

玉軸受の保持器形状が EHD 接触域における潤滑状態に与える影響

Influence of Cage Shapes on Lubrication Condition in EHD Contacts of Ball Bearings

NSK (正) *松崎 康男 (正) 真鍋 佳資 (正) 丸山 泰右 協同油脂 (正) 野木 高

東工大 (正) 桃園 聰 名工大 (正) 前川 覚 (正) 糸魚川 文広

Yasuo Matsuzaki*, Keisuke Manabe*, Taisuke Maruyama*, Takashi Nogi**,

Satoshi Momozono***, Satoru Maegawa****, Fumihiro Itoigawa****

*NSK Ltd., **Kyodo Yushi Co., Ltd., ***Tokyo Institute of Technology, ****Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

転がり軸受は、内外輪と転動体、および保持器から構成され、様々な機械の回転部を支持する部品である。軸受にかかる荷重は内外輪と転動体の EHD (elastohydrodynamic) 接触域が支持しており、接触域に形成される油膜厚さは軸受トルクや焼付き寿命と深く関係するため、油膜厚さの予測は軸受を設計する上で非常に重要である。一般的に、転がり軸受の油膜厚さは Hamrock-Dowson の式¹⁾ (以下、H-D 式) より求められるが、十分潤滑を前提としている。接触域に流入する油量が少ないと、すなわち入口メニスカス長さが短い場合は枯渇潤滑となり、油膜厚さが H-D 式より薄くなる。野木ら²⁾は、サイドバンドからの再流動を考慮した EHL (elastohydrodynamic lubrication) 解析により入口メニスカス長さを含むメニスカス形状を計算し、ボールオンディスク試験の結果と一致することを示した。実際の転がり軸受には保持器が存在しており、転動体に形成したサイドバンドに影響すると考えられるが、保持器形状が油膜厚さに与える影響については分かっていない。丸山ら³⁾は、実際の軸受における油膜厚さを測定できる電気インピーダンス法 (EIM, electrical impedance method) を開発しており、本手法は軸受の枯渇潤滑を理解する上で非常に有効な手段である。そこで本研究では、形状の異なる 3 種類の保持器を用いて微量の油を封入した深溝玉軸受における油膜厚さについて EIM を用いて測定し、保持器の種類、および潤滑剤封入量と油膜厚さの関係について調査した。

2. 実験方法

Figure 1 は、実験装置の概略図である。本研究では、合成油 PAO (poly- α -olefin oil) を微量封入した深溝玉軸受 (6306) を用いて純アキシャル荷重条件下、かつ内輪回転で実験を行った。実験中、EIM を用いて油膜厚さ h [m] を測定した。試験条件、および試験に用いた潤滑剤の物性を Table 1, Table 2 に示す。保持器は一般に使用される冠型保持器、打抜き保持器に加えて、玉を 2 枚のプレートで挟むプレート型保持器 (Fig. 2 参照) を使用した。

3. 実験結果と考察

Figure 3 は、本研究で行った軸受試験結果であり、図中の破線は H-D 式から算出した理論油膜厚さを示す。封入量が 34 mg の場合、冠型保持器は理論値よりも薄いが、打抜き、およびプレート型保持器は理論値とほぼ一致した。冠型保持器は、転動体に付着した潤滑油をかき取る構造をしているので、他の保持器形状に比べて油膜厚さが薄くなつたと思われる。一方、プレート型保持器を用いても潤滑剤封入量を少なくすることで枯渇潤滑が生じることがわかった。かき取る構造が無いにも関わらず、このような結果が得られた理由について以下に考察する。

まず、EIM を用いて得られる油膜厚さ h_{EIM} [m] から計算される無次元入口メニスカス長さ m_{EIM} [-] と、野木ら²⁾が示した理論値 m_{Nogi} [-] を比較した。尚、 m_{EIM} は下式(1)より求められ、式中の $h_{\text{c}, \text{F}}$ [m] は H-D 式で表される中央油膜厚さ、 m^* [-] は十分潤滑となる際の無次元限界メニスカス長さである⁴⁾。

$$\frac{h_{\text{EIM}}}{h_{\text{c}, \text{F}}} = \left(\frac{m_{\text{EIM}} - 1}{m^* - 1} \right)^{0.29} \quad (1)$$

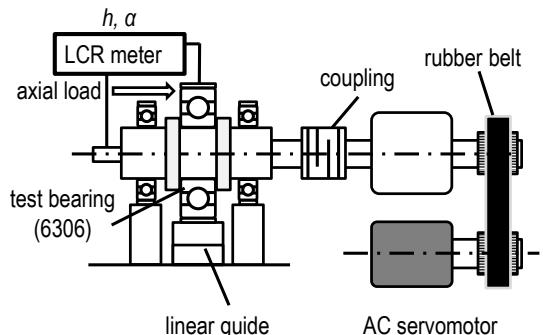


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Test conditions

Rotational speed, min ⁻¹	600
Axial load, N	436
Radial load, N	0
Maximum contact pressure, GPa	1.0
Alternating voltage, V	0.2
AC frequency, MHz	1.0

Table 2 Lubricant properties

Base Oil	PAO
Kinematic viscosity, mm ² /s at 40°C	130
Density, g/cm ³ at 25°C	0.85
Relative permittivity at 1 MHz	2.1
Oil amount, mg	0.4, 0.9, 34

Figure 4 は、潤滑剤封入量 W [g] と m_{EIM} の関係を示しており、図中の破線は m^* を示す。 $W = 0.4$ mg のとき、 $m_{EIM} \approx 1$ となった。尚、 m_{nogi} は非常に小さな値 ($m_{nogi} \approx 2.5 \times 10^{-5}$) であったため、Fig. 4 に図示していない。このような結果が得られた理由として、野木のモデルでは EHD 接触域後方に形成されるサイドバンドがそのまま接触域前方に流入すると仮定して供給油量を計算していることが挙げられる。アキシャル荷重やモーメント荷重を受けて接触角が生じる場合、1 つの転動体上に 2 本のヘルツトラックが生じると考えられる。つまり、打抜き保持器やプレート型保持器を用いた転がり軸受は、転動体を介して内外輪の接触域後方に形成されるサイドバンドを互いに踏み合うことで枯渢潤滑となることを回避している可能性がある（冠型保持器は、サイドバンドをかき取ることで枯渢潤滑が生じやすいと考えられる）。

そこで、内外輪の接触域におけるサイドバンド位置のずれが、メニスカス長さに及ぼす影響について確認した。野木の解析手法⁵⁾を用いて、サイドバンド位置を転動体回転方向と垂直方向に接触半径分ずらした際に生じるメニスカス形状の数値計算結果を Fig. 5 に示す。サイドバンドの中心がずれることで、入口メニスカス長さが十分長くなることを確認した。

4. まとめ

本研究では、形状の異なる 3 種類の保持器を用いて潤滑剤を微量封入した際の EHD 接触域における油膜厚さを測定した。その結果、同じ封入量である場合、冠型保持器は打抜き保持器、およびプレート型保持器に比べて油膜が薄くなることがわかった。さらに、プレート型保持器を用いても封入量を少なくすることで枯渢潤滑が生じることがわかった。測定した油膜厚さから逆算した無次元入口メニスカス長さは枯渢潤滑における理論メニスカス長さよりも十分長く、軸受内外輪の EHD 接触域後方に形成されるサイドバンドの中心が転動体上でずれていることが示唆された。

文献

- 1) B. J. Hamrock and D. Dowson: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III—Fully Flooded Results, *Transactions of the ASME: Journal of Lubrication Technology*, 99, 2 (1977) 264.
- 2) T. Nogi, H. Shiomi and N. Matsuoka: Starved Elastohydrodynamic Lubrication with Reflow in Elliptical Contacts, *ASME: Journal of Tribology*, 140, 1 (2018) 011501.
- 3) T. Maruyama, M. Maeda and K. Nakano: Lubrication Condition Monitoring of Practical Ball Bearings by Electrical Impedance Method, *Tribology Online*, 14, 5 (2019) 327.
- 4) B. J. Hamrock and D. Dowson: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part IV—Starvation Results, *Transactions of the ASME: Journal of Lubrication Technology*, 99, 1 (1977) 15.
- 5) T. Nogi: An Analysis of Starved EHL Point Contacts with Reflow, *Tribology Online*, 10, 1 (2015) 64.

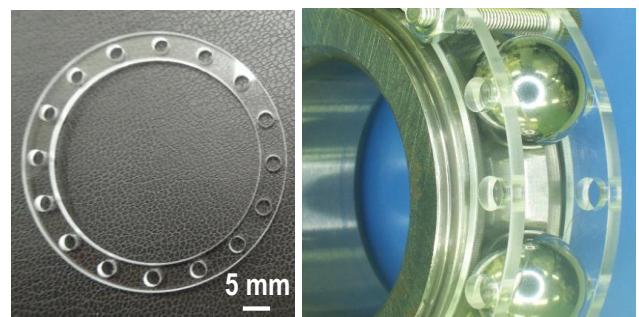


Fig. 2 Photographs of plate type cage.

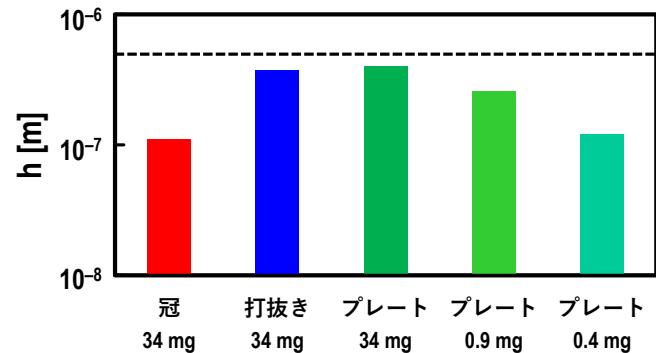


Fig. 3 Measured values of oil film thickness h_{EIM} varying cage types and oil amounts; broken line in graph: theoretical value $h_{c, F}$ by Hamrock-Dowson equation¹⁾.

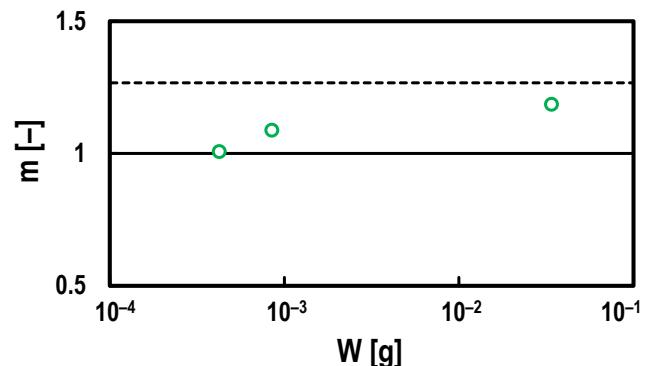


Fig. 4 Measured values of non-dimensional inlet meniscus length m_{EIM} varying oil amount W using plate type cage; broken line in graph: theoretical value of non-dimensional inlet meniscus length m^* at the boundary between fully flooded and starved conditions⁴⁾.

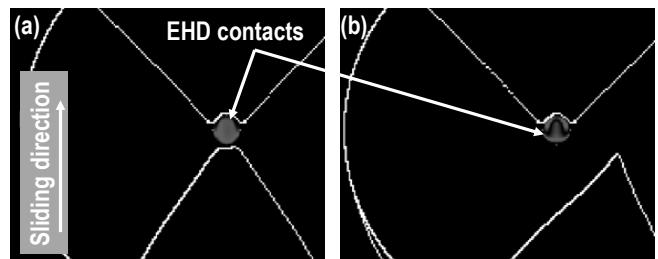


Fig. 5 Analytical results of the meniscus using (a) original side band and (b) shifted side band.