

vol.99-4

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

November 1999



ドイツ 11月

【特集】 Ogdenモデルによるゴム材料解析

FEM Consulting Services for Engineering Practice
URL <http://www.mech-da.co.jp>

特集 Ogden モデルによるゴム材料解析

前回の大会の経緯を振り返るまでもなく、ゴム材料は現代の工業製品の付加価値を高めるために、極めて大きな貢献を果たしてきました。ゴム材料はしなやかである反面、変形に伴って体積がほとんど変化しない（非圧縮）という特性を持っています。たとえば0リングが高いシール性を示すのは、断面が自由に变形して接触面になじむからだけではありません。溝の中で充填すると急激に剛性が立ち上がり、高い面圧を維持できるからです。このように、自由表面の割合を操作することによって機能性を自由に設計できるという利点をゴム材料は持っています。今回はゴム材料のモデルの中で代表的な、Ogden モデルに注目した結果を紹介します。

【1】 ゴム弾性とひずみエネルギー関数

金属のように結晶構造からなる物質は、その構成要素である原子または分子が整然と配列しており、外力による変形に対しては原子間力の増加で抵抗します。この特性は結晶弾性と呼ばれ、発生する歪みは微小に留まります。これに対してゴムに代表されるような高分子材料は、複雑に入り組んだ長い鎖状の分子構造を持ち、その鎖が伸びることによって数百%に達する大きな歪みが許容されます。

熱力学的なエントロピー（状態の雑然さ、すなわち自由度の多さ）の観点から見ると、分子鎖は、伸びきって自由のない状態よりも自由に縮んだ状態を好むので、この自由度の差に基づくエネルギーによってゴムは外力に抵抗します。これをエントロピー弾性と呼びます。実際、ゴムを引き伸ばし、これを肌当てれば熱を感じるでしょう。これは分子鎖の自由度として保持されていたエネルギーが、外界に放出された結果です。このような熱力学的なゴム弾性の理論は、1940年代には一応の完成を見せています⁽¹⁾。

一方、材料力学の観点からは、ゴムの変形は大ひずみ（有限変形）弾性に属します。材料が弾性体であるための条件は以下の2点です。

- (1) 弾性体に作用した(熱)力学的過程はエネルギー(仕事)の散逸がない。すなわち可逆である。
- (2) 弾性体の応答は変形の履歴に依存しない。すなわち各点の応力は現在の変形のみによって定まる。

いま、物体に力が加わり、位置が移動することを考えます。それに伴う仕事が物体の経路に依存しないということは、ポテンシャルと呼ばれる位置のスカラー関数が存在し、その微分勾配が力に等しいことを意味しています。例えば重力と位置エネルギー、あるいはバネ力とたわみエネルギーの関係はその最も代表的な例です。閉じた経路に沿ってそのような力（保存力）が行う仕事は0であり、ポテンシャル関数を知れば、作用した力が求まることになります。

連続体の場合、経路をひずみによる変形の過程、力を応力とすると、ポテンシャルはひずみエネルギーです。大ひずみ弾性にこの考え方を適用し、応力成分がひずみエネルギー関数のひずみ成分による微分から定められるとき、その材料を超弾性（Hyperelastic）材料と称します^{(2), (3), (4)}。ゴムは粘弾性効果のため応力緩和を示すものの、支配的な性格である非線形弾性の部分については、超弾性材料として研究が進められてきました。まず、ひずみの尺度として次のような伸長比 λ を考えます。

$$\lambda = l - l_0 = 1 + e \quad \dots\dots (1-1)$$

ここで、 l_0 : 変形前の長さ、 l : 変形後の長さ、 e : 工学ひずみ

座標軸として、せん断の効果を省くために主応力の方向を考えます。Fig. 1-1 に示すように $1 \times 1 \times 1$ の単位寸法をもつ正方形の面に主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ が作用するものとします。各辺は $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ のように変形し、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は変形後の面積に加わる応力、すなわち真応力です。

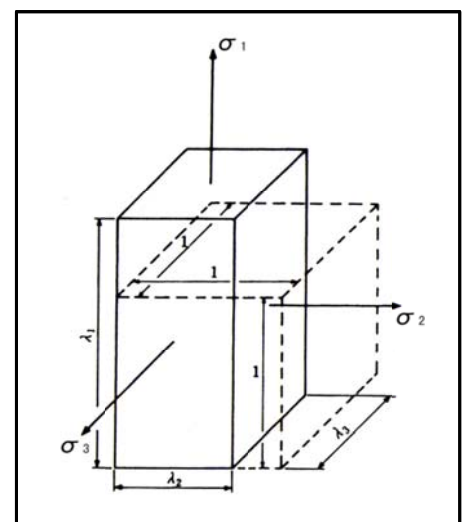


Fig.1-1 単軸立方体要素の変形状態

ここに変形の微小変化によって生ずる歪エネルギーの変化 dW は、次のようになります。

$$dW = \sigma_1 \lambda_2 \lambda_3 d\lambda_1 + \sigma_2 \lambda_1 \lambda_3 d\lambda_2 + \sigma_3 \lambda_1 \lambda_2 d\lambda_3 \quad \dots\dots(1-2)$$

例えば、右辺第一項の $\sigma_1 \lambda_2 \lambda_3$ は第一方向の力であり、移動量 $d\lambda_1$ を乗じてエネルギーを表しています。(1-2)式を応力に対して示すと、

$$\sigma_i = \frac{1}{\lambda_j \lambda_k} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad \dots\dots(1-3)$$

一方、ゴム材料は変形によって体積がほとんど変化しない非圧縮の材料です。この条件を伸長比を用いて示すと(1-4)式、さらに(1-3)式に代入して(1-5)式となります。

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad \dots\dots(1-4) \quad \sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p \quad (i=1\sim 3) \quad \dots\dots(1-5)$$

材料が非圧縮であると、静水圧応力 p は仕事をしないので、(1-5)式には任意の大きさを持つ p を追加しています。この事実は、非圧縮性材料の応力場は変形から完全には決定できないことを示しています⁽²⁾が、ここではこれ以上は踏みません。

【2】 Ogden モデル

Fig.2-1 は Ogden によって同定された実在のゴムのひずみエネルギー関数 W を示します。2つの方向の伸長比 λ_1 と λ_2 に対して W の分布を描いており、この曲面の勾配が応力に相当しています。研究の初期においては、neo-Hookean 則あるいは Mooney 則に代表される W のモデル化がある程度の成功を収めてきました^{(2),(7)}。これらは主に単軸の材料試験や、熱力学的な考察を背景にした理論です。しかし、Fig.2-1 からわかるように、 λ_1 と λ_2 が共存する高いひずみの領域では、 W は強い非線形を示し、これらの理論の適用には限界がありました。一方、多軸場のひずみエネルギー関数を表すために、Valanis と Landel は次のような簡単な仮定を提案しています^{(5),(6)}。

$$W = w(\lambda_1) + w(\lambda_2) + w(\lambda_3) \quad \dots\dots(2-1)$$

すなわち 1 つの関数 w の各方向に対する値の線形和で W が示されます。各方向のエントロピーの和が全エントロピーに相当することが念頭におかれています。それ以上の根拠はなく、むしろ【3】以下に示すように、 W を効率的に近似するための便宜と考えるのが妥当です⁽⁸⁾。Ogden はこの式に対応する実際の関数形として、次のような N 次の級数を提案しました^{(9),(10),(11)}。

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad \dots\dots(2-2)$$

ここで、 μ_n と α_n は定数

(2-2)式は無変形状態 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ のときに、 $W=0$ となるようになっています。(2-2)式を(1-5)式に代入すると、次のように簡単な応力の表示が得られます。

$$\sigma_i = \lambda_i \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_i^{\alpha_n - 1} - p = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_i^{\alpha_n} - p \quad (i=1,2,3) \quad \dots\dots(2-3)$$

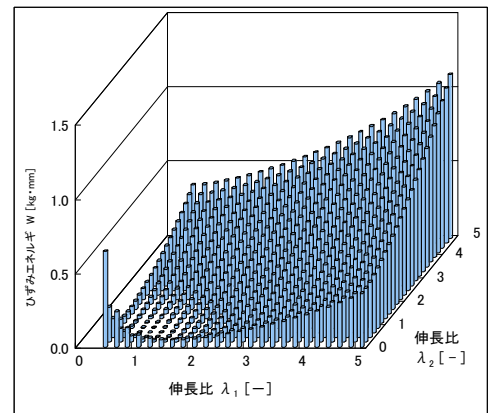


Fig.2-1 実在ゴムのひずみエネルギー関数

【3】 非線形 CAE のための材料モデリング

複雑な曲面形状をもつひずみエネルギーの分布を同定するには、応力場の異なる単純な材料試験を組合せ、係数を推定するのが現実的な方法です。ゴムの非圧縮性を利用すると、以下のように巧みな応力場の設定が可能です。

3.1 単軸引張 (Simple Tension)

これはリボンのような長尺の試験片の引張に相当します。引張方向の伸長比を λ_1 とすると、それ以外の方向は(1-4)式の非圧縮性を満足するように、なりゆきで縮みます。すなわち、

引張方向 $\lambda_1 = \lambda_1 \dots\dots (3-1)$

断面方向 $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-\frac{1}{2}}$ (自由なので、同時に $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$)

これらを(2-3)式に代入すると、

$$\sigma_i = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_i^{\alpha_n} - p \quad \sigma_2 = 0 = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_i^{-\frac{1}{2}\alpha_n} - p \dots\dots (3-2)$$

(3-2)式から p を消去し、また単に $\sigma_1 = \sigma$ 、 $\lambda_1 = \lambda$ と表記すると次のようになります。ただし σ は真応力です。

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \mu_n \left(\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-\frac{1}{2}\alpha_n} \right) \dots\dots (3-3)$$

また公称応力を s とすると、 σ に対しては断面積比を乗じて

$$s = \sigma \lambda^{-1} = \sum_{n=1}^N \mu_n \left(\lambda^{\alpha_n - 1} - \lambda^{-\frac{1}{2}\alpha_n - 1} \right) \dots\dots (3-4)$$

Fig.3-1 は MARC を使用して単軸引張を解析した例を示します。軸対称要素を使用し、長さ断面積が共に 1 となるモデルを作ると、引張によって生ずる力と変位は、そのまま公称応力 s と工学ひずみ e に相当します。使用した Ogden モデルの係数は、次の【4】で同定した値です。

次に、(3-4)式で得られた単軸の公称応力-ひずみ関係と、初期弾性率 (ヤング率) E との関係を調べてみましょう。(1-1)式に示したように伸長比と公称ひずみの関係は $\lambda = 1 + e$ です。これを(3-4)式に代入します。

$$s = \sum_{n=1}^N \mu_n \left\{ (1+e)^{\alpha_n - 1} - (1+e)^{-\frac{1}{2}\alpha_n - 1} \right\}$$

これを二項定理を用いて級数展開し、e の高次項を省略すると、E は(3-5)式のような形で導くことができます。Mooney モデルの初期弾性率が $E = 6(C_1 + C_2)$ で定められること(7)を思い出すと、(3-5) 式ははるかに柔軟な係数の選択が可能であると推測できます。【4】に示す Ogden モデルの同定では、この初期弾性率の評価が最初の足がかりになります。なお、微小ひずみ弾性の下で、非圧縮 (ポアソン比 $\nu = 0.5$) を考えると、横弾性係数 G を(3-6)式のように与えることができます。

$$s = \sum_{n=1}^N \mu_n \left[\left\{ 1 + (\alpha_n - 1)e \right\} - \left\{ 1 + \left(-\frac{1}{2}\alpha_n - 1 \right)e \right\} \right] = \frac{3}{2} \sum_{n=1}^N \alpha_n \mu_n e \equiv Ee$$

$$\therefore E = \frac{3}{2} \sum_{n=1}^N \alpha_n \mu_n \quad \dots\dots (3-5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{1}{3} E = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \alpha_n \mu_n \quad \dots\dots (3-6)$$

3.2 純せん断(Pure Shear)

通常材料では純せん断試験は容易ではなく、ねじり試験などによらざるをえません。ゴムの場合はその非圧縮性を利用して、Fig.3-2 に示すような長尺のリボンを長辺を拘束したまま短辺方向に引張ることで、純せん断のひずみ場を実現できます。これを伸長比で示すと、

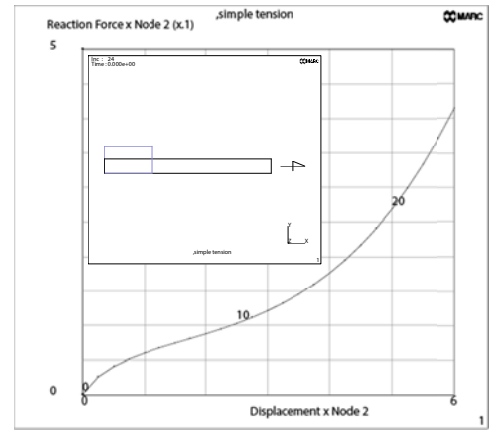


Fig.3-1 単軸引張

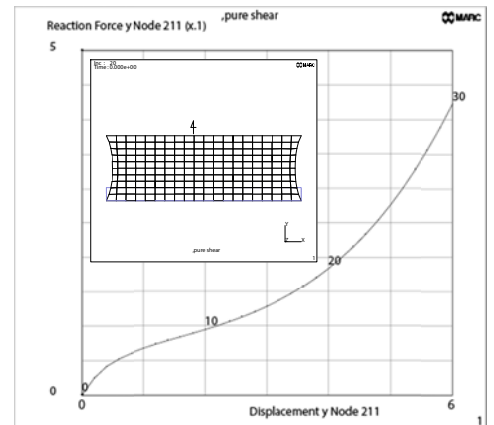


Fig.3-2 純せん断

$$\begin{aligned}
 \text{引張方向} & \lambda_1 = \lambda_1 \\
 \text{長辺方向} & \lambda_2 = 1 \quad (\text{拘束}) \\
 \text{厚み方向} & \lambda_3 = \lambda_1^{-1} \quad (\text{自由なので、同時に } \sigma_3 = 0)
 \end{aligned}
 \dots\dots(3-7)$$

すなわち、引張方向と厚み方向には正負逆のひずみが生じます。これらは主ひずみであるので、下記の主せん断ひずみが試験片内部に生ずることになります。

$$\gamma = e_1 = e_3 = \lambda_1 - \lambda_1^{-1} \dots\dots(3-8)$$

単軸引張のときと同様に、これらを(2-3)式に代入すると

$$\sigma_1 = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{\alpha_n} - p \quad \sigma_2 = \sum_{n=1}^N \mu_n - p \quad \sigma_3 = 0 = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{-\alpha_n} - p \dots\dots(3-9)$$

(3-9)式から p を消去し、また単に $\sigma_1 = \sigma$ 、 $\lambda_1 = \lambda$ と表記すると次のようになります。ただし σ は真応力です。また公称応力を s とすると、 σ に対しては断面積比を乗じます。

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-\alpha_n}) \dots\dots (3-10) \qquad s = \sigma \lambda^{-1} = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n-1} - \lambda^{-\alpha_n-1}) \dots\dots(3-11)$$

Fig.3-2 は Ogden が参照している Treloar⁽¹²⁾の実験で実際に用いられた試験片を、MARC を用いて解析した結果です。試験片の初期寸法は 75mm×5mm であり、引張によって側部に凹の湾曲を生じますが、精度にはほとんど影響しません。

3.3 一様 2 軸引張 (Equi-Biaxial Tension)

この試験では、Fig.3-3 に示すように正方形の薄板材料を縦横に一様に引張ります。Ogden モデルの前後には、この種の試験が多数行われ、以下のような知見がまとめられています^{(6), (8), (12)}。

- (1) 2 軸の各引張方向の伸長の組合せを変えた試験を行うことより、Ogden モデルの基礎をなす Valanis らの仮定 (2-1) 式が実験的に裏づけられる。
- (2) 高ひずみ領域の弾性の立ち上がりは、2 軸試験において顕著に現れる。
- (3) ひずみ場の等価性より、単純圧縮に相当するデータが得られる。(以下の(3-12)式は厚み方向に単純圧縮した場合と等価です)

一様 2 軸引張を伸長比で示すと、

$$\begin{aligned}
 \text{2 軸方向} & \lambda_1 = \lambda_2 \\
 \text{厚み方向} & \lambda_3 = \lambda_1^{-2} \quad (\text{自由なので、同時に } \sigma_3 = 0)
 \end{aligned}
 \dots\dots(3-12)$$

これらを(2-3)式に代入すると

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 = \sigma_2 & = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{\alpha_n} - p \\
 \sigma_3 = 0 & = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{-2\alpha_n} - p
 \end{aligned}
 \dots\dots(3-13)$$

(3-13)式から p を消去し、また単に $\sigma_1 = \sigma$ 、 $\lambda_1 = \lambda$ と表記すると次のようになります。ただし σ は真応力です。

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-2\alpha_n}) \dots\dots(3-14)$$

また公称応力を s とすると、 σ に対しては断面積比を乗じて

$$s = \sigma \lambda^{-1} = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n-1} - \lambda^{-2\alpha_n-1}) \dots\dots(3-15)$$

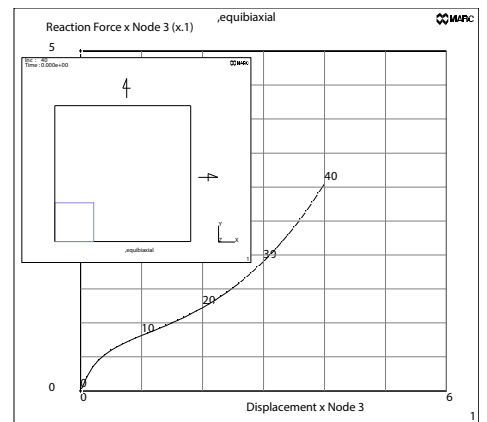


Fig.3-3 一様 2 軸引張

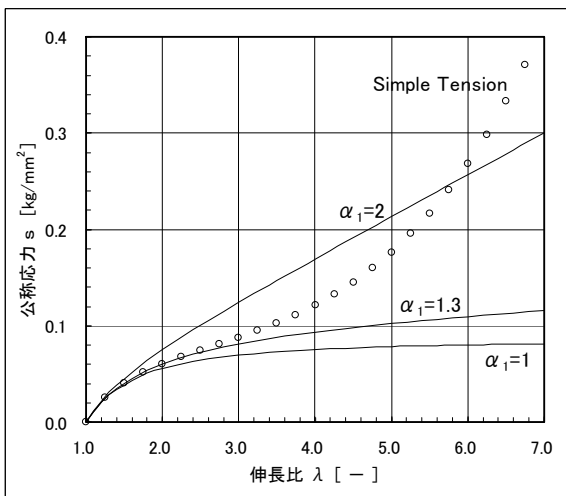
【4】 Ogden モデル定数の同定

現在では、材料試験で得られた荷重-変位関係からモデルの定数を近似計算で求めるプログラムも提供されています。しかし、ここでは Treloar⁽¹²⁾の実測値に対して Ogden⁽⁹⁾が同定した手順をたどり、係数のもつ意味を調べてみます。

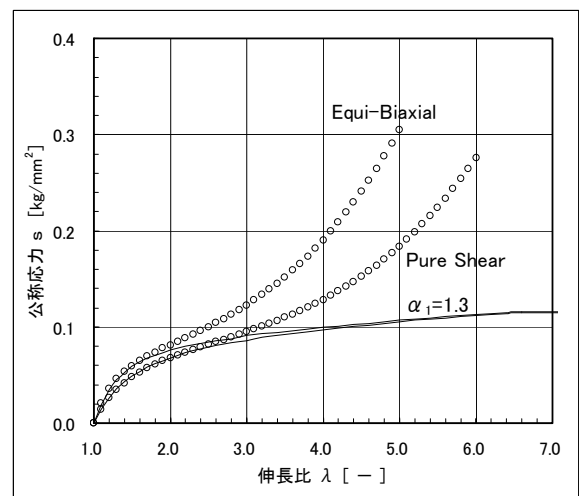
4.1 第1次項の同定 (低ひずみ領域 $\lambda < 2$)

Ogden モデルは、(2-2)式に示すように N 次の級数です。まず第1次項だけを用いて低ひずみ領域を同定します。Fig.4-1(a)に単純引張の実測値をプロットで示します。原点付近の勾配は、(3-5)式の初期弾性率 E に相当します。Ogden は E の実測値から、 α_1 と μ_1 の積が約 $8 \times 10^{-2} \text{kg/mm}^2$ であるとしています。

Fig.4-1(a)の実線は、この条件の下で単純引張の応力と伸長比の関係(3-4)式を計算した結果です。 $\alpha_1=1$ と $\alpha_1=2$ は先行の他のモデル Varga および neo-Hookean で採用されている値であり、Ogden は $\alpha_1=1.3$ を採用しました。同様に Fig.4-1(b)に他の引張方向に関する結果を示します。 $\lambda < 2$ 程度の低ひずみ領域で、概ね実測値を再現できていることがわかります。



(a) α_1 の選定 (単軸引張)



(b) 純せん断, 一様2軸引張

Fig.4-1 第1次項の同定 (低ひずみ領域 $\lambda < 2$)

4.2 第2次項の同定 (高ひずみ領域 $4 < \lambda < 7$)

次に次数を上げて高ひずみ領域での特性を合わせます。単軸引張の第2次項の寄与は(3-4)式より以下ようになります。

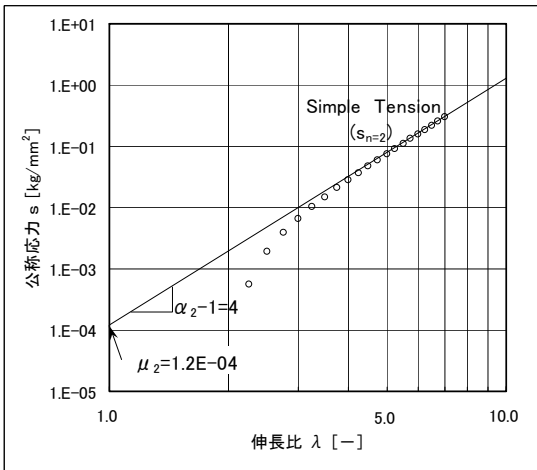
$$s_{n=2} = \mu_2 \left(\lambda^{\alpha_2-1} - \lambda^{-\frac{1}{2}\alpha_2-1} \right) \dots\dots(4-1)$$

λ が大きければ、右辺かっこ内の第2項は0に近づくので、第1項のみを残して両辺の対数をとると、

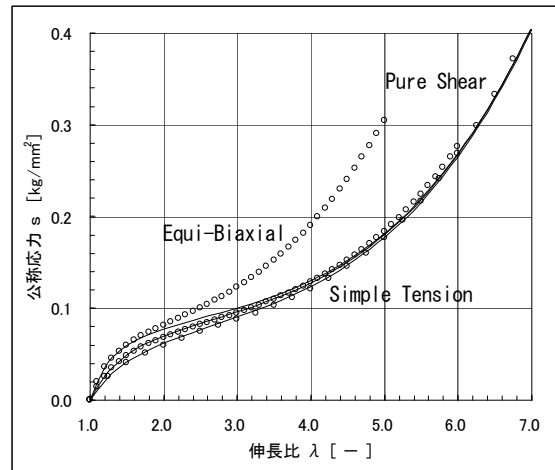
$$\log s_{n=2} = \log \mu_2 + (\alpha_2 - 1) \log \lambda \dots\dots(4-2)$$

(4-2)式を実測値と共に両対数グラフに示すと Fig.4-2(a)のようになります。 $4 < \lambda < 7$ 程度の高ひずみ領域に着目して直線を当てはめると、その傾きは α_2-1 、y切片は μ_2 に相当します。図より $\alpha_2=5$ 、 $\mu_2=1.2 \times 10^{-4} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$ を読み取れます。第1次項と第2次項をあわせて応力を計算すると Fig.4-2 (b) のようになり、単軸引張について実測値をほぼ再現することがわかります。尚、 μ_1/μ_2 を更に微調整すれば、その精度は向上するとされています。

図中、純せん断も実測値との一致は良好です。Ogden はこれを幸運と指摘していますが、後述のように Fig.2-1 のひずみエネルギー分布のグラフ上をたどる経路は、単軸引張も純せん断も大きく異なるので、このような結果になっていると考えられます。なお、一様2軸引張については、第2次項まででは立上りを表現できていません。



(a)第2次項の寄与 (単軸引張)



(b)単軸引張,純せん断,一様2軸引張

Fig.4-2 第2次項の同定 (高ひずみ領域 $4 < \lambda < 7$)

4.3 第3次項の同定 (一様2軸引張の特性改善)

一様2軸引張の特性を改善するために、第3次項を追加します。(3-4)式、(3-11)式、(3-15)式より、各方向の第3次項の寄与は、

$$\text{単軸引張} \quad s_{n=3} = \mu_3 \left(\lambda^{\alpha_3-1} - \lambda^{-\frac{1}{2}\alpha_3-1} \right) \quad \dots\dots (4-3)$$

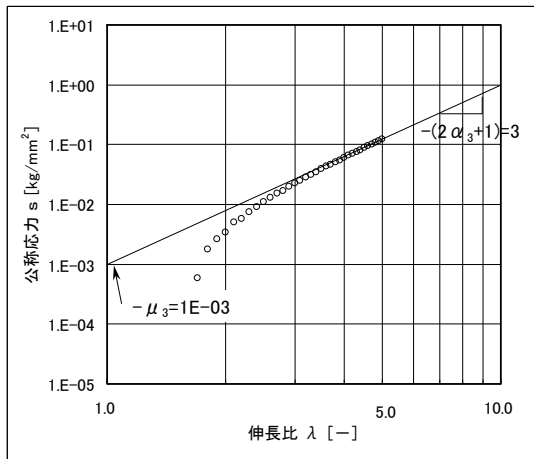
$$\text{単軸せん断} \quad s_{n=3} = \mu_3 \left(\lambda^{\alpha_3-1} - \lambda^{-\alpha_3-1} \right) \quad \dots\dots (4-4)$$

$$\text{一様2軸引張} \quad s_{n=3} = \mu_3 \left(\lambda^{\alpha_3-1} - \lambda^{-2\alpha_3-1} \right) \quad \dots\dots (4-5)$$

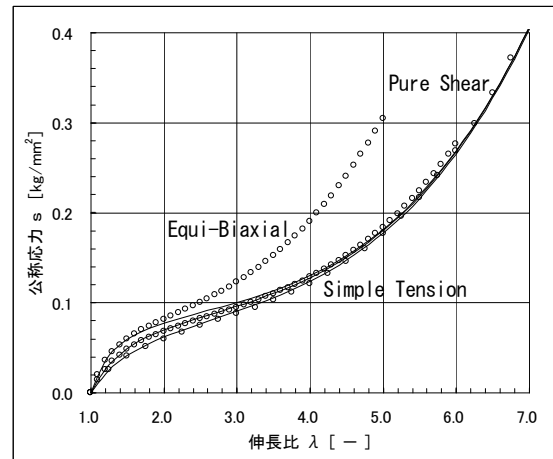
右辺かっこ内の第1項は、いずれも共通であるので、一様2軸引張だけを操作するには、(4-5)式のかっこ内の第2項を際立たせることが必要です。 λ の大きい領域では指数が負であれば0に近づくことを利用すると、 $\alpha_3 < -1/2$ とすれば、この項だけが生き残ることがわかります。また、(4-5)式全体を正にするには、 $\mu_3 < 0$ であることが同時に必要です。以上の条件に従い、(4-5)式の対数をとると、

$$\log s_{n=3} = \log(-\mu_3) - (2\alpha_3 + 1) \log \lambda \quad \dots\dots (4-6)$$

第2次項のときと同様に両対数グラフに直線をあてはめ、 $\alpha_3 = -2, \mu_3 = -0.1 \times 10^{-2} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$ が得られます。第3次項までを用いると、Fig.4-3 (b) に示すように3方向ともに実測値を良く再現することがわかります。



(a)第3次項の寄与 (一様2軸引張)



(b)単軸引張,純せん断,一様2軸引張

Fig.4-3 第3次項の同定 (一様2軸引張の特性改善)

4.4 Ogden による同定のまとめ

以上 4.1~4.3 の検討結果を総合し、若干の微調整も加えて、Ogden は下記の値を最終的に採用しています。

$\alpha_1=1.3$	$\alpha_2=5.0$	$\alpha_3=-2.0$	
$\mu_1=6.3 \times 10^{-2}$	$\mu_2=0.012 \times 10^{-2}$	$\mu_3=-0.1 \times 10^{-2}$	[kg/mm ²]

Fig.4-4 は、各方向に対する非圧縮性の条件すなわち (3-1) 式、(3-7) 式、(3-12) 式を λ_1 と λ_2 の関係に着目して表示した結果です。Fig.2-1 に示した図は、この図の紙面垂直方向にひずみエネルギー関数を表示した図です。すなわち各方向の試験では、Fig.4-4 の経路をたどってひずみエネルギー関数が定義されると理解することができます。ひずみ場の等価性から次の項目をまとめとして示すことができます。

単軸引張： λ_1 方向の単軸引張りにより、 λ_2, λ_3 は一様に縮む。これは λ_2, λ_3 の方向からの一様 2 軸圧縮と同等である。

純せん断： $\lambda_3 = \lambda_1^{-1}$ なる正負の主ひずみの入力により、内部には純せん断場が形成される。経路は単軸引張と大差ないが、ひずみエネルギーは若干高めとなる。

一様 2 軸引張： λ_1, λ_2 方向の一様引張により、 λ_3 は縮む。これは λ_3 方向の単軸圧縮と同等である。ひずみエネルギーは他のケースよりも高めとなる。

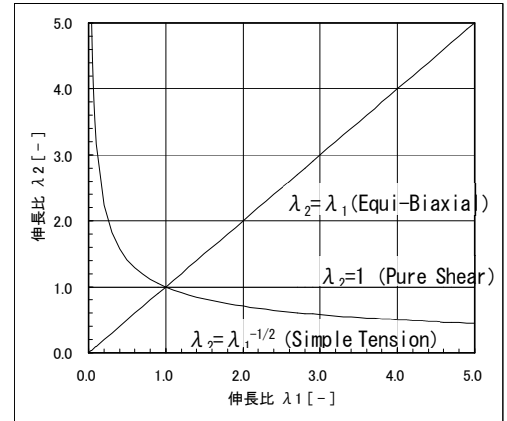


Fig.4-4 非圧縮性の条件

【5】MARC Curve プログラムによる同定

Mentat3.2 には、多軸試験の結果から Ogden のひずみエネルギー関数を同定する Curve プログラムが搭載されています。このプログラムは Downhill Simplex 法を使用して、関数近似を行います(13)。Fig.4-3 (b) と同じデータを用いて、この Curve プログラムで同定した結果を Fig.5-1 に示します。近似精度を上げるために、反復計算の回数を最大の 49 に上げた結果です。今回のデータはひずみ範囲が非常に広いので、実際の必要に応じて上限を切り捨てるなどの措置を施せば、近似精度はより向上すると考えられます。

参考文献

- (1) 例えば久保, ゴム弾性 [初版復刻版], 裳華房, 1996.
- (2) J.T.Oden, 山田他訳, 非線形連続体の有限要素法, 1・2, 培風館, 1980.
- (3) 棚橋, 連続体の力学(3), 理工図書, 1986.
- (4) 久田, 野口, 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.
- (5) K.C.Valanis and R.F. Landel, J. Appl. Phys., 38, p.2997, 1967.
- (6) 川端, 日本ゴム協会誌, 45-2, p.207, 1972.
- (7) 例えば K.J.Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, 1996.
- (8) D.F.Jones and L.R.G. Treloar, J.Phys. D, 8, p.1285. 1975.
- (9) R.W.Ogden, Proc. R. Soc. Lond. A., 326, p.565, 1972.
- (10) R.W.Ogden, Rubber Chemistry and Technology, 59, p.361,
- (11) R.W.Ogden, Non-linear Elastic Deformations, Dover Publications, 1997.
- (12) L.R.G.Treloar, Trans. Faraday Soc., 40, p.59.1944.
- (13) MARC Special Topics Seminar, Analysis of Rubber Materials, 1998.

表紙 : LOOK/Florian Werner

* MARC/MENTAT は日本エムエスシー(株)の製品です。

** 今回の内容は、1999年12月開催予定の第1回 Mech D & A セミナーテキストからの引用です。

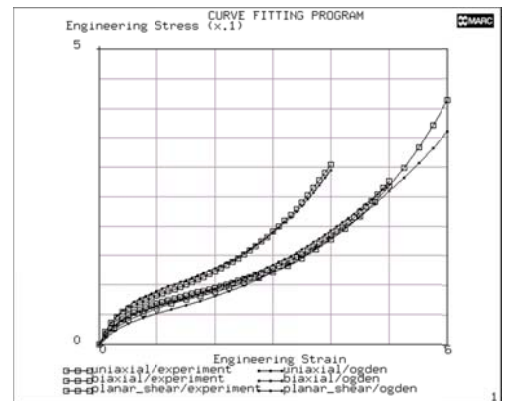


Fig.5-1 Mentat3.2によるOgdenモデルの同定

株式会社 メカニカルデザイン

〒182-0024 東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2 階

TEL 042-482-1539 FAX 042-482-5106

E-mail: comm@mech-da.co.jp http://www.mech-da.co.jp/