

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

Mixed lubrication simulation using partial EHL analysis considering non-Gaussian surface roughness

NSK (正) *相川 文明 東京科学大学 (正) 桃園 聡

Fumiaki Aikawa*, Satoshi Momozono**

*NSK Ltd., ** 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。対策として潤滑油の低粘度化や少油量化といった手段が考えられるが、これらの手段は潤滑油膜厚さの低下につながり、接触域での油膜破断の影響が無視できない混合潤滑状態となる可能性が高まる。混合潤滑状態には表面粗さが大きく影響し、その評価指標として計算油膜厚さと二乗平均平方根高さ σ の比である Λ 値が広く用いられている。しかし、低 Λ 条件における表面損傷形態は Λ 値のみでは整理できない事も実験的に知られている¹⁾。これまでに数値計算による弾性流体混合潤滑状態の評価が行われているが、その多くは表面粗さがガウス分布に従うものと仮定しており、考慮されている表面粗さのパラメータには限りがある²⁾。そこで、本研究では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評価した。

2. 数値解析手法

基本的な EHL 数値解析は Liu ら³⁾と同等の手法を用いた。混合潤滑状態を考えるにあたり、平均流モデルに Patir-Cheng⁴⁾のモデル、粗面の接触モデルに非ガウス表面粗さを考慮可能な TKO モデル⁵⁾を用い、粗面と平滑面の間の潤滑状態を計算した。代表的な解析条件を Table 1 に示す。 S_{sk} , S_{ku} の影響を検討するため、等方性で σ の等しい5種類の粗さに対して計算を行った。

Table. 1 Partial EHL analysis conditions

	#1	#2	#3	#4	#5
Reduced Young's modulus E' , GPa	115				
Radius R ($=R_x=R_y$), m	12.7×10^{-3}				
Viscosity η_0 , Pa·s	0.563				
Viscosity-pressure coefficient α , GPa^{-1}	15.9				
Load W , N	30				
Rolling speed u , m/s	$6.23 \times 10^{-4} \sim 0.479$				
Surface pattern parameter γ , -	1				
RMS roughness σ , nm	300				
Skewness S_{sk} , -	0.0	-0.8	0.8	0.0	0.0
Kurtosis S_{ku} , -	3.0	3.0	3.0	2.0	4.0

3. 結果と考察

解析結果の一例を Fig. 1 に示す。Hertz 接触円中心における転がり方向への膜厚および圧力の分布を示している。ここで h は公称膜厚(二面の中心線間距離), P_{fluid} , P_{asp} はそれぞれ流体圧力, 粗さ突起の接触圧力, P_{total} は両者の和である。 P_{fluid} と P_{asp} の和により荷重を支持している混合潤滑状態であることが確認できる。 S_{sk} および S_{ku} の影響を評価するにあたり、流体潤滑による荷重支持能力の指標として Λ 値を用いて解析結果を整理した (Hamrock-Dowson の式による計算中央油膜厚さ h_{HD} と σ の比を Λ 値と定義した)。また、膜厚の代表値として Hertz 接触円内での h の平均値 h_{ave} を用いた。

3.1 スキューネス S_{sk} の影響

Figure 2 に h_{ave}/σ と Λ 値の関係を、Fig. 3 に接触による荷重支持割合 $W_{contact}/W_{total}$, みかけの平均接触面圧 \bar{P}_{asp} , 実接触面積割合 A_r/A_0 と Λ 値の関係を示す。 $S_{ku}=3.0$ で一定とし、 $S_{sk}=-0.8, 0.0, 0.8$ での解析結果を比較した。 Λ 値の減少に伴い、表面粗さの影響により h_{ave}/σ が Λ と乖離するとともに、 $W_{contact}/W_{total}$, \bar{P}_{asp} , A_r/A_0 が上昇しており、流体潤滑状態から混合潤滑状態へと遷移している。 $\Lambda < 0.5$ の領域では Λ が低下しても膜厚や接触状態がほぼ変化せず、境界潤滑領域になっているものと考えられる。また、同一 Λ 値であっても膜厚および接触状態には差が生じており、なじみ後の表面に相当する(なじみ後の表面と形態に近い) $S_{sk}=-0.8$ の粗さの方が流体潤滑状態を維持しやすいことが分かる。 A_r/A_0 に関して $S_{sk}=-0.8$ では Λ の低下に伴い急速に上昇し $\Lambda < 1$ の領域では $S_{sk}=0.0, 0.8$ よりも大きくなっているが、これは $S_{sk}=-0.8$ の表面では接触を生じる突起の頂点高さのばらつきが小さいため多くの突起が接触するとともに、突起頂点の曲率半径が大きいいため個々の突起の接触面積が大きくなるからであると考えられる。

3.2 クルトシス S_{ku} の影響

Figure 4 に、 Λ 値と接触状態の関係を Fig.3 と同様に整理した結果を示す。 $S_{sk}=0.0$ で一定とし、 $S_{ku}=2.0, 3.0, 4.0$ での解析結果を比較した。 S_{sk} を変化させた場合と同様に S_{ku} を変化させた場合も、 Λ 値の減少に伴い接触の影響が顕著になりその影響の現れやすさは S_{ku} によって異なる。 $\Lambda < 0.5$ の領域で境界潤滑領域になっているものと考えられる点についても共通している。 $S_{ku}=4.0$ では突起頂点高さのばらつきが大きく、 $\Lambda > 3$ であっても一部の高い突起によって接触が生じるため $P_{asp} > 0$ となっている。 また、低 Λ 条件における A_r/A_0 については、 $S_{ku}=2.0$ の方が $S_{ku}=3.0, 4.0$ よりも大きくなっている。

4. おわりに

TKO モデルを用いた Partial EHL 解析により、混合潤滑状態における S_{sk} , S_{ku} の影響を数値計算により評価した。同一 Λ 値であっても S_{sk} , S_{ku} によって混合潤滑状態には差がある。なじみ後の表面に相当する $S_{sk} < 0$ の表面では接触の影響が生じにくい一方で、 $S_{ku}=4.0$ の表面では $\Lambda > 3$ であっても接触の影響が生じ得る。講演では荷重の影響についても報告する。

文献

- 1) I. I. M. Yazid, H. Komata, S. Hashimoto & K. Ueda, An Experimental Study of Surface Damage on Rolling Bearings in Low Lambda Conditions. Tribology Online, 18, 1, (2023). 1-9.
- 2) D. Zhu & H. S. Cheng, Effect of Surface Roughness on the Point Contact EHL, Trans. ASME J. Tribol., 110, 1 (1988) 32-37.
- 3) Y. Liu, Q. J. Wang, W. Wang, Y. Hu & D. Zhu, Effects of differential scheme and mesh density on EHL film thickness in point contacts., Trans. ASME J. Tribol., 128, 3 (2006) 641-653.
- 4) 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) 12-17.
- 5) T. Tomota, Y. Kondoh & T. Ohmori, Modeling solid contact between smooth and rough surfaces with non-Gaussian distributions., Tribology Transactions, 62, 4, (2019), 580-591.

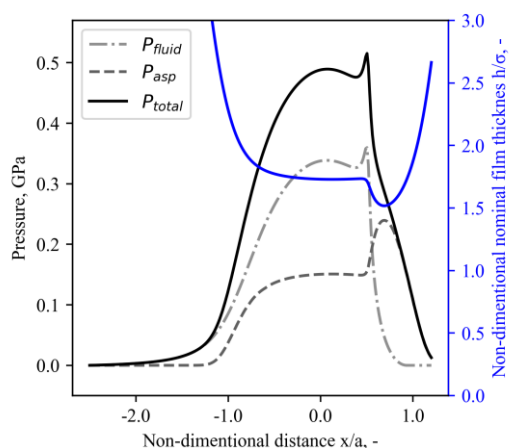


Fig. 1 Nominal film thickness and pressure distributions, ($S_{sk}=0.0$, $S_{ku}=3.0$, $u = 0.160\text{m/s}$)

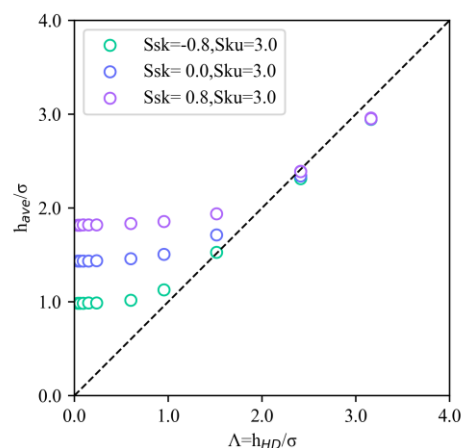


Fig. 2 The relation between Λ and analysis results of nominal film thickness, (effect of skewness, $S_{ku} = 3.0$)

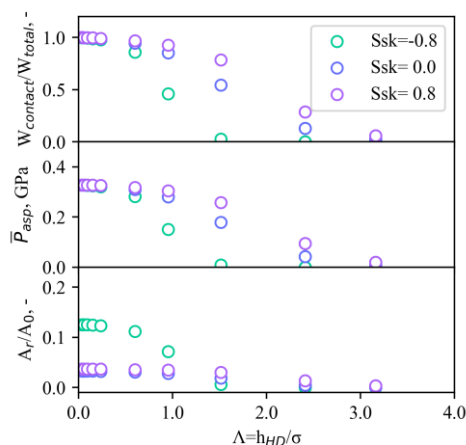


Fig. 3 The relation between Λ and analysis results of contact conditions, (effect of skewness, $S_{ku} = 3.0$)

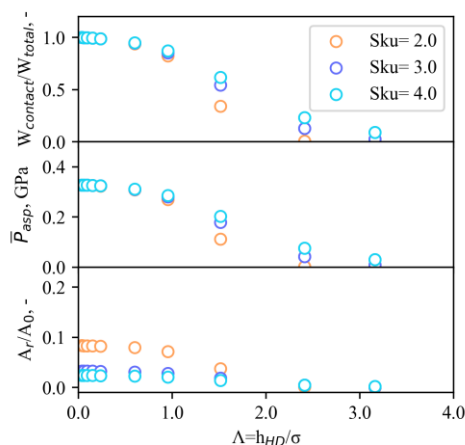


Fig. 4 The relation between Λ and analysis results of contact conditions, (effect of kurtosis, $S_{sk} = 0.0$)