

## インピーダンス分光法を用いた複数軸受の潤滑状態モニタリング

Lubrication condition monitoring of multiple bearings using impedance spectroscopy

日本精工(株) (正) \*小杉 大智 (正) 岩瀬 駿介 (正) 丸山 泰右 (正) 清水 康之

Daichi Kosugi \*, Shunsuke Iwase\*, Taisuke Maruyama\*, Yasuyuki Shimizu\*

\*NSK Ltd.

## 1. はじめに

近年, SDGs (sustainable development goals) の達成に貢献するため, 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, 潤滑剤の低粘度化・低油量化がトレンドとなっているが, 同時にEHD (elastohydrodynamic) 接触域における油膜破断による軸受破損のリスクも高まる。したがって, 軸受の低トルク化と長寿命化を両立するためには, 油膜モニタリング技術を用いた安定稼働が必要不可欠である。これまで, 丸山らは従来の電気的手法を改良し, 光干渉法と同等な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<sup>1)</sup>)を開発し, 実際の転がり軸受への応用<sup>2)</sup>にも成功している。しかし, 実際の機械は複数の軸受を使用しており, 前述のEIMは全ての軸受のEHD接触域における平均油膜厚さしか測定できないため, 複数の軸受に対して各々の潤滑状態をモニタリングすることはできない。そこで本研究は, 回転軸を介して直列回路を構成した2つの軸受に対して, 交流周波数を掃引する電気インピーダンス分光法(EIS, electrical impedance spectroscopy<sup>3)</sup>)を適用し, それぞれの軸受の油膜挙動を同時に把握できることを見出したので報告する。

## 2. 試験方法

本試験で用いた軸受試験機の模式図について, Fig. 1に示す。粘度が異なるグリースを封入した深溝玉軸受を2個使用し, それぞれの軸受外輪に電極を接続して回転軸を介した直列回路を構成した。試験条件をTable 1に, グリース物性と封入量をTable 2にそれぞれ示す。Figure 2に示す通り, 金属接触部に生じる電気抵抗 $R$ と表面粗さ等の接触域の不均一性を考慮したCPE (constant phase element) の並列回路が2つ直列に接続された等価回路を想定している<sup>4)</sup>。交流周波数を掃引して得られた複素インピーダンスから, Cole-Coleプロット(横軸: 複素インピーダンス実部, 縦軸: 複素インピーダンス虚部)におけるカーブフィッティングを行い, 各々の軸受の回路定数を特定した。得られた軸受の回路定数に対してEIMを適用し, 油膜厚さ $h$ , および油膜の破断率 $\alpha$ を算出した。尚, 確認のために軸受単体の複素インピーダンスも別途それぞれ測定し, 直列回路から予想された単体の複素インピーダンスと一致するか確認した。

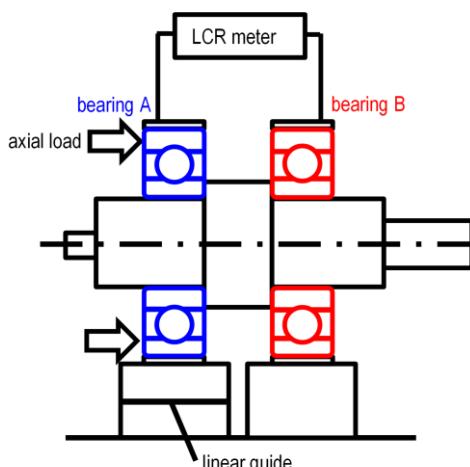


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

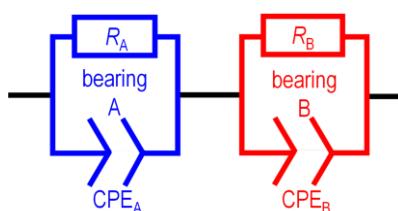


Fig. 2 Equivalent circuit of experiment

Table 1 Test conditions

Bearing	6306
Temperature, °C	35
Rotational speed, min <sup>-1</sup>	500
Axial load, N	436
Radial load, N	0
Maximum contact pressure, GPa	1.0
Alternating voltage, V	0.2
AC frequency, Hz	20-1000000

Table 2 Grease properties

Bearing	A	B
Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s at 40°C	17	411
Pressure-viscosity coefficient, GPa <sup>-1</sup>	11.5	16.2
Relative permittivity	2.1	2.1
Mass, g	3.6	3.6

### 3. 結果と考察

軸受単体、および軸受2つを直列に繋いで測定したCole-Coleプロットについて、Fig. 3に示す。直列に繋いだ測定結果（Fig. 3中の黒丸）に対して、Fig. 2の等価回路を想定したカーブフィッティングを行った結果を図中の黒い実線で示す。このカーブフィッティングにより予想される各々の軸受の複素インピーダンス（Fig. 3中の青、赤の実線）と単体測定の結果（Fig. 3中の青四角、赤三角）がほとんど一致していることがわかる。つまり、本手法は各々の軸受に生じる複素インピーダンスを、直列に繋いだ測定結果から把握できることが示された。さらに、各々の軸受に生じる複素インピーダンスの推定値から、EIMを用いて $h$ 、および $\alpha$ をモニタリングした結果をFig. 4に示す。直列に繋いだ測定結果（Fig. 4中の黒丸）は、単体測定の結果（Fig. 4中の青四角、赤三角）とほぼ一致していた。 $h$ に関しては、理論油膜厚さ $h_{\text{theory}}$ <sup>5)</sup>ともほとんど一致していた。これらの結果より、直列に繋いだ軸受全体の複素インピーダンスから、個々の軸受の潤滑状態を同時にモニタリングできることが示唆された。

### 4. まとめ

直列回路を構成した2つの軸受全体にEISを適用することで、各々の軸受の油膜挙動を同時にモニタリングできることがわかった。つまり、実際の機械に使用されている複数の軸受に対して平均値ではなく、より詳細な潤滑状態監視を実施できることを意味する。

### 文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) V. F. Lvovich: *Impedance Spectroscopy Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc. (2012).
- 4) 板垣：電気化学インピーダンス法 第2版，丸善出版 (2011) 77-79.
- 5) B. J. Hamrock and D. Dowson: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III—Fully Flooded Results, *ASME Journal of lubrication technology*, Vol. 99, No. 2 (1977) 264.

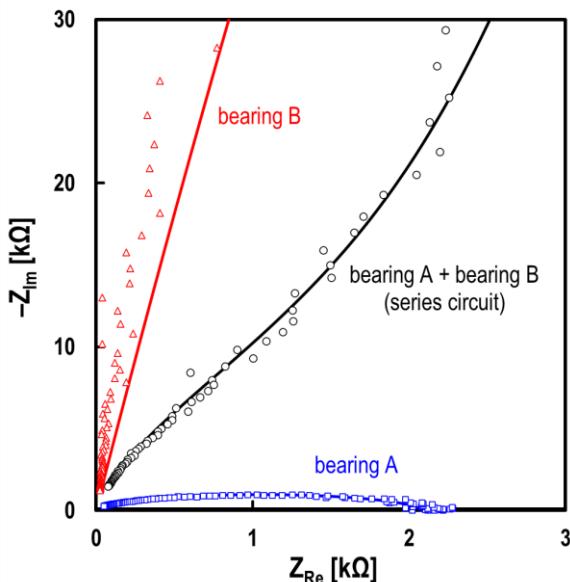


Fig. 3 The result of EIS (Cole-Cole plot); black circles in the graph: experimental value of the series circuit; black line: fitting result of the series circuit; blue squares: experimental value of bearing A; blue line: bearing A part of the fitting result of the series circuit; red triangles: experimental value of bearing B; red line: bearing B part of the fitting result of the series circuit.

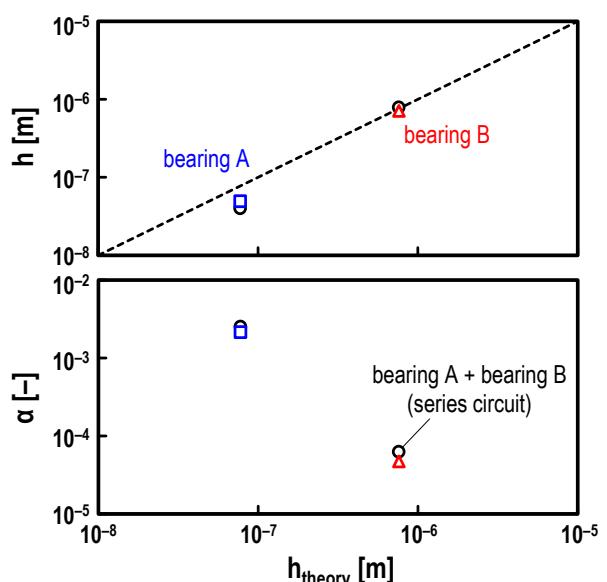


Fig. 4 Experimental values of oil film thickness  $h$  and breakdown ratio  $\alpha$  for AC frequency  $f = 1$  MHz; black circles: bearing A or B part of the fitting result of the series circuit; blue square: experimental value of bearing A; red triangle: experimental value of bearing B; black dashed line: theoretical prediction by Hamrock and Dowson.