを接続して回路を作成し、インピーダンスを測定した。試験中、絶縁破壊を起こさないよう電圧 150mV の条件で計測を行った。交流電圧の周波数は 100kHz であり、測定頻度は 1 回/1 秒である。負荷荷重は 120g(最大ヘルツ接触面圧 500MPa)、摺動回転数を 100rpm(周速度 0.08m/s)とした。なじみ状況の差を比較するため、油温は 40 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$ 、120 $^{\circ}\text{C}$ の3水準とし、試験時間を3時間とした。また、摩擦係数とインピーダンスが定常状態に至るまでの見極めを油温 80 $^{\circ}\text{C}$ で実施し、この場合のみ8時間の試験を追加で行った。

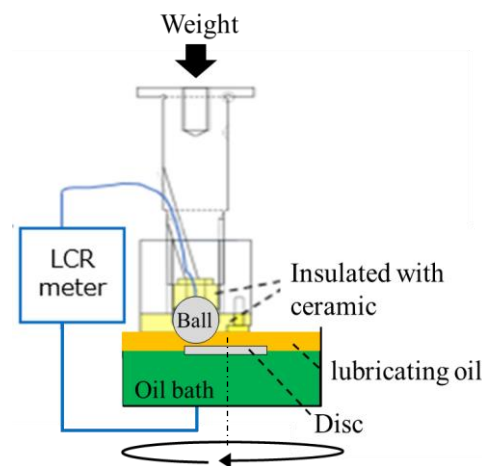


Fig.1 Model of ball/disk type friction tester

3. 試験結果

Fig.2 に油温 40 $^{\circ}\text{C}$ の摩擦係数とインピーダンス Z の推移、Fig.3 に摩擦係数と位相角 θ の推移を示す。平均化した摩擦係数は 50m 付近で安定化したのに対し、 Z は試験時間と共に上昇し、摩擦係数に遅れて 300m 付近で安定化する傾向を示した。 θ は完全接触である 0 から流体潤滑側となるマイナス側へ減少する傾向を示し、 Z とほぼ同じ距離で-4 $^{\circ}$ で安定化した。

Fig.4 に油温違いでの Z の時間変化を示す。40 $^{\circ}\text{C}$ に対し、80 $^{\circ}\text{C}$ 、120 $^{\circ}\text{C}$ の条件は Z の立ち上がりが遅く、3時間の試験条件では定常状態に至らなかった。そこで、80 $^{\circ}\text{C}$ で8時間まで延長した試験結果を Fig.5 に示す。平均化した摩擦係数は 500m 付近で安定化したのに対し、 Z は摩擦係数に遅れて 1300m 付近で安定化する傾向を示し、40 $^{\circ}\text{C}$ に比べて長期化する傾向を示した。以上の結果から、試験温度が高いほど定常状態に至るまでに長い時間を要すると考えられる。

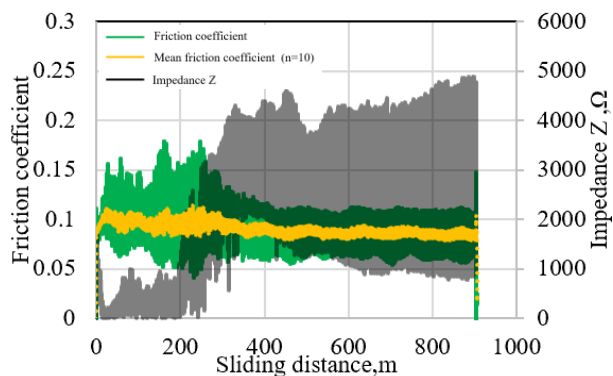


Fig.2 Friction coefficient and Impedance values (40°C)

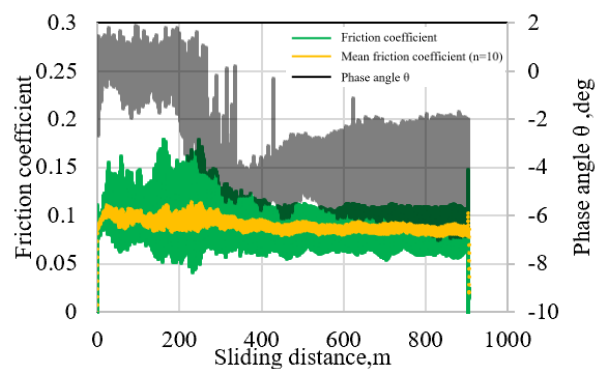


Fig.3 Friction coefficient and Phase angle (40°C)

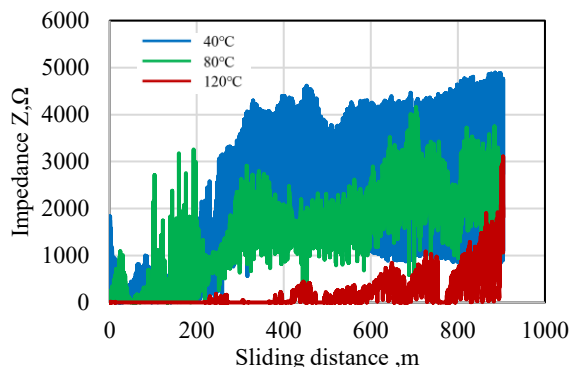


Fig.4 Differences in impedance values at each oil temperature

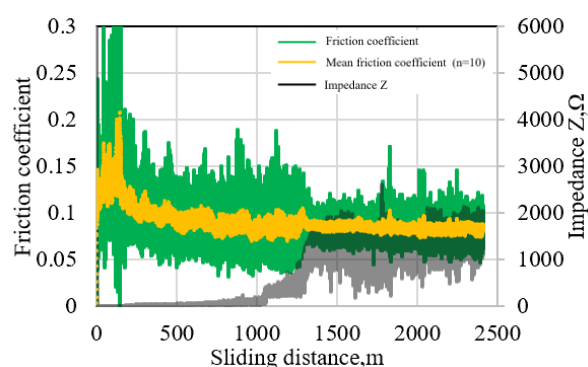


Fig.5 Friction coefficient and Impedance values (80°C)

4. 考察

平均化した摩擦係数と Z の安定化に要する時間の差について考察する。Fig.5 において、平均化した摩擦係数が安定化した 500m 付近での Z の値は低く、表面同士の接触が依然として発生していると考えられる。また、この時点での摩擦係数の値は変動が大きく (図中の緑線)、Fig.6 の左図に示す表面の突起部が残存しており、スティックスリップ現象が頻繁に発生していると考えられる。一方、 Z の値が増加し安定化した 1300m 付近から、摩擦係数の変動は大幅に減少する傾向を示し、同様の現象は Fig.2 の 40°C の条件においても認められる。これらの結果から、Fig.6 の左図に示すように、平均化した摩擦係数の値が安定化した後も、依然として表面に突起が残っている状況に対し、 Z の値が高い値で安定化した状況においては右図のように、表面の突起部が摩擦によりほぼ除去し尽くされ、スティックスリップ現象の起振源が解消され、油膜形成の安定化に伴いなじみが完了したものと考えられる。よって、なじみの完了の可視化手法として、様々な因子が複合された結果として表される摩擦係数、およびその値を平均化した摩擦係数の推移よりも、電気的に接触状態を直接捉えたインピーダンスの方が、なじみの指標として有効と考えられる。

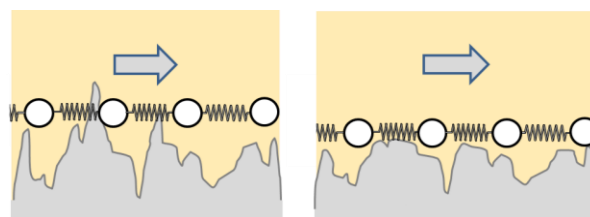


Fig.6 Diagram of the surface before and after testing

5. 緒言

摩擦試験中の摩擦係数、2 面間のインピーダンス Z 、位相角 θ を計測する手法を開発し、異なる油温条件での推移を比較した結果、以下の知見を得た。

- (1) 試験中の平均化した摩擦係数の安定化する時間に比べ、 Z や θ の安定化する時間は長い。
- (2) 試験温度が高いほど、 μ や Z が定常状態に至るまでに長い時間を要する傾向が見られた。
- (3) 摩擦係数の振幅が減少するタイミングと Z が安定化するタイミングは一致した。

参考文献

- 1) Shun Terauchi, Yutaka Mabuchi, et al, Tribology Online, 19, 2(2024), 121-129,
- 2) 丸山泰右, 前田成志, 中野健, “EHD 接触域の潤滑状態モニタリングに関する研究—電気インピーダンス法の開発—”, トライボロジスト, 64, 11(2019), 655-660.
- 3) Maruyama T, Kosugi D, et al: Application of the electrical impedance method to steel/steel EHD point contacts. *Front. Mech. Eng.* 10(2024):1489311.
- 4) 金子太一, 他, トライボロジー会議 2022 秋 福井, 予稿集, F14, 446-447.