

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

Relationship between Strain Distribution and Normal Load for Friction between Rubber and Resin Sphere

東北大（正）*上野 恭平（正）野本 智広（正）西 駿明（正）

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

Kyohei Ueno*, Tomohiro Nomoto*, Toshiaki Nishi*

Shinya Sugisawa**, Kentaro Hanzawa**, 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重要である。車走行時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力を発現する。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¹⁾。ゴムの摩擦制御技術を確立するためには、ゴム内部に生じるひずみ挙動を考慮する必要がある。これまでにデジタル画像相関法（DICM）を用い、ゴムシートとアスファルト粗面の摩擦におけるゴム内水平断面内でのひずみ分布の実験的に測定できること²⁾、さらに断面位置によってそのひずみ分布が変化すること³⁾が報告されている。しかしながら、これら先行研究では、面内（2次元）でのひずみ分布の測定に留まっており、3次元でのひずみ分布の測定は達成されていない。本研究では、2台の高速度カメラを使用する3次元DICMにより、ゴムシート水平断面の3次元ひずみ測定手法を確立し、そのひずみ分布に及ぼす垂直荷重の影響を明らかにすることを目的とし、グリセリン潤滑下でのシリコンゴムシートと樹脂球の摩擦試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 摩擦試験方法

Fig. 1 に本研究で用いたゴム試験片断面の概略図を示す。酸化チタン粒子（TITONE A-190, 堺化学工業（株）、1次粒子径 0.15 μm）が疎に分布する白色粉末層を含む 4.5 mm 厚の透明シリコンゴム（SYLGARD 184, Dow Inc., USA）層の上に、摩擦面として、黒色食用色素（ホームメイド食用色素, 共立食品）を 1wt% 混合した 0.50 mm 厚の黒色シリコンゴムを設けたゴム試験片を作製した。摩擦面から白色粉末層までの深さ D は 0.50, 0.97, 2.60, 3.26, 4.38 mm の 5 水準とした。Fig. 2 に摩擦試験機の概略を示す。また、実験はグリセリン潤滑条件下にて行った。摩擦試験と同時に、ゴム試験片透明層とガラスステージを介して、2 台の高速度カメラ（HAS-L1, DITECT Corporation）によりゴム試験片内の白色粉末層を 200 fps にて観察した。観察視野は 17 mm × 17 mm、ピクセルサイズは 12 μm × 12 μm とした。

2.2 ひずみ解析方法

ひずみ解析は以下の手順で行った。(A)入射角を変えた 2 台のカメラのキャリブレーションを行い、鉛直方向への変位を考慮する。(B)2 台のカメラのうち 1 台目によって撮影された動画データにより、観察視野内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での相関を式(1)に基づき定量化し、最も相関係数が高い点を変位後のサブセットとし、サブセット中心の変位から見かけの 2 次元平面におけるひずみを算出した⁴⁾。

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

(C)2 台目のカメラのデータを用いて、すべてのサブセットに対し z 軸方向への変位および、角度を補正することで、各フレームにおける 3 次元曲面を作成する (Fig. 3)。(D)それぞれのサブセットにおける 3 次元曲面上の局所平面にお

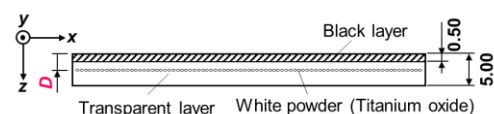


Fig. 1 Schematic of cross-section of rubber sheet specimen

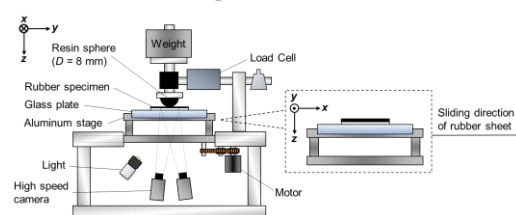


Fig. 2 Schematic of experimental setup

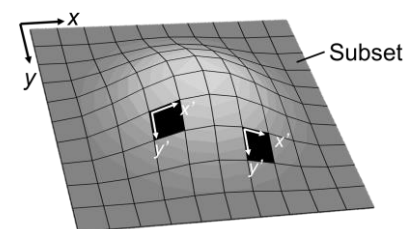


Fig. 3 Subset in deformed surfaces

ける単位法線ベクトル \mathbf{n} を算出することで x', y' 方向への単位接線ベクトル $\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2$ を求め、変形後の局所平面上でのゴムの変位量 u'_x, u'_y に変換した。本研究では、ひずみのパラメータとして、3次元曲面上の変位から算出された進行方向へのひずみ ε'_x および、局所平面上で面内せん断ひずみが 0 となる軸を基準とした方向での最大主ひずみ ε'_1 、最小主ひずみ ε'_2 を用いた。

3. 結果および考察

Fig. 4 に定常すべりに相当するすべり距離 $d = 3.0 - 4.0$ mm での動摩擦係数 μ_d と W の関係を示す。各プロットは D の異なるゴム試験片での結果を表している。接触界面への潤滑剤（グリセリン）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、低い μ_d を示したと考えられる。また、このとき摩擦係数の荷重依存性は見られなかった。

Fig. 5 および Fig. 6 にグリセリン潤滑下、 $W = 0.98, 9.8$ N, $D = 0.50, 0.97$ mm, $d = 3.0$ mm における各サブセット位置と各サブセットにおける ε'_2 の分布を示す。赤色および青色の領域は、それぞれ引張および圧縮ひずみの発生を示す。荷重条件に依らず接触点直下において、楕円形状の引張ひずみ領域が確認された。また、引張ひずみ領域の周囲には圧縮ひずみが発生し、その分布は接触点を中心にすべり方向に対し線対称に観察された。 W の増加に伴い、引張および圧縮ひずみ量およびその領域が増加する様子が観察された。また、 $W = 0.98$ N においては D の増加とともにひずみの大きさがわずかに小さくなっているのに対し、 $W = 9.8$ N においては $D = 0.97$ mm で $D = 0.50$ mm よりもわずかにひずみの発生領域が大きくなる様子が観察された。

Fig. 7 に各面内に分布するひずみのうち、定常すべり時 ($d = 3.0$ mm) における ε'_1 の最大値（引張ひずみ最大値）と ε'_2 の最小値（圧縮ひずみ最大値）に及ぼす D の影響を示す。緑色のプロットの横軸は、それぞれの D における最大/最小のひずみ量を示し、縦軸は最大/最小のひずみを示すサブセットの鉛直方向への位置を示す。 $W = 0.98$ N, 1.96 N, 4.9 N の場合、最大引張・圧縮ひずみ量は $D = 0.500$ mm で最大化した。一方、 $W = 9.8$ N の場合、最大引張・圧縮ひずみ量は $D = 0.970$ mm で最大化し、接触表面に近づくにつれひずみ量は小さくなる傾向を示した。以上の結果より、ゴムと球の摩擦においては荷重が大きくなることで、摩擦挙動には影響を及ぼさないものの、荷重増加により底面部に発生するひずみが内部に留保するということが示唆された。

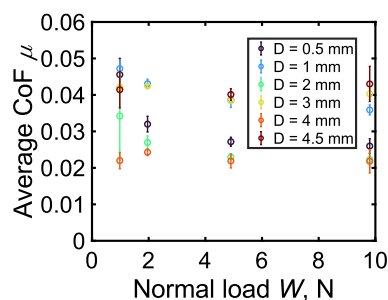
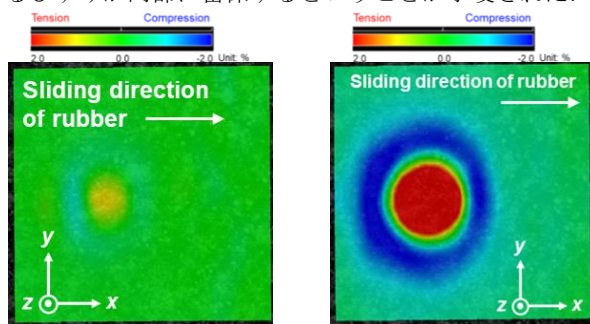
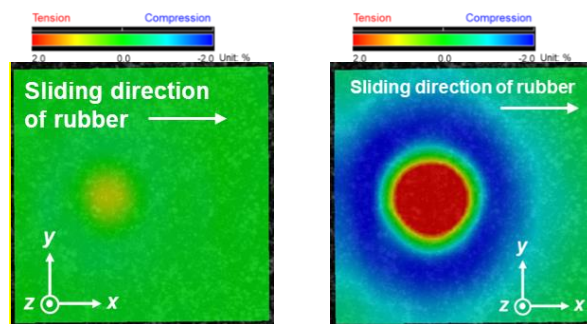


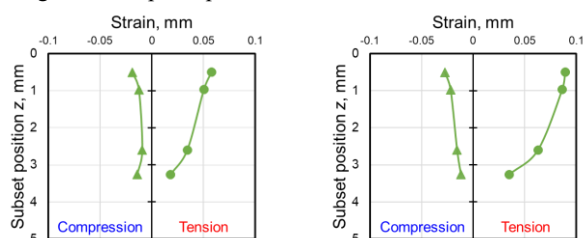
Fig. 4 Relationship between normal load and kinetic COF



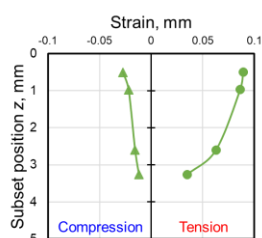
(a) $W = 0.98$ N (b) $W = 9.8$ N
Fig. 5 Minor principal strain distribution at $D = 0.50$ mm



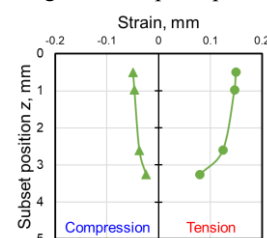
(a) $W = 0.98$ N (b) $W = 9.8$ N
Fig. 6 Minor principal strain distribution at $D = 0.97$ mm



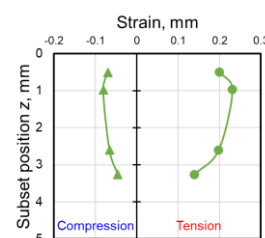
(a) $W = 0.98$ N



(b) $W = 1.96$ N



(c) $W = 4.9$ N



(d) $W = 9.8$ N

Fig. 7 Variation of maximum major and minimum minor principal strains in the rubber surface with depth

4. 結言

2 台の高速度カメラを使用した 3 次元デジタル画像相関法により、ゴムシート水平断面の 3 次元ひずみ測定手法を確立した。結果、ひずみはゴムシート内の深さ方向位置によって異なり、主ひずみの最大値と最小値の深さ方向分布は、垂直荷重の小さい条件で接触表面に近い条件で大きくなり深さに応じて徐々に小さくなるが、荷重増加に伴い中間層付近にひずみが大きく表れ、再表面ではひずみは小さくなり、荷重条件によってひずみ分布挙動が変化することを明らかにした。

文献

- 1) D. F. Moore, W. Geyer, A review of hysteresis theories for elastomers, *Wear*, 30(1), (1974), 1-34.
- 2) 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.
- 3) T. Nishi, et al. : Visualization of strain distribution in rubber bulk during friction, *Scientific reports*, 14, (2024), 13530.
- 4) J. N. Butters, et al. : *Electronic speckle pattern interferometry*, Academic Press, Inc. (1978) 111-158.