

無潤滑下での樹脂球とゴム平板の摩擦におけるゴム内部ひずみ分布の放射光による定量化

Quantification of Internal Strain Distribution in Rubber Using Synchrotron Radiation During Friction Between a Resin Sphere and a Rubber Plate Under a Dry Condition

東北大（学）*蔵納慎太郎 東北大（正）西 駿明 東北大（学）伊藤 真 JASRI（非）梶原 堅太郎
東北大（非）上田 亮介 東北大（非）矢代 航 東北大（正）山口 健

Shintaro Kurano*, Toshiaki Nishi*, Shin Ito*, Kentaro Kajiwara**, Ryosuke Ueda*, Wataru Yashiro *, Takeshi Yamaguchi*

*Tohoku University, **Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1. 緒言

タイヤトレッドや靴底等，耐滑性が要求される箇所では多くの場合ゴムが使用される¹⁾。一般的に摩擦力は，真実接触部のせん断に起因する凝着項と，摩擦に伴う材料内部における圧縮および回復過程での応力差に起因するヒステリシス項の総和として説明される^{2,3)}。特に粘弾性を有する高分子材料であるゴムでは，ヒステリシス項の寄与が大きい。そのため，摩擦制御技術を確立する上では，ひずみ分布の定量化が重要である。材料内部におけるひずみ分布の定量化は数値解析による手法が一般的であるが，実験的定量化結果との比較による妥当性検証が未達成である。実験による材料内部でのひずみ分布の定量化に向けた先行研究は報告されているが，現状透明体に限定される⁴⁾。本研究では非透明ゴム内部における3次元ひずみ分布の定量化手法の確立を目指し，垂直断面に金属マーカーを散布した非透明ゴム試験片と樹脂球の摩擦におけるひずみ分布測定手法の確立を目的とした。金属マーカーは放射光施設（SPring-8）の高輝度白色X線にて撮像し，金属マーカーの時空間変化から材料内部のひずみ分布を算出した。

2. 実験方法

2.1 ゴム試験片

Figure 1 に，摩擦試験に使用した非透明ゴム試験片を示す。ゴム試験片の母材は Styrene-butadiene rubber (SBR)とした。同図に示すように，試験片中央に粒径10.0–40.0 μm のタングステン粉末（W-L，日本新金属株式会社）を13.3 vol%添加した垂直断面層（厚さ0.12 mm）を設けた。

2.2 摩擦試験

Figure 2 に摩擦試験の概略図を示す。ステージ上に固定したゴム試験片にナイロン66からなる樹脂球（直径8.0 mm，精密級天鈿鋼球製作所）を垂直荷重4.90 Nにて接触させ，すべり速度10.0 mm/s，すべり距離40.0 mmにて直動すべりさせた。すべり方向から白色X線（200 keV）を入射し，その透過像を高速カメラ（TMX 6410, Vision Research, Inc.）にて撮像するとともに，摩擦力を多機能型静動摩擦測定機（TL201Tt，トリニティーラボ）を用いて測定した。高速カメラの視野は11.28 mm \times 7.05 mm，ピクセルサイズは8.810 μm \times 8.810 μm ，ビット数は12 bit，撮像速度は1000 fps，摩擦力のサンプリング周波数は1000 Hzとした。

2.3 ひずみ解析

本研究では，撮像したX線透過像におけるタングステン粉末の位置変化から，デジタル画像相関法⁵⁾に基づき，摩擦時における材料内部のひずみ分布の定量化を行った。デジタル画像相関法は，市販ソフトウェア（DIPP-Strain，ディテクト）を使用し，解析エリアは6.343 mm \times 1.286 mm，サブセットサイズは0.441 mm \times 0.441 mmとした。本研究では，特に接触部直下と接触部端部のサブセット2点をそれぞれ Subset A，Subset Bと定義し，これらの位置変化およびひずみの時系列変化に着目した。

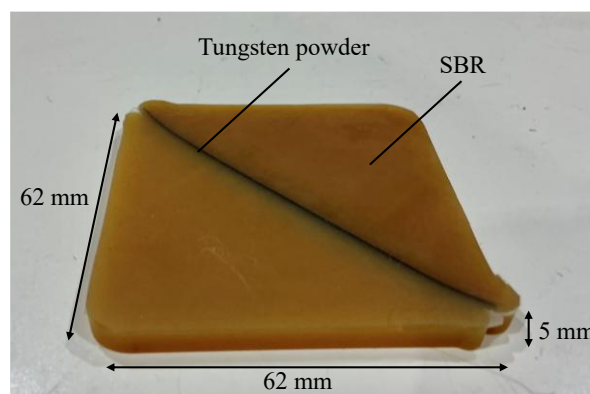


Fig. 1 Image of rubber specimen

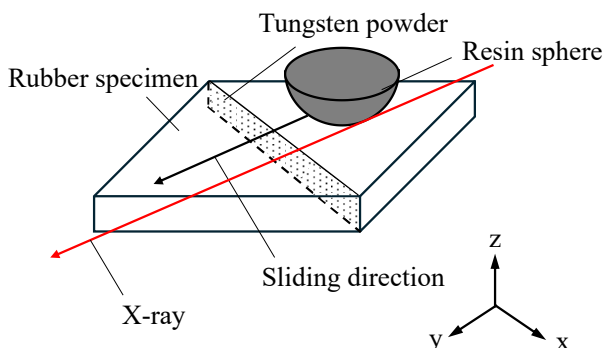


Fig. 2 Schematic view of rubber specimen and friction test

3. 結果および考察

摩擦試験において、摩擦係数はほぼ一定となり、金属マーカー層を通過したすべり距離 20–30 mm における動摩擦係数の平均値は 0.769 であった。摩擦に伴い Subset A が z 方向の負の方向に最も変位した時刻を $t = 0.000$ s, $t = 0.000$ s での位置を $z = 0.0$ mm とした。 $t = -2.000, 0.000, 2.000$ s における y 軸方向から撮像した X 線透過像と各サブセット位置を示した図を、Figure 3 に示す。 Figure 3 より樹脂球がマーカー層に接近するに伴い、特に接触部中央において鉛直方向下方に変位したことがわかる。 $-2.000 \text{ s} \leq t < 2.000 \text{ s}$ における xz 平面内の Subset A, B の軌跡を Figure 4 に示す。 Subset A は樹脂球がマーカー層へ接近する過程において z 軸の負の方向に大きく変位し、その後元の位置に変位した。一方、Subset B は同接近過程において z 軸負の方向への変位と同時に水平方向(x 軸)に接触部から離れる方向へ変位し、その後弧を描く形で元の位置に戻った。 Figure 5 に $-2.000 \text{ s} \leq t < 2.000 \text{ s}$ における xz 平面内の Subset A, B の最大・最小主ひずみの時系列変化を示す。接触部直下通過時、Subset A および B の最大主ひずみは共に正となり、引張ひずみが生じた。また、接触部通過前後において最小主ひずみは共に負となり圧縮が生じ、接触部通過後ではひずみ量の絶対値が減少した。つまり、接触部通過前後におけるひずみ分布が非対称であることが確認された。接触部通過前後における非対称なひずみ分布は接触部前端後端部での応力差、すなわちヒステリシス項の発現が示唆される。

4. 結言

垂直断面にタングステン粉末を含むマーカー層を設けたゴム試験片を用いて、白色 X 線の撮像によりマーカー層の位置変化を観察し、デジタル画像相関法からひずみ解析を行うことで、材料内部における変位およびひずみの時系列変化を測定した。また摩擦に伴い接触部通過前後におけるひずみの非対称性からヒステリシス項の発現が示唆された。

文献

- 1) 西：ソフトマターの摩擦に及ぼすぬれ性の影響，トライボロジスト, 69, 2 (2024) 111-6.
- 2) Moore, D.F., “The Friction and Lubrication of Elastomers”, Tribology Series, Vol. 30, (1995), p. 21, p. 194.
- 3) Moore D.F., Geyer W, A review of hysteresis theories for elastomers, (1974), Wear, 30(1), 1-34.
- 4) Toshiaki Nishi, Kyohei Ueno, Tomohiro Nomoto, Shinya Sugisawa, Daiki Shin, Ken Yamaguchi, Isao Kuwayama, and Takeshi Yamaguchi, Visualization of strain distribution in rubber bulk during friction, Scientific Reports, 14, 1 (2024) 13530.
- 5) 出水 享, 松田 浩, 戸次 翔, 森崎 雅俊, 内野 正和, 伊藤 幸広, 森田 千尋：デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), 68, No. 2 (2012) I_683-I_690.

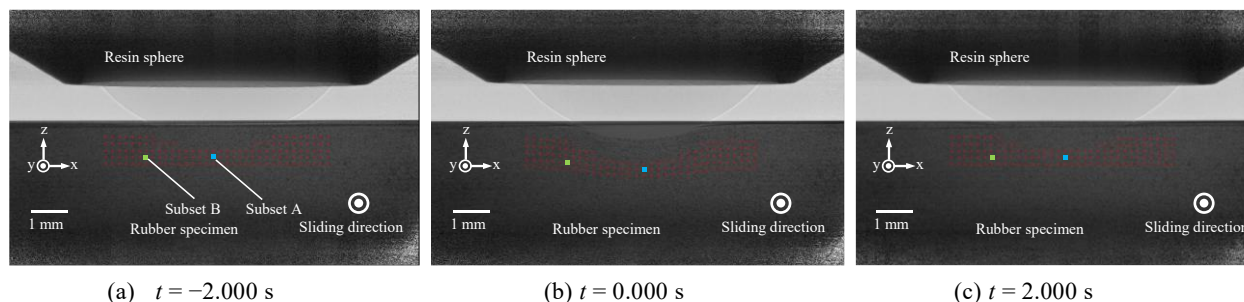


Fig. 3 Observed images of rubber specimen during sliding in y -axis

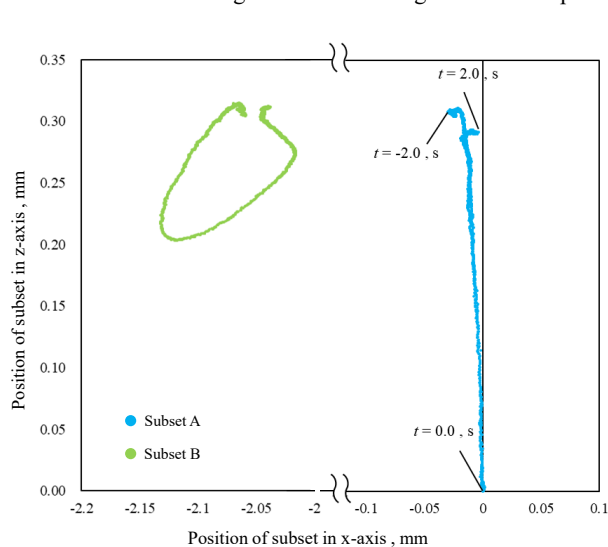


Fig. 4 Change in position of subsets in rubber specimen in xz -plane

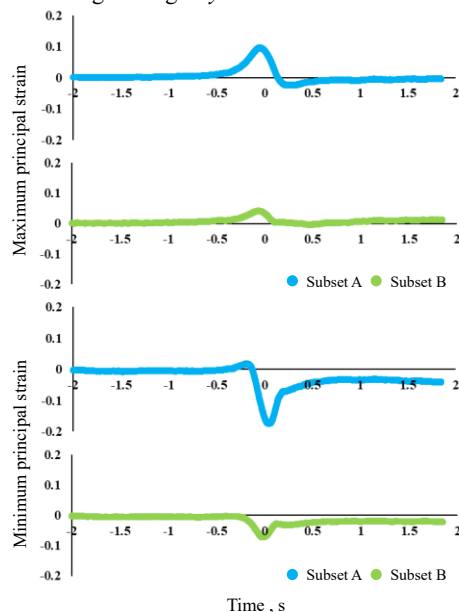


Fig. 5 Time series variation of principal strains