

# ゴムと樹脂球のすべり摩擦における摩擦力とひずみ分布に及ぼす粘弾性の影響

## Influence of Viscoelastic Properties on Friction Force and Strain Distribution in Sliding Friction between Rubber and Resin Sphere

東北大（正）\*野本 智広 （正）上野 恭平 （正）西駿明  
ブリヂストン（非）杉澤 進也 （非）半澤 健太郎 （非）秦 大樹 （正）山口 健 （非）桑山 勲  
東北大（正）山口 健

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

Shinya Sugisawa\*\*, Kentaro Hanzawa\*\*, Daiki Shin\*\*, 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。ゴムは粘弾性体であるため、ひずみに伴う圧縮・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いとされる。一方、摩擦に伴い発生するひずみの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におけるひずみ分布の実験的定量化を目的とする。具体的には、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）により摩擦に伴うゴム内部のひずみ分布を明らかにした。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験片

Fig. 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特性をそれぞれ示す。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 4.5 mm 厚の無色透明層と 0.5 mm 厚の黒色層の 2 層構造とした。PDMS および SEBS はそれぞれ黒色色素（ホームメイド食用色素, 共立食品 (株)）10wt%, 黒色樹脂（ペレット PP タルク黒, Avalon Tech (株)）10wt% を添加し黒色とし、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 試験片それぞれ 0.971, 2.60, 3.25 mm および 1.16, 2.33, 3.62 mm の 3 水準とした。

#### 2.2 摩擦試験と 3 次元ひずみ算出方法

Fig. 2 に摩擦試験の概略図を示す。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 1.96 N にて接触させ、すべり速度  $v = 20.0$  mm/s, すべり距離  $d = 10.0$  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。なお、定常すべりに相当する  $d = 2.0 - 5.0$  mm での摩擦係数を動摩擦係数  $\mu_d$  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、200 fps にて 2 台の高速度カメラ（HAS-L1, (株) ディテクト）により白色粉末層を観察した。観察視野は  $17$  mm  $\times$   $14$  mm, ピクセルサイズは  $12$   $\mu$ m  $\times$   $12$   $\mu$ m とした。

観察視野内に  $0.78$  mm  $\times$   $0.78$  mm のサブセットを等間隔に配置した上で、上野ら<sup>2)</sup>の手法に基づき、摩擦時の最大主ひずみ  $\epsilon'_1$ , 最小主ひずみ  $\epsilon'_2$  の分布を求めた。なお、変位後のサブセット面の 3 軸を  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  軸と定義した。

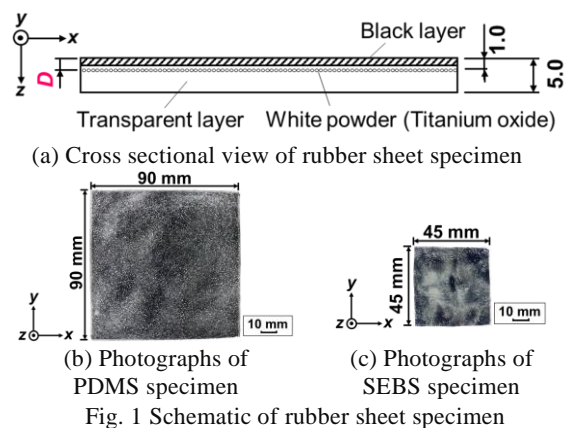


Table 1 Material properties of rubber sheet

	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

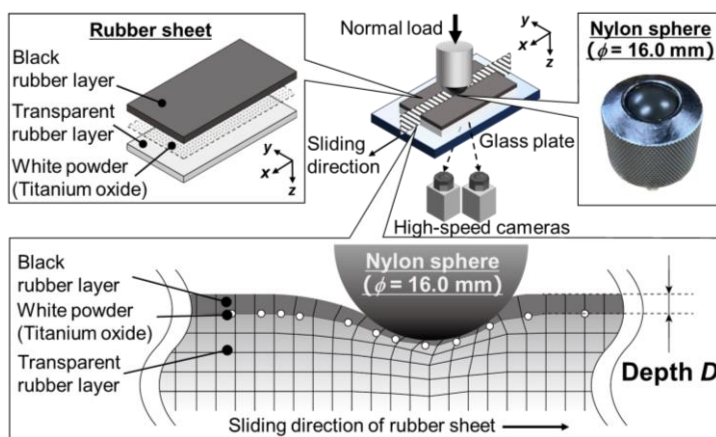


Fig. 2 Schematic of friction tests

### 3. 実験結果および考察

Fig. 3 に PDMS 試験片 3 水準および SEBS 試験片 3 水準での動摩擦係数  $\mu_d$  と摩擦力  $F$  の平均値を示す。左軸が動摩擦係数  $\mu_d$  を示し、右軸が摩擦力  $F$  を示している。エラーバーは、 $D$  の異なるゴム試験片 3 水準の動摩擦係数  $\mu_d$  の標準偏差である。Fig. 3 より損失正接が PDMS よりも大きい SEBS では  $\mu_d$  が大きい値を示した。これはグリセリン潤滑条件下では潤滑剤の接触界面への流入により、真実接触面積が減少し、凝着項が減少したことで、ヒステリシス項の寄与が相対的に高くなったためと考えられる。なお、ゴム試験片 3 水準の  $\mu_d$  の標準偏差は小さく、 $D$  の増減に伴う  $\mu_d$  への影響は確認されなかった。

Figs. 4, 5 にそれぞれ PDMS ( $D = 0.971$  mm) および SEBS ( $D = 1.16$  mm) での、すべり開始前 ( $d = 0.0$  mm) と定常すべり時 ( $d = 10.0$  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りひずみと圧縮ひずみが発生している領域を示している。ゴム試験片に関わらず樹脂球との接触部直下において、円盤状の引張りひずみが発生する領域が確認された。圧縮ひずみ領域に着目すると、ゴム試験片に依らず  $d = 0.0$  mm では樹脂球との接触部を中心にドーナツ形状の圧縮ひずみ発生領域が確認された。なお、樹脂球の片当たりによってすべり開始前の樹脂球の接触部後端側に圧縮ひずみが偏って発生しているが、 $d = 10.0$  mm では、樹脂球の接触部前後の圧縮ひずみの分布の偏りが減少していることから、すべりに伴い  $x'$  軸に対して接触部前端側、後端側で圧縮ひずみがそれぞれ増加、減少したことが分かる。

Fig. 6 に PDMS ( $D = 0.971$  mm) および SEBS ( $D = 1.16$  mm) での、すべり開始前 ( $d = 0.0$  mm) と定常すべり時 ( $d = 10.0$  mm) における、樹脂球の接触部直下中央を  $x'$  軸方向に横断する Fig. 5 中の AB 線上における  $\epsilon'_2$  分布を示す。横軸は点 A からの距離を示し、淡色、濃色の実線はそれぞれ  $d = 0.0$  mm と  $d = 10.0$  mm での結果を示している。SEBS は PDMS と比較して低弾性のため  $\epsilon'_2$  の絶対値が AB 間全体で大きかった。 $d = 0.0$  mm では、樹脂球の片当たりによって樹脂球の接触部後端側に前端側よりも大きな圧縮ひずみが発生した。 $d = 10.0$  mm では、前端側に圧縮ひずみの分布が偏って非対称化し、その傾向は PDMS と比較して SEBS の方がより顕著であった。

Fig. 7 に  $d = 10.0$  mm における、 $\epsilon'_2$  の最小値（圧縮ひずみ）と最大値（引張りひずみ）の  $D$  に対する分布を示す。水色、紫色プロットは、それぞれ PDMS, SEBS での結果を示す。PDMS, SEBS とともに、 $\epsilon'_2$  の最小値と最大値は  $D = 2.5$  mm 近傍で最大化したことがわかる。また、SEBS では  $\epsilon'_2$  の最小値と最大値の差分が PDMS より大きかった。ゴムは粘弾性体であるため、すべりに伴う圧縮・回復過程において損失正接に比例する応力差に相当する摩擦力が発生する。SEBS は、PDMS よりも損失正接が大きく、さらにひずみ量が大きかったことから、より大きなヒステリシス項が発現したと考えられる。

### 4. 結言

粘弾性の異なる PDMS および SEBS の摩擦におけるひずみ分布を実験的に定量化した。損失正接がより大きい SEBS では、PDMS に比べすべり方向に対するひずみ分布がより非対称性化し、より高摩擦を発現することが分かった。

### 参考文献

- 1) Moore D.F., Geyer W., A review of hysteresis theories for elastomers, Wear, 30(1), (1974)1-34.
- 2) 上野恭平, 他, ゴムと樹脂球のすべり摩擦におけるひずみ分布と垂直荷重の関係, トライボロジー会議 2024 秋名護予稿集, (2024).

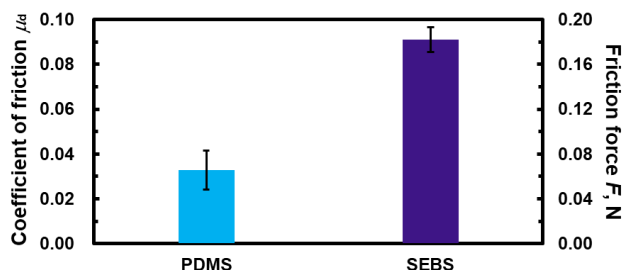
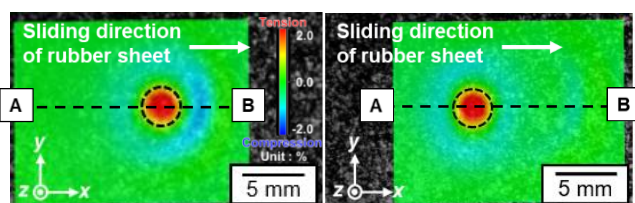
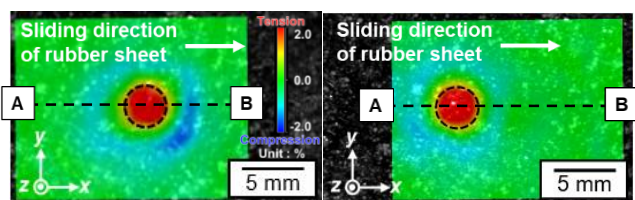


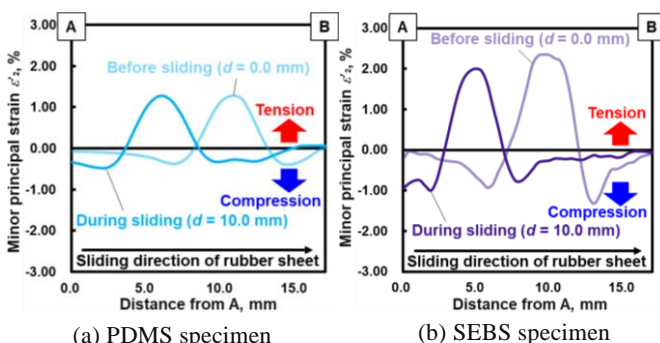
Fig. 3 Mean value of coefficient of friction under glycerol lubrication at sliding distance  $d = 2.0-5.0$  mm



(a) Before sliding ( $d = 0.0$  mm) (b) During sliding ( $d = 10.0$  mm)  
Fig. 4 Minor principal strain distribution of PDMS specimen



(a) Before sliding ( $d = 0.0$  mm) (b) During sliding ( $d = 10.0$  mm)  
Fig. 5 Minor principal strain distribution of SEBS specimen



(a) PDMS specimen (b) SEBS specimen

Fig. 6 Minor principal strain distribution on A-B line

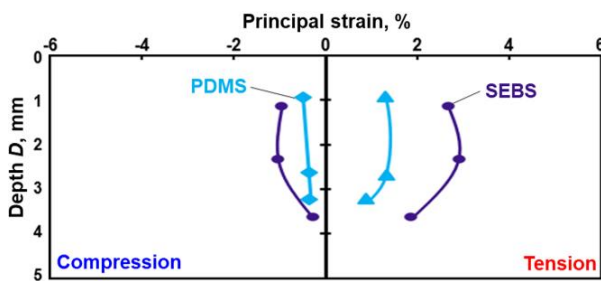


Fig. 7 Variation of major and minor principal strains in the rubber surface with depth during sliding ( $d = 10.0$  mm)