

# 電気的手法を用いた潤滑状態診断技術について

## Monitoring Techniques for Lubrication Conditions Using Electrical Methods

NSK (正) \*丸山 泰右 (正) 岩瀬 駿介 名工大 (正) 糸魚川 文広 横国大 (正) 中野 健

東工大 (正) 桃園 聡

Taisuke Maruyama\*, Shunsuke Iwase\*, Fumihiro Itoigawa\*\*, Ken Nakano\*\*\*, Satoshi Momozono\*\*\*\*

\*NSK Ltd., \*\*Nagoya Institute of Technology, \*\*\*Yokohama National University, \*\*\*\*Tokyo Institute of Technology

### 1. はじめに

近年、持続可能な開発目標 (SDGs, sustainable development goals) を達成するため、様々な機械のしゅう動部に用いられる転がり軸受には更なる低トルク化が求められている。そのため、軸受に用いられる潤滑剤の低粘度化や微量化が避けられない状況になってきており、その結果として弾性流体 (EHD, elastohydrodynamic) 接触における油膜の破断が懸念されている。従って、軸受の更なる低トルク化だけでなく長寿命化も両立する必要がある、そのためには潤滑状態を詳細にモニタリングできる技術が必要不可欠となる。これまで、筆者らは従来の電気的手法<sup>1)</sup>を改良し、光干渉法<sup>2)</sup>に匹敵する精度で油膜厚さを測定でき、かつ油膜の破断率も同時に測定できる電気インピーダンス法 (EIM, electrical impedance method) を開発した<sup>3~5)</sup>。更に、潤滑剤に印加する交流の周波数を掃引することで潤滑剤の性状などをモニタリングできる電気インピーダンス分光法 (EIS, electrical impedance spectroscopy) の開発も行っている。本報告では、これら電気的手法 (EIM, および EIS) の特徴について、簡単に紹介する。

### 2. 電気インピーダンス法 (EIM)

EIM とは、EHD 接触域に交流電圧を印加し、その応答である複素インピーダンスを解析することで、接触域内の油膜厚さ  $h$  [m]、および油膜の破断率  $\alpha$  [-] を求める手法のことである。過去に、EIM の油膜測定精度について検証している。評価に用いたボールオンディスク型試験機の模式図について、Fig. 1 に示す<sup>3)</sup>。この試験機を用いて、光干渉法<sup>2)</sup>、および EIM を用いて得られる油膜厚さ、さらに Hamrock-Dowson の式<sup>6)</sup>から求められる理論油膜厚さと比較した。ガラスディスク試験片の表面には Cr の半透過膜だけでなく、光を透過できる導電性材料である酸化インジウムスズ (ITO, indium tin oxide,) も被膜しているため、光干渉法との同時測定が可能である。また、トルクメータを用いて接触域に生じる摩擦係数  $\mu$  [-] も測定しており、油膜の破断率  $\alpha$  との比較も行った。PAO (30 mm<sup>2</sup>/s at 40°C) を用いて引き込み速度  $U$  [m/s] を変化した時の  $h$ 、 $\alpha$ 、および  $\mu$  を測定した結果について、Fig. 2 に示す。ただし、垂直荷重  $F_z = 10$  N とし、ボール試験片のみ回転させている。また、Fig. 2 上図に示す○印は電気インピーダンス法を用いた結果、×印は光干渉法を用いた中央油膜厚さ、破線は Hamrock-Dowson の式<sup>6)</sup>から得られる理論中央油膜厚さである。Fig. 2 より、EIM を用いて得られる油膜厚さは、光干渉法による測定値だけでなく理論値ともほぼ一致していることがわかった。また、 $U \leq 0.02$  m/s の範囲では  $\alpha$ 、 $\mu$  共に上昇していることから、 $\alpha$  も定量的に評価できることが示唆された。

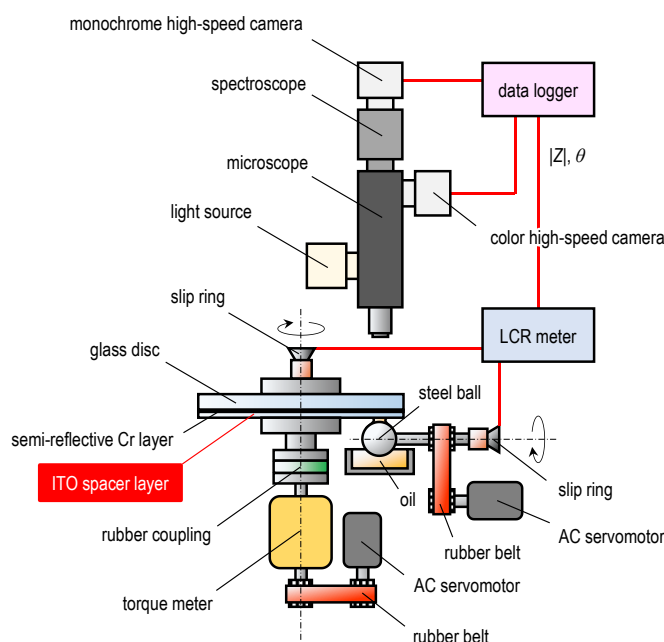


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

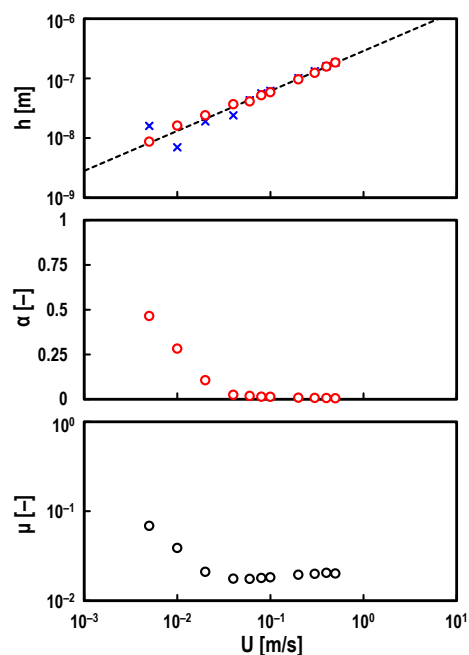


Fig. 2 Measured  $h$ ,  $\alpha$  and  $\mu$  for varying  $U$

### 3. 電気インピーダンス分光法 (EIS)

EIS は、対象物（潤滑剤など）に印加する交流電圧の周波数  $f$  [Hz] を掃引する点で、EIM（交流周波数＝一定）と測定方法が異なる。交流周波数を掃引して得られる複素インピーダンスから、複素誘電率（誘電率  $\epsilon_r'$  [-] と誘電損率  $\epsilon_r''$  [-]）の交流周波数依存性を求めることができ、その誘電特性  $\epsilon_r'$  から材料内部の構造ダイナミクスに関する情報が得られる。具体的な測定結果について、Fig. 3, 4 に示す。Figure 3 は、12-ヒドロキシステアリン酸リチウム (12-OHStLi) を増ちょう剤としたグリース（基油：鉱油）を平行平板電極に挟んで EIS を適用した結果である。増ちょう剤濃度が増えるほど、 $\epsilon_r'$  が低周波領域で増加していることがわかる。これは、増ちょう剤分子に含まれる永久双極子の濃度が増えるからである。Figure 4 は、同じく 12-OHStLi を増ちょう剤としたグリース（基油：エステル油）について、熱劣化試験（恒温槽 180℃×96 h）を実施し、室温に戻した後、EIS を適用した結果（図中△印）である。新品のグリース（図中○印）と比較して、 $\epsilon_r'$  と  $\epsilon_r''$  の両方が特に低周波領域で増加していることがわかる。これは酸化劣化により生じたイオン成分が電極界面に蓄積する電極分極と呼ばれる現象が生じていたためと考えられる。

### 4. まとめ

本報告では、電気的手法を用いた潤滑状態診断技術として、特に EIM と EIS について紹介した。EIM は光干渉法に匹敵する油膜測定精度を有しており、かつ油膜の破断率も同時に測定が可能である。一方、EIS は交流周波数を掃引することで、潤滑剤に関する様々な物性（増ちょう剤濃度）や性状（酸化劣化の程度）について観測可能である。転がり軸受の更なる低トルク化と長寿命化の両立を達成する上で、実際の潤滑状態を把握することは非常に重要である。つまり、これらの電気的手法は軸受の性能向上を図る上で欠かすことのできない技術であると言える。

### 文献

- 1) K. Nakano and Y. Akiyama: Simultaneous Measurement of Film Thickness and Coverage of Loaded Boundary Films with Complex Impedance Analysis, Tribology Letters, 22, 1 (2006) 127.
- 2) G. J. Johnston, R. Wayte and H. A. Spikes: The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contacts, Tribol. Trans., 34 (1991) 187.
- 3) T. Maruyama and K. Nakano: In Situ Quantification of Oil Film Formation and Breakdown in EHD Contacts, Tribology Transactions, 61, 6 (2018) 1057.
- 4) T. Maruyama, M. Maeda and K. Nakano: Lubrication Condition Monitoring of Practical Ball Bearings by Electrical Impedance Method, Tribology Online, 14, 5 (2019) 327.
- 5) T. Maruyama, F. Radzi, T. Sato, S. Iwase, M. Maeda and K. Nakano: Lubrication Condition Monitoring in EHD Line Contacts of Thrust Needle Roller Bearing Using the Electrical Impedance Method, Lubricants, 11, 5 (2023) 223.
- 6) D. Dowson: Elastohydrodynamic and Micro-elastohydrodynamic Lubrication, 190, 2 (1995) 125.
- 7) A. Suzuki, S. Kotake, M. Masuko, and Y. Fujinami: Relation between Dielectric Relaxation and Rheological Properties of Lubrication Greases, Tribology Online, 7, 3 (2012) 165.

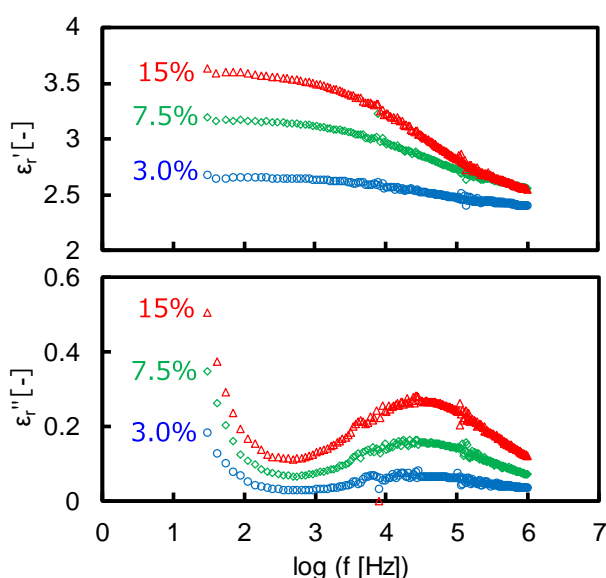


Fig. 3 Influence of thickener concentration on complex dielectric constant

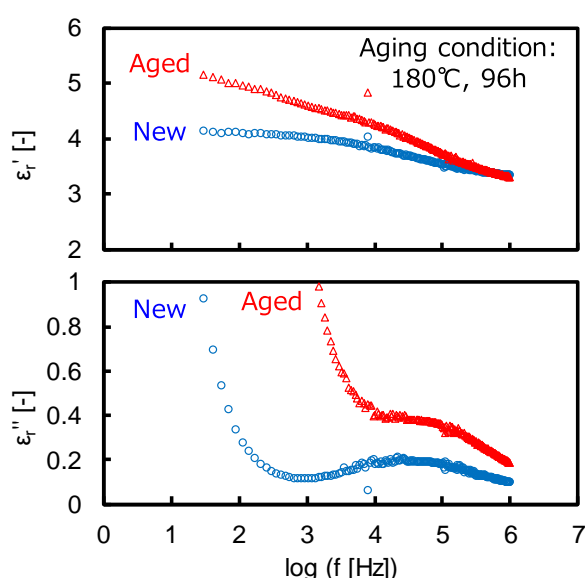


Fig. 4 Influence of grease degradation on complex dielectric constant