

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(第2報)
—温度影響を考慮した表面粗さと摩擦係数の関係—

Effect of Surface Roughness Parameters on Rolling-Sliding Friction in Boundary and Mixed Lubrication (Part 2) -Relationship Between Surface Roughness and Friction Coefficient Considering Influence of Temperature-

ジェイテクト（正）獅子原 祐樹

Yuki Shishihara

JTEKT CORPORATION

1. 緒言

機械システムの動力損失低減のため、潤滑油量の削減や低粘度油の活用が検討されているが、その結果として潤滑環境はますます過酷な条件となっている。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設計が重要となる。これまでに、異なる表面粗さのサンプルを用いた転がり-すべり摩擦試験から、摩擦係数に影響を及ぼす表面粗さパラメータを検討した¹⁾。その結果、粗さ凹凸の大小を表すパラメータだけでなく、粗さの山谷の対称性を示すスキューネス R_{sk} が摩擦係数を説明する有効なパラメータであることを示した。しかしながら、前報は一定温度条件下における検討であり、温度の影響は検討していなかった。温度の変化は、油膜厚さの変化をもたらす表面突起の接触状態に影響するため、表面粗さと摩擦係数の関係性にも影響する可能性がある。本報では、異なる温度条件下における転がり-すべり摩擦試験を実施し、表面粗さと摩擦係数の関係に対する温度の影響を検討した。

2. 試験方法

表面粗さと摩擦係数の関係に対する温度の影響を検討するため、Table1 に示す異なる粗さを有するディスク(Disk-L, Disk-M, Disk-S, Disk-P, Disk-PS)を用い、異なる温度条件下における摩擦試験を行った。相手材には、鏡面仕上げ($R_q:0.02$)した直径 19.05 mm のボールを用いた。これらディスク、ボールの材質はともに高炭素クロム鋼(JIS SUJ2)とした。

摩擦試験は、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 $23.2 \text{ mm}^2/\text{s} (@40^\circ\text{C})$ の ATF(Automatic Transmission Fluid)を用い、荷重 75 N とし、表面速度・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、SRR0%一定で、Table2 に示す条件範囲で表面速度を低下させ 100 mm/s まで測定した。その後、Table2 に示す条件範囲で SRR を増加させ、再び最大表面速度から 100 mm/s まで測定した。温度影響を考慮するため、潤滑油温は 20°C 、 60°C 、 80°C 、 100°C の 4 水準とした。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 $\lambda_c=0.25 \text{ mm}$ 、 $\lambda_s=2.5 \text{ }\mu\text{m}$ のガウシアンフィルタでフィルタ処理を行い算出した。

3. 結果

3.1 異なる温度条件における摩擦係数

異なる温度条件における摩擦係数を比較した。代表例として SRR10%における温度 20°C と 100°C の表面速度と摩擦係数の関係を Fig.1 に示す。いずれの条件においても表面速度の増加に伴い摩擦係数が低下する傾向を示した。粗さの異なる各サンプルの摩擦係数の傾向を温度毎に表面速度で分類すると、 20°C では 300 mm/s 以下の低速域において、Disk-PS の摩擦係数が最も低く、最大で 0.074 の摩擦係数を示した。また、表面速度の増加とともに Disk-S が Disk-PS と同程度の摩擦係数まで急激に低下し、最も高速域において Disk-S で 0.052、Disk-PS で 0.055 の低い摩擦係数を示した。Disk-L, M, P も表面速度の増加に伴い徐々に摩擦係数は減少し、0.058~0.063 の摩擦係数となった。

Table 1 Disk surface profiles and initial surface roughness parameters

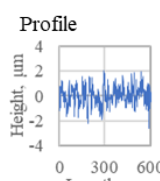
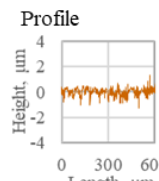
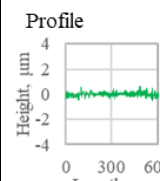
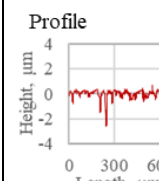
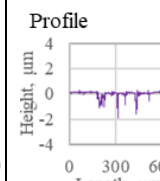
Disk-L	Disk-M	Disk-S	Disk-P	Disk-PS
 Roughness Rq:0.65 Rsk:-0.04 Rpk:0.63 Rvk:0.65	 Roughness Rq:0.22 Rsk:-0.89 Rpk:0.13 Rvk:0.36	 Roughness Rq:0.10 Rsk:-0.24 Rpk:0.10 Rvk:0.13	 Roughness Rq:0.43 Rsk:-1.81 Rpk:0.14 Rvk:1.01	 Roughness Rq:0.22 Rsk:-2.42 Rpk:0.08 Rvk:0.54

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°C :23.2 mm ² /s)
Temperature, °C	20,60,80,100

100℃の試験においても 20℃の試験とほぼ同様の摩擦係数の傾向を示した。2000 mm/s 以下の速度条件において、Disk-PS の摩擦係数が最も低く、20℃における摩擦係数と同等の 0.075 の値を示した。また、表面速度の増加とともに Disk-S が Disk-PS と同程度の摩擦係数まで低下し、20℃の場合よりも低い摩擦係数を示し、Disk-S で 0.034、Disk-PS で 0.038 を示した。Disk-L、M、P においても 20℃の傾向と同様に、表面速度の増加に伴い摩擦係数は 0.070~0.074 まで低下したが、20℃の摩擦係数よりも高い値となった。これらの傾向は、その他の SRR 条件でも同様であった。

3.2 表面粗さと摩擦係数の関係に対する温度の影響

3.2.1 油膜パラメータと摩擦係数に対する温度の影響

異なる温度条件における表面粗さと摩擦係数の関係は、油膜厚さの変化が影響していると推定される。そこで、温度の影響を考慮した油膜厚さ h および二乗平均平方根高さ R_q から求まる 2 面の合成粗さ σ の比である油膜パラメータ $A(=h/\sigma)$ を算出し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、油膜厚さの計算に用いる温度は、各試験での油温の実測値を用いた。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 R_q を用いた。

前項で得られた温度および速度に応じた Disk-L、S、PS の摩擦係数の変化を摩擦係数と油膜パラメータ A との関係で整理した結果を Fig.2 に示す。いずれの条件においても、 A の低下に伴い摩擦係数が高くなり、ストライベック線図と同様の傾向が認められた。図示したように、いずれの場合も、 A 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、 A の計算に用いた油膜厚さと R_q 以外の要因が摩擦係数に影響していると考えられる。

3.2.2 R_{sk} と摩擦係数の関係に対する温度の影響

上述した各条件の摩擦係数を R_q 以外の粗さパラメータとの関係で整理した。粗さには、前報で摩擦係数との相関が示された粗さパラメータである R_{sk} に着目し、温度・ A 条件毎に摩擦係数と R_{sk} の関係を比較した(Fig.3)。いずれの温度・ A においても R_{sk} と摩擦係数との間に相関性が認められ、 R_{sk} が小さいほど低い摩擦係数を示した。 R_{sk} は、負の値が小さいほど、突出した山部は少なく、谷部が多い形状を示す。そのため、本結果から、 R_{sk} 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により低い摩擦係数を示したと推定する。

次に R_{sk} と摩擦係数の関係に対する温度の影響を考察するため、各 A 範囲における温度の影響について考察した。 $A 0.01 \sim 0.1$ では、温度に影響を受け難く、 R_{sk} と摩擦係数の関係はほぼ一致した。 $A 0.1 \sim 0.2$ 、および $A 0.2 \sim 0.3$ では、温度の影響が確認され、20℃よりも 100℃において同一の R_{sk} の場合に低い摩擦係数を示した。一般に混合潤滑下の摩擦係数は、境界潤滑部・流体潤滑部の摩擦係数と境界潤滑部の荷重分担割合で決まる。また、転がり-すべり接触下では、すべりに伴うトラクションが作用し摩擦係数に対する流体潤滑部の寄与割合が増加する。これらのことから、 $A 0.1 \sim 0.3$ では温度が高いほど粘度低下すると共にトラクションも低下し、流体潤滑部の摩擦係数が低減することにより同一の R_{sk} であっても低い摩擦係数を示したと推定する。一方、 $A 0.01 \sim 0.1$ では、 $A 0.1 \sim 0.3$ と比較して境界潤滑部の荷重分担割合が多いため、流体潤滑部の影響が小さく、 R_{sk} と摩擦係数の関係に対する温度の影響が小さくなったと考える。

4. 結言

- 異なる温度条件下の油膜パラメータ A と摩擦係数の関係は、同一線上で整理することができず、表面粗さと摩擦係数の関係は温度の影響を受けた。そのため、 A の計算に用いる油膜厚さと二乗平均平方根粗さ R_q 以外の要因が摩擦係数に影響を及ぼしたと考える。
- 摩擦係数の相違を R_q 以外の表面粗さパラメータから検討し、前報同様に異なる温度条件下においてスキューネス R_{sk} が摩擦係数を説明する有効なパラメータであることを示した。
- 混合潤滑領域においては、 R_{sk} と摩擦係数の関係は温度の影響を受け、高温ほど摩擦係数が低くなる傾向を示した。その要因は、温度の影響が大きい流体潤滑部の摩擦係数の割合が大きくなるためと考えた。

文献

- 獅子原：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，トライボロジー会議 2024 秋名護

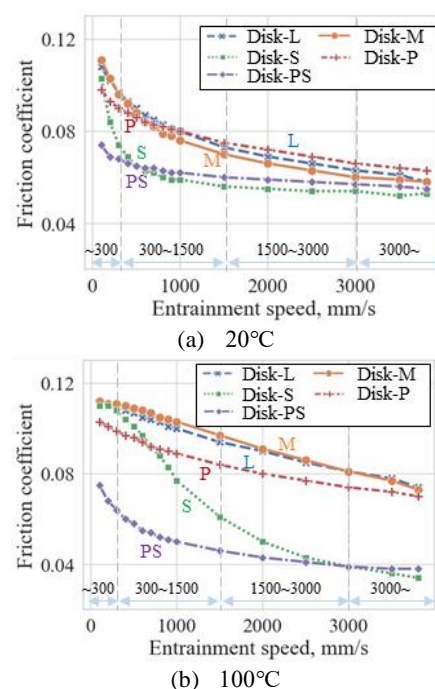


Fig. 1 Relationship between entrainment speed and friction coefficient(SRR10%)

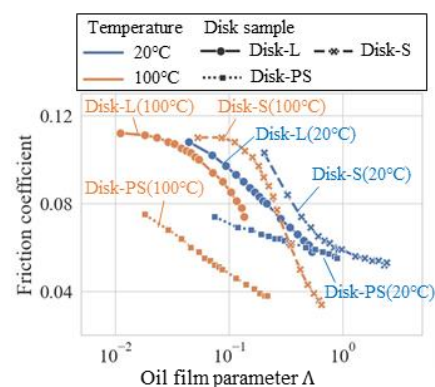


Fig. 2 Relationship between oil film parameter and friction coefficient(SRR10%)

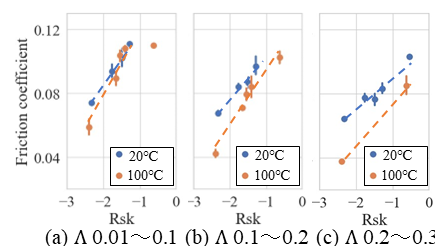


Fig. 3 Relationship between R_{sk} and friction coefficient(SRR10%)