

# 粘弾性の異なるゴムと樹脂球の摩擦でのひずみ分布に及ぼすすべり速度の影響

## Influence of Sliding Velocity on Strain Distribution in Friction between a Resin Sphere and Rubbers with Different Viscoelastic Properties

東北大（正）\*野本 智広（非）田村 祐也（正）西 駿明  
ブリヂストン（非）松尾 拓磨（非）種村 駿（正）山口 健（非）桑山 勲  
東北大（正）山口 健

Tomohiro Nomoto\*, Yuya Tamura\*, Toshiaki Nishi\*

Takuma Matsuo\*\*, Shun Tanemura\*\*, Ken Yamaguchi\*\*, Isao Kuwayama\*\*, Takeshi Yamaguchi\*

\*Tohoku University, \*\*Bridgestone Corporation

### 1. 緒言

タイヤは自動車部品の中で唯一路面と接触し、制動性能を決定する重要な部品である。タイヤ表面を構成するタイヤトレッドは、走行時にアスファルト路面上の突起先端部と接触し、ひずみを伴う中で摩擦力が発現する。ゴムは粘弾性を有するため、摩擦に伴う圧縮・回復過程での応力差に起因するヒステリシス項の寄与が大きくなりとされる。しかし、摩擦時のひずみ分布とゴムの粘弾性特性の関係は明らかになっていない。本研究では、粘弾性の異なるゴムの摩擦でのひずみ分布に及ぼすすべり速度の影響を明らかにすることを目的とし、粘弾性特性の異なる 2 種類のゴム試験片と樹脂球との摩擦試験を行うとともに、3 次元デジタル画像相関法（DIC 法）により摩擦時のゴム内部でのひずみ分布を実験的に明らかにした。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験片

Figure 1, Table 1 に本研究で用いたゴム試験片の概略図および材料物性をそれぞれ示す。本研究ではゴム試験片の材料として、粘弾性特性の異なる Dimethylpolysiloxane (PDMS, SYLGARD 184, Dow Inc.) と Styrene ethylene/butylene styrene rubber (SEBS, タフテック H1221, 旭化成 (株)) を用いた。いずれのゴム試験片においても、内部に酸化チタン粉末 (TITONE A-190, 堺化学工業 (株)) を散布した白色粉末層を含む無色透明層と黒色層の 2 層構造とした。PDMS および SEBS の黒色層はそれぞれ黒色色素 (ホームメイド食用色素, 共立食品 (株)), 黒色樹脂 (ペレット PP タルク黒, Avalon Tech (株)) を 10 wt% 添加し黒色とし、黒色層側のゴム表面から白色粉末層までの深さ  $D$  は PDMS, SEBS 試験片ともに 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm の 4 水準とした。

#### 2.2 摩擦試験と 3 次元ひずみ算出方法

Figure 2 に示すようにゴム試験片の黒色層表面と樹脂球 (ポリアミド樹脂精密球  $\phi = 16.0$  mm, (株) 天辻鋼球製作所) をグリセリン潤滑下で垂直荷重  $W = 9.81$  N にて接触させ、すべり速度  $v = 10, 100$  mm/s, すべり距離  $d = 40.0$  mm の直動すべりを与えた際の摩擦力をロードセル (TI201, (株) トリニティーラボ) にて測定した。定常すべりに相当する  $d = 30.0 - 35.0$  mm での摩擦係数の平均値を動摩擦係数  $\mu_d$  と定義した。ゴム試験片透明層とガラスステージを介して、 $v = 10, 100$  mm/s それぞれ 500, 2000 fps にて 2 台の高速度カメラ (FASTCAM MH6, (株) フォトロン) により白色粉末層を観察した。観察視野は  $17.0$  mm  $\times$   $17.0$  mm, ピクセルサイズは  $27 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$  とした。

DCI 法では、観察視野内に  $0.57$  mm  $\times$   $0.57$  mm のサブセットを等間隔に配置した上で、式(1)<sup>2)</sup>に基づきサブセットの中心点周りの輝度分布の相関から、摩擦時の最大主ひずみ  $\epsilon'_1$ , 最小主ひずみ  $\epsilon'_2$  を算出した。また 2 台のカメラから得られた計算結果の連立から 3 次元でのひずみを算出した。

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

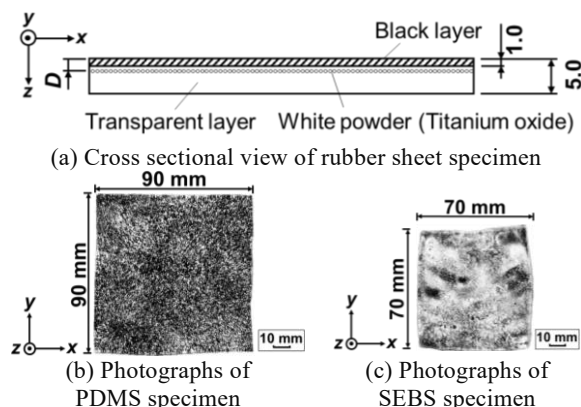


Fig. 1 Schematic of rubber sheet specimen

Table 1 Material properties of rubber sheet

	PDMS	SEBS
Storage modulus $G^*$ of transparent rubber layer, MPa	0.578	0.515
Glass Transition Temperature $T_g$ , °C	-123	-23
Loss tangent $\tan \delta$ (25 °C)	0.0501	0.120

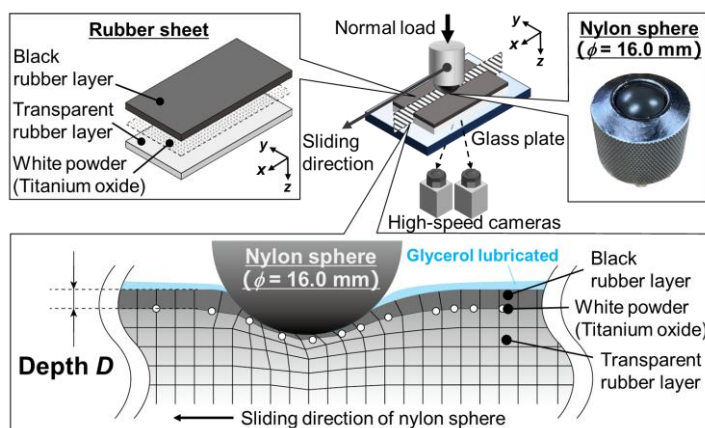


Fig. 2 Schematic of friction tests

### 3. 実験結果および考察

Figure 3 にすべり速度  $v = 10, 100 \text{ mm/s}$  における  $D$  の異なる PDMS 試験片および SEBS 試験片の  $D4$  水準での  $\mu_d$  平均値とその標準偏差を示す。Fig. 3 より PDMS と SEBS はともに  $v$  の増加に伴って  $\mu_d$  は減少傾向を示した。これは  $v$  の増加に伴い流体潤滑成分が増加し、凝着項が減少したためと考えられる。一方、SEBS は PDMS と比較して、 $v$  の増加に伴う  $\mu_d$  の減少量が小さかった。これは損失正接が PDMS よりも大きい SEBS では、高すべり速度での摩擦において、ヒステリシス項の寄与が相対的に大きかったことが一因と考えられる。

Figures 4, 5 にそれぞれ PDMS ( $D = 1.0 \text{ mm}$ ) および SEBS ( $D = 1.0 \text{ mm}$ ) での定常すべり時 ( $d = 30.0 \text{ mm}$ ) における  $\epsilon'_2$  の分布を示す。赤色および青色の領域はそれぞれ引張ひずみと圧縮ひずみが発生した領域を示す。ゴム試験片に関わらず樹脂球との接触部直下において、円形状の引張ひずみ領域が確認された。また、圧縮ひずみ領域に着目すると、樹脂球との接触部を中心とするリング状の圧縮ひずみ領域が確認された。ゴム試験片に関わらず、樹脂球の接触部前端側により広い圧縮ひずみ領域が発生した。SEBS は PDMS と比較して、樹脂球の接触部前後での圧縮ひずみ領域面積の分布の偏りがより大きく、さらに  $v$  の増加に伴いその偏りはより大きくなった。すなわち、SEBS では  $v$  の増加に伴いすべり方向( $x$  軸)に対して接触部前端側、後端側で応力差が増加した可能性が示唆される。

Figure 6 に PDMS および SEBS での、定常すべり時 ( $d = 30.0 \text{ mm}$ ) における、 $\epsilon'_1$  の最大値 (引張ひずみ) と  $\epsilon'_2$  の最小値 (圧縮ひずみ) の  $D$  に対する垂直分布を示す。PDMS では、 $v$  の増加に伴いゴムの表面近傍 ( $D = 1-2 \text{ mm}$ ) での  $\epsilon'_1$  の最大値が増加し、 $\epsilon'_2$  の最小値には大きな変化は確認されなかった。一方、SEBS では、 $v$  の増加に伴い、バルクに相当する  $D = 2 \text{ mm}$  において  $\epsilon'_2$  の最小値が増加し、 $\epsilon'_1$  の最大値には大きな変化は確認されなかった。 $\epsilon'_2$  の最小値の垂直分布は摩擦発現の寄与の分布に相当すると考えられる。高  $v$  条件では SEBS において PDMS よりもバルクでの  $\epsilon'_2$  の最小値が大きく、試験片内部においてより大きな摩擦が発現したことが示唆され、その摩擦はヒステリシス項に相当すると考えられる。すなわち、SEBS では PDMS よりもヒステリシス項の寄与が大きかったため、 $v$  の増加に伴う  $\mu_d$  の減少量が小さかったと考えられる。

### 4. 結言

SEBS ではすべり速度の増加に伴い  $\mu_d$  が減少する傾向を示し、その傾向は PDMS においてより顕著であった。特に高すべり速度条件では、より粘性である SEBS において、すべり方向に対して非対称な圧縮ひずみが発生し、さらにその圧縮ひずみはバルクにおいて最大化した。

### 参考文献

- 1) D.F. Moore, W. Geyer., A review of hysteresis theories for elastomers, Wear, 30, 1 (1974) 1-34.
- 2) T. Nishi, K. Ueno, T. Nomoto, S. Sugisawa, D. Shin, K. Yamaguchi, I. Kuwayama & T. Yamaguchi, Visualization of strain distribution in rubber bulk during friction, Scientific Reports, 14, 1 (2024)

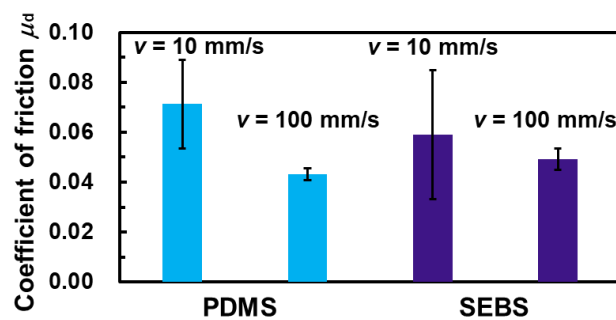


Fig. 3 Mean value of coefficient of friction under glycerol lubrication at sliding distance  $d = 30.0-35.0 \text{ mm}$

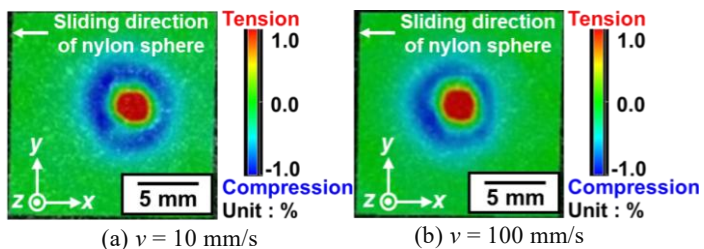


Fig. 4 Minor principal strain distribution of PDMS specimen

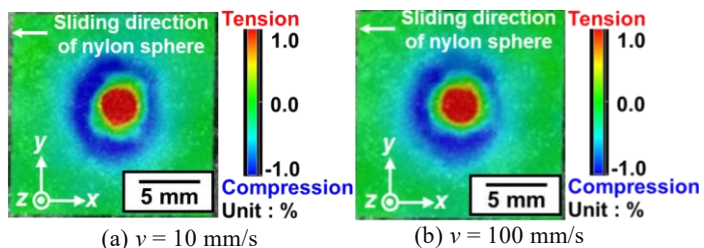


Fig. 5 Minor principal strain distribution of SEBS specimen

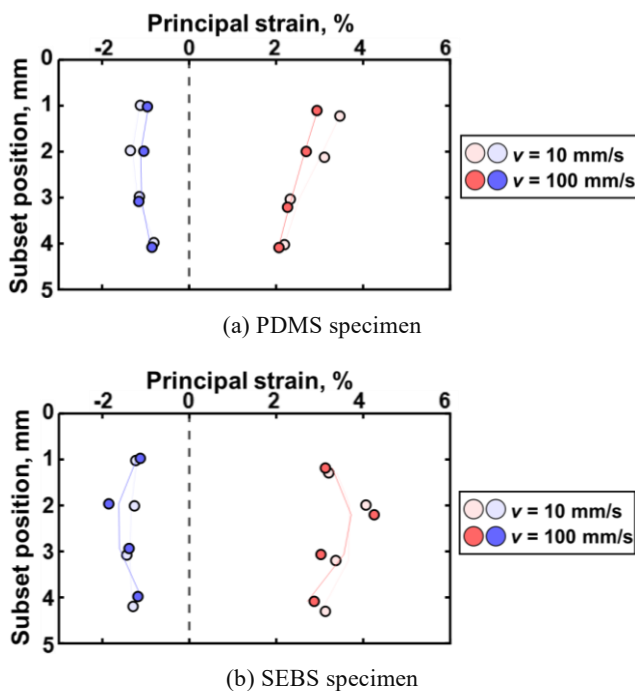


Fig. 6 Variation of major and minor principal strains in the rubber surface with depth during sliding ( $d = 30.0 \text{ mm}$ )