

境界・混合潤滑下の転がり-すべり摩擦に及ぼす表面粗さパラメータの影響

Effect of Surface Roughness Parameters on Rolling-Sliding Friction in Boundary and Mixed Lubrication

ジェイテクト（正）獅子原 祐樹

Yuki Shishihara

JTEKT CORPORATION

1. 緒言

カーボンニュートラル実現に向け、多くの産業分野の機械システムに対して、動力損失の低減が求められている。機械システムの動力損失低減のため、潤滑油量の低減や低粘度油の使用により、粘性抵抗に起因する損失の低減が進められているが、それらは潤滑環境の過酷化を招く可能性がある。過酷な潤滑環境下におけるしゅう動表面では、突起同士の直接接触による損傷や摩擦損失が懸念され、突起同士の直接接触を抑制するための表面粗さ設計が重要となる。特に、転がり軸受や歯車等に見られる転がり-すべり摩擦においては、純粋な転がり摩擦よりも摩擦損失は大きい。そのため、従来から表面粗さが摩擦係数に及ぼす影響に関して検討がなされており、最大粗さ高さ等の表面粗さパラメータで混合潤滑下の摩擦係数を推定する取り組みも報告されている¹⁾。しかし、境界潤滑・混合潤滑など異なる潤滑環境で、複数の表面粗さパラメータを組合せて摩擦係数に及ぼす影響を検討した例は少ない。本報では、異なる表面粗さのサンプルを用い、境界・混合潤滑下での転がり-すべり摩擦試験を行い、表面粗さパラメータが転がり-すべり接触下の摩擦係数に及ぼす影響を明らかにした。

2. 試験方法

表面粗さが摩擦係数に及ぼす影響を検討するため、異なる粗さを有する 5 種類のディスク(Disk-L,Disk-M,Disk-S,Disk-P,Disk-PS)を用いた (Table 1)。一方、相手材であるボールの粗さは固定し、直径 19.05 mm の鏡面仕上げサンプル(Rq:0.02)を用いた。これらディスクおよびボールの材質はいずれも高炭素クロム鋼(JIS SUJ2)とした。

摩擦試験は、Fig.1 に示す MTM 試験機(Mini Traction Machine, PCS Instruments 製)を用い、潤滑油中においてボールオンディスクの転がり-すべり接触形態で行った。試験条件を Table2 に示す。潤滑油には動粘度が 23.2 mm²/s(@40℃)の ATF(Automatic Transmission Fluid)を用い、潤滑油温 50℃、荷重 75N を一定とし、表面速度および SRR(Sliding Rolling Ratio, 転がりすべり比)を変化させた。測定は、まず SRR0%, 表面速度 4,000 mm/s(最大表面速度)から開始し、SRR 一定で表面速度を段階的に低下させ 100 mm/s まで測定した。その後、SRR を増加させ、再び SRR 一定で最大表面速度から 100 mm/s まで測定した。この一連の測定を 1 回の測定として、各サンプルで 6 回の繰り返し測定を実施した。

試験前後の両試験片の表面粗さパラメータは、レーザ顕微鏡で測定し、カットオフ $\lambda c=0.25$ mm, $\lambda s=2.5$ μ m のガウシアンフィルタでフィルタ処理を行い算出した。

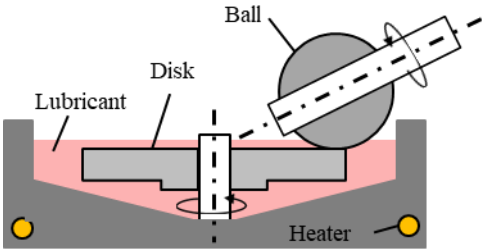
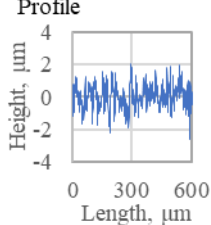
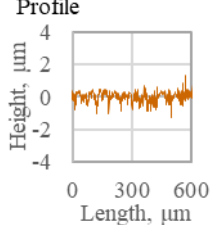
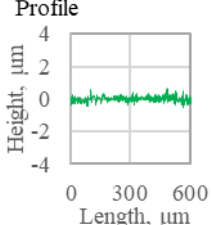
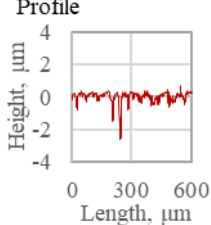
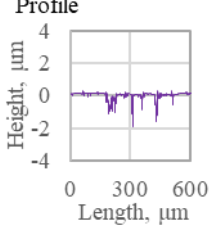


Fig. 1 Test apparatus

Table 2 Test conditions

Load, N	75
Hertzian pressure, GPa	1.3
Entrainment speed, mm/s	100~4000
SRR, %	0~100
Lubricant	ATF(Kinematic viscosity@40℃:23.2 mm ² /s)
Temperature, °C	50
Number of measurements	6

Table 1 Disk surface profiles and initial surface roughness parameters

Disk-L: Large roughness	Disk-M: Medium roughness	Disk-S: Small roughness	Disk-P: Plateau surface	Disk-PS: Plateau surface (Small roughness)
 Roughness Rq:0.65 Rsk:-0.04 Rpk:0.63 Rvk:0.65	 Roughness Rq:0.22 Rsk:-0.89 Rpk:0.13 Rvk:0.36	 Roughness Rq:0.10 Rsk:-0.24 Rpk:0.10 Rvk:0.13	 Roughness Rq:0.43 Rsk:-1.81 Rpk:0.14 Rvk:1.01	 Roughness Rq:0.22 Rsk:-2.42 Rpk:0.08 Rvk:0.54

3. 摩擦係数測定結果

測定の繰り返しに伴う摩擦係数変化が安定した 4~6 回目の測定値を利用して、表面速度と摩擦係数の関係を検討した。代表として SRR10%条件、測定 6 回目における表面速度と摩擦係数の関係を Fig.2 に示す。傾向が異なるものの、いずれのサンプルにおいても表面速度が速いほど摩擦が低下した。各サンプルの摩擦係数の傾向を表面速度で分類すると、300 mm/s 以下の場合、摩擦係数は「Disk-PS<Disk-P<Disk-S<Disk-M=Disk-L」の順に低い値をとった。300~1500 mm/s では、Disk-S の摩擦係数が表面速度の増加とともに著しく低下し、Disk-P よりも低い値となった。さらに、1500~3000 mm/s では、表面速度の増加とともに Disk-S の摩擦係数は Disk-PS と同等まで低下した。この速度域において Disk-M の摩擦係数は、Disk-P よりも低い値となった。3000 mm/s 以上では、摩擦係数は「Disk-PS=Disk-S<Disk-M<Disk-P=Disk-L」の順で低い値を示した。この結果は、その他の SRR 条件でも同様の傾向であった。

4. 表面粗さと摩擦係数の関係

4.1 油膜パラメータ(合成粗さと油膜厚さの比)と摩擦係数の関係

表面粗さパラメータと摩擦係数の関係を検討するため、2 面の合成粗さ σ と油膜厚さ h の比である、油膜パラメータ $\Lambda(=h/\sigma)$ の算出と摩擦係数との関係を検討した。油膜厚さ h は、Hamrock-Dowson の式で算出した最小油膜厚さを用いた。また、合成粗さ σ は、 $\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0.5}$ で定義され、 σ_1 , σ_2 は測定後のディスク、ボールの二乗平均平方根高さ Rq を用いた。Figure 2 の摩擦係数を油膜パラメータ Λ との関係で整理した結果を Fig.3 に示す。いずれのサンプルにおいても、 Λ が小さい場合に摩擦係数が高く、ストライベック線図と同様の傾向が認められた。図示されるように、各サンプルの Λ と摩擦係数の関係は同一線上に得られなかった。そのため、油膜厚さや二乗平均平方根高さ Rq のような粗さ凹凸の大小を表すパラメータのみでは説明できない、他の表面粗さパラメータが摩擦係数に影響していると考えられる。

4.2 油膜パラメータ範囲毎の表面粗さと摩擦係数の関係

上述した摩擦係数の差異を、JIS B0601 および JIS B0671-2 で規定される Rq 以外の表面粗さパラメータと摩擦係数の相関関係から検討した。 Λ の範囲毎にディスクの表面粗さパラメータと摩擦係数の関係を比較した結果を Fig.4 に示す。本報では摩擦面に関する表面粗さパラメータとして広く用いられている、スキューネス Rsk 、突出山部高さ Rpk 、突出谷部深さ Rvk に着目した。 Rsk は、いずれの Λ 範囲においても摩擦係数との間に相関係数 0.9 以上の高い相関性が認められた。 Rsk は、粗さの山谷の対称性を示すパラメータであり、負の値が小さいほど、突出した山部は少なく、谷部に片寄る形状を示す。そのため、本結果では Rsk が小さいほど表面突起部での微視的接触応力が緩和し、谷部が油溜まりとして作用することで、低摩擦となる傾向を示したと推定する。一方、突出山部高さ Rpk は、 Λ が小さいほど相関係数が高くなった。これは、境界潤滑に近い領域においては、突出山部が少ない (Rpk が小さい)ほど直接接触が少なくなり低摩擦となったためと推定する。さらに、突出谷部深さ Rvk は、 Rpk とは逆に Λ が大きいほど相関係数が高くなった。これは、油膜が形成され境界潤滑から混合潤滑に遷移する領域では、粗さの谷部が深いことで油溜まり性が向上し、油膜が厚くなることで直接接触が少なくなり低摩擦化したと推定する。

5. 結言

- 異なる表面粗さのディスクを用い、ボールとの転がり-すべり摩擦試験を行い、油膜パラメータ Λ と摩擦係数の関係を整理した結果、いずれの結果も Λ が大きいほど低摩擦傾向を示した。
- 異なる表面粗さにおける摩擦係数と Λ の関係は同一線上で得られず、 Λ の計算に用いた Rq のみでは説明できないことを明らかにした。このことは、他の表面粗さパラメータが摩擦係数に影響することを示唆するものである。
- 上述した摩擦係数の相違を、種々の表面粗さパラメータと摩擦係数との相関関係から検討した結果、 Rsk が摩擦係数を説明する有効なパラメータであることが示された。

文献

- 松本：混合潤滑状態にある転がり-すべり接触面の摩擦係数推定式（第 2 報）—摩擦係数に及ぼす表面粗さ形状の影響—，トライボロジスト，58，9 (2013) 676。

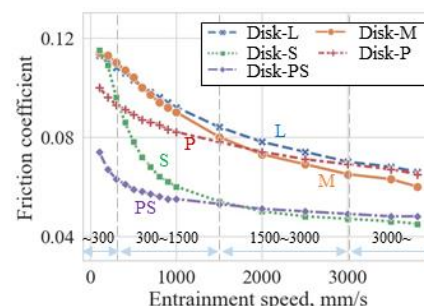


Fig. 2 Relationship between entrainment speed and friction coefficient(Order of measurements:6th, SRR:10%)

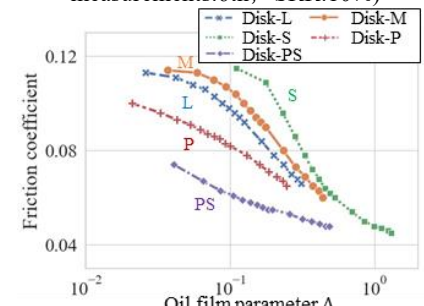


Fig. 3 Relationship between oil film parameter and friction coefficient(Order of measurements:6th, SRR:10%)

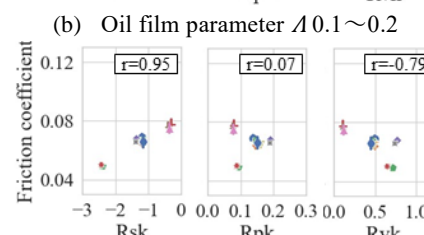
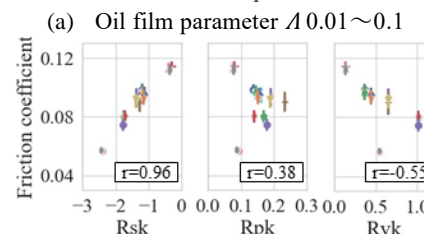
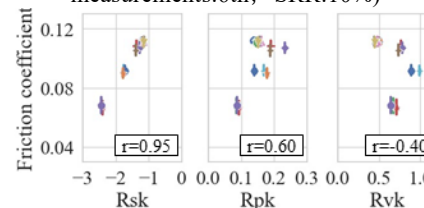


Fig. 4 Relationship between disk surface roughness parameter and friction coefficient(Order of measurements:4-6th, SRR:10%)