

## 放射光を用いたゴムブロックと樹脂球との摩擦に伴うひずみ分布の可視化技術の開発

Development for Visualization of Strain Distribution in Rubber Block during Sliding against Resin Sphere by Using Synchrotron Radiation

東北大（正）\*西 駿明 JASRI（非）梶原 堅太郎

東北大（非）藏納 慎太郎 （非）上田 亮介 （非）矢代 航 （正）山口 健

Toshiaki Nishi\*, Kentaro Kajiwara\*\*, Shintaro Kuranou\*, Ryosuke Ueno\*, Wataru Yashiro\*, Takeshi Yamaguchi\*

\*Tohoku University, \*\*Japan Synchrotron Radiation Research Institute

### 1. 緒言

高分子やコロイド、液晶などの高分子から構成され、なおかつ低弾性を示すゴムや樹脂、生体物質などはソフトマターと総称され、靴底やタイヤなどの工業用品や人工関節や肌など生体内外ではソフトマターの接触ならびに摩擦が発生する<sup>1)</sup>。金属やセラミックなどと比較すると、ソフトマターは低弾性が故に、接触・摩擦時に大きなひずみを伴い、より大きな真実接触部が形成されやすい。また、高分子で構成されるため粘弾性を有し、摩擦に伴うひずみ分布の変化からヒステリシス項が発生する特徴を有する。つまり、ソフトマターの接触・摩擦を理解し制御するためには、ひずみ分布の考慮が不可欠である。計算シミュレーションに基づくひずみ分布予測が数多く報告されている一方、実験に基づくひずみ分布の報告事例は限定的である<sup>2)</sup>。Nishi らによれば、透明ゴム試験片の水平断面に配置したマーカーを光学的に追跡することで、摩擦に伴うゴム水片断面内のひずみ分布挙動が報告されている<sup>2)</sup>。さらに、透明ゴム試験片の水平断面のマーカーをカメラ 2 台で撮像することで、水平断面における 3 次元ひずみ分布の定量化が達成されている<sup>3)</sup>。しかし本手法は、透明のゴムに限定されること、異なる水平断面高さでの測定では異なるゴム試験片を使用する必要があることを課題としている。そこで本研究では、透明ゴムに限定されないゴム試験片 1 つを用いて、ゴム内部の 3 次元ひずみ分布の定量化手法の確立を目指し、垂直断面にマーカーを散布したゴム試験片と樹脂球の摩擦におけるマーカー位置変化を白色 X 線にて撮像し、その軌跡を算出した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 ゴム試験片作製

Figure 1 にゴム試験片写真を示す。ゴム試験片の母材は、Dimethylpolysiloxane (PDMS, SLYGARD 184, DOW Inc.) とした。未架橋 PDMS と架橋剤(10 wt%)を三角柱形状モールドに充填し、100°C にて 90 分間静置し架橋反応が完了させた。続いて、側面 1 面にマーカーとなる鉄粉末 (#300, 協和純薬工業株式会社) を散布した上で、四角柱形状のモールドに設置し、モールド空隙部に未架橋 PDMS と架橋剤(10 wt%)を充填、その後 100°C で 90 分間静置したことで架橋反応を完了させ、ゴム試験片を得た。

#### 2.2 摩擦試験

Figure 2 に摩擦試験の概略図を示す。スライドステージに固定したゴム試験片に垂直荷重 4.90 N にてナイロン 66 からなる樹脂球（直径 8.0 mm, 精密級天辻鋼球製作所）と接触させ、すべり速度 10.0 mm/s, すべり距離 12.0 mm にて直動すべりさせた。すべり方向ならびにすべり方向と直行する 2 方向から白色 X 線(200 keV)を入射し、透過像を高速度カメラ (Vision research, Phantom) にて撮像した。視野は 11.28 mm × 7.048 mm, ピクセルサイズは 8.81 μm × 8.81 μm, ビット数は 12 bit, 撮像速度は 1000 fps, 霧囲気温度は 27.5–17.6°C, 湿度は 43–46%RH とした。

#### 2.3 ひずみ解析

2 方向からの X 線透過像におけるマーカー群の位置変化に基づくゴム内部でのひずみ分布定量化手法の確立を念頭に、本研究では摩擦に伴う表面近傍の微小領域(18 pixel × 17 pixel)の位置変化を画像相関法<sup>4)</sup>に基づき運動解析ソフトウェア(DIPP-Motion V, ディテクト)により定量化した。

### 3. 結果および考察

摩擦に伴い微小領域が樹脂

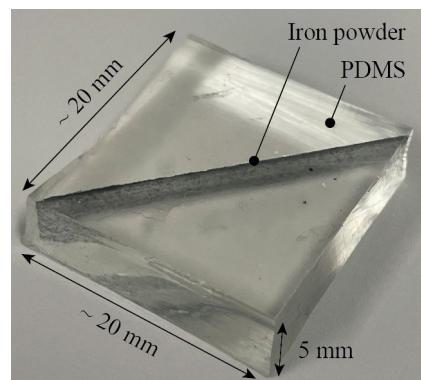


Fig. 1 Image of rubber specimen

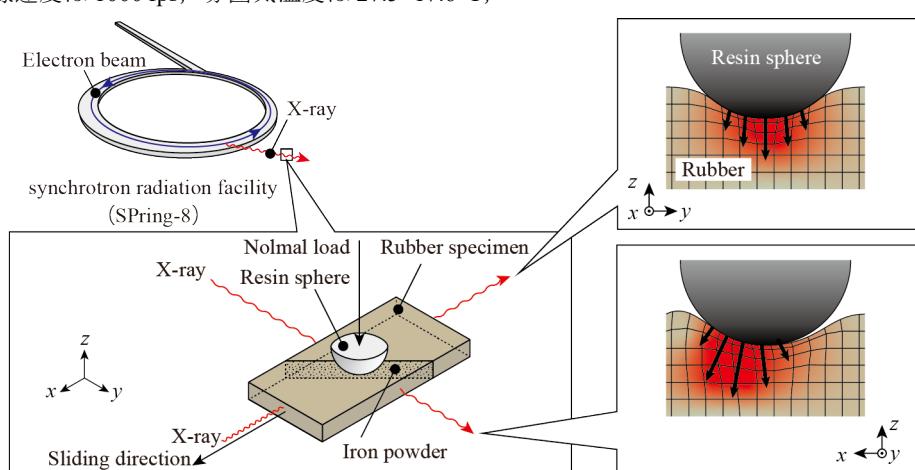


Fig. 2 Schematic view of rubber specimen and friction test

球の直下を通過した時刻を  $t = 0.000$  s と定義し,  $t = -3.000, 0.000, 3.000$  s における  $x$  軸方向ならびに  $y$  軸方向からの X 線撮像をそれぞれ Fig. 3 と Fig. 4 にそれぞれ示す。Figs. 3,4 よりゴム試験片表面は、樹脂球と接触することにより  $z$  軸負の方向に変位したことがわかる。また Fig. 4 より、樹脂球とゴム試験片の接触部前後端部では、樹脂球の輪郭に沿う軌跡を描いて変位した。その際、樹脂球前端部における接触長さは後端部より長かったことから、接触状態がすべり方向に対して非対称化したことがわかる。微小領域に着目すると  $-0.3 \leq t < 0.0$  s では  $z$  軸負の方向に変位し、 $0.0 \leq t \leq 0.3$  s では  $z$  軸正の方向に変位し、 $t = -0.3$  s と同じ深さ位置に戻った。Fig. 5 に、 $-0.3 \leq t \leq 0.3$  s における微小領域の  $x$  軸方向および  $z$  軸方向に対する変位の時系列変化を示す。ここで  $t = -0.3$  s での微小領域の位置を  $x = 0.0$  mm および  $z = 0.0$  mm とした。樹脂直下に接近する  $-0.3 \leq t < 0.0$  s では  $x$  軸、 $z$  軸の負の方向に変位し、樹脂球直下通過後の  $0.0 \leq t \leq 0.3$  s では、 $x$  軸  $z$  軸方向ともに正の方向に変位したことがわかる。Fig. 6 に  $-0.3 \leq t < 0.3$  s での  $xz$  平面内における微小領域の軌跡を示す。微小領域はすべりに伴い  $x < 0.0$  mm かつ  $z < 0.0$  mm の領域において、反時計回りのループ軌跡を描いた。 $-0.3 \leq t < 0.0$  s では、微小領域が樹脂球から離れる方向に変位し、 $0.0 \leq t \leq 0.3$  s では元の位置に戻る過程に相当する。これらの過程を通して、変位の軌跡が線上ではなくループを描いたことから、樹脂球接触部の前端側後端側での変位は非対称であり、その非対称性によってヒステリシス項が発現したことが示唆される。

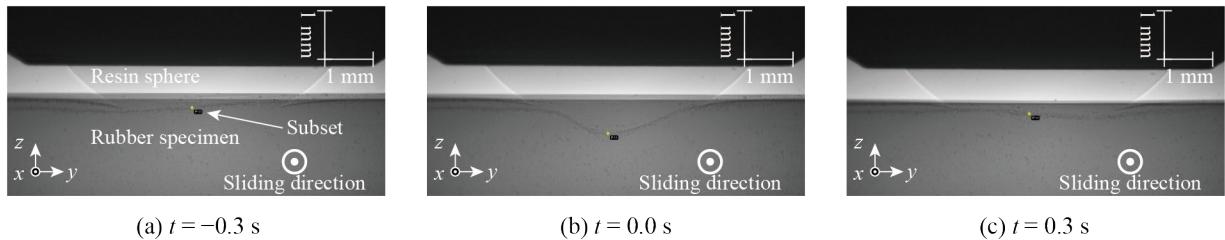


Fig. 3 Observed images of rubber specimen during sliding in  $x$ -axis

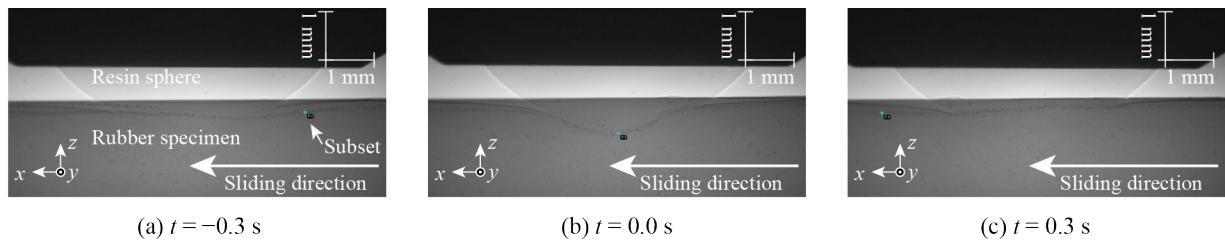


Fig. 4 Observed images of rubber specimen during sliding in  $y$ -axis

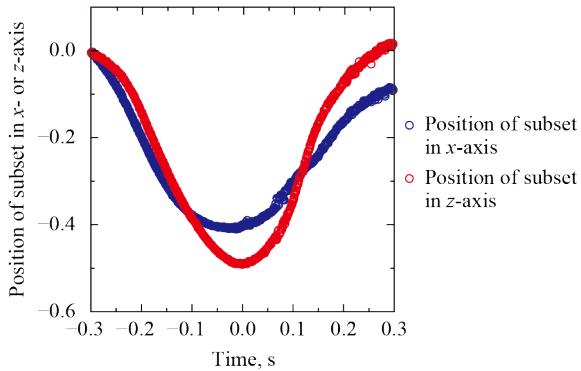


Fig. 5 Time series of displacement of subset in rubber specimen

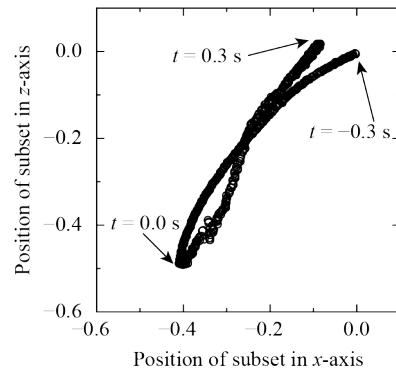


Fig. 6 Change in position of subset in rubber specimen in  $xz$ -plane during sliding

#### 4. 結言

垂直断面にマーカーを配意したゴム試験片の摩擦試験において、マーカー位置を X 線撮像と画像相関法により追尾することで、すべりに伴うゴム試験片内部での変位を実験的に測定した。また本手法は透明ゴムに限定されず、多数の微小領域を抽出し変位を算出することで、ゴム試験片内部での 3 次元ひずみの定量化が達成できると考えられる。

#### 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) Toshiaki Nishi, Kyohei Ueno, Tomohiro Nomoto, Shinya Sugisawa, Daiki Shin, Ken Yamaguchi, Isao Kuwayama, & Takeshi Yamaguchi, Visualization of strain distribution in rubber bulk during friction, Scientific Reports, 14, 1 (2024) 13530.
- 3) 上野・野本・西・杉澤・半澤・秦・山口・桑山・山口：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, 名護, B27.
- 4) Butters, J. N., Jones, R. & Wykes, C: Electronic speckle pattern interferometry, Academic Press, Inc. (1978) 111–158.