

高速すべり軸受の油膜幅縮小と油膜厚さ低減がブシュ駆動トルクに及ぼす影響

Effect of Reduction of Oil Film Width and Decrease in Oil Film Thickness on Bush Driving Torque in High Speed Journal Bearings

九工大・情工（学）*上月 康史 九工大・情工（正）畠中 清史

Yasushi Kozuki*, Kiyoshi Hatakenaka*

*Kyushu Institute of Technology

1. はじめに

浮動ブシュ軸受 (Fig. 1) は、最高回転速度が数十万 rpm に達する小型の高速回転機械を支えるすべり軸受として多用されている。この軸受は、軸受とジャーナルとの間に薄肉円筒状のブシュを挿入した構造をしている。ジャーナルが回転すると、ブシュは軸受すきま内で浮動し、回転する。ジャーナルは浮動ブシュ内外のすきま内に形成される直列二重の油膜で支えられる。浮動ブシュの回転速度は、浮動ブシュ内外の油膜トルクが釣り合うように定まる。

浮動ブシュ軸受では、軸受油膜の不安定化作用に起因するオイルホイップが生じる。ただし、オイルホイップは、ジャーナル回転速度を上昇させると、消滅することがある^{1,2)}。このとき浮動ブシュの回転速度は頭打ちになる。

著者らは、この特異な現象を合理的に説明する理論モデルの予測精度改善に向け、実現現象の解明に取り組んでいる。これまでに、高速浮動ブシュ軸受の内側油膜を模擬した真円軸受の実験装置を用いて、油膜幅の縮小現象が生じることを観察実験により明らかにし³⁾、また、軸受ブシュに作用する油膜の粘性トルク（以下、ブシュ駆動トルク）の測定実験を行った⁴⁾。しかし、両実験結果の対応付けはできていない。本報では、ブシュ駆動トルクの測定結果が目視（カメラ撮影）による油膜観察結果のみでは説明できないことについて考察を行った。

2. 実験

2.1 実験装置の概略

本実験装置は実験装置本体、駆動系、給排油系、電気系、計測系から構成される (Fig. 2)。AC モータの回転速度はプーリーおよびベルトを介して 2 段階で増速し、転がり軸受で支えた供試軸に伝える。供試軸の先端部分がジャーナルであり、供試軸受はここに装着する。本実験装置の主な仕様は次の通りである。[1] 供試軸の最高回転速度は 50 krpm である、[2] 供試軸の回転速度は最高回転速度までの範囲で容易に調節できる、[3] 軸回転速度の測定が可能である、[4] 油膜を観察（目視）できる、[5] ブシュ駆動トルクを測定できる。

供試軸受の仕様を Table 1 に示す。アクリル樹脂製の真円軸受は、幅中央部に幅 8 mm の全円周油溝が設けてあり、その左右に各々幅 10 mm の全周油膜が形成されるようにしてある。軸受平均半径すきまは、大きめの値（すきま比は公称値で 8/1000）に設計²⁾した。

供試軸受はカートリッジ状であり、スリーブ状の真円軸受を間に挟んだつば付きの部品 2 個を両側から 3 本のボルトで締結する構造となっている (Fig. 3)。つば付きの部品は各々をハウジングに挿入する。ハウジングとの間のすきまに潤滑油を供給してスクイズフィルムダンパとして機能させ、供試軸受の振動エネルギーを減衰させる。スクイズフィルムダンパの直径すきまは 100 μm とした。ブシュ駆動トルクは、締結ボルトの 1 本に装着したトルクアーム（棒状部品）をロードセルに取り付けて測定した。

2.2 実験方法

本報では、1 krpm からジャーナル回転速度を 1 krpm ずつ上昇させた。油膜の観察ならびにブシュ駆動トルクの測定は、回転速度を一定に保った状態で並行して行った。供試軸受には、室温中 (21.2 ~ 27.6 $^{\circ}\text{C}$) に放置したオイルタ

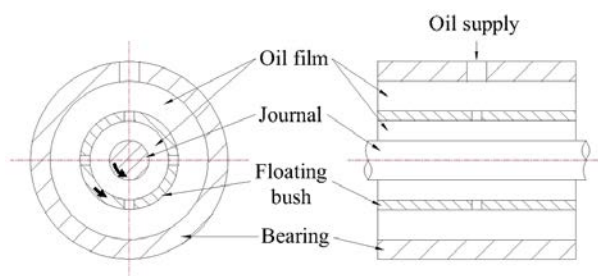


Fig. 1 Floating bush journal bearing

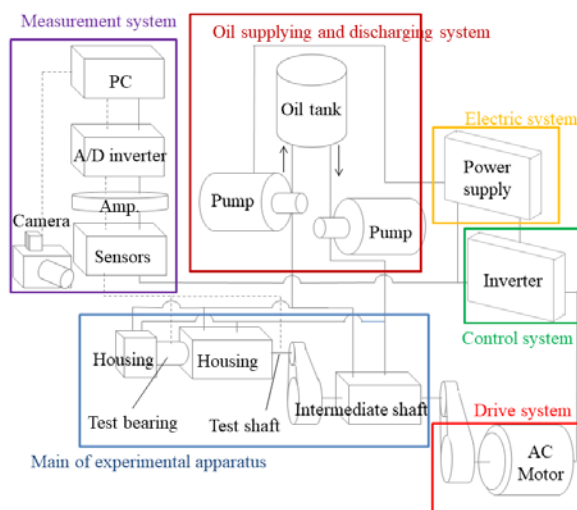


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Specification of test bearing

Journal diameter	20 mm
Bearing width	10 mm \times 2
Mean radial clearance	80 μm
Oil groove (width \times depth)	8 mm \times 1 mm
Material	Acrylic resin

ンク内の潤滑油（粘度グレード VG32 の ATF）を電動ポンプにより供給した．給油温度の制御は行っていない．給油圧力を 15, 10, 5 kPa に設定した実験を，それぞれケース 1, 2, 3 とする．

3. 実験結果および考察

油膜観察実験の結果をケース 1 について Fig. 4 に示す．中央部の帯状に見える赤色箇所は，潤滑油で満たされた全円周油溝である．油溝の左側は供試軸の先端側に，右側はモータ側に対応する．供試軸は下から上に向けて回転する．軸受すきまは数十 μm 程度の厚みであるため，ここを流れる潤滑油は，明瞭な赤色ではなく，やや曇って見える．気体がすきま部分を占める場合は，ジャーナル表面の金属光沢のため，やや明るく見える．図中の青線は潤滑油と気体との境目を示す．

6 krpm までのジャーナル回転速度では軸受すきま全体を潤滑油が満たしていたが，7 krpm になると供試軸先端側の軸受すきま内への気体の侵入が始まり，軸受端（つば付き部品との境目）の付近で金属光沢が見えるようになった（Fig. 4(a)）．気体の侵入は回転速度の上昇とともに徐々に進み，13 krpm ではすきま幅の半分程度を全周にわたり気体が占めるようになった（Fig. 4(b)）．モータ側の軸受すきまへの気体の侵入は 13 krpm から始まった．こちら側への侵入も回転速度の上昇とともに徐々に進んだ．ところが 18 krpm になった時点で全円周油溝が気泡の発生にともなう白濁を始め，この気泡から間欠的に分離した気体が幅の狭い環状のすじとなって軸受すきま内を移動し，軸受端から侵入した気体と合体した（Fig. 4(c)）．この回転速度以上ではブシュ駆動トルクの測定値が回転前の値（0 Nm）を下回ったため，見かけ上，十分な幅の油膜が残存していたが，実験を終了することにした．ケース 2 と 3 でも，同様に，全円周油溝内に気泡が発生した時点で実験を終了した．終了時のジャーナル回転速度は，ケース 1, 2, 3 でそれぞれ 17, 15, 8 krpm であり，給油圧力が低いほど小さくなった．

次は，ジャーナル回転速度とブシュ駆動トルクとの関係を Fig. 5 に示す．記号 ■, ▲, ● はそれぞれのケースで実施した実験値の平均であり，エラーバーにより測定値の最小値から最大値までを示す．実線はペトロフの式⁵⁾により算出した同心油膜のブシュ駆動トルクの理論値を表す．

ブシュ駆動トルクの測定値は，軸受すきま内への気体の侵入が始まるまでは，ジャーナルの偏心にともなう円周方向の油膜圧力こう配の寄与があるために，理論値を上回っている．気体の侵入が始まると，見かけ上，軸受幅全体にわたり油膜が存在していても，ブシュ駆動トルクは急減する．急減後のブシュ駆動トルクは，回転速度の上昇とともに徐々に増加するものの，やがて頭打ちとなる．

理論モデル^{6, 7)}によると，給油圧力を低く設定した浮動ブシュ軸受で支えたジャーナルを高速回転する場合，軸受端から油膜内への外気流入が，ジャーナル表面付近において，まず，生じる．これにともない，円周方向の油膜速度成分の油膜厚さ方向こう配が低減し，ブシュ駆動トルクは低下する．ブシュ駆動トルクの測定結果は，この理論予測結果が定性的に妥当であることを示唆するが，本報では軸受外部からのカメラ撮影による油膜観察を行ったに過ぎないため，ジャーナル表面付近への外気流入の有無は評価できない．今後は，軸受すきま内で潤滑油と気体が混在する状況を，例えば，光学的な手法を導入して検討する必要があると考える．

4. まとめ

本報では，高速浮動ブシュ軸受の内側油膜を模擬した実験装置を用いて，ブシュ駆動トルクの測定と油膜の観察を並行して行い，給油圧力が低いほど軸受すきま内への気体流入が進行しやすいことを示した．ブシュ駆動トルクの低下は，従来と同様，見かけ上の油膜幅が縮小することにより生じることに加え，理論モデル^{6, 7)}が予測するようなジャーナル表面付近への気体流入にともなう油膜速度こう配の低下が関与する可能性が新たに示唆された．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 18K03909 の助成を受けて行われた．

参考文献

- 1) 多々良，日本機械学会誌，72，610 (1969) 1564.
- 2) 畠中・梁井，トライボロジスト，53，8 (2008) 536.
- 3) 上月・畠中，日本機械学会九州支部第 74 期総会・講演会講演論文集，(2021) C24.
- 4) 上月・畠中，日本機械学会九州支部第 75 期総会・講演会講演論文集，(2022) F14.
- 5) 日本トライボロジー学会，トライボロジー辞典，養賢堂，(1995) 238.
- 6) Hatakenaka, K., et al., *ASME Journal of Tribology*, 124, 3 (2002) 494.
- 7) 畠中ら，トライボロジスト，53，9 (2008) 612.



Fig. 3 Cartridge-type test bearing

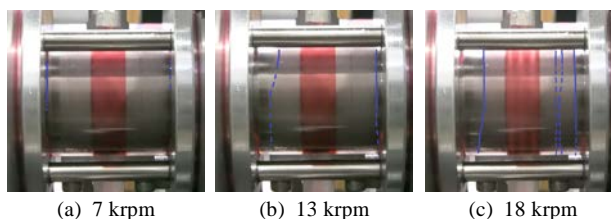


Fig. 4 Appearance of oil film observed for Case 1 ($p_{\text{sup}} = 15 \text{ kPa}$)

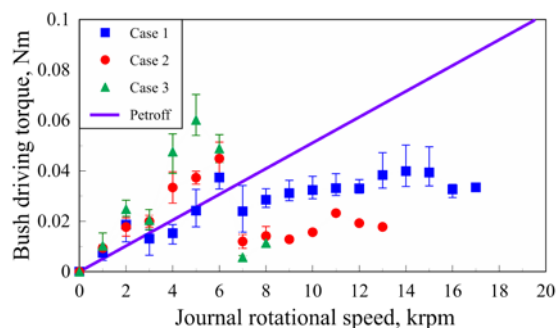


Fig. 5 Variation of bush driving torque with journal rotational speed