

EHD 線接触における電気インピーダンス法の開発

Development of the Electrical Impedance Method in EHD Line Contacts

日本精工(株) (正) \*丸山 泰右 (正) 前田 成志 (正) 岩瀬駿介 (非) Faidhi Radzi

Taisuke Maruyama\*, Masayuki Maeda\*, Shunsuke Iwase\*, Faidhi Radzi\*

\*NSK Ltd.

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低油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, elasto-hydrodynamic) 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、光干渉法と同等な精度で点接触における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>2)</sup>。更に、実際の深溝玉軸受 (つまり、楕円接触) にも適用できるよう発展させている<sup>3)</sup>。本研究では、スラストニードル軸受のような線接触到に適用可能な EIM を開発したので報告する。尚、紙面の都合上、本手法の理論については割愛する。

2. 試験方法

本研究で用いた軸受試験機の模式図について、Fig. 1 に示す。試験軸受としてスラストニードル軸受 (FNTA2542) を使用し、本研究で開発した手法を用いて油膜厚さ  $h$  [m] と油膜の破断率  $\alpha$  [-] (ただし、静止時  $\alpha = 1$ ) を同時に測定した。また、軸受トルク  $M$  [N·m]、および下レース温度  $T$  [°C] も併せて測定した。試験条件について、Table 1 に示す。室温で試験を開始し、試験軸受にアキシヤル荷重 1.5 kN を掛けて上レースを 3000 min<sup>-1</sup> で約 5 h 回転させた。本試験では、Table 2 に示す無添加鉱油を軸受の転走面に 1.0 ml 滴下して実験を行った。

3. 結果と考察

試験結果 ( $h$ ,  $\alpha$ ,  $M$ ,  $T$ ) について、Fig. 2 に示す。 $h$  の結果より、試験開始直後の測定値 (Fig. 2 中の赤プロット) は大きく変動していたが、試験中は概ね理論中央油膜厚さ (Fig. 2 中の黒破線, Ertel-Grubin equation<sup>4)</sup>) と一致することを確認した。一方、 $\alpha$  は時間とともに減少し 1 h 以降は  $\alpha \approx 0$  となることがわかった。この時、 $T$  と  $M$  も同様にほぼ一定となっていることから、約 1 h でなじみ摩耗が完了したと考えられる。試験後の下レース表面を観察した結果について、Fig. 3 に示す。Figure 3 (a) に示す摩耗痕付近の表面粗さを測定した結果、試験前にあった 100 nm 以上の凸部 (Fig. 3 (b) 右半分にある高い凸部) が摩耗痕内ではほぼ消滅していることを確認した ( $R_q = 0.12 \rightarrow 0.08 \mu\text{m}$ )。1 h 以降の  $h$  も約 100 nm であったことから、油膜厚さと同じオーダーの凸部が摩耗してなじみが完了したと考えられる。

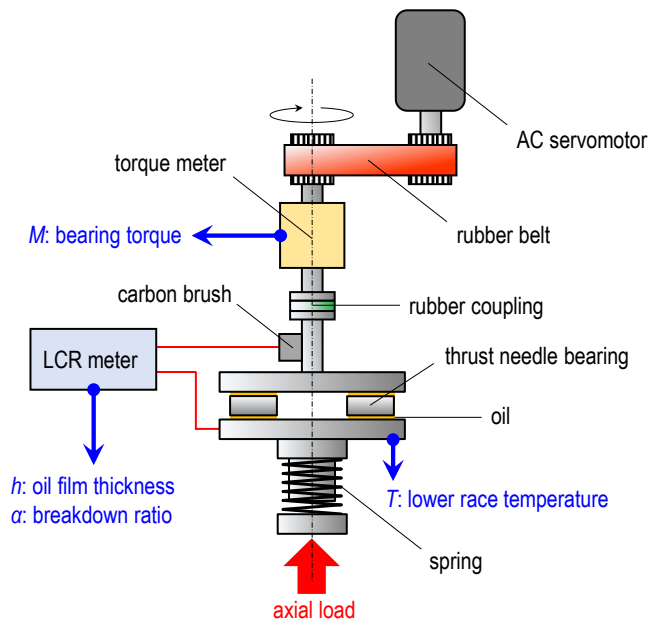


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Test conditions

Bearing		FNTA2542
Temperature, °C		26
Rotational speed, min <sup>-1</sup>		3000
Axial load, kN		1.5
Maximum contact pressure, GPa		1.0
Root mean square roughness, μm	Roller	0.15
	Race	0.12
Alternating voltage, V		1.1
AC frequency, kHz		10

Table 2 Oil properties

Oil	Mineral oil
Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s at 40 °C	32
Relative permittivity	2.1
Oil volume, ml	1.0

#### 4. まとめ

本研究では、線接触に適用可能な EIM を開発し、実際のスラストニードル軸受を用いて油膜厚さと油膜の破断率を同時に測定した。試験開始直後の油膜厚さは大きく変動していたが、時間とともに  $\alpha$  が減少しなじみ摩耗が完了したと思われる 1 h 以降の油膜厚さは理論値とほぼ一致することがわかった。また、試験後の下レース表面を観察した結果、実際になじみ摩耗が生じていることを確認した。以上の結果から、本手法はスラストニードル軸受のような線接触における潤滑状態を詳細にモニタリングできることが示唆された。

#### 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*, Vol. 22, No.1 (2006) 127.
- 2) T. Maruyama and K. Nakano: In Situ Quantification of Oil Film Formation and Breakdown in EHD Contacts, *Tribology Transactions*, Vol. 61, No. 6 (2018) 1057.
- 3) T. Maruyama, M. Maeda and K. Nakano: Lubrication Condition Monitoring of Practical Ball Bearings by Electrical Impedance Method, *Tribology Online*, Vol. 14, No. 5 (2019) 327.
- 4) D. Dowson: *Elastohydrodynamic and Micro-elastohydrodynamic Lubrication*, Vol. 190, No. 2 (1995) 125.

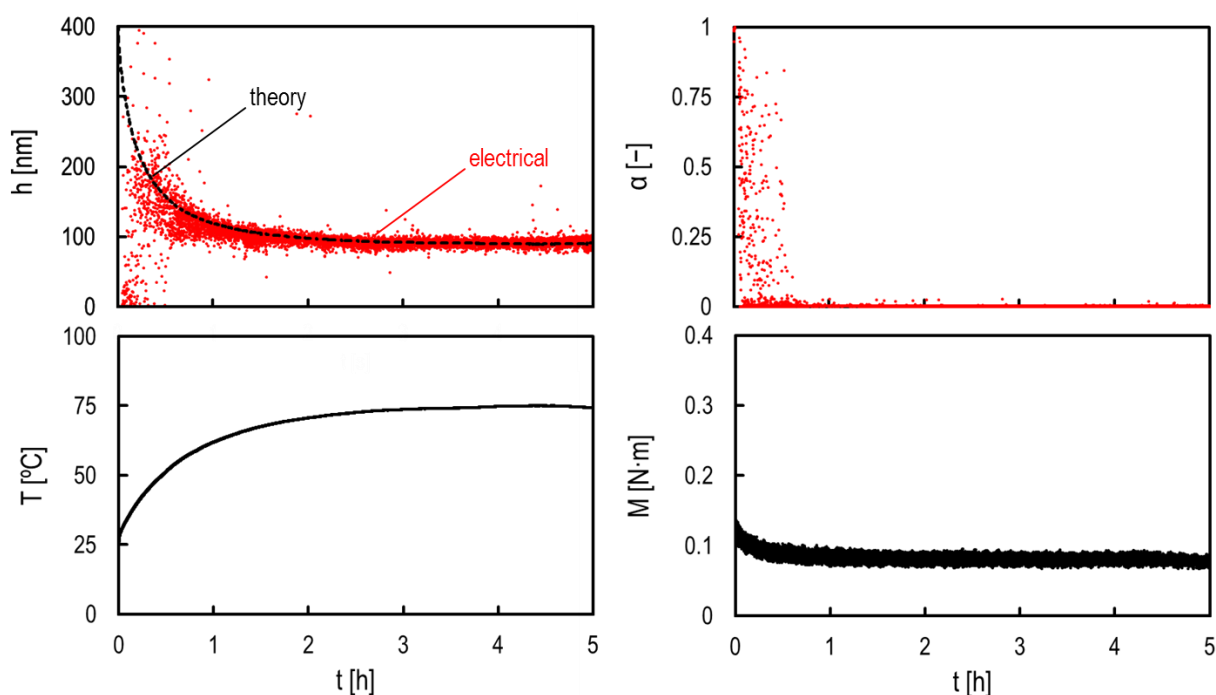


Fig. 2 Time evolutions of measured oil film thickness  $h$  (top left), breakdown ratio  $\alpha$  (top right), lower race temperature  $T$  (bottom left), and bearing torque  $M$  (bottom right); oil: mineral oil (kinematic viscosity at 40°C:  $\nu = 32 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), rotational speed:  $N = 3000 \text{ min}^{-1}$ , and axial load:  $F_a = 1.5 \text{ kN}$ ; red plots in graphs: measured values by EIM; black dashed line in top left graph: theoretical prediction at  $T$  by Ertel-Grubin equation.

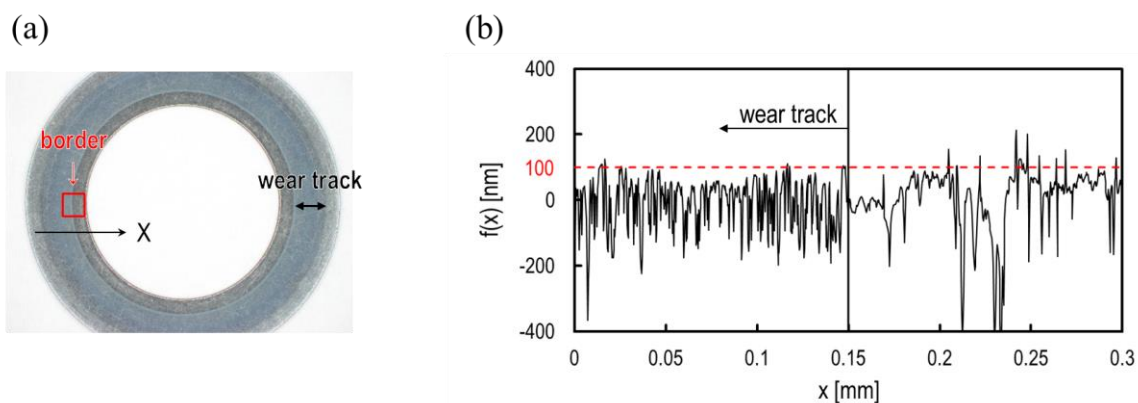


Fig. 3 Observations of the lower race surface after the experiment; (a) photograph of the wear track and (b) surface roughness profile around the border of the wear track; red open square in (a): surface roughness measurement area shown in (b); black vertical line in (b): the border of the wear track; red horizontal dashed line in (b):  $f(x) = 100 \text{ nm}$ .