

欠損部を起点とするゴムの摩耗進展

Wear propagation of rubbers originating from defects

横国大(院)畠中 慎太郎, ブリヂストン(非)半澤 健太郎, (非)梶木 亮, (正)山口 健, 横国大(正)大久保 光, (正)中野 健
Shintaro Hatanaka¹, Kentaro Hanzawa², Ryo Kajiki², Ken Yamaguchi², Hikaru Okubo¹, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University, ²Bridgestone Corporation

1. 緒言

天然ゴムの生産地での森林伐採や、合成ゴムによる海洋プラスチック汚染の環境問題を背景として、自動車用タイヤには低摩耗性が求められている。ゴムの摩耗は、摩擦初期において不規則に発生したミクロクラックを起点として、定常アブレージョンパターンの形成が進行することで進展する[1]。しかし、ゴムと粗面の滑り摩擦系では、「摩耗起点」と「摩耗進展」がともに不規則に生じることから、これらを実験的に計測・評価することは容易ではない。先行研究において、著者らは、粗面の突起群を单一の三角柱で模擬したシンプルな実験系と理論を用いて、ゴムの摩耗現象の理解の深化を試みた[2]。その結果、ゴムの摩耗はヒステリシス摩擦によらず、凝着摩擦に依存することを示し、ゴムの摩耗現象の一端を明らかにした。しかし、上述したシンプルな摩擦系にも拘わらず、「摩耗起点」はゴム表面で不規則に発生し、「摩耗進展」の過程を詳細に捉えることはできなかった。このことは一方で、ゴム表面の「摩耗起点」を空間的に予め定めることができれば、そこから伝搬して発現する「摩耗進展」に関わる現象を詳細に可視化できると考えた[3]。そこで本研究では、ゴム試料の表面に欠損部を導入することで、「摩耗起点」を意図的に発現させ、「摩耗進展」に焦点を当てた検討を実施した。本報では、単一の三角柱を相手材とした摩擦試験の結果に基づき、ゴムの摩耗進展に及ぼす圧子の貫入量の影響について報告する。

2. 方法

実験装置は Bruker 社製 UMT Tribolab を使用した。上部に固定した SBR ゴムリング(外径:30 mm, 内径:20 mm, 厚さ:5 mm, カーボンプラック部数:30 phr)と、六本の鉄鋼三角柱圧子(材料:SUS316, 勾配: $\theta = 45, 60, 75^\circ$, 表面粗さ: $R_a 0.8 \mu\text{m}$, 長さ:24 mm)の接触部をシリコーンオイル(粘度: $\eta = 10 \text{ cSt}@25^\circ\text{C}$)で潤滑し、線接触滑り摩擦試験を実施した。三角柱圧子($\theta = 75^\circ$)の頂部をゴムリングの上面に接触させ、ヒートガン(設定温度 500°C)で加熱することで、六本の線状の欠損部を等間隔に導入した。加熱時間に変更することで、深さ: $d = 20, 40, 80 \mu\text{m}$ の三水準の欠損部を施した。静的貫入量: $\delta = 400, 550, 800 \mu\text{m}$ となるように、垂直荷重と圧子勾配の水準を決めた。垂直荷重一定の条件下で、ゴムリングに対する圧子の貫入量を PID 制御した。設定した垂直荷重で接触させた後、三角柱圧子を回転駆動した。このとき、六本の三角柱圧子は、ゴム表面の六本の欠損部を同時に通過する。回転速度は 10 rpm(接線速度:13.1 mm/s)とし、摺動回数 3333 回とした。試験前及び 1666 回、3333 回摺動後に、ゴム試料を摩擦試験機から取り外し、5 倍と 50 倍の二種の対物レンズのレーザ顕微鏡で、ゴム試料表面の光学観察像と断面形状を取得した。また、COMSOL Multiphysics®により、三角柱圧子とゴム平板の接線接触時の第一主応力分布を評価した。欠損なし、及び、欠損あり($d = 50 \mu\text{m}$)の二つのモデルについて、貫入量 $\delta = 300, 700 \mu\text{m}$ の 2 水準で計算を実施した。材料モデルは、粘弾性の影響を考慮せず、Neo-Hookean の超弾性モデルを使用した。また、良好な潤滑条件を想定し、接触界面に働く摩擦力はゼロとした。

3. 結果および考察

摩擦試験前後の欠損部近傍の光学観察像と断面形状を図 1 に示す。光学観察像より、顕著な摩耗は欠損部の近傍で生じることを確認した。試験前の断面形状(青線)は、導入した欠損部の形状を示す。試験後の断面形状(緑線と赤線)は、欠損部を起点とする摩耗進展を示す。欠損部の前縁側では、試験前後で断面形状に顕著な変化は見られなかった。一方、欠損部の後縁側では、摩耗による顕著な断面形状の変化が見られ、アブレシブ摩耗の形態の一つである掘起しによる摩耗が観察された。このように、ゴム表面への欠損部の導入により、明確な摩耗起点を持つ摩耗進展を捉えることが可能となる。次に、試験前後の断面形状の変化より定義した摩耗長さ L_w を指標として、摩耗進展に及ぼす貫入量の影響を検討した。欠損部の深さを一定($d = 40 \mu\text{m}$)とした場合の、摩耗長さ L_w と静的貫入量 δ_0 の関係を図 2(a)に示す。摩耗長さは、静的貫入量に伴い増加した。静的貫入量を一定($\delta_0 = 550 \mu\text{m}$)とした場合の、摩耗長さ L_w と欠損部深さ d の関係を図 2(b)に示す。摩耗長さは、欠損部深さに従って増加した。圧子がゴム表面の欠損部を通過するときに、貫入量は瞬間に増加する。この時の貫入量を、静的貫入量と欠損部深さの和と仮定し、実効貫入量: $\delta_e = \delta_0 + d$ で定義する。摩耗長さ L_w と実効貫入量 δ_e の関係を図 2(c)に示す。摩耗長さと、欠損部深さ、及び、静的貫入量の関係を、両者の和である実効貫入量を用いることで、統一的に整理できる。このように、摩耗起点を意図的に決定することで、摩耗の進展は貫入量の大きさに従うことがわかる。次に、有限要素法を用いた第一主応力分布の評価結果を図 3 に示す。欠損部を付与した場合に、接線接触時に、欠損部の前縁側に引張歪、後縁側に圧縮歪が生じ、非対称な応力場が生じた。また、貫入量が大

きいほど、引張・圧縮歪はともに増加した。このような欠損部前後の非対称な応力場は、図1で示した掘起しによると考えられる。以上に示した実験と計算の結果より、摩耗進展の抑制には、貫入量の低減が有効である。従って、先行研究[2]で示された、粘弾性に由来する圧子の浮上効果の活用により、摩耗進展の抑制が可能であることが示唆される。

4. 結言

- ・ゴム表面への欠損部の導入により、明確な摩耗起点を持つ摩耗進展現象を捉えることが可能となる。
- ・欠損部を起点とする摩耗長さは、静的貫入量と欠損部深さの和である、実効貫入量に従って大きくなる。
- ・ゴムの摩耗進展は、欠損部の前後の引張・圧縮応力による非対称な応力場が、掘起こし摩耗を誘引することで進行する。

文献

- [1] Fukahori Y, Yamazaki T, Mechanism of rubber abrasion: Part 1. Abrasion pattern formation in natural rubber vulcanizate., *Wear*, **171** (1994)
- [2] 島中, 半澤, 堀, 山口, 梶木, 中野, ゴムと粗面の摩擦と摩耗の因果関係, トライボロジー会議 2023 春 東京 予稿集 (2023).
- [3] Miyazaki M, Nakano K, Tadokoro C, Vlădescu SC, Reddyhoff T, Sasaki S, Tsujii Y. Enhancing durability of concentrated polymer brushes using microgrooved substrates., *Wear*, **482-483** (2021).

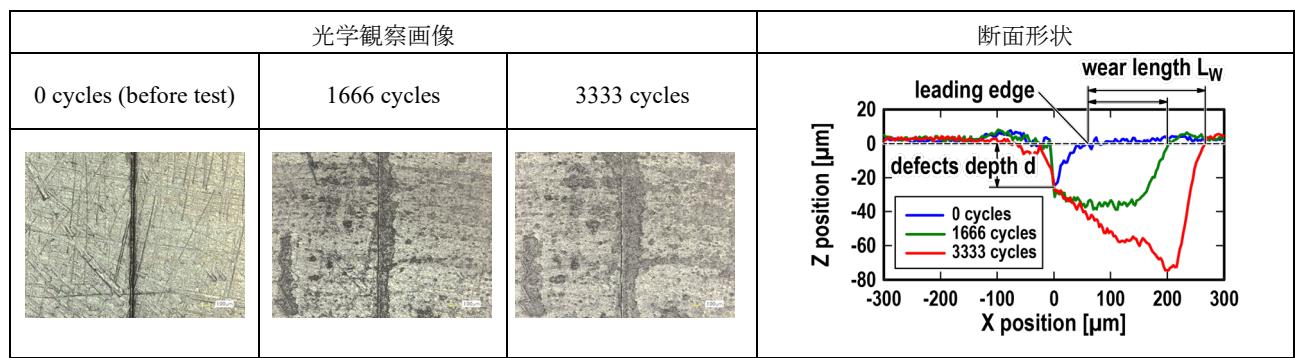


図1 摩擦試験前後の欠損部近傍の光学観察画像(左), 及び, 断面形状(右)

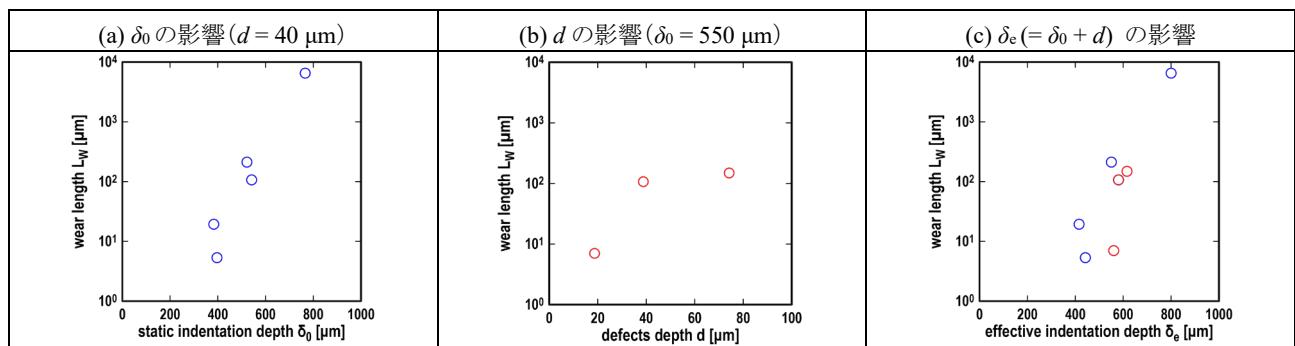


図2 摩耗長さ L_w に及ぼす(a) 静的貫入量 δ_0 , (b) 欠損部深さ d , 及び, (c) 実効貫入量 $\delta_e (= \delta_0 + d)$ の影響

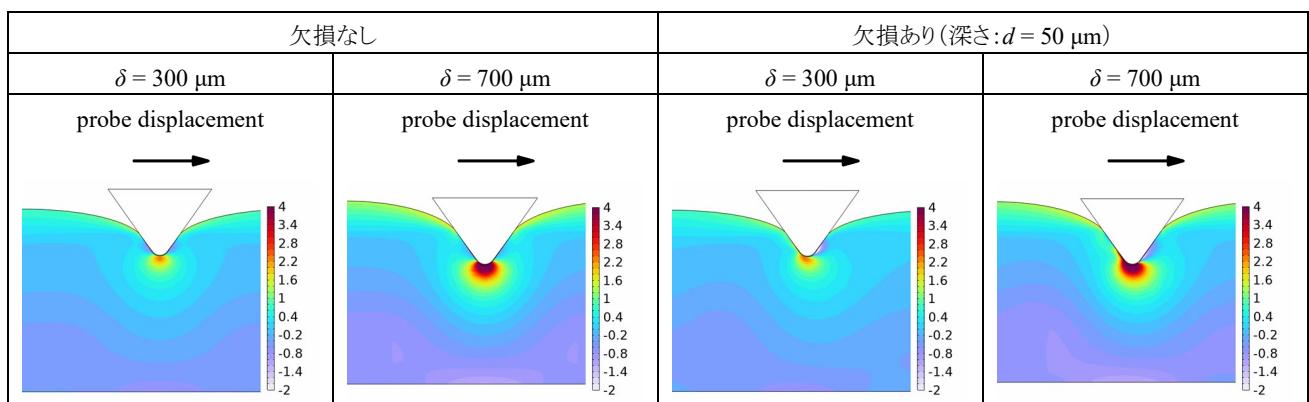


図3 有限要素法による欠損部近傍の第一主応力分布の評価(欠損なしの場合(左), 欠損ありの場合(右))