

負圧発生による高摩擦化を意図したゴムの表面テクスチャリングに関する研究

A Study on Surface Texturing of Rubber Intended for High Friction by Negative Fluid Pressure

東北大学 (学) *西本 葵 (正) 石塔 新太 (正) 西 駿明 (正) 山口 健

Aoi Nishimoto, Arata Ishizako, Toshiaki Nishi, Takeshi Yamaguchi

Tohoku University

1. 緒言

ゴム材料は乾燥状態で高摩擦を示す一方、液体潤滑下では摩擦が著しく低下する。例えばタイヤや靴底の摩擦低下は交通事故や転倒事故の原因となるため、液体中においても高い摩擦を発現させることは安全性や信頼性の観点から重要である。これまでに液体潤滑下におけるゴムの高摩擦化を目指した多くの研究が行われており、Ishizako ら¹⁾はゴムブロックの接触界面に負の流体圧力（負圧）が発生する時に高摩擦化することを明らかにした。また Ishizako ら²⁾は、接触界面に負圧を発生させることを意図した傾斜の溝をゴムブロックに付与することが高摩擦化に有効であることを明らかにしている。しかし、くさび膜効果を得る際に最大負荷容量となる形状が傾斜平面流路ではなく段付平行流路であることは知られている³⁾。そのため傾斜溝ではなく段付平行溝を付与することで、より大きな負圧を発生させることができれば、流体圧力を利用したさらなる高摩擦化が期待できる。そこで本研究では、負圧の発生を意図した段付平行溝テクスチャを付与したゴムブロックのグリセリン潤滑下における摩擦試験を行い、段付平行溝の付与とその本数が摩擦係数に与える影響を明らかにする。

2. 段付平行溝で発生する負圧の推定

負圧を発生させるために好適な段付平行溝の形状を決定するため、負圧の推定を行った。Figure 1 に、段付平行溝を有するゴムブロックと相手面の接触界面を模擬した流路モデルを示す。同図は粘度 η の液中においてゴムブロックと接触する相手面が速度 v で運動するときの界面の流路モデルである。段付前の区間の長さを L_1 、その膜厚を h_1 、段付後の区間の長さを L_2 、その膜厚を h_2 、 h_2 と h_1 の差分を溝深さ D とする。ゴムの前端と後端において流体圧力は大気圧 P_0 とすると、圧力分布は入口側から段付部まで直線的に減少し、段付部から出口側に向かって直線的に増加する。この流路の段付部で発生する流体圧力 P_s （ゲージ圧）は以下の式で求められる。また、圧力の下限値が $-P_0$ を下回るとき、Fig. 1 に示すような台形の圧力分布が得られる。

$$P_s = -\frac{6\eta v L_1 L_2 D}{L_2 h_1^3 + L_1 (h_1 + D)^3} \quad (1)$$

この圧力値を位置 x で積分すると単位幅あたりの吸着力 $f_{\text{fluid_pred}}$ を推定できる。Figure 2 に D と L_1 に対する $f_{\text{fluid_pred}}$ の分布図の例を示す。同図より、 D および L_1 が小さいほど大きくなることが分かる。以上に基づいてゴムブロックの試験片に付与する段付平行溝の寸法を決定した。

3. 実験方法

本研究で用いたゴムブロック試験片の寸法を Fig. 3 に示す。試験片はシリコンゴム（Sylgard 184, Dow Inc.）に対して硬化剤 15%、酸化チタン 25%、シリカ 20%を配合して作製した 50 mm × 50 mm のゴムブロックであり、硬度（HS(A15)）は 75.5 であった。Figure 2 の丸印に対応する $L_1 = 5$ mm、 $D = 0.2$ mm の溝を試験片にレーザーカッター（Speedy 100, Trotec laser）で加工した。そして、Fig. 3(a)-(e)に示すように、溝の本数を $N = 0, 1, 3, 5, 9$ 本と増加させた。試験片は 90%濃度のグリセリン水溶液（ $\eta = 200$ mPa·s）で満たされたガラス板に荷重 88.4 N で接触させ、すべり速度 $v = 0.30$ m/s で直線運動させた。ガラス板には圧力センサ（113B28, 東陽テクニカ）と変位センサ（LK-H020, キーエンス）を取り付け、センサ直上を試験片が通過するときの流体圧力、断面形状を測定した。摩擦係数は、すべり距離 10 mm までの摩擦係数の最大値を静止摩擦係数 μ_s 、すべり距離 75 mm ~ 125 mm（圧力センサの直上通過時）の摩擦係数の平均値を動摩擦係数 μ_k とした。

4. 実験結果

各試験片の μ_s を Fig. 4(a)、 μ_k を Fig. 4(b)にそれぞれ示す。Figure 4(a)より、 μ_s は溝数に伴って増加し、 $N = 9$ では $N = 0$ と比較して 250%以上増加した。Figure 4(b)より、 μ_k は N

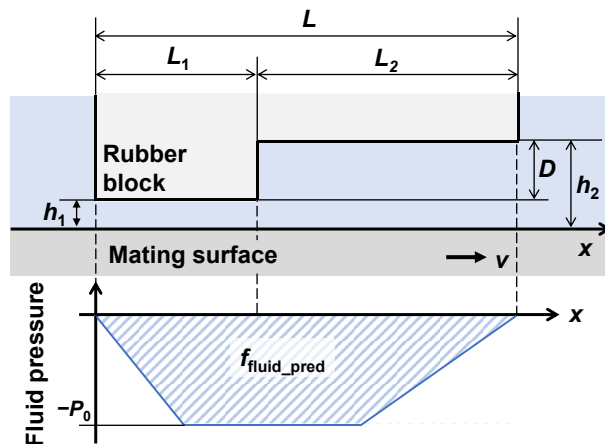


Fig. 1 Schematic of two-dimensional flow channel model and fluid pressure distribution

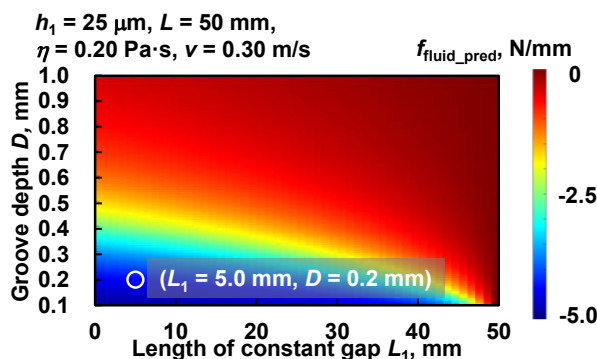


Fig. 2 Distribution of $f_{\text{fluid_pred}}$ as a function of the length of constant gap L_1 and groove depth D .

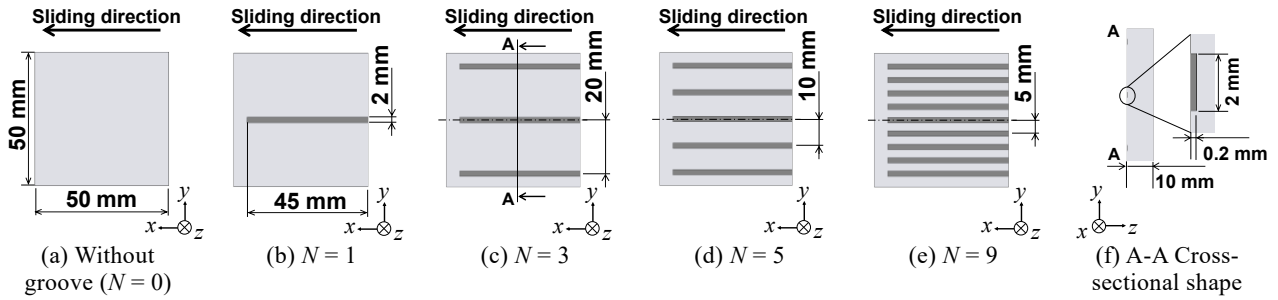


Fig. 3 Dimension of rubber block sample with and without stepped parallel groove

= 1 および $N=3$ は $N=0$ と比較して約 10%増加し, $N=5$ および $N=9$ は摩擦係数が約 20%増加した. これらの結果より, 溝の付与並びに溝数の増加が高摩擦化に有効であることが示された.

Figure 5 に試験片中央部の溝長手方向の流体圧力分布を示す. 同図より, 溝加工を施した試験片では約 -65 kPa の負圧が発生していることが確認でき, 試験片前端から後端にかけて広い領域で負圧が発生した. 溝の領域で発生する負圧は y 軸方向に一樣であるとして流体圧力を積分し吸着力 F_{fluid} を算出した. なお, $N=0$ は負圧が発生していないことから, F_{fluid} を 0 N とした. 得られた F_{fluid} と μ_k の関係を Fig. 6 に示す. 同図より, F_{fluid} の増加に伴い μ_k が増加する傾向が見られた.

Figure 7 に試験片底面とガラス面間の潤滑液の平均膜厚 h_{mean} と μ_k の関係を示す. 同図より, 界面の流体膜厚が溝加工前後で 20 μm 以上減少し, $N=1, N=3$ に対して $N=5, N=9$ の膜厚が減少する傾向を示した. また, h_{mean} が減少するに伴って, μ_k が増加する傾向が見られた.

5. 考察

段付平行溝テクスチャを付与した試験片が付与していない試験片に対して高摩擦を示した理由として, 溝の付与により底面の面積 (見かけの接触面積) は減少するものの, 負圧の発生により膜厚が減少し, 真実接触面積が増加したことが考えられる. また Fig. 4(a) に示すように, テクスチャの付与が μ_s の増加にも影響することが分かった. これは溝テクスチャの角部で応力集中が発生し, ガラス面との接触圧力が増加したことで, 静止時においてガラスとゴムブロックの直接接触が増加したためと考えられる. また, Fig. 5 の流体圧力分布は溝本数による差が見られないが, Fig. 7 の膜厚は $N=5, N=9$ が $N=1, N=3$ と比較して減少する傾向を示し, それに伴って μ_k が増加する傾向を示した. これは, 1 つの溝で発生する流体圧力が同じでも, 溝の本数を増やすことで吸着力を増加させ, 試験片底面と相手面間の流体膜厚を減少させることが可能であることを示唆している. そして, 流体膜厚の減少に伴って真実接触面積が増加したために μ_k も増加したと考えられる.

6. 結言

- (1) グリセリン水溶液潤滑下において段付平行溝テクスチャを付与した試験片は付与していない試験片と比較して $\mu_s \cdot \mu_k$ がともに増加した. また, 溝数の増加とともに $\mu_s \cdot \mu_k$ がともに増加した.
- (2) 段付平行溝テクスチャの付与により接触界面に負圧が発生し, 溝数の増加に伴い吸着力が増加し, 膜厚が減少する傾向を示した.

参考文献

- 1) A. Ishizako et al., Tribology International, 198(2024)109904.
- 2) A. Ishizako et al., Tribology International, 205(2025)110531.
- 3) 山本・兼田: トライボロジー 第2版, オーム社(2018), 81.

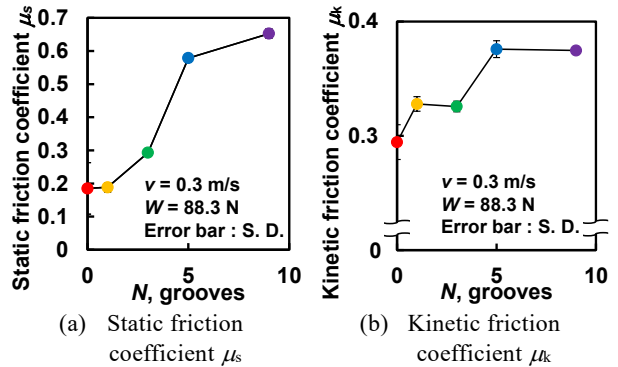


Fig. 4 Effect of number of grooves on friction coefficients

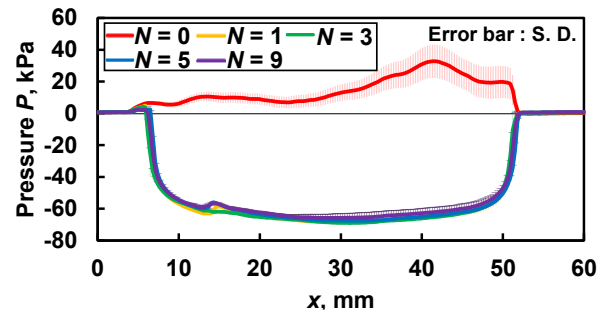


Fig. 5 Fluid pressure distribution at groove center position in the x-direction

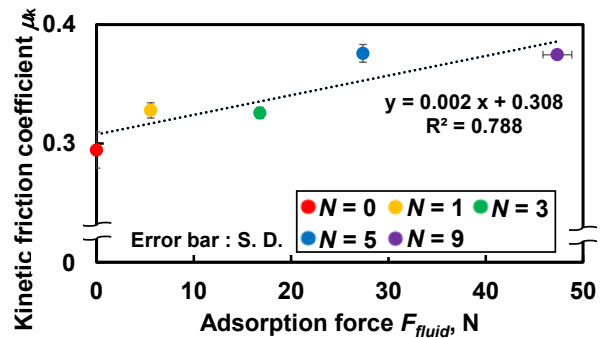


Fig. 6 Relationship between F_{fluid} and μ_k

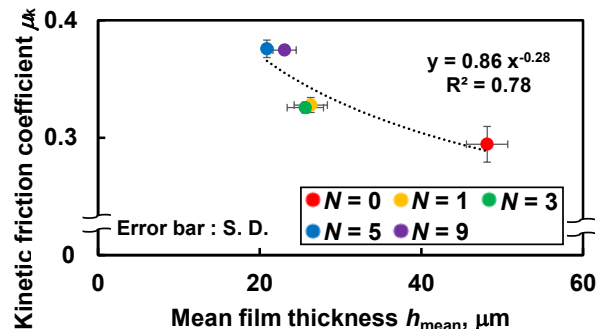


Fig. 7 Relationship between h_{mean} and μ_k