

B24 自動車用タイヤにおけるチッピング現象に関する力学的検討

濱田 雅規 (指導教員 柴原, 伊藤, 深沢)

Mechanical Study on the Chipping Phenomenon in Automobile Tires

by Masaki Hamada

Abstract

Hyper-elastic materials are difficult to analyze stress and strain distribution using conventional FEM. Since rubber has complicated mechanical characteristics which are material nonlinearity, geometric nonlinearity, viscoelasticity and temperature dependency, it is very important to investigate the details of mechanical characteristics by measurement. To develop new rubber materials, it is important to investigate the mechanical properties measured is very important. And, in recent years, the developments of measurement methods are developing and strain deformation of the rubber materials. In this study, non-linear analysis is performed by using Ogden strain energy function that can estimate reproduce the actual behavior of the rubber materials widely. Also check the accuracy of the nonlinear FEM analysis by the experiment of rubber materials. In addition, automobile tires took up as an example of real product and proposed method is applied to this problem. In addition, the chipping which is one of the fracture phenomena of the tire is investigated.

1. 緒 言

超弾性体とは大変形が可能で荷重を取り除くとほぼ元の状態に戻るという力学的な特徴を持つ物体であり、高分子材料のゴム材料や、人体の筋肉、網膜などの生体軟組織がそれにあたる。特にゴム材料は浮標ブイを係留するラバージョイナー、船の係留施設における防舷材、自動車のタイヤなどに用いられるなど各工業分野において多種多様な用途で使用されている。そのため、ゴム材料を対象として多くの学問分野において様々な解析が行われている。しかしながら、ゴム材料は非常に解析が難しい材料として知られている。その理由として以下が挙げられる。ゴム材料は数百パーセントのひずみが発生する超弾性変形の際に、応力-ひずみ関係が非線形となること。また、大変形による幾何学的非線形性などが存在すること。更に、厳密な解析を行うには、粘弾性、温度依存性などを考慮しなければならないということもあり、き裂進展メカニズム、摩擦・磨耗メカニズム、補強メカニズムなど明らかにされていない力学特性が多く存在する。新たなゴム材料の開発には、実測による力学特性の把握は非常に重要であり、近年、ゴム材料の変形・ひずみ計測法の開発が進められている。

そこで本研究では、広範囲なひずみレベルでゴムの実挙動を精度よく再現でき、数値計算において最も広く利用されている Ogden が提案したひずみエネルギー密度関数を有限要素法 (FEM) 中に導入することによって、非線形解析を行った。また、ゴム材料試験により材料非線形性を確認し、非線形有限要素法による解析の精度を確認した。

さらに、非線形有限要素法を実構造物問題に適用することを旨とし、一般に活用されている超弾性体を用いた実構造物問題として自動車用タイヤを取り上げた。そして現在、タイヤ接地面において未解明の事象として問題となっている破壊現象であるチッピングについて考察を行った。

2. Ogden ひずみエネルギー関数

ひずみエネルギー密度関数とは物体が変形を受けるとポテンシャルエネルギーが蓄えられると仮定したもので、エネルギーは主伸張比 λ_i の関数として表される。ここで、 λ_i は元の長さを 1 としたときの変形後の長さのことである。なお、添え字は主方向を示す。本研究では、(1) に示す、広範囲なひずみレベルでゴムの実挙動を精度よく再現でき、数値計算において最も広く利用されている Ogden が提案したひずみエネルギー密度関数を用いる。

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (1)$$

式(1)における、 μ_n および α_n は、一軸伸張、純せん断、一様二軸引張りに代表される試験法によりそれぞれ得られる材料定数である。本研究では一軸伸張試験により得られる材料定数を用いて主応力を算出する。その際、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の関係は非圧縮性より式(2)のように表せ

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (2)$$

一軸伸張試験において、一方向に引張ると他の二方向には自由に収縮するため、 λ_2, λ_3 は λ_1 を用いると(3)のように表せる。

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}, \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \quad (3)$$

更に式(3)を式(1)に代入し、 λ_1 で微分すると式(4)に示す主応力 σ_1 が得られる。

$$\sigma_1 = \sum_{n=1}^N \mu_n \left(\lambda_1^{\alpha_n - 1} - \lambda_1^{-\frac{1}{2}\alpha_n - 1} \right) \quad (4)$$

これにより、主応力 σ_1 を主伸張比 λ_1 のみ、つまり主ひずみ ϵ_1 のみの関数として表現できる。

3. 非線形弾性解析手法の確立

3.1 材料試験

円筒型ゴム材料を用いて圧縮実験を行い、試験力-スト

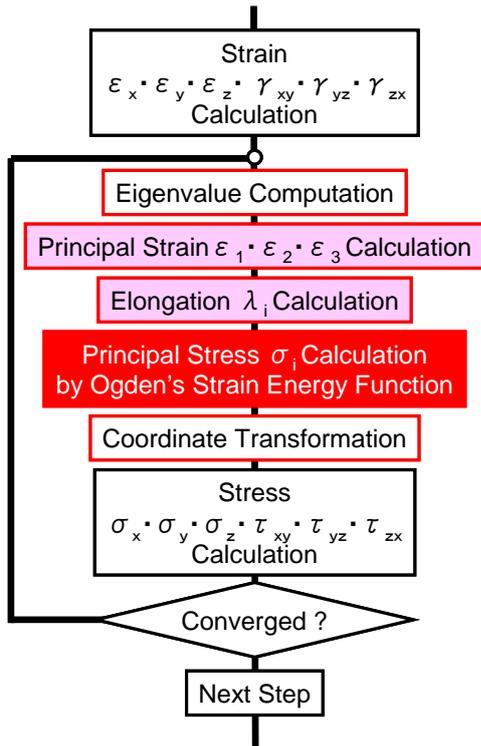


Fig.1 Flow of FEM using Ogden's strain energy function

ロック曲線を作成する. 試験材料には SBR(スチレンブタジエンゴム)を主とする 4 種類のゴム材料を用い, カーボンブラックと硫黄の配合の違いによる挙動の違いについて検討する.

試験片形状寸法は半径 18 mm, 長さ 25 mm である. 試験装置として島津製作所製島津オートグラフ AG-IS MS(卓上)形を使用した. 実験方法は, 試験機の上下圧縮用ジグで試験片をはさみ, 下方を固定し上方から圧縮し, 試験力 0N から 45,000N 時の試験力-ストロークグラフを作成した.

3.2 Ogden 関数の導入

Ogden ひずみエネルギー関数を導入した FEM を用い, 円筒型ゴム材料の 1/8 モデルにおいて Fig.1 に示すようなフローで非線形解析を行う. なお, 解析条件は材料試験を再現するため, 上面の Z 方向・Y 方向, 下面の X 方向・Y 方向・Z 方向は強制変位 0 で拘束し, 上面の X 方向の強制変位を -10~0 mm とした.

3.3 精度評価

材料試験による応力-ひずみ曲線と Ogden 関数を導入した非線形 FEM 解析による応力-ひずみ曲線を Fig.2 に示す. 破線は材料試験から算出した応力-ひずみ分布であり, 実線は Ogden ひずみエネルギー関数を導入した超弾性非線形解析より算出した応力-ひずみ分布である. これにより, ゴム材料の非線形性が Ogden ひずみエネルギー関数を導入した FEM 解析によって精度良く表現できていることが確認できる.

4. 実構造物への適用に向けた基礎的検討

4.1 チッピングの評価方法

チッピングとは, 自動車の悪路での過荷重や急駆動・

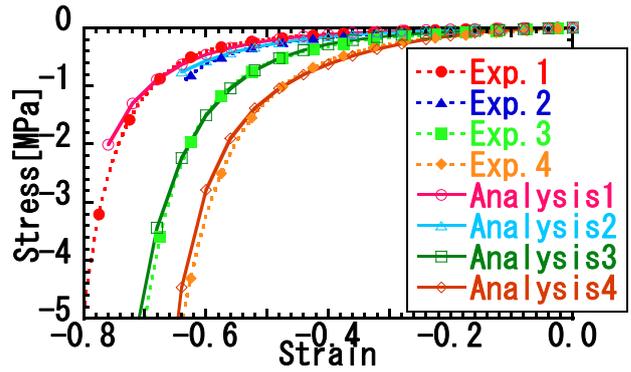


Fig.2 Stress-strain curve

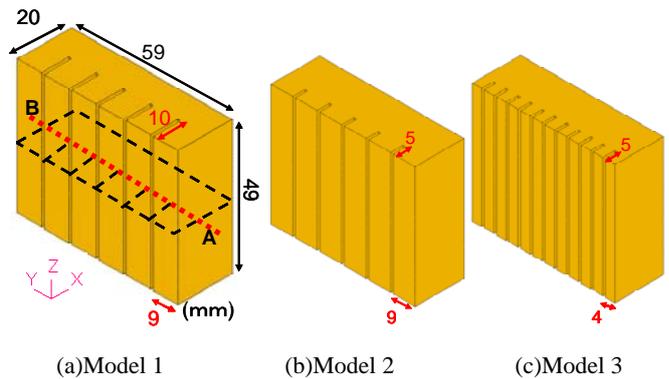


Fig.3 Schematic illustration of tread patterns

急ブレーキ時などにタイヤ接地面において局部的に荷重が加わり, 表面が欠けた状態になり, また, うろこ状に表面が剥離するなど, 表面がささくれた状態になる現象をいう. しかし, チッピングの発生メカニズムは未解明である. 本研究では, タイヤの接地面におけるトレッドのパターンメッシュについて解析を行うにあたり, タイヤ表面のチッピングを予測した場合の破壊モードをき裂に対して引張をモード 1: σ_x , せん断をモード 2: τ_{xy} , 面外せん断をモード 3: τ_{zx} として定義した.

4.2 荷重方向による応力集中の比較

トレッドの深さ・間隔による応力状態への影響を考察するため, 厚さ 20 mm, 長さ 59 mm, 幅 49 mm のタイヤ表面のメッシュを 3 種作成し, 詳細を Fig.3 に示す.

なお, 材料定数は材料試験に使用した試料のうち, 最も実際のタイヤの材料配合に近い試料よりカーブフィットにより算出したものを採用し, ポアソン比は非圧縮性を再現するために 0.499 として解析を行った. ここでは, モデル 1 についての結果を示す.

4.2.1 垂直荷重による影響

接地面に垂直方向に -5 mm の強制変位を加え, タイヤに加わる車体の重量などの垂直荷重を再現した. また, 接地面は完全に拘束した. Fig.4 (a) にトレッド部の応力分布を示す. 同図より, X 方向垂直応力は圧縮で働いており, 破壊の原因には至らないと考える. また, XY せん断応力は ZX せん断応力に比べ値が大きく, 破壊の要因になる可能性があると考えられる.

4.2.2 縦方向荷重による影響

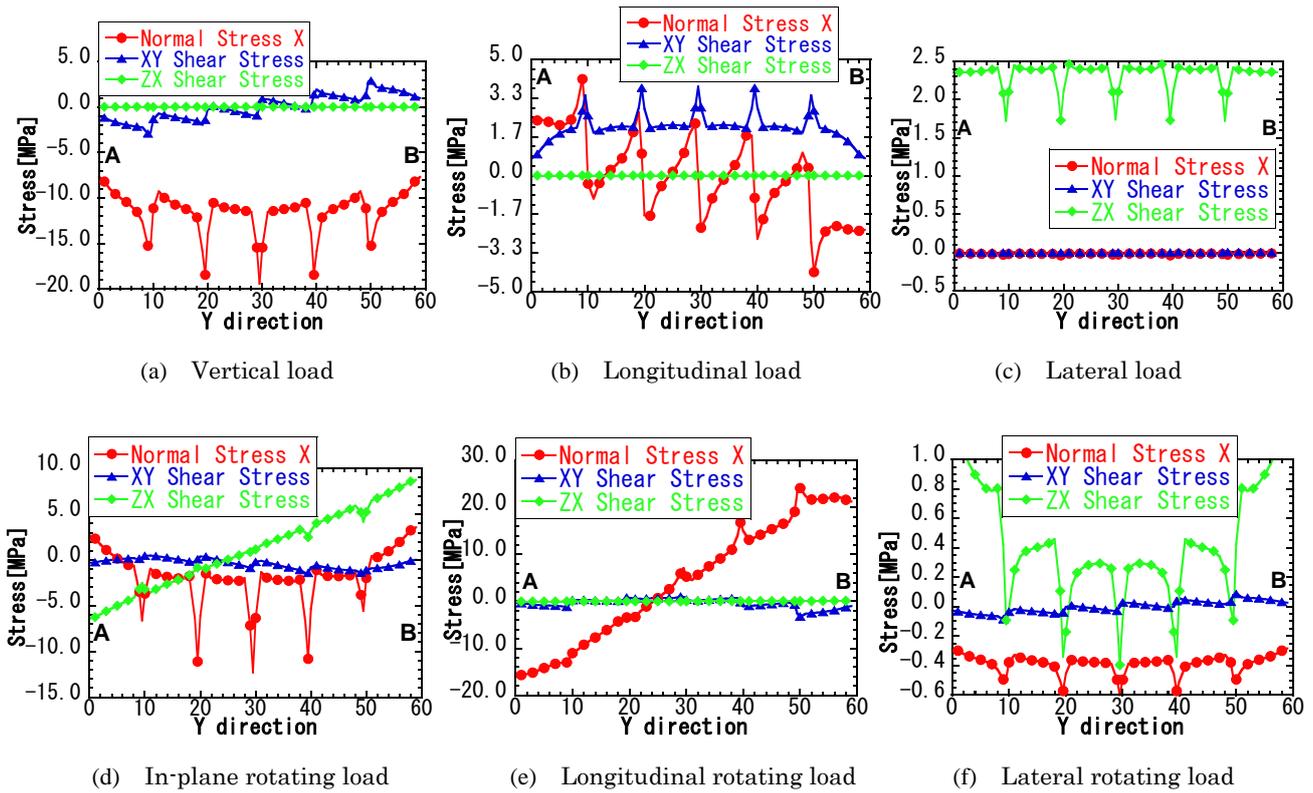


Fig.4 Stress distribution along line A-B

車体進行時にタイヤに加わる縦方向荷重を模擬するため、接地面の進行方向に 5 mm の強制変位を与えた。また、接地面は完全拘束した。Fig.4 (b)にトレッド部の応力分布を示す。同図より、X 方向垂直応力はトレッド部において極端に大きくなっており、拘束条件から、特に接地面中央での破壊の可能性がある。また、XY せん断応力はトレッド部において極端に大きくなっており、破壊の要因になる可能性がある。ZX せん断応力は値が小さく、影響は少ないと考えられる。

4.2.3 横方向荷重による影響

車体横滑り時にタイヤに加わる横方向荷重を模擬するため、接地面に水平方向 5 mm の強制変位を与えた。また、接地面は完全拘束した。Fig.4 (c)にトレッド部の応力分布を示す。同図より、X 方向垂直応力、XY せん断応力の値は小さく、影響は少ないものと考えられる。また、ZX せん断応力は他の破壊モードに比べ非常に大きく支配的であるとされる。

4.2.4 面内回転荷重による影響

ハンドル旋回時にタイヤに加わる回転による荷重を模擬するため、接地面の中心周りに 30°回転の強制変位を与えた。また、接地面は完全拘束した。Fig.4 (d)にトレッド部の応力分布を示す。同図より、X 方向垂直応力は、圧縮で作用しており、破壊の原因としては考えにくい。また、XY せん断応力は値が小さく、影響は少ないものと考えられる。ここでは、ZX せん断応力による破壊が最も起きやすいと考えられる。

4.2.5 縦回転荷重による影響

ブレーキ作動時にタイヤに加わる回転荷重を模擬するため、接地面 Z 方向の中心線周りに 20° 面内回転の強制

変位を与えた。また、接地面は完全拘束した。Fig.4 (e)にトレッド部の応力分布を示す。同図より、X 方向垂直応力は、溝部において極端に大きくなり、破壊の可能性が伺える。XY せん断応力・ZX せん断応力の値は小さく、影響は少ないと考えられる。

4.2.6 横回転荷重による影響

カーブ時にタイヤに加わる回転荷重を模擬するため、接地面 Y 方向の中心線周りに 20° 面内回転の強制変位を与えた。また、接地面は完全拘束した。Fig.4 (f)にトレッド部の応力分布を示す。同図より、X 方向垂直応力は、圧縮で働いており、溝部で極端に小さな値をとる。XY せん断応力は小さな値で推移しており、破壊に繋がる可能性は低いと考えられる。ZX せん断応力は溝が浅い場合に大きく働いており、接地面の前後で大きな値をとる。

5. 自動車用タイヤモデルへの適用

5.1 ラグ型トレッド

ラグ型トレッドとは、タイヤの回転方向に対して溝が垂直になるパターンである。駆動力、制動力に優れており、建設用・産業用・農耕用車などのタイヤに使用されることが多い。

5.2 解析条件

作成したメッシュは、節点数 95,360・要素数 70,144 である。タイヤメッシュの寸法はタイヤ幅が 200 mm、タイヤ厚さが 80 mm、ホイールサイズが 18in である。

ここでは、ホイール部に -10 mm の強制変位を加え、タイヤ全体に加わる垂直荷重を再現し、チップングの発生が多い接地面外側における応力分布について検討した。

5.3 解析結果

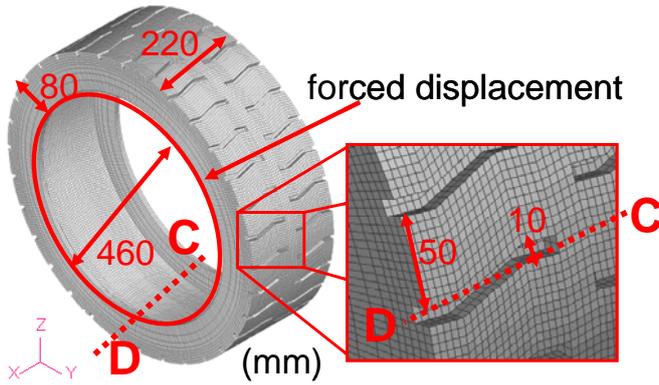


Fig.10 FE mesh division of lag tire model

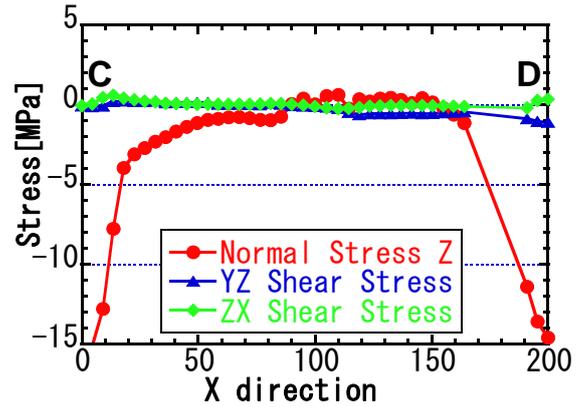


Fig.11 Stress distribution along line C-D

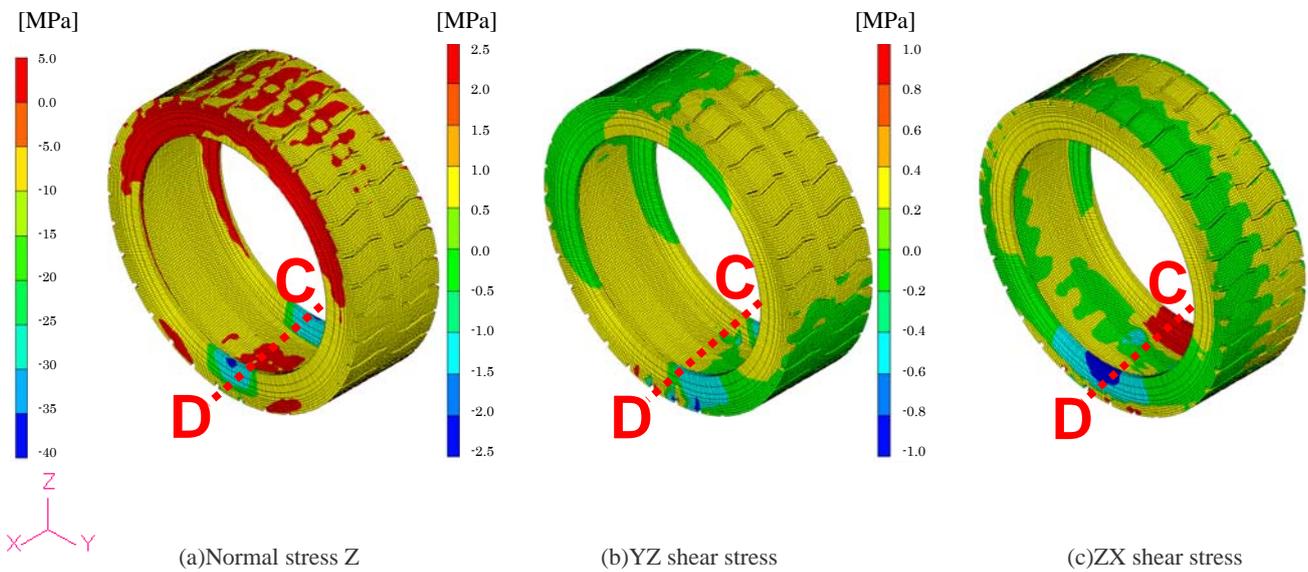


Fig.12 Stress distribution of lag tire loaded in vertical direction

Z 方向垂直応力は、圧縮で働いており、その値がタイヤ両端において極端に上下しているのがわかる。YZせん断応力・ZXせん断応力は、小さな値で推移している。垂直荷重のみを考慮した場合、破壊に至るような大きな応力集中は見られない。

6. 結 言

本研究では、Ogden ひずみエネルギー関数を導入した FEM 解析プログラムを開発し、非線形超弾性体の応力状態を解析した。また、材料試験を実施し、開発したプログラムの精度確認を行った。さらに、自動車タイヤにおけるチッピング現象について検討するため、本手法をタイヤ表面モデルおよびタイヤ全体モデルに適用した結果、以下の知見を得た。

1. Ogden ひずみエネルギー関数の導入により、超弾性体の非線形弾性解析を行い、実験と良好な一致を示した。
2. タイヤ表面モデルにおいて、車体の動きを模擬した荷重方向の強制変位を与え、タイヤ接地面における応力解析を行い、トレッド境界部の応力について整理すると、モード I においては縦方向荷重・縦回転荷重の影響が大

きく、モード II においては縦方向荷重の影響が大きく、モード III においては横方向荷重・面内回転荷重・横回転荷重の影響が大きいことがわかった。

3. タイヤ全体モデルを用いて自重による荷重を模擬した解析を行ったところ、タイヤ外縁のトレッド境界部にせん断応力が発生することがわかった。

参 考 文 献

- 1) R.W.Ogden : Non-linear elastic deformations, 1997
- 2) YavuzBasar, MikhailItskov : Finite element formulation of the ogden material model with application to rubber-like shells, Int. J. Numer. Meth. Engng. 42, 1279-1305 (1998)
- 3) 久保亮五 : ゴム弾性, 1996, 88-91
- 4) 日本機械学会 : 計算力学ハンドブック (I 有限要素法 構造編), 1998.7
- 5) 藤本邦彦, 得居伸, 御船直人 : チッピング現象に関する研究, 1987
- 6) 安部武治, 清水茂俊, 山田勝稔 : 弾性力学, 2003, 31-41
- 7) 中村喜代次, 森教安 : 連続体力学の基礎, 1988
- 8) 井上達雄 : 弾性力学の基礎, 1987, 38-50