

## 離散要素法を用いた凹凸路面上のゴム摩耗解析

Analysis of rubber wear on a substrate with roughness using the discrete element method

ブリヂストン（正）\*小早川 彰      ブリヂストン（非）赤司 篤政

Akira Kobayakawa\*, Tokumasa Akashi\*

\*Bridgestone Corporation

### 1. はじめに

近年、サステナブル社会の実現に向けた関心の高まりを背景として、TRWP（Tire and Road Wear Particles：タイヤ・路面摩耗粒子）に代表されるタイヤ摩耗への注目が集まっている。とりわけ、耐摩耗性の向上を通じた摩耗量の削減は、環境負荷低減に資する重要な課題であり、タイヤ製品の技術的改善が求められている。

本研究では、ゴム材料の粘弾性特性、特にガラス転移温度（ $T_g$ ）と摩耗特性との関連に着目した。一般的に  $T_g$  が低い場合摩耗特性が優れていることが知られている<sup>1)</sup>。当該特性が摩耗挙動に与える影響を数値的に再現することを目的とし、離散要素法（Discrete Element Method：以下 DEM）を適用した摩耗シミュレーションを実施した。シミュレーションモデルには粘弾性を導入し、凹凸のある路面における摩耗メカニズムを解析し、実験結果との比較検証を行った。その結果、粘弾性特性の違いが摩耗量に与える影響が確認された。

### 2. 計算方法およびモデル

本研究では、DEM を用い、ゴム粒子間の相互作用として一般化 Maxwell モデル（Fig. 1）に基づく粘弾性要素を導入し、時間依存した変形挙動をモデル化している。比較検討のため、ガラス転移温度（ $T_g$ ）が異なる 2 種類の SBR（以下 ゴム A：低  $T_g$ 、ゴム B：高  $T_g$ 、摩耗量 ゴム A < ゴム B）をモデル化し、それぞれの摩耗挙動を解析対象とした。ゴム A、ゴム B の緩和弾性率は Fig. 2 に示す。シミュレーションモデルを Fig. 3 に示す。ゴムサイズは  $300 \times 50 \times 50 \mu\text{m}$  とし、粒子サイズは  $1 \mu\text{m}$  で定義した。粒子間の影響半径は  $2.5 \mu\text{m}$ 、相互作用粒子数は平均 5 個程度である。凹凸路面のモデルには、実際のアスファルト舗装路面をレーザースキャンによって取得した 3 次元形状データを使用し、現実的な接触条件の再現を図った。一定荷重を与え、 $x$  方向に一定速度で路面を変位させた条件でシミュレーションを行った。また、粒子間の破壊特性を表現するため、一定の歪みが加わった際に相互作用が消失する条件を設定した。この破壊条件はゴム A、ゴム B 共通とした。摩耗量は初期のモデルから離脱した粒子数をカウントすることで算定した。試験は上記ゴムサンプルをアスファルト路面上で摺動させた際の摩耗量を測定し、シミュレーションと比較を行った。

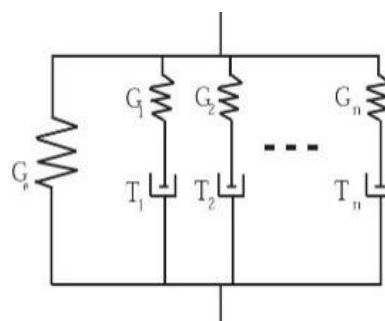


Fig.1 Viscoelasticity based on the generalized Maxwell model

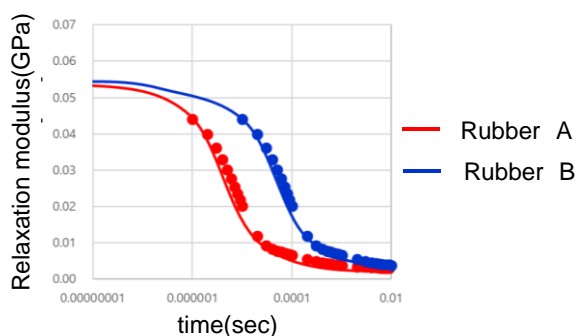


Fig.2 Relaxation modulus of rubber A and B

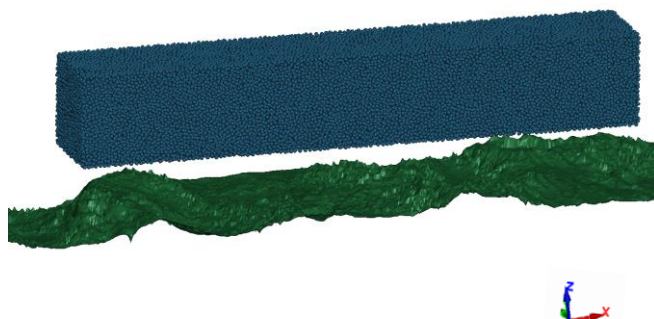


Fig. 3 Simulation model  
Upper body shows rubber, lower shows road surface.

### 3. 結果および考察

本研究では、異なるガラス転移温度 ( $T_g$ ) を有する2種類のゴム材料 (ゴム A: 低  $T_g$ 、ゴム B: 高  $T_g$ ) に対して、摩耗挙動の違いをシミュレーションおよび実験の両面から検討した。特に、応力分布解析、摩耗量の定量比較、ならびに応力頻度分布の解析を通じて、材料特性が摩耗に与える影響を評価した。

Figure 4 に示した実験結果との比較では、摩耗量をゴム A 基準で INDEX 化することで、相対的な摩耗傾向を明確にした。シミュレーション結果は実験に対して若干の過小評価傾向を示したが、 $T_g$  の違いによる摩耗量の差異は定量的に再現されており、モデルの妥当性は高いと評価できる。

シミュレーションの同時刻のスナップショットを Fig. 5: ゴム A、および Fig. 6: ゴム B に示した。コンタ図は最大主応力を示す。離脱した粒子の様子からもゴム B の摩耗が進行していることが視覚的に確認できる。

この結果は、材料の粘弾性特性、特に応力緩和挙動が摩耗に大きく影響することを示唆している。高  $T_g$  材料であるゴム B は、短時間の変形に対して高弾性が持続するため、局所的な応力集中が生じやすい。これが摩耗の進行を加速させる要因となっていると考えられる。このスナップショットの応力頻度分布を Fig. 7 に示した。応力分布はほぼべき乗分布で表現される。最大主応力が 0.05 GPa 以上の領域において、ゴム B (青線) の頻度がゴム A (橙線) を大きく上回っている。これは、ゴム B において高応力が局所的に発生していることを意味し、摩耗量の増加と強く相関している。べき乗からの外れ方を考慮すると応力緩和が速いゴム A の局所的な変形が少なくとも考えられる。また、0.01 GPa 付近はゴム A の頻度が高い。この応力はゴム A が全体的な変形 (Fig. 5 コンタの緑部) に対応している。この結果からもゴム A は全体的な変形を生じやすく、一方、ゴム B は局所的な変形が生じやすいことが判明した。このような高応力頻度の違いは、ゴム材料の粘弾性特性に起因するものであり、摩耗量に影響を与えたと考えられる。

このような傾向は、シミュレーションにおける摩耗モデルのパラメータ設定や、粒子離脱の閾値設定に起因する可能性がある。今後は、実験結果とのさらなる整合性を図るため、モデルの調整やパラメータ最適化が必要である。また離脱した摩耗粉サイズの統計解析により形成メカニズムをより詳細に把握できる可能性がある。

### 4. 緒言

本研究により、 $T_g$  の違いが摩耗挙動に与える影響を定量的に評価できた。特に、応力緩和特性の違いが局所的な応力集中を引き起こし、摩耗量の差異に繋がることが明らかとなった。今後は、摩耗粉サイズの分布解析や、表面粗さとの相関解析を通じて、より詳細な摩耗メカニズムの解明を進める必要がある。

### 文献

- 1) R. N. Kienle, et al.: Rubber Chem. Technol, 44 No. 4, 996 (1971)

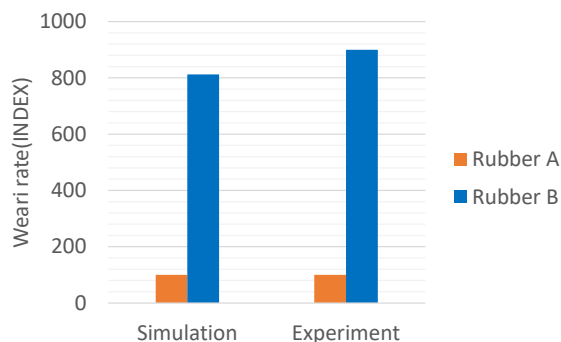


Fig. 4 Comparison of wear rates for different  $T_g$  rubber

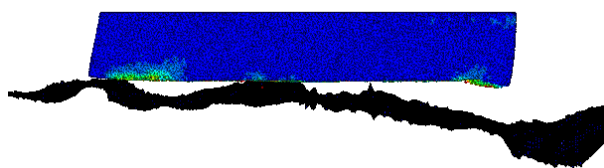


Fig. 5 Snapshot of wear simulation for rubber A

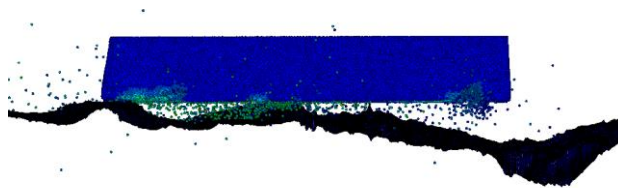


Fig. 6 Snapshot of wear simulation for rubber B

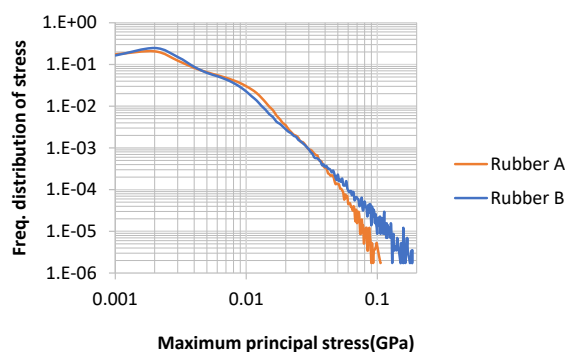


Fig. 7 Comparison of frequency distribution of maximum principal stress