

柱状表面テクスチャによる混合潤滑下での摩擦制御における気泡発生の影響について  
Impact of Bubble Formation on Friction Control in Mixed Lubrication Using Columnar Surface  
Texturing Patterns

東理大・工（院）\*松浦 匠      東理大・工（正）佐藤 魁星      東理大・工（正）佐々木 信也

Takumi Matsuura\*, Kaisei Sato\*\*, Shinya Sasaki\*\*

\*Graduate School of Tokyo University of Science, \*\*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、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状態の制御手法の一つに、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<sup>1)</sup>、これを参考にした医療用ピンセット<sup>2)</sup>や湿式クラッチ<sup>3)</sup>においてその有効性が確認されている。潤滑下における柱状テクスチャによる高い摩擦の実現は、軸受特性数の増加に伴うしゅう動面間の油膜厚さの上昇を抑え、流体潤滑領域への遷移を抑制するためと考えられている。

湿式クラッチ摩擦界面においては、多孔質構造の摩擦材に起因する気泡が油膜中に発生する可能性が高い<sup>4)</sup>。油膜中の気泡の発生は、油膜の負荷容量を低下させて摩擦低減を抑制する反面、油膜破断を誘発し潤滑不良に至る可能性もある。高い摩擦を安定して発生させるためには、テクスチャ形状に加え、気泡の挙動も考慮し、摩擦特性の関係を調査する必要がある。

本研究では、油潤滑下における柱状テクスチャによる摩擦制御特性の調査にあたり、油膜中における気泡の発生と挙動をその場観察することにより、その影響について検討した。

2. 実験・解析方法

2.1 摩擦特性測定

本試験では、油膜厚さその場観察摩擦試験装置を用いた。Figure 1 に摩擦試験機の概略を示す。下部にテクスチャ形状を付与したリングを、上部に薄膜を付与したガラスディスクを固定して面接触させ、上部試験片を一方方向に回転させてしゅう動を行う。リング試験片のしゅう動面形状は、内径φ20 mm、外径φ29 mmである。Figure 2 に試験片のテクスチャ形状を示す。柱状テクスチャの平面形状は、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一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、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、それぞれの速度を2 s間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。

Table 1 Sliding test conditions

Contact Pressure, MPa	0.1 0.2 0.5
Oil temperature, °C	40 80
Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s	26.8 8.60
Sliding velocity, mm/s	1~500
Velocity retaining time, s	2
Velocity steps number	10

Table 2 Measuring conditions for white-light interferometry

Disc reflective layer	Cr 7 nm
Disc spacer layer	SiO <sub>2</sub> 500 nm
High-speed camera	MEMRECAM GX-3, NAC, JP
Recording speed, fps	100
Magnification	20x
Range per pixel, μm/px	1.0
Oil film thickness fitting software	FiDiCa, JFE Techno-Research, JP

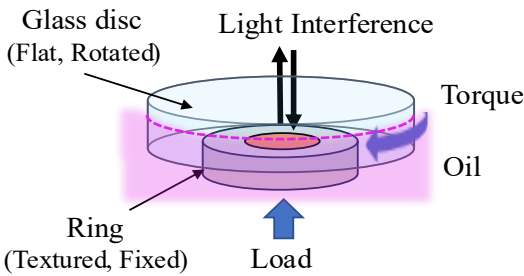


Fig. 1 Schematic diagram of sliding tests

Table 3 Observing conditions of sliding interface

High-definition camera	MC170, Leica, DE
Recording speed, fps	100
Magnification	5x
Range per pixel, μm/px	1.1
Pixel count, px	1024x768

## 2.2 油膜厚さ測定

油膜厚さは摩擦測定と同時に測定した。上部試験片に Cr 膜と SiO<sub>2</sub> 膜を付与した  $\phi 100\text{ mm} \times$  高さ 10 mm のガラスディスク試験片を用い、摩擦面プラトー部の白色干渉光の分光スペクトルから油膜厚さを算出した。Table 2 に白色干渉光の測定条件を示す。

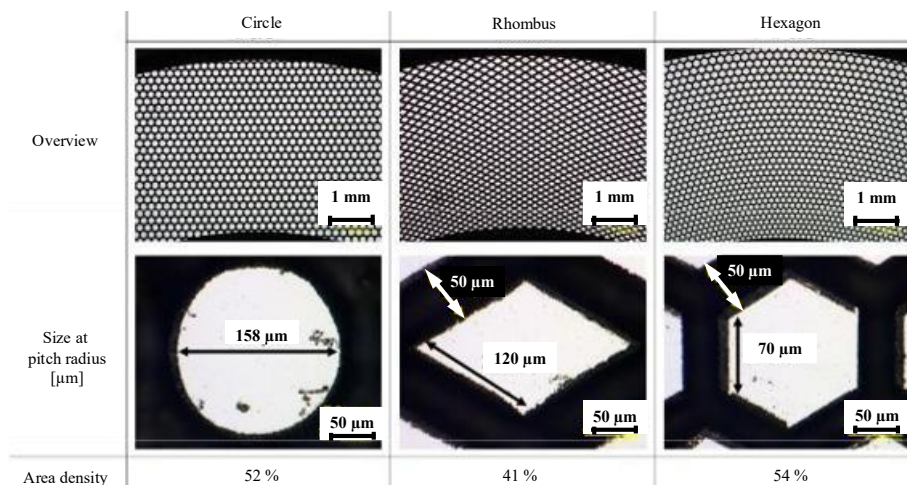


Fig. 2 Texture designs on test pieces

## 2.3 気泡観察

摩擦界面における気泡発生および油膜状態を観察するため、顕微鏡にカメラを取り付けて低倍率で動画撮影した。Table 3 に撮影条件を示す。

## 3. 実験結果・考察

### 3.1 摩擦特性測定

Figure 3 に面圧 0.2 MPa・油温 80°Cでの摩擦-速度特性を、Fig. 4 に同面圧で油温 40°Cでの摩擦-速度特性をそれぞれ示す。80°Cではテクスチャ形状によらず単調に近い正勾配の摩擦特性がみられた。40°Cの場合は、丸形テクスチャの場合に約 30 mm/s 付近でピーク値を示す様子が見られた。

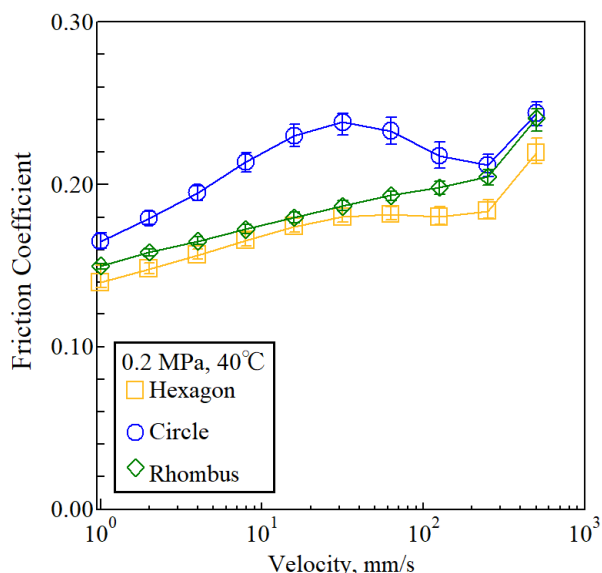


Fig. 3  $\mu$ - $V$  curve at 0.2 MPa, 40°C

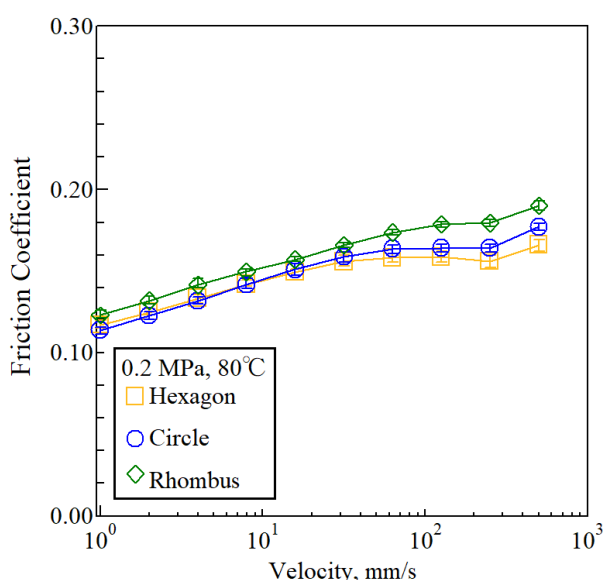


Fig. 4  $\mu$ - $V$  curve at 0.2 MPa, 80°C

### 3.2 油膜厚さ測定

Figure 5, 6 に同上条件での油膜厚さ変化の測定結果をそれぞれ示す。摩擦係数の結果と同様に、40°Cの温度条件、丸形テクスチャにおいて、ほかのテクスチャと異なる傾向が確認された。ほかのテクスチャでは、徐々に油膜厚さが増加していくのに対して、丸形テクスチャでは、1-100 mm/s の領域で油膜厚さの低下が生じ、静止時より有意に小さい油膜厚さが確認された。また、油膜厚さ低下を示したしゅう動速度域も摩擦特性のピーク速度域と概ね合致した。したがって、丸形テクスチャで見られた特異な摩擦ピークは、油膜厚さの低下によるものと考えられる。

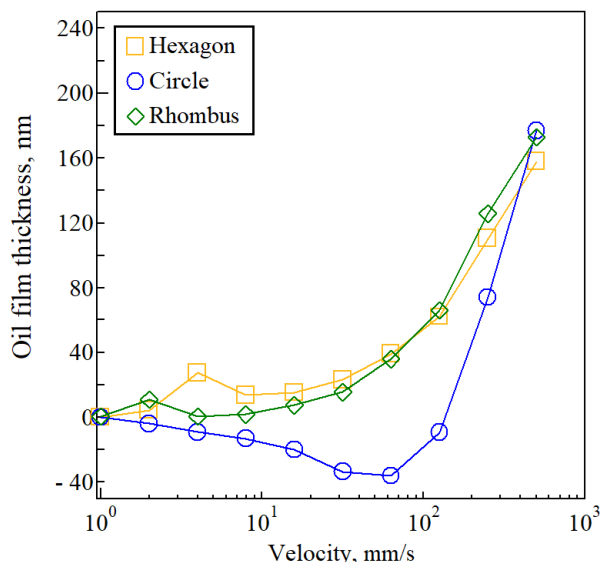


Fig. 5 Oil film thickness at 0.2 MPa, 40°C

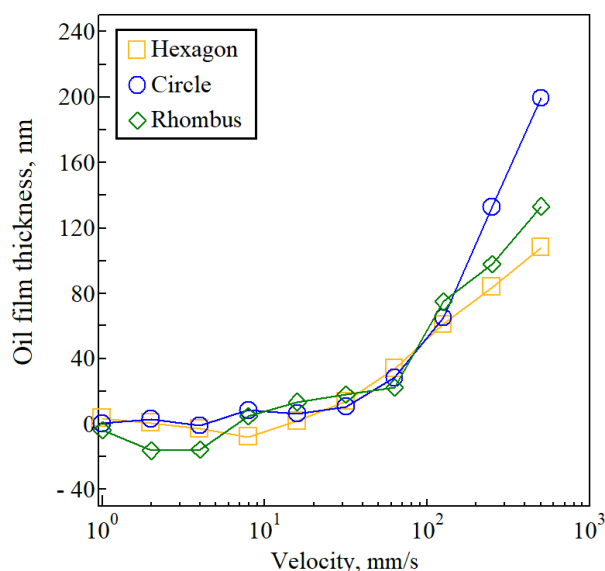


Fig. 6 Oil film thickness at 0.2 MPa, 80°C

### 3.3 気泡観察

Figure 7~12 に各テクスチャにおける、しゅう動速度 32 mm/s での摩擦面画像をそれぞれ示す。80°Cではすべてのテクスチャで均一な油膜が形成された一方、40°Cでは丸形テクスチャのプラトー部に気泡領域が断続的に出現し、油膜形成が不均一となった。丸形テクスチャで気泡領域が出現したしゅう動速度範囲も、摩擦特性や油膜厚さのピークと概ね対応した。低温で気体発生が増加したことから、潤滑油中に溶存した気体が、負圧部で析出したと考えられる<sup>9)</sup>。気泡の発生は、局所的な油膜破断をもたらすと考えられる。六角形テクスチャやひし形テクスチャの場合、40°Cでもプラトー部に気泡を確認できなかったことから、丸形テクスチャにおいて見られた摩擦の上昇は、気泡の発生によるものと考えられる。丸形テクスチャの場合は、六角形テクスチャやひし形テクスチャに比べ、溝幅が狭くなる部分が多くあり、この溝流路の変化により生じる動圧や流速から、油膜破断の核となる気泡の発生が促進されたと考えられる。

## 4. 結言

油潤滑下における柱状テクスチャによる摩擦制御特性の調査にあたり、油膜中における気泡の発生と挙動をその場観察することにより、以下の知見を得た。

- (1)気泡の発生は 80°Cよりも 40°Cで発生しやすく、特に丸形テクスチャの場合に顕著に見られた。
- (2)丸形テクスチャにおいて、摩擦の上昇と油膜厚さの減少に相関が見られ、この際に気泡の発生が関与することがわかった。

今後、気泡発生メカニズムと、これを制御するためのテクスチャ形状の設計指針の確立を目指す。

## 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) J. J. GIL, H. Sugiyama, T. Arai: Visualizaion of Cavitation Phenomena in Wet Clutch Engagement Process, *JSME international journal. Ser. C, Dynamics, control, robotics, design and manufacturing*, 40, 1 (1997) 144-149.
- 5) 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.
- 6) 大津・田中・杉村：点接触 EHL における気体性キャビテーションの成長に及ぼす雰囲気温度の影響，*トライボロジスト*, 59, 10, (2014) 648-656.

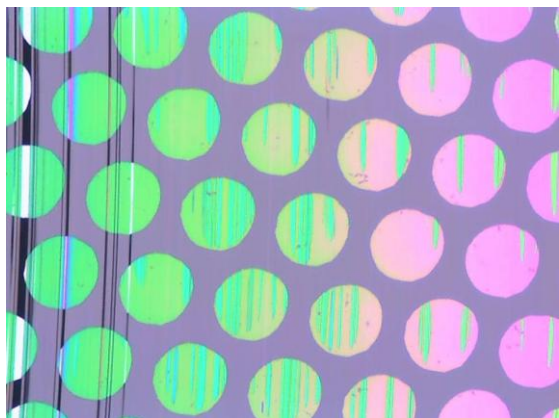


Fig. 7 Surface image on circle pillar texture,  
0.2 MPa, 40°C, 32 mm/s

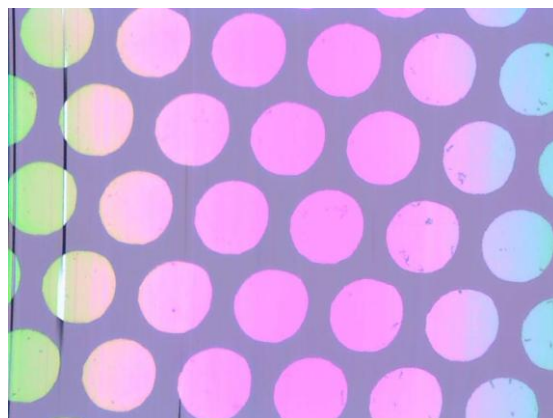


Fig. 8 Surface image on circle pillar texture,  
0.2 MPa, 80°C, 32 mm/s



Fig. 9 Surface image on hexagon pillar texture,  
0.2 MPa, 40°C, 32 mm/s

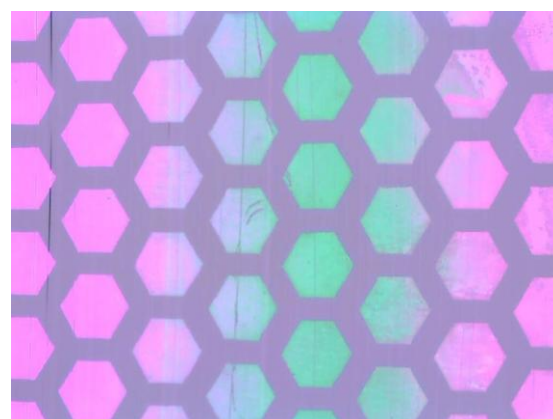


Fig. 10 Surface image on hexagon pillar texture,  
0.2 MPa, 80°C, 32 mm/s



Fig. 11 Surface image on rhombus pillar texture,  
0.2 MPa, 40°C, 32 mm/s

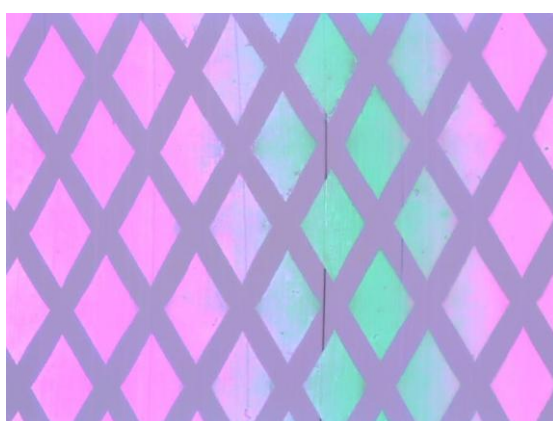


Fig. 12 Surface image on rhombus pillar texture,  
0.2 MPa, 80°C, 32 mm/s