

ステンレス球との摩擦に伴いシリコンゴム内部に発生するひずみ分布に及ぼす 潤滑条件の影響

Influence of lubricant condition on strain distribution in silicone rubber bulk
during friction against a stainless-steel sphere

東北大（正）*西 駿明（正）上野 恭平（非）野本 智広

ブリヂストン（非）杉澤 進也（非）秦 大樹（正）山口 健（非）桑山 勲 東北大（正）山口 健

Toshiaki Nishi*, Kyohei Ueno*, Tomohiro Nomoto*,

Shinya Sugisawa**, Daiki Shin**, Ken Yamaguchi**, Isao Kuwayama**, Takeshi Yamaguchi*

*Tohoku University, **Bridgestone Corporation

1. 緒言

自動車の制動性を高める上で、タイヤトレッドを構成するゴムの摩擦制御技術は非常に重要である。車走行時ににおいてゴムトレッドはアスファルト路面上の突起先端部と接触し摩擦する。一般に、摩擦力は凝着項とヒステリシス項の和として説明されるが、特にゴムは粘弾性体であるためヒステリシス項の寄与が大きい。ゴムの摩擦制御技術確立するためには、ゴム内部に生じるひずみ挙動を知ることが求められる。Ueno ら¹⁾は、デジタル画像相関法（DICM）を用い、ゴムとアスファルト粗面の摩擦におけるゴム内部のひずみ分布の可視化に成功している。本研究では、摩擦に伴う接触部近傍でのひずみ時空間分布と潤滑条件の関係を明らかにすることを目的に、無潤滑下ならびにグリセリン潤滑下でのシリコンゴムとステンレス球の摩擦試験を行い、DICMによりゴム内部に生じるひずみ分布を算出した。

2. 実験方法

2.1 摩擦試験

本研究で用いたゴム試験片と摩擦試験の概略図を Fig. 1 に示す。ゴム試験片はシリコンゴム（SYLGARD 184, Dow Inc., USA）に黒色食用色素を 1% 混合した黒色層と、透明シリコンゴムの透明層の二層からなり、黒色層と透明層の間に白色の酸化チタン（TITONE A-190, 堺化学工業）粉末が散布されている。ゴム試験片は幅 38 mm、長さ 87 mm、高さ 10.0 mm のプレート状であり、黒色層の厚さ D は 0.231–7.80 mm の 7 水準とした。ゴム試験片の黒色層面とステンレス球（ $\phi = 16.0$ mm）を垂直荷重 9.81 N にて接触させ、すべり速度 $v = 20.0$ mm/s、すべり距離 $d = 20.0$ mm における直動すべりでの摩擦力を測定した。ゴム試験片とガラスステージはジグにより固定されており、黒色層面の裏面から鏡を介して、150 fps にて高速度カメラ（DITECT Corporation, HAS-L1）により接触面を観察した。気温 26°C、相対湿度 68% にて無潤滑下とグリセリン潤滑下で実施し、実験回数は各 1 回とした。

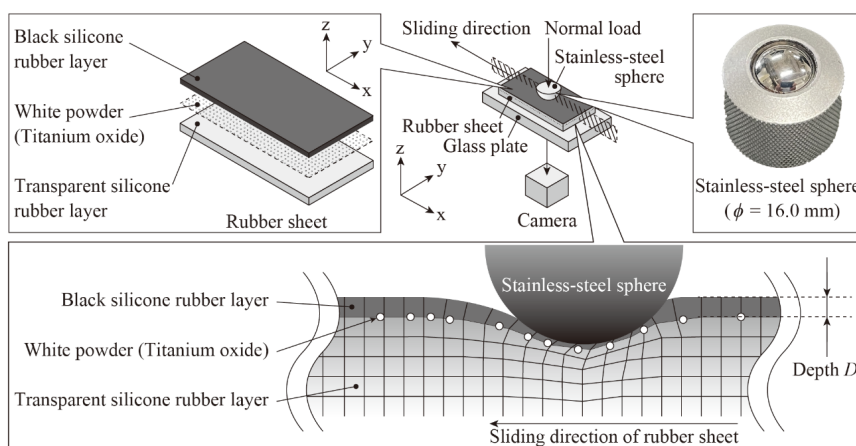


Fig. 1 Schematic of rubber sheet specimen and friction tests

Fig. 1 Schematic of rubber sheet specimen and friction tests. The top part shows a 3D view of the rubber sheet specimen with layers: Black silicone rubber layer, White powder (Titanium oxide), and Transparent silicone rubber layer. A stainless-steel sphere is shown in contact with the black layer. The bottom part shows a cross-sectional view of the contact area, illustrating the sliding direction of the rubber sheet and the depth D of the black layer.

2.2 ひずみ解析

観察面内（48 mm × 84 mm）に等間隔に配置されたサブセットの中心点周りの輝度分布の相関をとり、式(1)²⁾に基づき、最も相関係数が高い点を変位後のサブセットとして設定し、サブセット中心の変位を求め、ひずみを算出した。

$$C(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{I_n(X+u+i, Y+v+j) - I_{n-1}(X+i, Y+j)\}. \quad (1)$$

3. 結果および考察

無潤滑下およびグリセリン潤滑下における定常すべりに相当する $d = 10.0$ mm での摩擦係数は、それぞれ 0.940 ± 0.102 、 $0.0306 (\pm 0.0043)$ であった。 D の増減に伴う摩擦係数への影響は確認されなかった。接触界面への潤滑剤流入により、真実接触面積が減少し、凝着項が減少したことで、摩擦係数が減少したと考えられる。

Figure 2 に無潤滑下およびグリセリン潤滑下、 $D = 1.48$ mm でのすべり開始（前 $d = 0.0$ mm）、すべり開始時（ $d = 0.7$ mm）、定常すべり時（ $d = 10.0$ mm）における各サブセット位置と各サブセットにおける最大主ひずみ ϵ_1 、最小主ひずみ ϵ_2 を示す。 ϵ_1 と ϵ_2 のベクトル交点が、サブセット位置を示し、赤色および青色のベクトルはそれぞれ引張りひずみと圧縮ひずみを示す。なお、サブセット移動距離を 3 倍に強調している。無潤滑下に着目すると、 $d = 0.0$ mm では、ステンレ

ス球との接触に伴い接触部直下に等方的な引張りひずみが発生し、 $d=0.7\text{ mm}$, 10.0 mm では、摩擦力によってサブセット位置、 $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ 分布の対称性が崩れたことがわかる。また、グリセリン潤滑下に着目すると、 $d=0.0\text{ mm}$ でのサブセット位置、 $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ 分布は無潤滑下と同様の傾向を示す。さらに d が増大しても変化は小さいことが分かる。これは摩擦力が小さいことにより、サブセット位置、 $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ 分布が変わらなかったためと考えられる。

サブセット位置の変位から、接触部が通過する線の直下ならびに y 軸方向に 6.0 mm 離れた場所におけるゴムの軌跡を Fig. 3 に示す。無潤滑下・接触面直下において、接触部通過前でゴムはすべり方向と逆方向に変位し、接触部通過後に初期位置へ戻った。また、接触部から 6.0 mm 離れた場所では、ゴムは接触部通過に伴い、反時計回りに半弧を描いて初期位置へ戻った。一方、グリセリン潤滑下・接触面直下では、接触部通過前にすべり方向と逆方向に、通過時にすべり方向に、そして通過後に再度すべり方向と逆方向に変位した。接触部から 6.0 mm 離れた場所では、無潤滑下とは異なり、時計回りに円を描いて初期位置へ戻った。また、各条件に関わらず、 D の増大に伴い、変位量は減少した。これらの結果より、摩擦に伴いゴム内部は垂直方向だけではなく、水平方向にもひずみが発生していることが明らかとなった。ひずみ量の増大に伴い、ヒステリシス項は増大するため、摩擦に伴うゴムの変位が描く弧の制御により、ヒステリシス項が制御できる可能性が示唆される。

4. 結言

摩擦に伴う接触部近傍でのひずみ時空間分布と潤滑条件の関係を明らかにした。摩擦に伴い水平方向に非対称なひずみが発生し、その軌跡は弧を描くことが実験的に示され、その挙動は潤滑剤の有無で大きく変化することがわかった。

文献

- 1) K. Ueno, J. Oda, T. Nishi, S. Sugisawa, D. Shin, & T. Yamaguchi: In-plane Strain Distribution of Rubber Surface Sliding over Asphalt Block, 9th International Tribology Conference, Fukuoka 2023 (2023) 28-PO-03.
- 2) Butters, J. N., Jones, R. & Wykes, C: Electronic speckle pattern interferometry, Academic Press, Inc. (1978) 111–158.

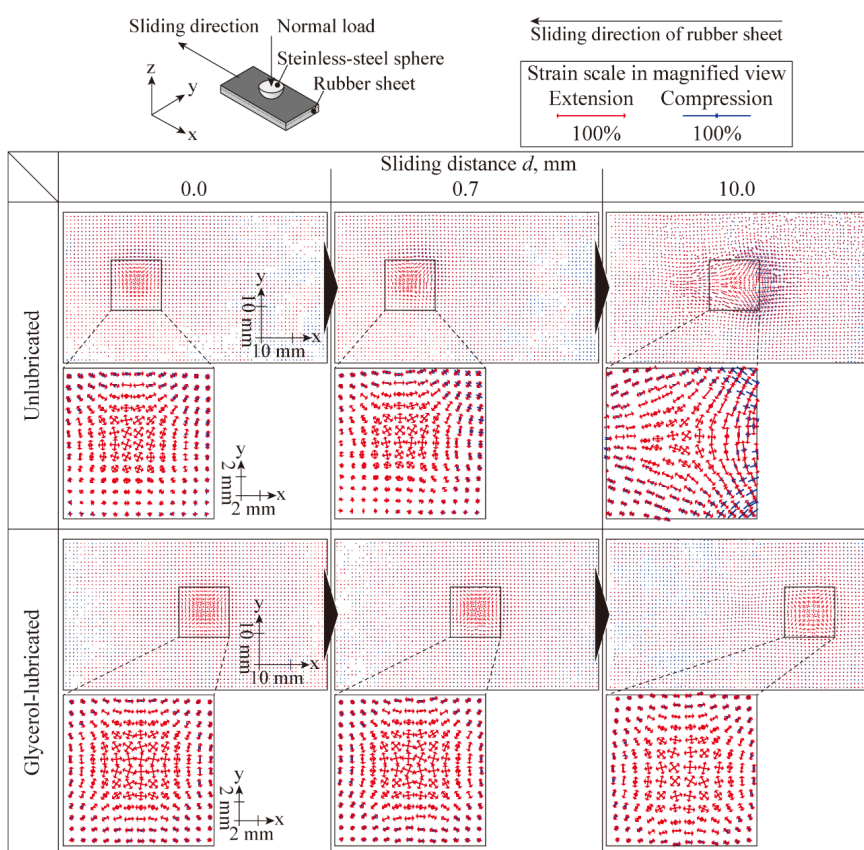


Fig. 2 Subset position and vectors of major and minor principal strains in rubber bulk during friction against steel sphere at $d = 0.0, 0.7$, and 10.0 mm and $D = 1.48\text{ mm}$ under unlubricated and glycerol-lubricated conditions.

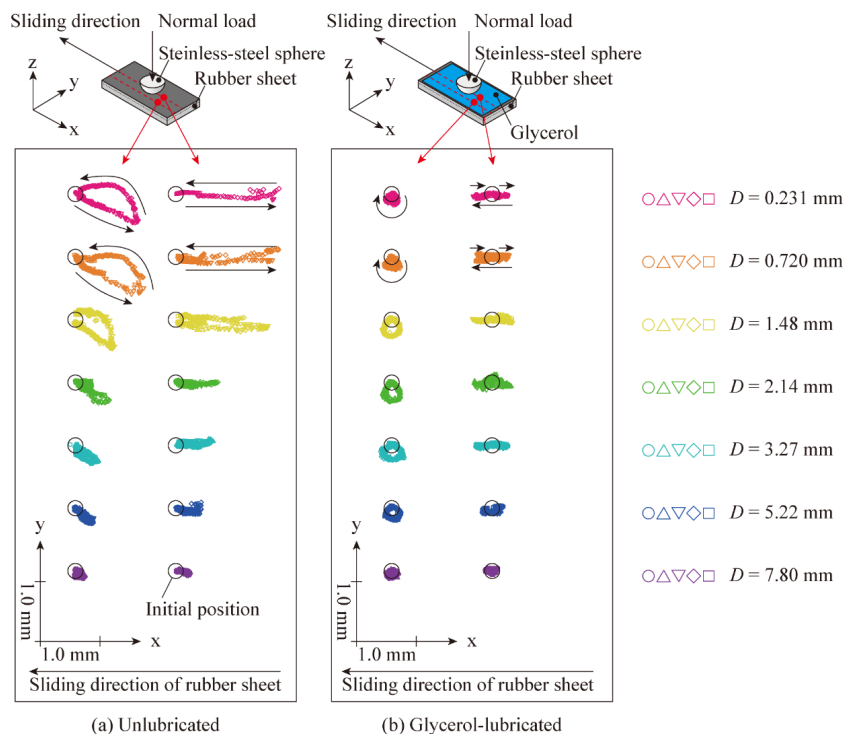


Fig. 3 Trajectory of points under and beside the center line of the contact point at $D = 0.231\text{--}0.780\text{ mm}$ under unlubricated and glycerol-lubricated conditions.