

## 転がり軸受の低トルク化と長寿命化の両立によるカーボンニュートラルへの貢献 ～熱回路網法を用いた潤滑剤温度予測～

### Contribution to Carbon Neutrality by Achieving Both Low Torque and Long Life in Rolling Bearings: Prediction of Grease Temperature Using the Thermal Network Method

日本精工（正）\*眞鍋 佳資 （正）前田 成志 （正）丸山 泰右 Science Tokyo（正）桃園 聡

Keisuke Manabe\*, Masayuki Maeda\*, Taisuke Maruyama\*, Satoshi Momozono\*\*

\* NSK Ltd., \*\*Institute of Science Tokyo

#### 1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向け、機械のしゅう動部に使用される転がり軸受にはさらなる低トルク化が求められている。低トルク化は潤滑剤の低粘度化および少油量化によって達成可能であるが、EHD（elastohydrodynamic）接触域における油膜破断のリスクが高まり、軸受寿命の短縮によって環境負荷が増大する可能性がある。したがって、低トルク化と長寿命化の両立が不可欠である。潤滑剤は軸受トルクによる発熱で温度が上昇し、蒸発や酸化が促進されて粘度が増加する可能性がある。高粘度化が進行すると流動性が損なわれるため枯渇潤滑となり、最終的には油膜が破断する。油膜が破断するまでの時間を潤滑寿命と定義し、上記過程を数式化することで潤滑寿命の定量的評価を目指す。本報では、軸受トルクに起因する温度上昇の予測式を導出するため、簡易的な熱解析手法である熱回路網法<sup>1)</sup>を用いた潤滑剤温度予測を行ったので報告する。

#### 2. 理論

本報で潤滑剤温度の推定に用いた熱回路網法とは、熱の流れと電気の流れの類似性に着目し、伝熱経路を熱抵抗および熱容量で構成される熱回路に置き換えて温度を算出する手法である。対象物を節点でモデル化し、熱抵抗と熱容量に基づく熱収支方程式を解くことで温度分布を算出する。潤滑寿命を推定するには構成要素の繰り返し計算が必要となるため、計算負荷の軽い熱回路網法は適した手法である。

#### 3. 試験方法および計算方法

本研究に使用した軸受試験機の概略図を Fig.1 に示す。深溝玉軸受 6305 を 2 個用いて試験を実施し、軸受トルク  $M$  [N・m] および軸受外輪の温度  $T$  [°C] を測定した。さらに、電気インピーダンス法<sup>2)</sup> (EIM, electrical impedance method) を用いて、油膜厚さ  $h$  [m] および油膜破断率  $\alpha$  [-] を同時に測定した。なお、これら測定結果 ( $M, T, h, \alpha$ ) は試験軸受 2 個の平均値である。試験条件を Table1 に示す。室温下で試験軸受にアキシヤル荷重を負荷し、回転数を 40 分間隔で段階的に増加させるステップ試験 (500~13000 min<sup>-1</sup>, 全 12 ステップ) を実施した。潤滑剤には Table 2 に示すグリースを用い、軸受の転走面に 3.4 g を封入した。測定したトルクと回転数から発熱量を算出し、熱回路の入力とした。また、空気温度を基準温度とした。計算により得られた外輪温度と測定した外輪温度の比較を行った。さらに、実験結果から得られた外輪温度、および計算から得られた潤滑剤温度 (すなわちグリース温度) を用いて理論油膜厚さ<sup>3)</sup> を算出し、EIM によって測定された油膜厚さとの比較も実施した。

#### 4. 結果と考察

温度測定に関する試験結果を Fig. 2 右上に示す。実測された外輪温度  $T_{\text{outer\_test}}$  (黒プロット) と熱回路網法により算出された外輪温度  $T_{\text{outer}}$  (青プロット) は各ステップの終了時点で温度差が 4°C 以内であり、概ね一致していることが確認された。また、熱回路網法で算出されたグリース温度  $T_{\text{grease}}$  (赤プロット) は外輪温度  $T_{\text{outer}}$  よりも高く、回転数の増加に伴ってその差が顕著になる傾向が見られた。油膜厚さに関する試験結果を Fig. 2 右下に示す。実測された外輪温度を EHD 接触域入口温度として算出した理論油膜厚さ  $h_{\text{outer\_test}}$  (青プロット) は EIM で測定された油膜厚さ  $h_{\text{EIM}}$  (黒プロット) よりも大きな値を示した。一方、グリース温度を入口温度として算出した理論油膜厚さ  $h_{\text{grease}}$  (赤プロット) は  $h_{\text{outer\_test}}$  よりも  $h_{\text{EIM}}$  に近い値を示しており、グリース温度を用いた方が実測値に近い結果となった。第 5 ステップ (1680min<sup>-1</sup>) 以降では  $h_{\text{EIM}}$  が  $h_{\text{grease}}$  よりも低い値となり、潤滑剤の供給不足によって生じる枯渇潤滑を示唆する結果である。続いて、油膜破断率  $\alpha$  の測定結果について Fig. 2 左下に示す。第 6 ステップ (2190 min<sup>-1</sup>) 以降  $\alpha$  が上昇しており、油膜破断が示唆された。また、Fig.2 左上に示す軸受トルク  $M$  は、第 5 ステップ以降で時間とともに急激に低下し、回転数が小さい第 4 ステップ (1185 min<sup>-1</sup>) よりも低い値が得られた。以上の結果から、第 5 ステップ以降の中高速域では枯渇潤滑が生じており、油膜厚さを用いた潤滑剤温度予測の妥当性を検証することは困難であった。一方で、第 5 ステップまでの十分潤滑と考えられる速度域では、グリース温度の計算結果が油膜厚さの実測値と良好に一致しており、本研究で仮定した潤滑剤温度予測のモデルについて妥当性が確認された。

## 5. まとめ

本研究では、潤滑寿命を予測する上で必要な潤滑剤温度予測式に着目し、熱回路網法を用いた解析を行った。外輪温度の実測値との比較により、潤滑条件にかかわらず温度予測の妥当性が確認された。一方、油膜厚さの測定結果より、高速度域では枯渇潤滑が生じたため、高速度域におけるグリース温度予測精度について検証することができなかった。今後は有限要素法など、より詳細なシミュレーションを使った解析結果と比較して温度予測精度について確認する予定である。

## 文献

- 1) J. Takabi and M. M. Khonsari: Experimental testing and thermal analysis of ball bearings, Tribology International, 60, (2013) 93.
- 2) T. Maruyama, M. Maeda and K. Nakano: Lubrication Condition Monitoring of Practical Ball Bearings by Electrical Impedance Method, Tribology Online, 14, 5 (2019) 327.
- 3) B. J. Hamrock, and D. Dowson: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III—Fully Flooded Results, ASME Journal of lubrication technology, 99, 2 (1977) 264.

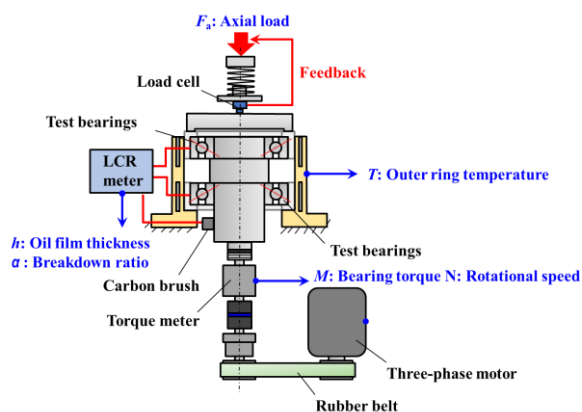


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Test conditions

Test bearing	6305
Temperature, °C	25
Rotational speed, min <sup>-1</sup>	500-13000
Axial load, N	1000
Radial load, N	0
Maximum contact pressure, GPa	1.45
Alternating voltage, V	0.2
AC frequency, MHz	1

Table 2 Grease properties

Base oil	PAO
Thickener	Urea
Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s at 40°C	46
Worked penetration	243

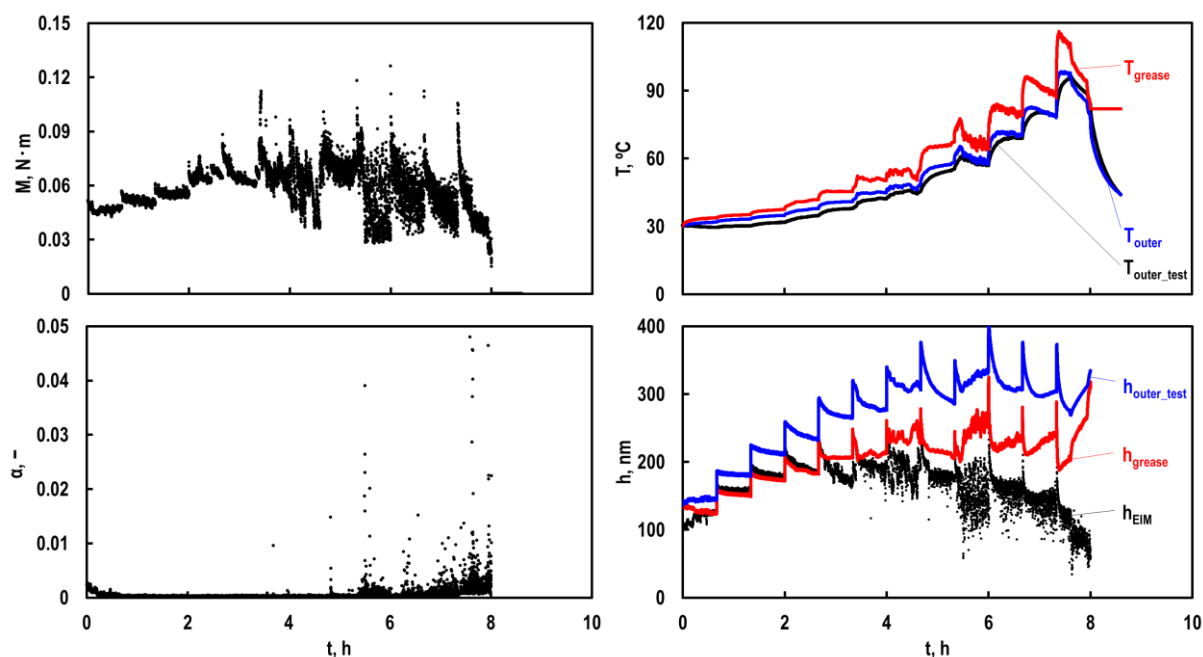


Fig. 2 Time evolutions of bearing torque  $M$  (top left), temperature  $T$  (top right), breakdown ratio  $\alpha$  (bottom left) and oil film thickness  $h$  (bottom right); black plots in graphs: measured values; blue and red plots in graphs: theoretical values.