

油膜厚さその場観察法によるディンプルならびに溝テクスチャが摩擦特性に与える影響調査

An investigation of the effects of dimple and groove texture on friction behavior by in-situ observation of oil film thickness

東理大・院（学）*湯原 裕司 東理大・工（正）佐々木 信也

Yuji Yuhara*, Shinya Sasaki**

*Graduate school of Tokyo University of Science, **Tokyo University of Science

1. はじめに

近年、レーザ技術の汎用化と低コスト化により、レーザ表面テクスチャリング（Laser Surface Texturing : LST）による表面改質技術が広く普及してきている。表面テクスチャリングは、しゅう動材料表面に対して人工的に付与される微細な凹凸であり、幅広い分野でトライボロジー性能の向上を目的に利用されている。表面テクスチャリングによるトライボロジー特性への効果は、表面テクスチャ形状や潤滑状態により異なるが、しゅう動面への潤滑油の供給による油膜切れ防止効果や摩耗粉の捕集による摩耗や摩擦低減効果、そして流体潤滑域においてはしゅう動部における動圧発生による負荷容量の向上などが挙げられる。これまでに境界潤滑域から流体潤滑域に至るまで、平行溝形状やディンプル形状などの様々な形状の表面テクスチャリングに関する研究が行われている⁽¹⁾。しかしながら、表面テクスチャリングが摩擦特性へ与える効果に関しては相反する研究も多く、そのメカニズムに関しては未だに不明な点が多い⁽²⁾。この理由として、表面テクスチャリングの効果を考察する上で重要な指標である油膜厚さと摩擦係数を同時に観測した研究報告が少ないことが挙げられる。したがって、表面テクスチャリングが摩擦特性に与える影響を明らかにするためには、油膜厚さと摩擦係数を正確に観測可能なその場観察技術の開発が必要である。

本研究では、摩擦係数と油膜厚さを高精度に同時計測可能なその場観察試験機を開発し、この試験機を用いて、様々な形状の表面テクスチャリングが潤滑状態および摩擦特性に与える影響について調査した。

2. 実験装置

開発した試験機を Fig. 1 に示す。当装置は、ボールオンディスク式しゅう動試験機に、油膜厚さをその場観察するための、白色分光式膜厚測定機構を組み込んだ構成となっている。本装置では、ボールとディスクに取り付けたモータの回転速度を独立して制御することで、相対すべり速度を広い範囲で変化させることができる。摩擦力と押しつけ力は、ロードセルを用いて測定した。

ボールには $\phi 19.05\text{ mm}$ の軸受鋼 (SUJ2) を用い、ディスクには $\phi 100\text{ mm}$ の BK7 ディスクを用いた。油膜厚さを白色分光法で測定するために、厚さ 7 nm の Cr 中間層と厚さ 500 nm の SiO₂ 膜のコーティングをディスクに施した。摩擦試験機の上部に取り付けた落射型顕微ユニット (CFI₆₀-2/ CFI₆₀, Nikon, Japan) により、ボール-ディスクの接触部を観察する。顕微ユニットはイメージング分光器 (CLP-50TS, テクノ・シナジー, Japan) とハイスピードカメラ (EMRECAM GX-3, Nac Image Technology, Japan) に接続されており、ボール-ディスク接触領域のライン画像と分光反射率データをハイスピードカメラで同時に撮影する機構となっている。測定はボールの回転軸に沿った方向のライン領域について行った。

3. 実験方法

Table 1 に摩擦試験の実験条件を示す。油温は室温 ($25.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$)、荷重は 20 N、すべり率は SRR50 %で固定し、すべり速度は 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 mm/s とした。潤滑油には PAO4 を使用し、ボールによるかき揚げにより潤滑油をしゅう動部に供給した。Fig. 2, Table 2 にテクスチャパターンとパラメータをそれぞれ示す。なお、テクスチャはボール側表面に施した。

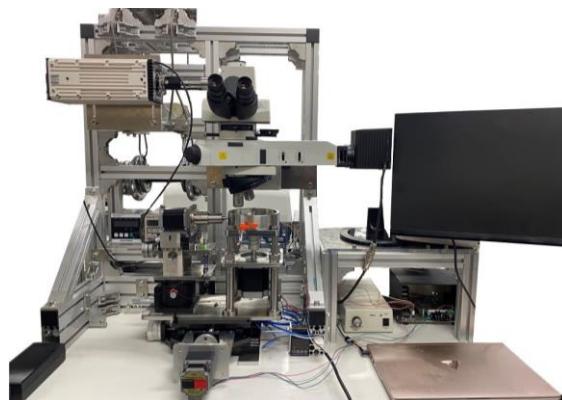


Fig. 1 Ball-on-disk tribotester

Table 1 Friction test condition

Normal load, N	20 (543 MPa)
Sliding speed, mm/s	0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000
SRR, %	50
Temperature, °C	25.5 ± 0.5

4. 実験結果

4.1 摩擦係数測定の結果

Figure 3 に non texture, 10μm dimple, parallel, vertical テクスチャを用いた場合のしゅう動速度に対する摩擦係数を示す。しゅう動速度が 1000 mm/s, 100 mm/s の流体潤滑域では, parallel, vertical テクスチャが最も高い摩擦係数を示す傾向が観察された。一方で、低速の境界・混合潤滑域では 10μm dimple, parallel, vertical テクスチャが non texture よりも低い摩擦係数を示した。また、10μm dimple テクスチャが最も低い摩擦係数を示すことが確認された。これらの結果から境界・混合潤滑域の摩擦係数の低減には dimple 形状が最適であると考えられる。そのため、dimple テクスチャが摩擦係数へ及ぼす影響を調査するため dimple 直径を変更して再度実験を行った。Fig. 5 に dimple 直径を変更した場合のしゅう動速度に対する摩擦係数を示す。境界潤滑域から流体潤滑域にかけて dimple 直径が小さくなるにつれ摩擦係数が減少する傾向が確認された。

4.2 膜厚測定の結果

Figure 4 に non texture, 10μm dimple, parallel, vertical テクスチャを用いた場合のしゅう動速度に対する中央膜厚を示す。この結果より、しゅう動速度が 10 mm/s 以下の境界・混合潤滑域では 10μm dimple, parallel, vertical テクスチャの油膜厚さは non texture よりも大きく、10μm dimple テクスチャが最も大きな油膜厚さを示した。Fig. 5 に直径の異なる dimple テクスチャを用いた場合のしゅう動速度に対する中央膜厚を示す。この結果から境界潤滑域から流体潤滑域にかけて油膜厚さは dimple 直径が小さくなるにつれて増加する傾向が確認された。

5. 考察

テクスチャを施したサンプルは、non texture と比較して、しゅう動速度 10 mm/s 以下の境界・混合潤滑域で厚い油膜厚さを形成し、低い摩擦係数を示した。低速の境界・混合潤滑域では、かき揚げによる潤滑油の供給が不十分であり、メニスカスにより潤滑油がしゅう動部に保持されている状態である。そのため、境界・混合潤滑域では、テクスチャ溝内の潤滑油が接触時のボールの弾性変形により押し出され、しゅう動部に供給されることで油膜厚さが増加したと考えられる。テクスチャ形状の違いに着目すると、Fig. 3, Fig. 5 より境界・混合潤滑域における油膜厚さの増加および摩擦低減効果は、10μm dimple テクスチャの方が parallel, vertical テクスチャよりも大きかった。これは、parallel, vertical テクスチャの場合、接触部において潤滑油が溝部を通して外部へ排出されやすくなつたためと考えられる。また、流体潤滑域において parallel, vertical テクスチャの摩擦係数が non texture と比較して増加した原因是、溝部が接触部外まで伸びているため、溝部での流体動圧が低下する一方で、プラト一部での圧力が増加するため、潤滑油の粘度が増加し摩擦係数が増加したものと考えられる。

Figure 4, Fig. 6 より dimple 直径が小さいほど厚い油膜厚さを形成し、低い摩擦係数を示した。これは dimple 直径が小さいほど潤滑油の供給源となる dimple 溝が接触面内に多く存在するためであると考えられる。特に 110μm dimple テクスチャで油膜厚さが小さく、摩擦係数が増加している原因是、dimple 直径が大きく接触部外まで溝が広がっているため、接触部における潤滑油が溝部を通して外部へ排出されやすくなつたためと考えられる。

6. 結言

開発した潤滑膜厚その場観察装置を用いて、表面テクスチャが油膜厚さと摩擦係数に与える影響について調査した結果、以下の知見を得た。

- 境界・混合潤滑域において dimple, parallel, vertical テクスチャを用いた場合、dimple が最大の油膜厚さ最小の摩擦係数を示した。
- 流体潤滑域では non texture が最も低い摩擦係数を示した一方、vertical テクスチャが最も高い摩擦係数を示した。
- Dimple 直径が小さくなるにつれ、油膜厚さは増加し摩擦係数は減少する傾向を示した。

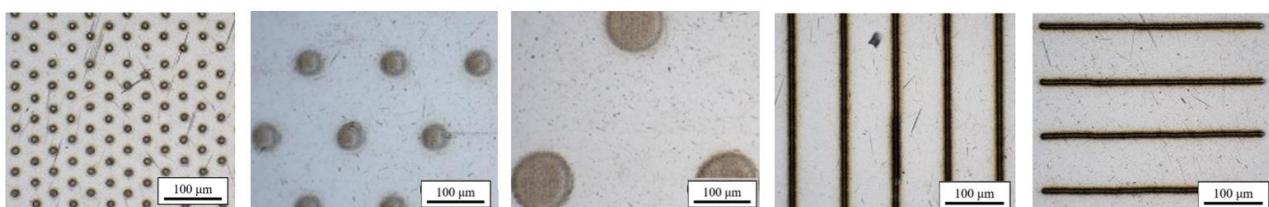


Fig. 2 Schematic diagrams of the textured ball specimen

Table 2 Parameter of surface texture

	Dimple	Parallel	Vertical
10 μm	48 μm	110 μm	
Pitch, μm	30	142.4	332.4
Depth, μm	1.0	1.0	1.0
Diameter (Width), μm	10	48	110
Area ratio, %	10	10.3	9.9
		10	10

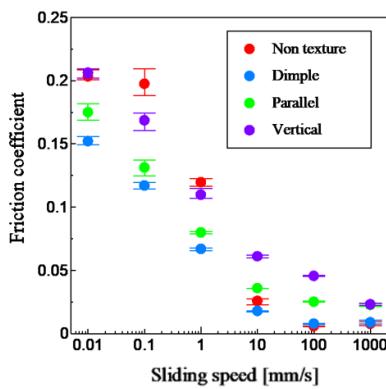


Fig. 3 Comparison of friction coefficient as a function of sliding speed

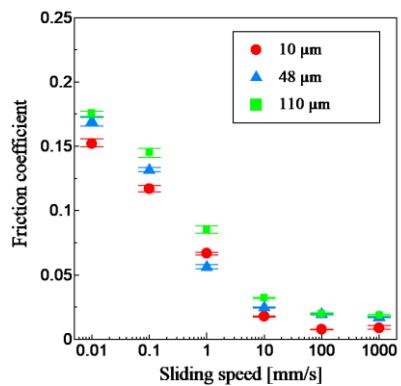


Fig. 4 Comparison of central film thickness as a function of sliding speed

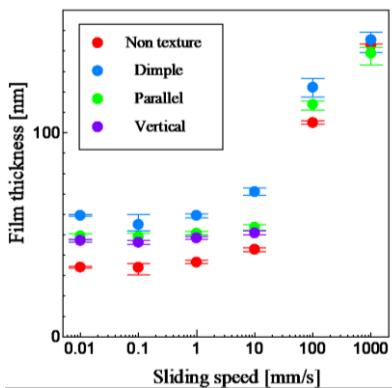


Fig. 5 Comparison of friction coefficient of dimple texture with different diameter as a function of sliding speed

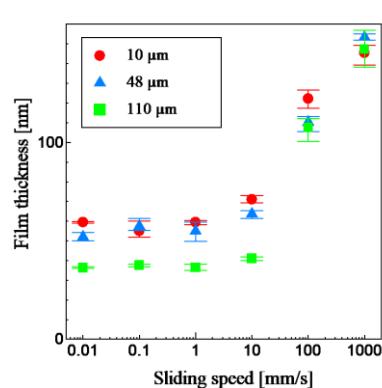


Fig. 6 Comparison of central film thickness of dimple texture with different diameter as a function of sliding speed

謝辞

本研究は、2021年度の自動車用動力伝達技術研究組合（TRAMI）の委託/共同研究により実施したものです。

文献

- 1) Sorin-Cristian Vladescu, Andrew V. Olver, Ian G. Pegg, Tom Reddyhoff, The effects of surface texture in reciprocating contacts – An experimental study, *Tribology International*, 82 (2015) 28-42.
- 2) C. Gachot, A. Rosenkranz, S.M. Hsu, H.L. Costa, A critical assessment of surface texturing for friction and wear, *Wear* 372-373 (2017) 21-41.