

粗面同士の潤滑しゅう動における動的インピーダンスと摩擦特性に関する研究

Study on Dynamic Impedance and Friction Characteristics in Lubricated Sliding between Rough Surfaces

名工大（学）*日比野 公亮 名工大（正）前川 寛 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）糸魚川 文広

Kousuke Hibino*, Satoru Maegawa*, LIU Xiaoxu*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

工作機械すべり案内面に用いられるオレイル基を有する酸性リン酸エステル添加油は、低面圧・低速度下において非常に低摩擦、かつ摩擦係数に強い正の速度依存性を発現する¹⁾。浅野らは両面が粗面の場合には粗さ突起同士がすれ違う際に、粘ちような境界膜の引き込み・圧縮が生じ、さらにそれに引き続くせん断による応力緩和が生じるとした。この緩和の時定数に着目すると、時定数と滑り速度により決まるすれ違い頻度（周波数）の相対関係が平均の粘性抵抗に影響するから、これにより速度依存性が発現し得るとするモデルを提案した²⁾。このモデルを認めると、突起間で圧縮され荷重支持する境界膜の時間平均圧縮率（密度）は、粗さ突起の摺動履歴の影響を受けることとなる。本研究では、この摺動履歴による密度変化が境界膜の電気的特性に影響を与えたと考え、しゅう動中の複素インピーダンスの速度依存性を調べ、その結果から速度依存性発現メカニズムを考察した。

2. 境界潤滑膜のモデル化

Figure. 1 に粗さ突起間に介在する境界潤滑膜の模式図およびその等価電気回路を示す。境界潤滑膜の一部分は破断し金属接触が起こり得ると仮定している。これらを電氣的にみると境界潤滑膜はキャパシタ C 、金属接触部は抵抗 R に置き換えられ、それらの並列回路と考えることができる。また、外部抵抗 R' を直列に接続している。本報告では、当モデルを用いて、しゅう動中における動的インピーダンスの考察を行う。

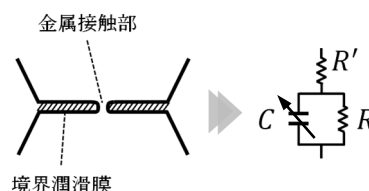


Fig. 1 Schematic diagram of a boundary lubrication film and its equivalent electrical circuit

3. 試験装置および試験方法

試験装置の概略図および試験片部の拡大図を Fig. 2 に示す。本装置は、装置上部のモータによって上試験片が回転し、下試験片は摩擦力を計測するための動力計を介して固定されている。試験片の材質は、材質は上試験片を S45C、下試験片を FC300 とし、上試験片は 6 本のピンが円周上に等配置され、Ring 状の下試験片を摩擦することで片当たりを防ぐ構造となっている。また、上下試験片ともに装置から絶縁させ、インピーダンス測定用のリード線は試験片に直接取り付けられている。実験条件は以下の通りに設定した。試験前の表面粗さは $R_{a15}=3.0\text{--}3.5\text{ }\mu\text{m}$ とし、しゅう動速度の範囲は $0.046\text{ }\mu\text{m/s}\text{--}301.8\text{ }\mu\text{m/s}$ 、なじみ運転速度は 9.2 mm/s 、接触面圧は 1.2 MPa とした。潤滑油として、パラフィン系鉱油(ISO VG68)にオレイル酸性リン酸エステル (OLAP) を $0.2\text{ wt}\%$ 添加したものを使用した。試験中は油切れを抑制するために、しゅう動面に潤滑油を連続的に供給し、供給量は 0.6 ml/min とした。動的インピーダンス計測は LCR メータを使用し、印加電圧は 0.2 V 、測定周波数範囲は $10\text{ Hz}\text{--}8\text{ MHz}$ で、この周波数を対数刻みで 50 点に分割し測定を行った。

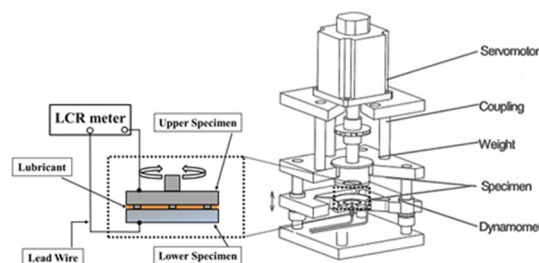


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

4. 実験結果および考察

本実験により得られた各しゅう動速度における摩擦係数を Fig. 3 に示す。この結果より、速度の増加とともに摩擦係数が増加することが確認でき、OLAP の摩擦特性が発現していることが分かる。次に、Fig. 3 中に赤矢印で示す速度 ($0.046\text{ }\mu\text{m/s}$, $3.726\text{ }\mu\text{m/s}$, $301.8\text{ }\mu\text{m/s}$) において測定した動的インピーダンスの結果をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 に示す。いずれの図も横軸に周波数、左縦軸にインピーダンスの絶対値、右縦軸に位相が示されている。また、黒プロットがインピーダンスを表し、白プロットが位相を表している。すべての測定結果において位相やインピーダンスが激しく入れ替わるっていることが分かる。これ

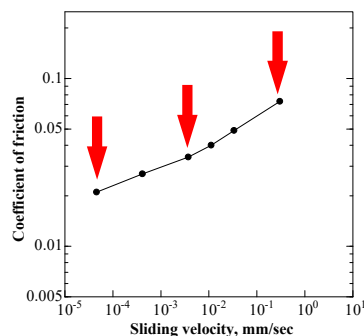


Fig. 3 Friction coefficient vs. sliding velocity

は摺動による油膜破断がランダムに生じているため、同一条件で測定してもこの入れ替わりの生じる周波数帯は変化する。

Figure 4 より、しゅう動速度 $0.046 \mu\text{m/s}$ においてインピーダンスは、ほぼ測定周波数全域にわたり傾き-1 で減少している。また、位相はほぼ -90° を示している。これより、接触点には誘電体である境界膜が安定して存在しており、その等価 CR 一次遅れ系の時定数は非常に大きいことがわかる。すなわち、固体接触はほぼ生じておらず、接触部の抵抗率は非常に大きいといえる。ただし、 $10 \text{ Hz} \sim 40 \text{ Hz}$ の低周波数に限り位相遅れは生じておらず、インピーダンスは約 100Ω 程度を示している。これはイオン電流による抵抗率変化による緩和現象が生じていると考えられるが、今回はこれには言及しない。

続いて、Fig. 5, 6 より、すべり速度の増加に対し、インピーダンスの絶対値は減少し、位相変化の周波数は増加していることが分かる。図中赤線で示した位相変化特性（ランダムな位相の入れ替わりを無視した場合）から、等価 CR 一次遅れ回路の時定数は、およそ速度増加比率で増加しており（3 条件の速度比は約 10^2 、時定数比も約 10^2 ）、インピーダンスが速度に依存することを示している。単一接触点の電気的特性は境界膜の誘電率、抵抗率、幾何学的な接触面積には依存するが、すべり速度依存は考え難い。すべり案内面の摺動では平均接触面圧は低く、摺動両面の粗さ突起は数多くの孤立した接触点が次々と入れ替わりながら荷重を支えている。粗さ突起の曲率半径はほぼ一定という仮定が成立し、高さ分散も十分小さいと考え、常に一定数の接触点がすべり速度で決まる時間だけ、荷重を支え次々と入れ替わっていると仮定できる。すなわち、Fig. 4, 5, 6 で測定される周波数特性（特に一次遅れ系と考えた場合の時定数と低周波数帯のインピーダンス）は接触部に介在する境界膜の電気的特性よりも、多点接触状態で摺動中の接触部の入れ替わり特性であると考えられる。一つの接触点の平均すれ違い距離を $L [\text{m}]$ とすると、平均接触時間 $T [\text{s}]$ は L/V であり、この T が接触 1 点の電気的特性で決まる時定数 $T_{CR} [\text{s}]$ より十分大きいと、インピーダンスの周波数特性は周波数 $1/T$ 程度までは、突起すれ違いによる回路の ON/OFF によるサンプリング特性が支配的となる。すなわち、この特性から摺動中の真実接触点の平均的なサイズを摺動中に in-situ で測定できる可能性を持つ。Fig. 7 は位相遅れの無い周波数帯（ $1/T$ 以下）のインピーダンスの絶対値を Fig. 3 上にプロットしたもので、すべり速度の増加とともに、すなわち T の減少とともにインピーダンスが小さくなっていることが分かる。図中の赤矢印は傾き-1 であり、インピーダンスの変化が単純に滑り速度の逆数で減少していることを示している。これらの結果から本研究が対象としている摺動における突起接触部間の境界潤滑膜は平均的には広い速度範囲で同じ状態（被覆率や介在する膜の機械的、電気的特性）にあるといえる。

5. 結言

本研究では、低面圧・低速度において境界潤滑膜の動的インピーダンスを計測し、粗さ突起のすれ違いを考慮したインピーダンスの解釈を試みた。

文献

- 1) 則久・糸魚川・中村・小川：低面圧境界潤滑領域における摩擦の速度依存性発現メカニズム，トライボロジー会議 2008 年 春 東京 予稿集，(2008) 35-36.
- 2) 浅野，前川，糸魚川：低面圧しゅう動条件における境界潤滑膜の速度応答，トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集

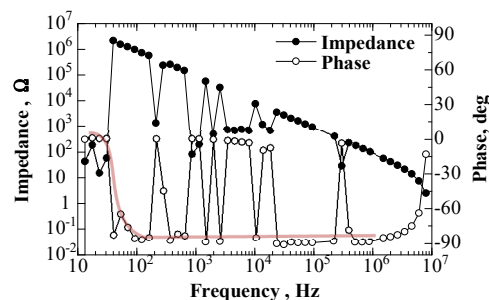


Fig. 4 Complex impedance vs. frequency measured at $0.046 \mu\text{m/s}$

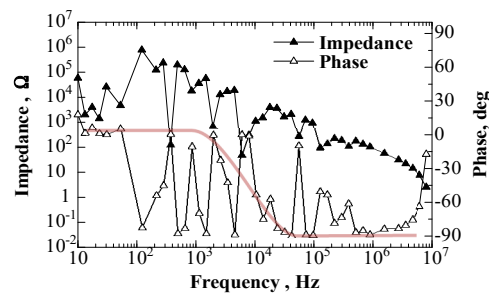


Fig. 5 Complex impedance vs. frequency measured at $3.726 \mu\text{m/s}$

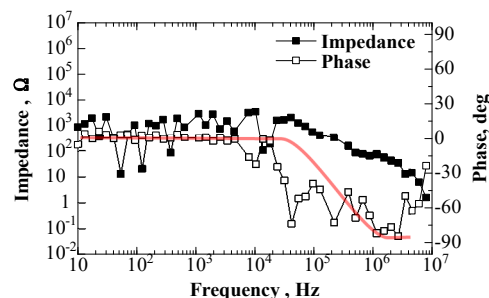


Fig. 6 Complex impedance vs. frequency measured at $301.8 \mu\text{m/s}$

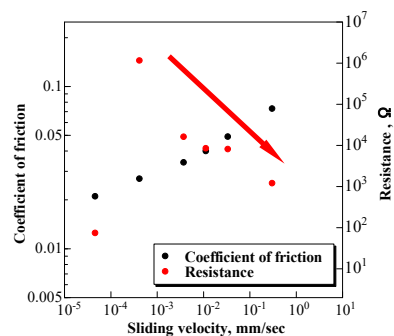


Fig. 7 Resistance vs. sliding velocity