

混合潤滑状態におけるジャーナル軸受の摩擦予測モデルの開発

Development of a model to predict friction in journal bearings under mixed lubrication condition

名工大（学）*小西 洸太郎 名工大（正）前川 寛 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）糸魚川 文広

Kotaro Konishi*, Satoru Maegawa*, LIU Xiaoxu*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. 緒言

混合潤滑域において適切ななじみを行った摺動面では、突起頭頂部のみが摩耗することで、プラトー表面構造（平滑なプラトー部と比較的深い谷部によって形成される複合表面構造）が形成される。プラトー表面構造の特徴として、表面内に2層の異なる粗さ構造（それぞれの層において高さ分布が Gaussian 分布を示す粗さが存在する）を有することから Bi-Gaussian 粗さ分布とも呼ばれている。著者らの研究グループでは、この Bi-Gaussian 粗さ分布を簡便に評価でき、摩耗の変化にともなう粗さ変化を一つのパラメータ（例えばプラトー率）の変化で表現できる接触モデルを開発した。同モデルを用いることで、摩耗によって刻一刻と変化する表面粗さの影響を考慮した摺動面の FEM モデルの構築が可能となる。

そこで本稿では、摩耗による形状変化と粗さ変化を考慮したジャーナル軸受 FEM モデルの開発を最終ゴールとしたうえで、ファーストステップとして前述の Bi-Gaussian 粗さモデルをジャーナル軸受 FEM モデルに実装した。プラトー率をパラメータとした数値シミュレーションを行い、混合潤滑域での摩擦特性予測を行った結果を下記に示す。

2. Bi-Gaussian 粗さモデルの概要

Figure 1 に本研究で扱うプラトーモデルの概要を示す。同図は、初期の粗さが摩耗の進行により突起がトランケートされ、プラトー部が形成される様子を示している。また、プラトー表面にも Gaussian 分布の粗さが形成されている。なお、プラトー部の粗さは初期の粗さと比べて十分小さいものとする。なお、Bi-Gaussian 粗さモデルの詳細については参考文献¹⁾に詳しく記載されている。

流体潤滑特性は、Patir-Cheng の平均流モデルに基づき修正レイノルズ方程式を解くことで油膜圧力と油膜厚さを算出する。初期の摩耗深さ H_{ave} を定義すれば、プラトー部の接触面積率基準位置からのプラトー表面高さ Z_{wear} 、平均隙間 h_{ave} およびプラトー部の平均隙間 h_{pla} 、プラトー面積率 R_{eq} を同定でき、接触面に加わる接触応力を計算できる。

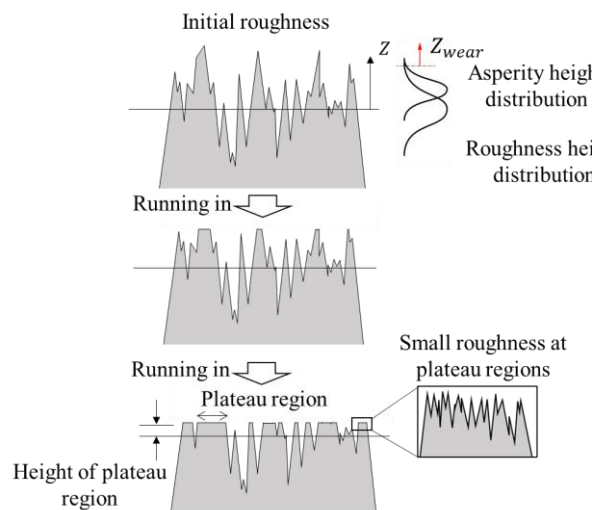


Fig.1 Plateau model overview

3. 計算モデルの概要

3.1 解析方法

Figure 2 と 3 に、ジャーナル軸受にプラトーモデルを実装したモデルの概略図を示す。垂直荷重 W のもとでジャーナルは回転数 N [rpm] で回転している。混合潤滑域における固体接触力および油膜圧力と油膜厚さは、プラトーモデル（Bi-Gaussian 粗さモデル）によって算出する。油膜圧力が高い領域では軸受の弾性変形を考慮する必要があり、弾性変形を考慮した油膜厚さとして次式を用いた²⁾。

$$h_{ela} = h + \frac{pt}{E}(1 - \nu^2) \quad (1)$$

ここで、 h ：幾何学的に決定される油膜厚さに粗さの平均隙間を加えて実効油膜厚さ、 E ：軸受のヤング率、 t ：軸受厚さ、 ν ：軸受のポアソン比である。偏心率が小さい時は、流体潤滑域となりジャーナルに働く荷重が流体圧力 P_{fluid} の積分値とつりあっている。流体圧力の摩擦力は以下の式で表される。Patir-Cheng の粗さモデルによるジャーナルに働く流体摩擦係数 $F_{f-fluid}$ はせん断応力の修正係数（ ϕ_f , ϕ_{fs} , ϕ_{fp} ）を用いて以下のように表せる。

$$F_{f-fluid} = \int_A \left((\phi_f + \phi_{fs}) \frac{\eta U}{h} + \phi_{fp} \frac{h_{ela}}{2R} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) dA \quad (2)$$

混合潤滑域では、油膜圧力の積分値と固体接触圧力 $F_{contact}$ の積分値の和が外力（荷重）とつりあうように油膜厚さが決定される。混合潤滑域における固体接触圧力は、プラトー部の粗さを GT（Greenwood-Tripp）モデル³⁾によりモデル化することで以下のように表せる⁴⁾。

$$P_{contact} = \begin{cases} 4.4086 \times 10^{-5} (4 - H_{dim}) \frac{15\sqrt{2}\pi}{16} (\sigma_{pla}\beta_{pla}\eta_{pla})^2 E \sqrt{\frac{\sigma_{pla}}{\beta_{pla}}} & (H_{dim} \leq 4) \\ 0 & (H_{dim} > 4) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、各パラメータは σ_{pla} (プラトー部の粗さ高さ分布の標準偏差)、 β_{pla} (プラトー部の曲率半径)、 α_{pla} (単位面積当たりの突起数)、 h_{pla} はプラトー部の平均隙間、 H_{dim} は h_{pla}/α_{pla} である。

3.2 解析条件

Table 1 に解析条件を示す。ジャーナルと軸受の表面粗さは同じとする。初期の表面粗さは R_a で $1\ \mu\text{m}$ 、プラトー部の表面粗さは $0.2\ \mu\text{m}$ とした。垂直荷重 W は $5000\ \text{N}$ とし、回転数を $1\ \text{rps}$ から $1000\ \text{rps}$ まで変化させて流体潤滑域から混合潤滑域までの摩擦力を計算した。また、境界潤滑域におけるクーロン摩擦係数は 0.1 とした。

Normal load, [N]	5000
Number of revolutions, [rps]	1-1000
Friction coefficient at solid contact region	0.1

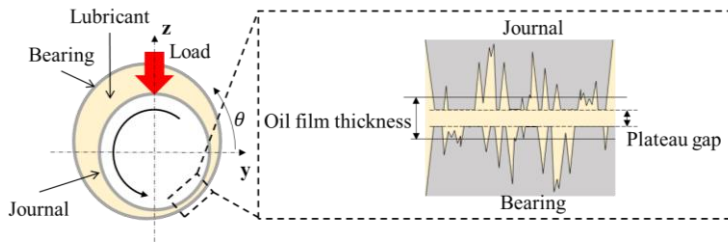


Fig.2 Journal bearing model

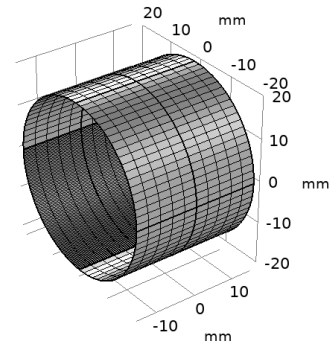


Fig.3 Geometry of analytical model

4. 結果および考察

Figure 4 に得られたストライベック線図を示す。横軸は軸受定数 (ゾンマーフェルト数)、縦軸は摩擦係数である。同図から、プラトー部の面積 R_{eq} が大きい (初期粗さからの摩擦耗量が多い) ほど、混合潤滑域における摩擦係数が低減していることがわかる。参考文献¹⁾で示す通り、摩擦耗が Archard の摩擦則に従うものとして、かつ摩擦係数 k が既知の場合においては、すべり距離 (すべり時間) の変化にともないストライベック線図がどのように変化するかを定量的に予測することが可能である。本報ではジャーナルと軸受の両方に同じ粗さが均一に広がっていると仮定を置いている。本モデルを拡張すれば、例えば局所的に摩擦耗が生じて軸受形状および粗さが変化するような現象においてもストライベック線図の数値予測が可能となる。

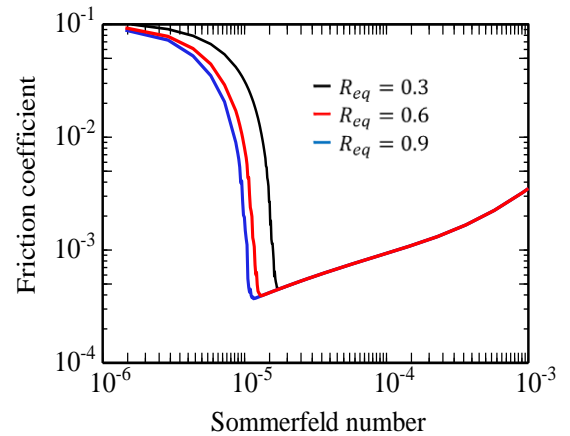


Fig.4 Stribeck curve

5. 結言

本研究では、ジャーナル軸受の表面粗さをラトーモデル (Bi-Gaussian 粗さモデル) で表現することで、混合潤滑域における摩擦特性の数値予測を行った。現時点では摩擦耗量を一定として摩擦耗が進行しない状態を計算しているが、今後は Archard の摩擦耗則を実装することで、時間発展にともなう摩擦耗の進展を予測可能な数値シミュレーションモデルの開発を行う予定である。

文献

- 1) 前川, 糸魚川: Bi-Gaussian 粗さ分布モデルに基づく摩擦面なじみ過程の数値シミュレーション, 機素潤滑設計部門講演会講演論文集, 20, (2021)
- 2) H.Guo, J.Bao, S.Zhang and M.Shi: Experimental and numerical study on mixed lubrication performance of journal bearing considering misalignment and thermal effect, Lubricants, 10 (2022) 262
- 3) J.A. Greenwood, and T. Tripp: The contact of two nominally flat rough surfaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 185 (1970) 625
- 4) N.Patir, H.Cheng: Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces: Trans. ASME. Journal of Lubrication Technology, 101 (1979) 220