

誘電分光による EHD 接触域の温度・粘度計測

Measurements of Temperature and Viscosity in EHD Contacts Using Dielectric Spectroscopy

NSK, 名工大（正）*岩瀬 駿介 NSK（正）丸山 泰右 東工大（正）桃園 聰

名工大（正）前川 覚 （正）糸魚川 文広

Shunsuke Iwase *, **, Taisuke Maruyama *, Satoshi Momozono***, Satoru Maegawa **, Fumihiro Itoigawa **,

*NSK Ltd., ** Nagoya Institute of Technology, *** Tokyo Institute of Technology

1. 背景と目的

誘電分光法 (dielectric spectroscopy) は、材料内部に存在する双極子の外部電場に対する緩和現象 (誘電緩和) を利用して、極性分子のダイナミクスを評価する手法であり、溶液物性学や生物物理学の分野で応用が進んでいる。鈴木ら¹⁾は、数種類の極性油に対して平板コンデンサを用いた誘電分光測定を行い、誘電緩和が観測されることを報告している。また、測定により得られた緩和周波数が、高温・低圧になるほど高周波シフトすることを明らかにしている。すなわち、誘電分光法を EHD (elastohydrodynamic) 接触域の油膜に適用することで、油膜の温度や粘度の *in situ* 計測へ応用できる可能性がある。本発表では、極性油を用いたボールオンディスク試験下における油膜誘電分光の測定結果について、1) 面圧依存性、2) すべり率 (SRR, slide-to-roll ratio) 依存性の観点から議論する。

2. 測定原理

ボールオンディスク試験における EHD 接触域、およびその周辺の a) 幾何モデルと b) 等価電気回路を Fig. 1 に示す。なお、本試験は流体潤滑条件下で行っているため、ボール-ディスク間の接触が生じておらず、EHD 接触域周辺は十分に油で満たされているとする。ボール-ディスク間の複素インピーダンス Z [Ω] は、EHD 接触域内の油膜における静電容量 C_1 [F]、および、EHD 接触域の周辺部における静電容量 C_2 [F]、交流電圧の角振動数 ω [rad/s] を用いて、以下の式で表される。

$$Z = \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \quad (1)$$

なお、 C_1 は油膜厚さ h_1 [m]、ヘルツ接触面積 S_1 [m^2]、真空の誘電率 ϵ_0 [F/m] を用いて以下のように表すことができる。

$$C_1 = \epsilon_r^* \epsilon_0 \frac{S_1}{h_1} \quad (2)$$

また、丸山らの報告²⁾ によると、 C_2 は油膜厚さ h_1 、ボール半径 r [m] を用いて式(3) で表すことができる。

$$C_2 = 2\pi\epsilon_r^* \epsilon_0 r \left(\ln\left(\frac{r}{h_1}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

ここで、 ϵ_r^* [-] は油の複素比誘電率であり、以下の式で表される。

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (4)$$

なお、 ϵ_r' [-], ϵ_r'' [-] はそれぞれ、複素比誘電率の実部、虚部成分である。複素インピーダンス Z は、電気測定により得られる測定対象のインピーダンスの大きさ $|Z|$ [Ω]、印加電圧に対する応答電流の位相差 θ [deg] と以下の関係がある。

$$Z = |Z| \cos \theta + j|Z| \sin \theta \quad (5)$$

式(1), (5) の実部と虚部を比較することで、 ϵ_r' , ϵ_r'' について式(6), (7) が得られる。

$$\epsilon_r' = -\frac{\sin \theta}{\epsilon_0 \omega |Z|} \left(\frac{S_1}{h_1} + 2\pi r \left(\ln\left(\frac{r}{h_1}\right) - 1 \right) \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\cos \theta}{\epsilon_0 \omega |Z|} \left(\frac{S_1}{h_1} + 2\pi r \left(\ln\left(\frac{r}{h_1}\right) - 1 \right) \right)^{-1} \quad (7)$$

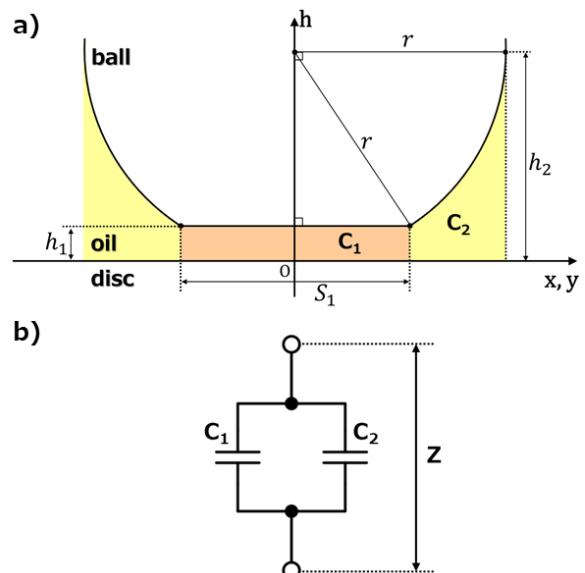


Fig. 1 Schematic diagram of EHD Contact and its surroundings; a) geometrical and b) electrical models.

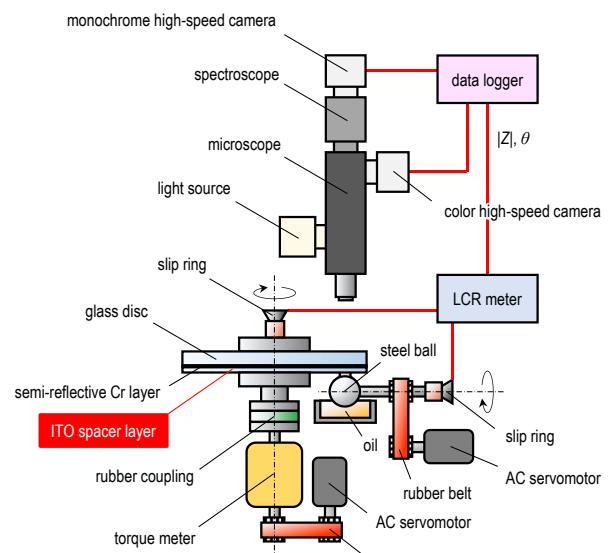


Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus.

3. 実験方法

実験に使用したボールオンディスク試験機の概略図を Fig. 2 に示す。本試験では ITO (indium tin oxide) を成膜したガラスディスクを使用しているため、誘電分光測定と同時に光干渉法による油膜厚さ計測を行うことができる。式 (6), (7) における油膜厚さ h_1 の入力には、光干渉法により得られた中央油膜厚さを使用した。Table 1 に試験条件を示す。

Table 1. Test conditions

AC frequency	1 kHz ~ 1 MHz
Alternating voltage	0.5~1.0 V
Test oil	DOP (Bis (2-ethylhexyl) phthalate)
Additive	N/A
Kinematic viscosity	57.8 mm ² /s at 25°C
Entrainment speed	0.6 m/s (i.e., hydrodynamic lubrication)
SRR (slide-to-roll ratio)	0, 0.02, 0.05, 0.1 ($\because v_{\text{ball}} > v_{\text{disc}}$)
Ambient temperature	25°C
Maximum contact pressure	543, 622 MPa

4. 結果と考察

4.1 誘電緩和の面圧依存性

面圧が異なる純転がり条件において、誘電分光測定を行ったところ、交流周波数 f [Hz] が増加するにつれ、 ϵ'_r が減少し、 ϵ''_r が極大を持つ誘電緩和が観測された (Fig. 3)。また、緩和周波数 (ϵ''_r のピークトップ周波数) は、面圧が高いほど低周波側にシフトした。これは、鈴木ら¹⁾により報告されている平板電極を用いた試験結果と一致している。さらに、622 MPa の場合、 ϵ'_r の低周波領域での値が高くなり、 ϵ''_r における緩和ピークが大きくなつた。これは、緩和強度が上昇していることを意味する。誘電緩和が測定周波数内に観測されるためには、少なくとも 100 MPa 程度の圧力が必要である¹⁾。つまり、高圧下に存在する EHD 接触域内のキャパシタンス C_1 が支配的であるほど、見かけ上の緩和強度が上昇する。 C_1 の大きさは、EHD 接触域の面積 S_1 、および油膜厚さ h_1 に依存する (式(2))。ここで、 S_1 は荷重の 2/3 乗に比例し、 h_1 は荷重の影響を受けにくい。したがって、荷重が増えるほど C_1 は増加することがわかる。一方、 C_2 は、接触面積 S_1 と無関係であるため (式(3))、一定値となる。すなわち、面圧が上がるほど、 C_2 に対する C_1 の寄与が大きくなるため、622 MPa の場合で緩和強度が増加したと考えられる。

4.2 誘電緩和の SRR 依存性

一定面圧条件下において、すべり率を変化させた試験を行った結果、SRR が増加するにつれ、緩和周波数が高周波側へシフトした (Fig. 3)。鈴木らの報告¹⁾によると、潤滑油 DOP の緩和ピークは、一定圧力下において、高温ほど高周波数側に現れる。すなわち、SRR の増加に伴う緩和周波数のシフトは、すべりによるせん断発熱が EHD 接触域の油膜温度を上昇させたことに起因すると推察される。また、SRR の増加に伴い、緩和ピークがシャープになることがわかつた。一般に、すべり条件下において EHD 接触域中央付近の温度は高くなり、接触面圧も中心付近が高くなる。一方、緩和周波数は、高温時と高圧時で相殺する方向にシフトする。よって、温度分布がほとんどない純転がり条件下よりも、緩和ピークがシャープになったと考えられる。

5 結論

ボールオンディスク試験機を用い、EHD 接触域に形成される極性油の油膜に対し誘電分光法を適用した結果、誘電緩和の面圧依存性や SSR 依存性を捉えることができた。これにより油膜の物性変化を in situ 測定できる可能性を示すことができた。本発表では、上記の内容に加え、油膜の温度・粘度算出に向けた試みについても述べる。

文献

- 1) A. Suzuki, & M. Masuko: A simple formula for the dielectric relaxation time–temperature–pressure relationship of lubricating oils and its application to viscosity prediction, Lubricant science, 16, 3 (2006) 239.
- 2) T. Maruyama, & K. Nakano: In Situ Quantification of Oil Film Formation and Breakdown in EHD Contacts, Tribology Transactions, 61, 6 (2018) 1057.

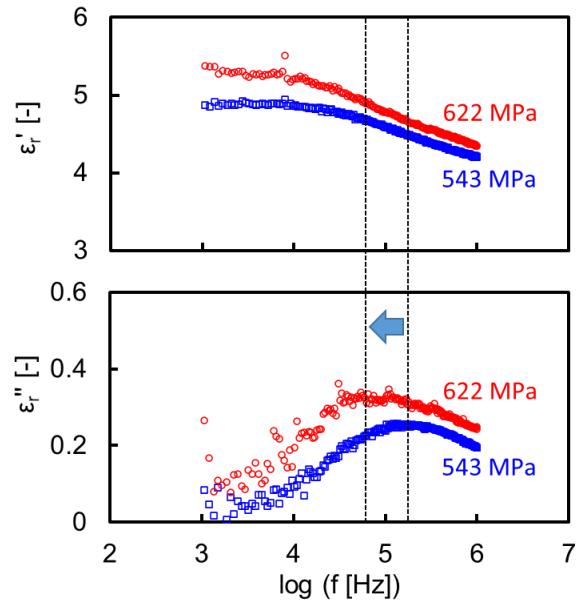


Fig. 3 Dielectric spectroscopy under pure rolling contacts.

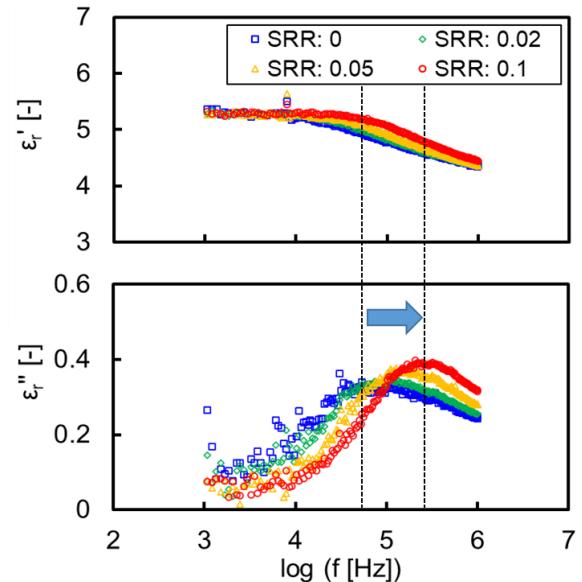


Fig. 4 Dielectric spectroscopy varying SRR at 622 MPa.