

# 非ガウス表面粗さを考慮した Partial EHL 解析による混合潤滑状態のシミュレーション (第2報)

Mixed lubrication simulation using partial EHL analysis considering non-Gaussian surface roughness (Part 2)

NSK (正) \*相川 文明 (正) 小杉 大智 (正) 丸山 泰右 Science Tokyo (正) 桃園 聡

Fumiaki Aikawa<sup>\*,\*\*</sup>, Daichi Kosugi<sup>\*</sup>, Taisuke Maruyama<sup>\*</sup>, Satoshi Momozono<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>NSK Ltd., <sup>\*\*</sup> Institute of Science Tokyo

## 1. はじめに

近年、少エネルギー化の要求から転がり軸受には更なる低トルク化が求められている。潤滑油の低粘度化や少油量化といった対策が考えられるが、これらの対策は潤滑油膜厚さの低下につながり、混合潤滑状態となる可能性が高まる。混合潤滑状態の評価のためには、各種表面粗さパラメータを考慮したシミュレーション技術が必要となっており、これまでに、接触モデルにおいて非ガウス表面粗さを考慮した Partial EHL 解析により、スキューネス  $S_{sk}$  やクルトシス  $S_{ku}$  が混合潤滑状態に及ぼす影響を検討した<sup>1)</sup>。しかし、前報では平均流モデルには Patir & Cheng<sup>2)</sup>のモデルを用いており非ガウス性を考慮できていなかった。そこで本報では、非ガウス性および弾性変形の影響を考慮した平均流モデルの計算を実施するとともに、Partial EHL 解析に組込んでその影響を検討した。また、前報では検討できていなかった自乗平均粗さ  $\sigma$  の影響についても検討を行った。

## 2. 数値解析手法

### 2.1 平均流モデル 圧力流量係数 $\phi_x$ の導出

平均流モデルの計算においては、表面粗さ分布の生成、弾性変形の計算、流体圧力分布の計算、流量係数の計算が必要となる。表面粗さ分布の生成に関して、パワースペクトル密度関数(PSD)に乱数で生成した位相を与えて逆 FFT することでガウス分布粗さを生成するとともに、Johnson 変換により Table 1 に示す  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$  となるよう変換を行った。PSD には全条件で同一のものをを用いており、周波数特性は変更していない。また等方性であるものと仮定している。弾性変形に関して、Patir & Cheng のようにすきまが負になった点を接触(すきま 0)とみなす手法(rigid)に加えて、Knoll ら<sup>3)</sup>のように接触圧力による弾性変形後のすきま分布を計算する手法(elastic)を実施した。弾性変形の計算には CG-FFT 法を用いた。流体圧力分布の計算に関しては、Patir & Cheng と同様の境界条件を設定し、有限差分法により Reynolds 方程式を解いた。圧力流量係数に関して、流体圧力分布から式 1 に示す Knoll らの定義に従い計算した。ここで、 $h$  は表面形状および弾性変形の影響を加味した真実すきま、 $\bar{h}$  は真実すきまの平均値であり、二面の中心線間距離  $h^*$  を流量の基準とした Patir & Cheng とは定義が異なる。

$$\phi_x = \left[ \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \frac{\bar{\rho} h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} d\Omega \right] / \left[ \frac{\bar{\rho} \bar{h}^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (1)$$

### 2.2 Partial EHL 解析

Zhu & Cheng<sup>4)</sup>と同等の手法により Partial EHL 解析を実施した。混合潤滑状態を考えるにあたり、平均流モデルに前述した手法で導出した流量係数の回帰式、粗面の接触モデルに非ガウス表面粗さを考慮可能な Tomota ら<sup>5)</sup>のモデル(TKO モデル)を用い、粗面と平滑面の間の潤滑状態を計算した。流量係数を Knoll の定義に基づいて計算しているため、修正 Reynolds 方程式は  $h^*$  ではなく  $\bar{h}$  に関するものとなる。代表的な解析条件を Table2 に示す。

## 3. 結果と考察

### 3.1 圧力流量係数 $\phi_x$ への影響

Figure 1 に圧力流量係数  $\phi_x$  の計算結果を示す。横軸に真実すきまの平均値  $\bar{h}$  と  $\sigma$  の比、縦軸に式(1)により計算した  $\phi_x$  をプロットした。なお、各粗さに対して  $\phi_x$  を  $\bar{h}/\sigma$  の関数としてフィッティングした結果を実線、Patir & Cheng の近似式の計算結果  $\phi_{x,PC}$  を破線で示す。弾性変形の計算手法(rigid, elastic)の影響を Fig. 1 (a)に示しており、計算手法によらずおおむね同一の曲線上にプロットされることがわかる。他の粗さについても同様の傾向を示した。また、プロットと  $\phi_{x,PC}$  に大きな差はなく、計算手法および変換に問題はないといえる。 $S_{sk}$  の影響を Fig. 1(b)に示しており、 $S_{sk}$  が負になると  $\phi_x$  は減少、正になると  $\phi_x$  は増大する。なお、 $S_{ku}$  に関しては、今回条件を設定した範囲では  $\phi_x$  に大きな影響を及ぼさなかった。

### 3.2 圧力流量係数 $\phi_x$ を考慮した Partial EHL 解析結果

各粗さにおける  $h_{HD}/\sigma$  ( $= \Lambda_{HD}$ ) と  $\bar{h}/\sigma$  の関係を Fig. 2 に示す。ここで、 $h_{HD}$  は Hamrock & Dowson の式による計算中央油膜厚さである。また、突起接触力のみで荷重を支持した乾燥接触状態での  $\bar{h}/\sigma$  ( $= \Lambda_{asp}$ ) を、各粗さについて実線で示す。 $\sigma = 300$  nm の場合、乾燥接触状態において  $\Lambda_{asp} \cong 1 \sim 2$  となる。解析結果の  $\bar{h}/\sigma$  も  $\Lambda_{HD} \cong 1 \sim 2$  程度で  $\Lambda_{asp}$  と一致して

おり、流体潤滑状態から境界潤滑状態へと速やかに遷移している(Fig. 2 (a)). 一方 $\sigma = 50$  nmの場合、乾燥接触状態において $\Lambda_{\text{asp}} \cong 0.3 \sim 0.5$ となる。しかし、解析結果の $\bar{h}/\sigma$ は $\Lambda_{\text{HD}} \cong 0.1$ 程度の条件であっても $\Lambda_{\text{asp}}$ と差がある。これは $\phi_x$ の影響により流体圧力が減少しにくく、完全な境界潤滑状態に遷移しにくいと考えられる(Fig. 2 (b)).

混合潤滑状態の指標として、Fig. 3 に $\Lambda_{\text{HD}}$ と接触による荷重支持割合 $W_{\text{asp}}/W_{\text{total}}$ の関係を示す。 $\Lambda_{\text{HD}} < 3$ で接触の影響が生じ始め、Fig. 3 (a)では $\Lambda_{\text{HD}} < 0.5$ でいずれの粗さにおいても $W_{\text{asp}}/W_{\text{total}} > 0.9$ となり速やかに境界潤滑へと遷移している。一方、Fig. 3 (b)では $\Lambda_{\text{HD}} \cong 0.1$ でも $W_{\text{asp}}/W_{\text{total}} < 0.9$ であり混合潤滑状態が維持されている。これらの傾向はFig. 2と一致している。また、#3は $W_{\text{asp}}/W_{\text{total}}$ が上昇しやすいが、これは $\phi_x$ が大きく(Fig. 1)流体圧力が減少しやすいとともに、 $\Lambda_{\text{asp}}$ も大きく(Fig. 2)接触圧力が生じやすいためである。#2は、#3より $\phi_x$ と $\Lambda_{\text{asp}}$ が小さいため、 $W_{\text{asp}}/W_{\text{total}}$ が上昇しにくく優れた潤滑特性を持つことが示唆される。

#### 4. 結論

- (1) 圧力流量係数 $\phi_x$ にKnollの定義を用いることで、弾性変形の扱い方によらず $S_{\text{sk}}, S_{\text{ku}}$ 毎に $\bar{h}/\sigma$ の関数として表現できる。 $S_{\text{sk}}$ が負になると $\phi_x$ は減少、正になると $\phi_x$ は増大する。
- (2)  $\sigma$ の大きい条件では流体潤滑状態から境界潤滑状態に速やかに遷移するが、 $\sigma$ の小さい条件では $\phi_x$ の影響があらわれ混合潤滑状態が維持されやすい。
- (3)  $S_{\text{sk}} > 0$ の粗さと $S_{\text{sk}} < 0$ の粗さでは、 $S_{\text{sk}} < 0$ の粗さの方が流体潤滑状態を維持しやすい。

#### 文献

- 1) 相川・桃園：非ガウス表面粗さを考慮した Partial EHL 解析による混合潤滑状態のシミュレーション，トライボロジー会議 2025 春 東京 (2025).
- 2) N. Patir & H. S. Cheng, An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication., ASME J. Tribology, 100, 1 (1978) 12.
- 3) G. Knoll *et al.*, Effect of Contact Deformation on Flow Factors, Journal of Tribology, 120, 1, (1998), 140.
- 4) D. Zhu & H. S. Cheng, Effect of Surface Roughness on the Point Contact EHL, Journal of Tribology, 110, 1, (1988), 32.
- 5) T. Tomota *et al.*, Modeling solid contact between smooth and rough surfaces with non-Gaussian distributions., Tribology Transactions, 62, 4, (2019), 580.

Table 1 Surface roughness parameter conditions

	#1	#2	#3	#4	#5
Skewness $S_{\text{sk}}$ , -	0.0	-0.8	0.8	0.0	0.0
Kurtosis $S_{\text{ku}}$ , -	3.0	3.0	3.0	2.0	4.0

Table 2 Partial EHL analysis conditions

Reduced Young's modulus $E'$ , GPa	115
Radius $R_x, R_y$ , m	$12.7 \times 10^{-3}$
Viscosity $\eta_0$ , Pa·s	0.563
Viscosity-pressure coefficient $\alpha$ , GPa <sup>-1</sup>	15.9
Load $W$ , N	30
Rolling speed $u$ , m/s	$6.09 \times 10^{-7} \sim 15.3$
RMS roughness $\sigma$ , nm	300, 50

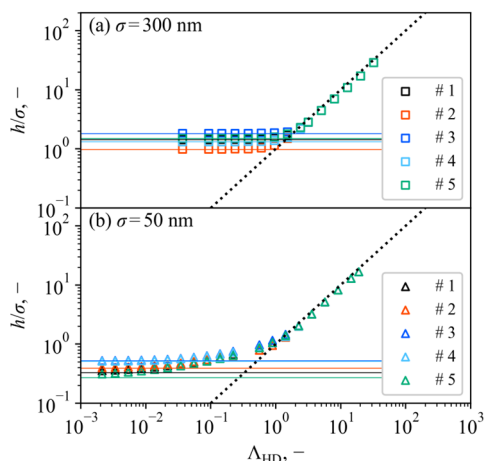


Fig. 2 Relationship between  $\Lambda_{\text{HD}}$  and  $\bar{h}/\sigma$ : (a)  $\sigma = 300$  nm, (b)  $\sigma = 50$  nm

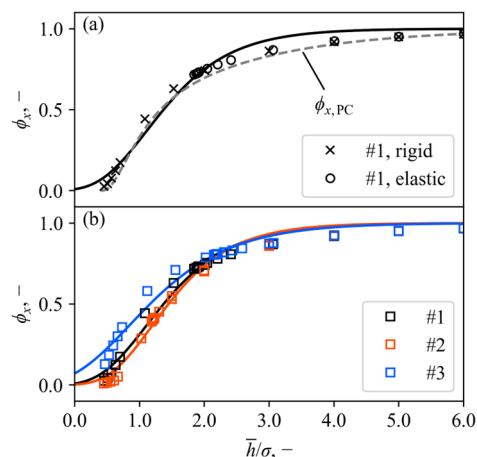


Fig. 1 Relationship between  $\bar{h}/\sigma$  and  $\phi_x$ : (a) Effect of elastic deformation, (b) Effect of skewness

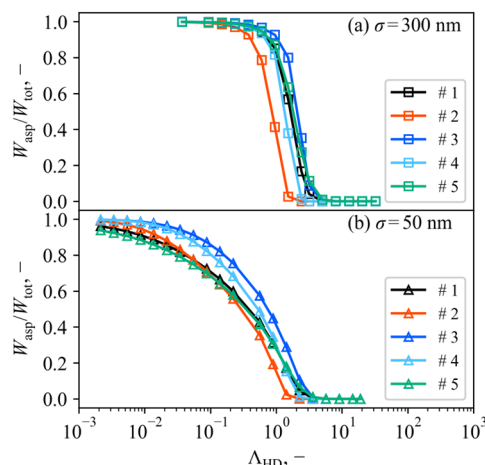


Fig. 3 Relationship between  $\Lambda_{\text{HD}}$  and  $W_{\text{asp}}/W_{\text{total}}$ : (a)  $\sigma = 300$  nm, (b)  $\sigma = 50$  nm