

柱状表面テクスチャパターンによる潤滑下での摩擦制御に関する研究

Research on Friction Control by Pillar-shaped Surface Texturing Patterns under Lubricated Conditions

東理大・工（学）*松浦 匠 東理大・院（学）北村 亮輔 東理大・院（学）松田 航

東理大・工（正）佐藤 魁星 東理大・工（正）佐々木 信也

Takumi Matsuura*, Ryosuke Kitamura**, Wataru Matsuda**, Kaisei Sato*, Shinya Sasaki*

*Tokyo University of Science, **Graduate School of Tokyo University of Science

1. はじめに

自動変速機で使用される湿式クラッチの締結は、動摩擦から静摩擦に移行するしゅう動時の摩擦を用いる。高速かつ滑らかな締結を行うためには、高摩擦を確保しつつ、摩擦に起因する振動を抑制する必要がある。したがって、高く安定した動摩擦係数の発現が重要となる。なお、しゅう動面を保護し製品寿命を確保するため、潤滑油を介在させた摩擦が前提となる。潤滑油中で高い動摩擦を得るためには、完全流体潤滑への遷移を抑えることが一つの解となる。

しゅう動表面の潤滑特性制御手法として、表面テクスチャリングがある。高い摩擦を実現するテクスチャの例としては、動物の足裏に備わる柱状構造が報告されており⁽¹⁾、これを基にした医療用ピンセット⁽²⁾や湿式クラッチ⁽³⁾等における有効性が示されている。しかしながら、それらの高摩擦発現の詳細なメカニズムは不明である。

本研究では、潤滑下における柱状テクスチャによる高摩擦発現メカニズムの解明を目的とし、摩擦試験ならびに数値解析より、油膜厚さならびに動圧分布へのテクスチャの影響を調査した。

2. 実験・解析方法

2.1 ストライベック線図測定

ストライベック線図測定では、リングオンリング摩擦試験機(MFT-5000, Rtec Instruments, US)を用いた。Fig. 2 にしゅう動条件の模式図を示す。試験は、上下 2 枚のリングが面接触し、上部試験片が一方方向に回転してしゅう動する。リング試験片のしゅう動面形状は、内径 20 mm、外径 29 mm である。Fig. 1 に試験片のテクスチャ形状を示す。テクスチャは、六角形・丸形・ひし形の 3 種類とし、工具鋼 SK105 リング表面にレーザ除去加工によりパターンを形成した。柱状テクスチャプラトー部の面積率は概ね同等(約 50 %)とし、柱の高さは約 20 μm であった。潤滑油には、自動車のオートマチックトランスミッション用潤滑油(EJ-1, ENEOS, JP)を用いた。Table 5 に潤滑油の動粘度を示す。回転する上部にはノンテクスチャ試験片を、下部にテクスチャ試験片を固定し、しゅう動面が浸漬されるよう潤滑油を供給した。摩擦係数は、しゅう動速度を複数段階に設定し、それぞれの速度で一定時間(本試験では 20 s)保持して時間平均値を求めた。Table 1 に実験条件を示す。なお、しゅう動速度の計算は、基準円直径である 24.5 mm を代表値に用いた。

2.2 油膜厚さ測定

油膜厚さ測定では、油膜厚さその場観察摩擦試験装置を用いた。下部試験片にはストライベック線図測定と同じリング試験片、上部試験片には Cr 膜と SiO₂ 膜をコーティングした $\phi 100\text{ mm} \times$ 高さ 10 mm のガラスディスク試験片を用いた。油膜厚さ測定には白色干渉法を用い、白色干渉光の干渉縞の次数を読み取ることでプラトー部油膜厚さを測定した。Table 2 に実験条件、Fig. 3 にしゅう動条件の模式図を示す。

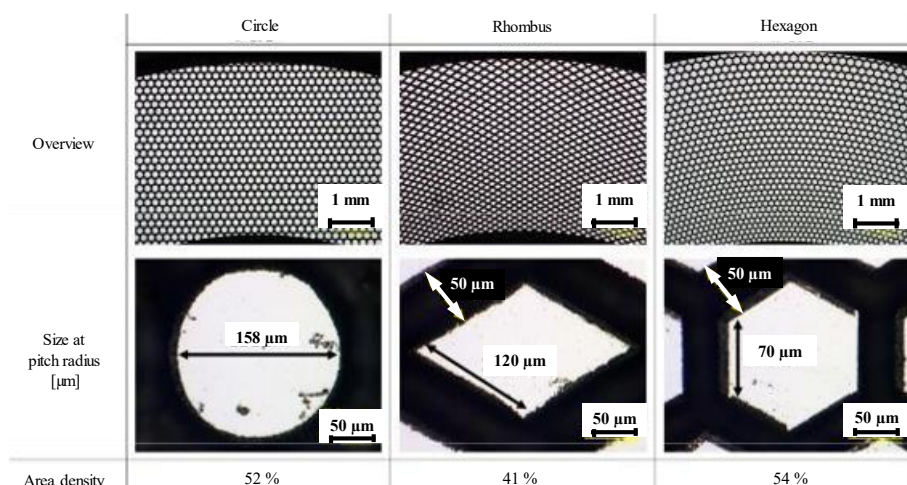


Fig. 1 Texture designs on test pieces

Table 1 Sliding test conditions
on metal-metal friction

Contact Pressure, MPa	1.0	2.5
Oil temperature, °C	40	100
Sliding velocity, mm/s	3~3000	1~1000
Velocity retaining time, s	20	
Velocity steps number	20	

Table 2 Sliding test conditions
on glass-metal friction

Contact Pressure, MPa	0.89
Oil temperature, °C	40 80
Sliding velocity, mm/s	1~500
Velocity retaining time, s	2
Velocity steps number	10

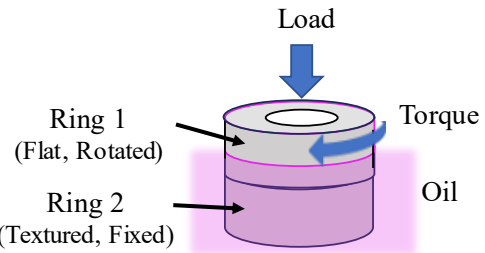


Fig. 2 Schematic diagram of metal-metal sliding

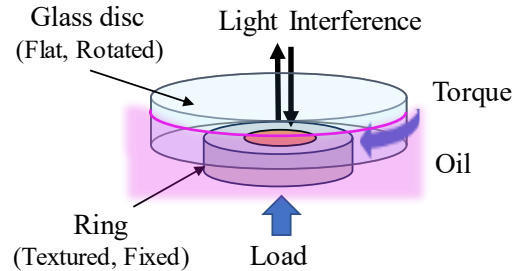


Fig. 3 Schematic diagram of glass-metal sliding

2.3 数値解析

流体解析ソフト(OilFilm, NewtonWorks, JP)を用い、しゅう動する2面間の潤滑状態を数値流体解析し、油膜厚さと圧力分布を求めた。Eq. 1 に示す支配方程式は、キャビテーション発生を考慮した修正レイノルズ方程式である。Table 3 に Eq. 1 内の変数について記す。解析に用いた表面形状は、実験で用いたテクスチャ形状を模擬した。Fig. 4 に表面形状を示す。なお、柱の高さは 20 μm に統一し、各面形状における1つの島の面積と島全体の面積率も統一した。Table 4 に解析条件を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial(F\phi)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial(F\phi)}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2p_b} \frac{\partial}{\partial x} \{ [1 + (1 - F)\phi] h_T \} + \frac{(U_1 - U_2)\sigma F}{2p_b} \frac{\partial \phi_{sx}}{\partial x} \quad (1)$$

Table 3 Parameters on
modified Reynolds equation

μ	Viscosity
h	Oil film thickness
U	Fluid velocity
P_c	Cavitation pressure
F	Cavitation index; $F = \frac{1}{2} (\tanh(\chi\phi) + 1)$
	$F\phi = \frac{p - p_c}{2p_b}$
ϕ_x	Pressure flow factor
ϕ_{sx}	Shear flow factor

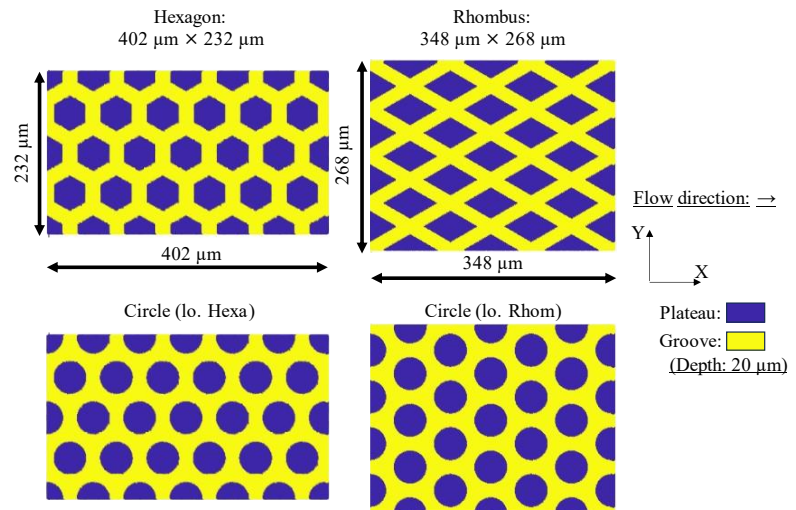


Fig. 4 Texture designs for numerical analysis

Table 4 Test conditions on numerical analysis

Contact Pressure, MPa	1.0
Oil temperature, °C	40
Cavitation Pressure, kPa	-30
Sliding velocity, mm/s	1~1000
Velocity steps number	4

Table 5 Kinematic viscosity of automatic transmission oil

Temperature, °C	Kinematic viscosity, mm^2/s
40	26.8
80	8.60
100	5.73

3. 実験結果

3.1 ストライベック線図

Fig. 5 に高速条件での試験結果を示す。テクスチャの有無により μ - V 曲線に顕著な差異が確認された。ノンテクスチャ表面では混合潤滑域と流体潤滑域での遷移を示す μ - V 曲線が得られた。一方でテクスチャ表面では、境界潤滑域と混合潤滑域での遷移と考えられる μ - V 曲線が得られ、柱状テクスチャによる高摩擦化が確認された。

テクスチャ間で摩擦特性を比較すると、明瞭な差異は確認されなかったが、ひし形は六角形より高い摩擦係数を示した。

3.2 油膜厚さ

油膜厚さその場観察摩擦試験装置を用いた 40°C における油膜厚さならびに μ - V 曲線の結果を Fig. 6, 7 に示す。テクスチャ表面では、全速度域でノンテクスチャ表面より油膜厚さが小さいことが確認された。この原因は、テクスチャ表面においては、しゅう動面から潤滑油が排除されたためと考えられる。油膜厚さの低下は、流体潤滑域から混合・境界潤滑域への遷移を促し固体接触の増加をもたらす。これが、テクスチャ付与による高摩擦化の理由と考えられる。

テクスチャ間を比較すると、高速度域において、六角形が他テクスチャ表面と異なる傾向を示した。六角形テクスチャにおいては、他のテクスチャに比べ高速度域で油膜厚さが大きく、摩擦係数が低くなることが確認された。一方、約 63 mm/s 以下の速度ではテクスチャ間の有意差はみられなかった。油膜測定装置で取得した μ - V 曲線は、Fig. 5 と類似する傾向が確認された。

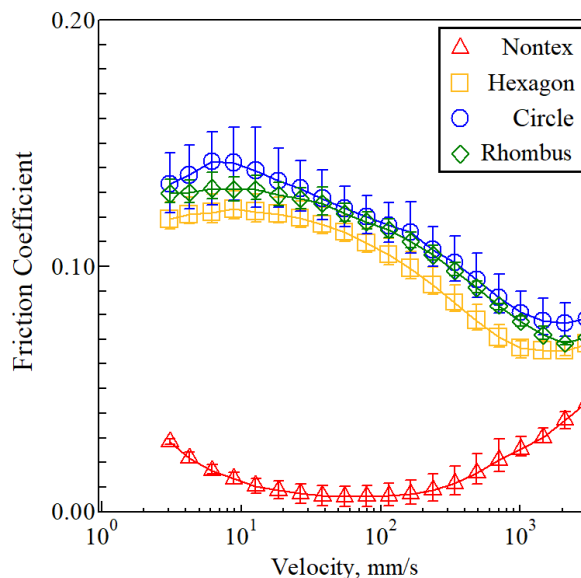


Fig. 5 μ - V curve at high velocity condition; 1 MPa, 40°C

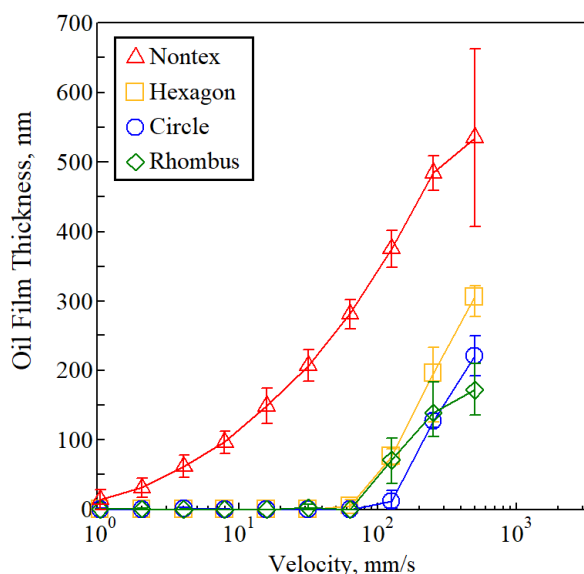


Fig. 6 Oil film thickness measured with interferometer; 0.89 MPa, 40°C

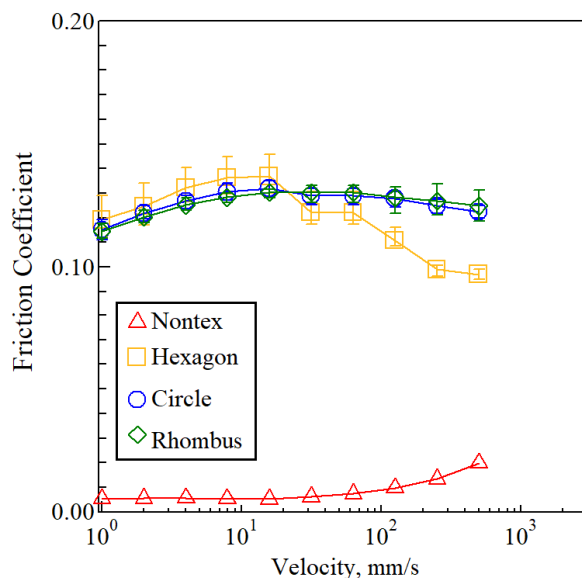


Fig. 7 μ - V curve measured with interferometer; 0.89 MPa, 40°C

3.3 数値解析

Fig. 8 に各テクスチャ表面における油膜厚さの数値解析結果を示す。各テクスチャ間で油膜厚さを比較すると、ひし形の油膜厚さが最小となった。六角形の油膜厚さがひし形に比べ大きい傾向は、Fig. 6 の油膜厚さ測定結果と一致する。ひし形の油膜厚さが小さいことは、ひし形の摩擦係数が高いことや、テクスチャ間ではひし形のみ焼き付きを生じたことと符合する。

Fig. 9 に六角形テクスチャの流体圧力分布の一例を示す。全テクスチャの解析結果において、正の圧力はテクスチャのプラトー部前方に集中し、溝部は領域端の外圧を概ね維持した。プラトー部前方の高圧は、流入時のくさび膜効果によるものである。プラトー部内での側面や後方に向けた負の圧力勾配は、プラトー部の潤滑油が幅広く側面や後方から溝へ流出することにより生じたと考えられる。このような流体圧力変化が、柱状テクスチャ表面の膜厚増加を抑制し、固体接触圧力の増加と高い摩擦係数の維持をもたらしたと考えられる。

一般に、直線状の単純な溝テクスチャでは、流れに対し平行な溝が膜厚を低減し、垂直な溝が膜厚を増加させることが知られている⁽⁴⁾。柱状テクスチャの全てにおいて、流れに対し横並びの柱の間の溝が平行に近い場合、ノンテクスチャに比べ膜厚が小さくなったと考えられる。特にひし形については、溝が平行に近いもののみで構成されているため、テクスチャ間でも膜厚が小さくなったと考えられる。一方、特に六角形については、プラトー部形状の前後面となる一辺が流れに垂直になるため、柱状テクスチャとしては大きな膜厚が得られたと考えられる。

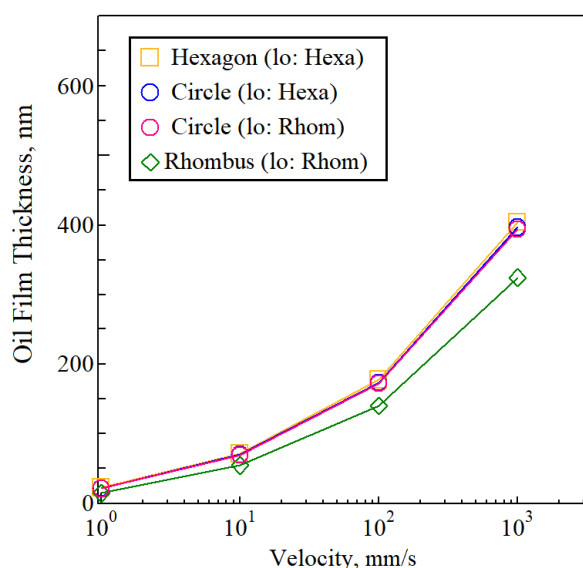


Fig. 8 Numerical analysis result of oil film thickness; 1 MPa, 40°C

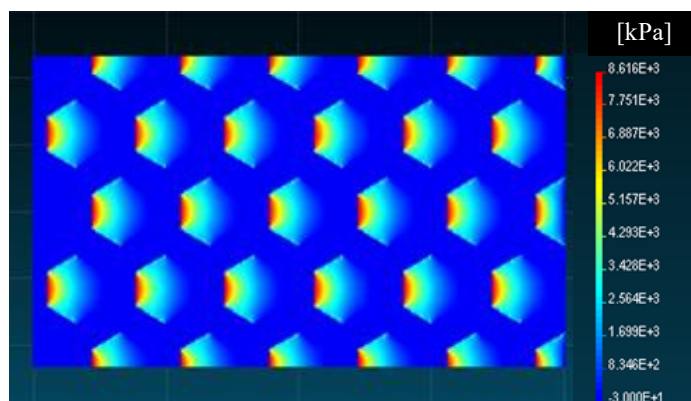


Fig. 9 Numerical analysis result of pressure distribution on Hexagon surface; 1 MPa, 40°C

4. 結言

柱状テクスチャによる高摩擦発現のメカニズム解明を目的とし、柱状テクスチャ表面の摩擦試験ならびに数値流体解析を実施し、油膜厚さと動圧分布を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 柱状テクスチャは、油膜厚さの増加を抑制し、混合潤滑域を高速条件寄りに拡大する。
- (2) 柱状テクスチャによる油膜厚さの増加抑制は、くさび膜効果で生じるプラトー部前方の高圧の油を溝へ誘導し広い方向から低圧化する圧力分布の形成に起因すると考えられる。
- (3) 油膜厚さならびに摩擦係数は、一部条件において各柱状テクスチャ形状間で差異が生じた。各テクスチャ表面の摩擦特性の違いは、プラトー部形状ならびに溝の配置角度に起因する油の流入と流出のバランスで定まる油膜厚さの違いによるものと考えられる。

文献

- 1) J. K. A. Langowski, D. Dodou, M. Kamperman & J. L. van Leeuwen: Tree frog attachment: mechanisms, challenges, and perspectives, *Frontiers in Zoology*, 15, 1 (2018) 1-9.
- 2) H. Chen, L. Zhang, D. Zhang, P. Zhang, & Z. Han: Bioinspired Surface for Surgical Graspers Based on the Strong Wet Friction of Tree Frog Toe Pads, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 25 (2015) 13987-13995.
- 3) 松尾：2種類の生物からヒントを得たクラッチテクスチャ技術, *JSAE Symposium*, 4-22 (2022) 26-29.
- 4) M. Zimmer, S.-C. Vlădescu, L. Mattsson, M. Fowell, & T. Reddyhoff: Shear-area variation: A mechanism that reduces hydrodynamic friction in macro-textured piston ring liner contacts, *Tribology International*, 161 (2021) 1-16.