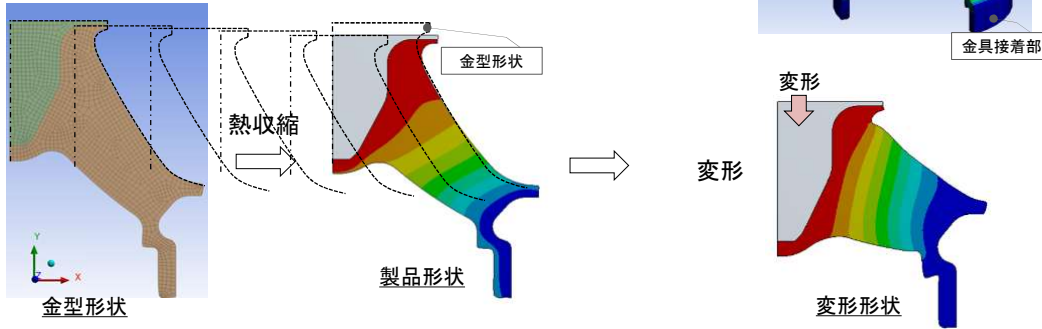


# 超弾性の基本：ゴムのFEM解析 基本フロー

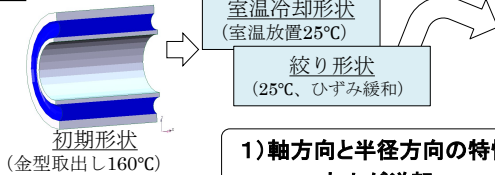
ゴム単製品は、そのまま変形解析を行えばいいですが、  
**金具接着タイプは、熱収縮解析が必須**だと考えます。



製品の加工工程を考慮することは、ゴム製品のみではなくすべての製品に当てはまります。  
**金型形状 ⇒ (熱履歴)熱収縮 ⇒ 変形解析** の手順を守ること、  
 解析による**予測精度を格段に向上**させることができます。

## ゴム製品の解析では、

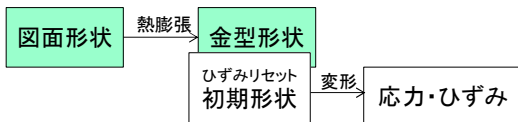
BUSH



- 1) 軸方向と半径方向の特性  
大小が逆転
- 2) 材料定義では補正できない

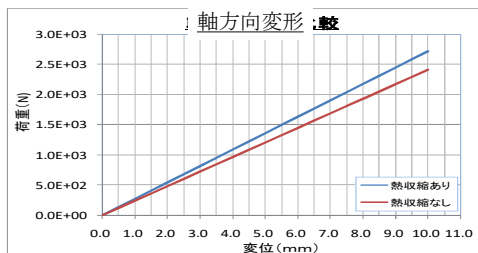
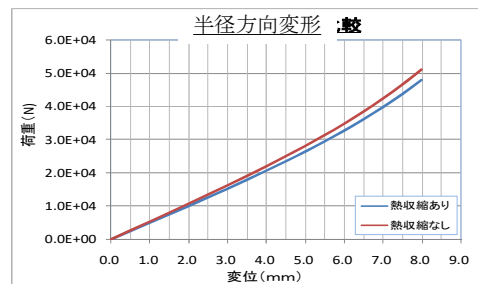
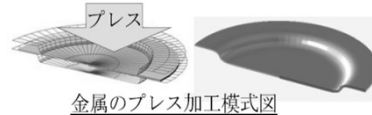
軸方向+5%補正、  
 半径方向はよりかい離が激しくなる。

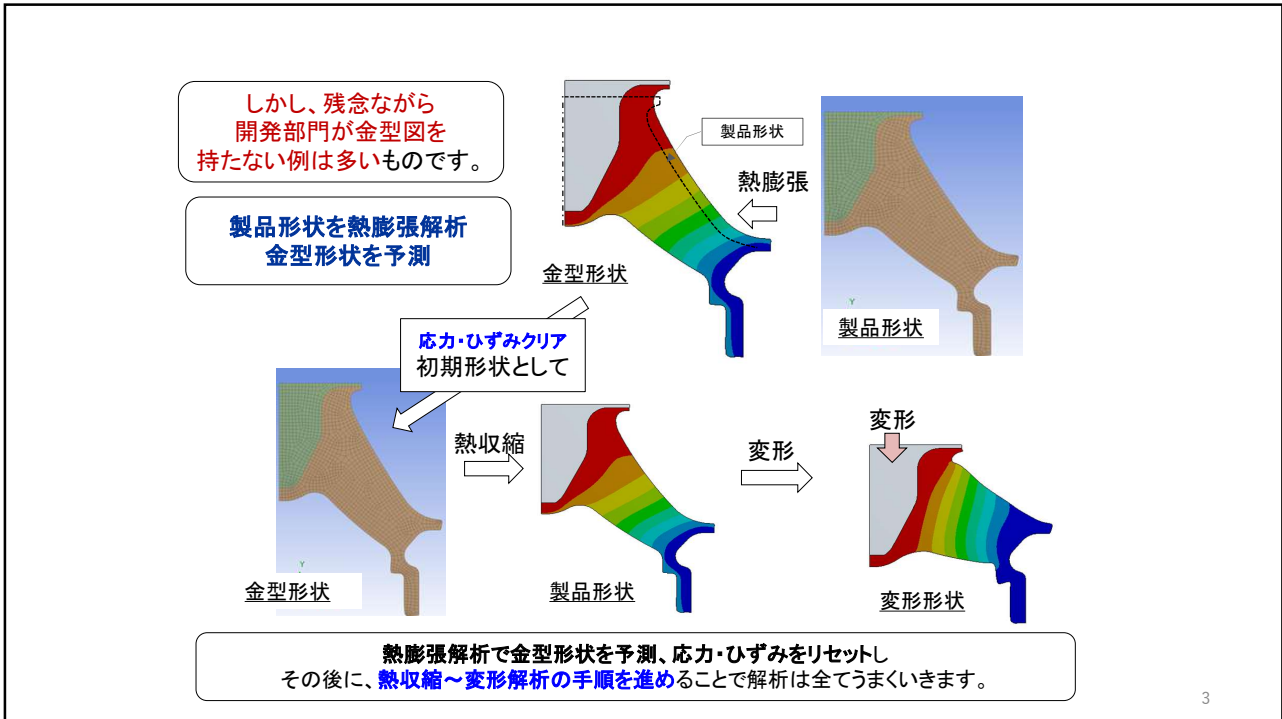
[具体的手順]



金型形状を初期形状として、熱収縮から  
 変形解析への熱-応力連成解析とすることが基本。

**精度が格段に向上**





1991年から同志社大学で坂口教授のもとで研究スタート、今も勉強中

ゴムの二軸伸張試験、承ります。-ゴムの専門家として解析適用までサポートします-

二軸伸張試験実施 ⇒ひずみエネルギー密度関数(Mooney, Ogden等回帰、係数算出。25万円～複数割あり)

$$W=C10(I1-3)+C01(I2-3)+C11(I1-3)(I2-3)+C20(I2-3)^2+C30(I2-3)^3$$

Ogden定義も可能です。

- ・エネルギー関数の真実、注意すべき点
- ・ゴムの解析への適用方法
- ・線形解析での間違えやすい点、その他サポート

二軸試験機  
コントローラ

現地(富山)の二軸試験機

サンプル取り付け部

サンプル取り付け部

簡易試験機

高さ80cm、重さ30kg

従来の試験機は、横置き型・大型 非常に高価 旧型、富山工業試験場、昭和生まれですがまだまだ現役です。

1991年 同志社大学からスタート

朝から晩まで御所の前で…祇園…

## ひずみエネルギー密度関数定義

### 単軸試験の課題② - 形状依存について -

材料力学から

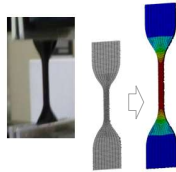
$$\text{ヤング率 } E = \text{応力 } \sigma / \text{ひずみ } \varepsilon$$

応力とひずみの関係の基本式

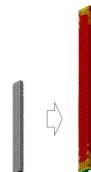


形状率依存性

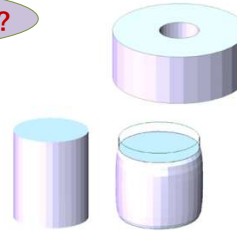
果たしてそうでしょうか？



ダンベル



短冊



ディスク

時間の都合で  
詳細はここでは省略。

試験片によって見かけ上（同じ材料でも測定から得られる）ヤング率が異なります。  
本当のヤング率が測定できません。短冊がお勧めです。

非線形性をどうとらえるかヒントをお送りします。

### 3. 測定用テストピース (TP)を選ばないと、本当の剛性は求められない。

#### 単軸試験の課題 - 形状依存について -

材料力学から

$$\text{ヤング率 } E = \text{応力 } \sigma / \text{ひずみ } \varepsilon$$

応力とひずみの関係の基本式

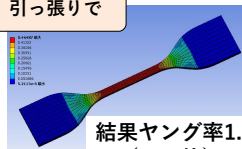
果たしてそうでしょうか？ 非線形性も考慮しないとイケませんが

形状率依存性



ヤング率 1.0 の材料で解析

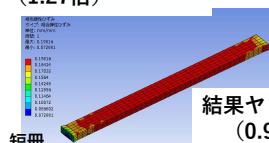
引っ張りで



ダンベル

結果ヤング率 1.27  
(1.27倍)

短冊

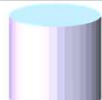


結果ヤング率 0.98  
(0.98倍)

圧縮で

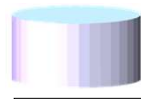
ディスク

Φ 18 × h 26 mm<sup>3</sup>



E=0.79N/mm<sup>2</sup>

Φ 29 × h 12.7 mm<sup>3</sup>



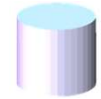
E=1.19N/mm<sup>2</sup>

Φ 40 × h 15 mm<sup>3</sup>



E=1.16N/mm<sup>2</sup>

Φ 10 × h 10 mm<sup>3</sup>



E=0.95N/mm<sup>2</sup>

試験片によって見かけ上（同じ材料でも測定から得られる）ヤング率が異なります。  
本当のヤング率が測定できません。短冊がお勧めです。

## 4. その他、解析誤差を拡大するもの

### 解析予測が実測とあ合わない3つの原因

#### 1. 正確な正しいヤング率定義 (ヤング率/6=C10 ネオフック)

#### 2. 寸法公差

寸法公差は精度の投球があり1～3級があります

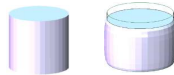
寸法	公差・1級	2級	3級[単位:mm]
3mm以下	±0.2	±0.3	±0.4
3～6mm	±0.2	±0.4	±0.5

一般的には2級を採用、リングなど直径3mm以下の製品は10%程度差があり、面積では20%、反力は20%差がみられる。



#### 3. 硬度差

剛性と硬度の関係

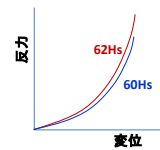


ディスク変形

例えば60Hs 必ずしも60Hsとは限りません。62Hs のときも「あります」。

1Hs 5%の差になり、一般的には±2or3Hs(±10～15%)の幅を持ちます。

ゴムは寸法公差、硬度(中心±3Hsなど)差が大きい。解析が合っていないと考えることも多い。⇒実際は合っている。

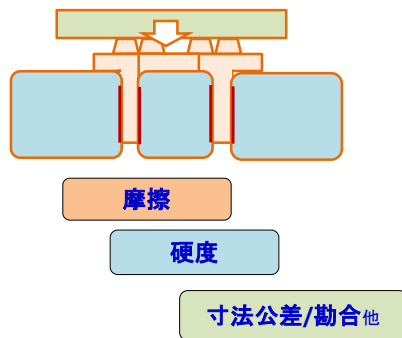


#### 4. 摩擦係数の誤解 寸法公差/勘合他

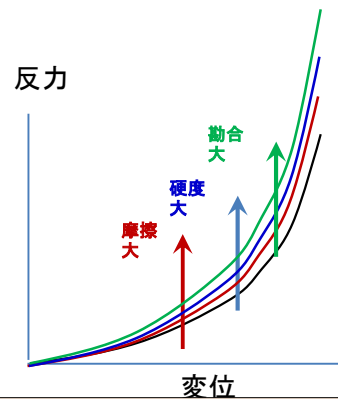
© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

## 複合的要因

圧縮時の荷重



反力

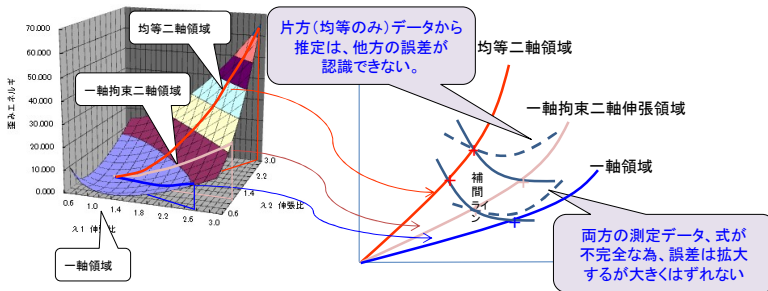


ゴムの様々なばらつきから安定品質の難しさ

## エネルギー関数導出の落とし穴

### 新規縦型の簡易二軸試験機が有効な理由

良く、単軸、一軸拘束二軸伸張（純せん断）、均等二軸すべてのデータを入力すると精度が上がるといいますが、間違いではありませんがこれらの式ですべての面をすべて精度よく表現できるでしょうか。難しいです、1つの領域でも表現できないのに・・・。



1) Mooney高次モデル

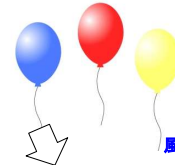
$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

2) Ogdenデル

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

一つの領域から求めたエネルギーは、他方の誤差核拡大の可能性あり。  
**双方の領域から得られたデータは、式が不完全なため双方の誤差拡大。**  
 → 製品のターゲットに合せたエネルギーデータ収集

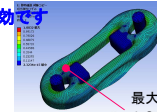
二軸均等伸張データで予測できるのは、**風船のような製品**



風船は均等二軸

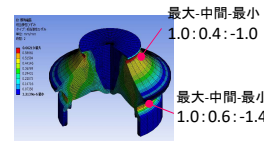
2方向に均等に伸張する製品は  
 ゴム製品でも少ない  
 ⇒ 均等二軸伸張の領域データは不要

単軸試験が有効です



最大-中間-最小  
 1.0:-0.4:-0.4

二軸試験で一軸拘束二軸伸張試験が有効な理由  
 最大-中間-最小主ひずみ成分をみれば



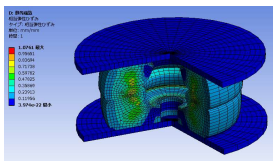
最大-中間-最小  
 1.0:0.4:-1.0

最大-中間-最小  
 1.0:0.6:-1.4

最大-中間-最小  
 1.0:0.5:-0.9

## エネルギー関数導出の落とし穴

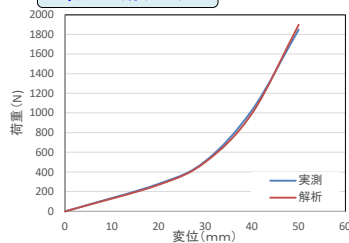
### クッションラバーの変形解析



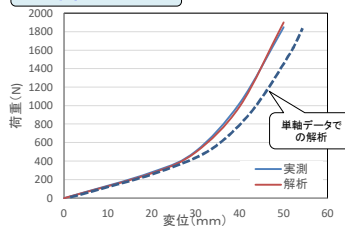
各部のひずみを確認すると、  
 単軸よりも二軸、それも純せん断のひずみ分布に近い

⇒ 二軸試験、純せん断データが有効  
 (均等二軸伸張ではありません)

#### 純せん断データ

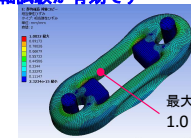


#### 単軸データ



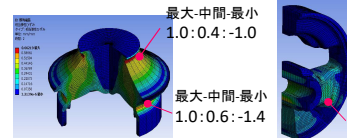
風船は均等二軸

単軸試験が有効です



最大-中間-最小  
 1.0:-0.4:-0.4

二軸試験で一軸拘束二軸伸張試験が有効な理由  
 最大-中間-最小主ひずみ成分をみれば



最大-中間-最小  
 1.0:0.4:-1.0

最大-中間-最小  
 1.0:0.6:-1.4

最大-中間-最小  
 1.0:0.5:-0.9

真実シリーズ

やってはいけない線形解析の定義・落とし穴から大変形注意点への展開

線形解析の定義では接触が扱えない為、変位拘束で解析しますが、**変位拘束は非常に注意が必要**です。

線形解析の注意点

モデリング・メッシング  
の注意点

材料定義の真実  
★2022.6.13追加

解析条件、摩擦等の注意点

解析

その他

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

連絡先 [haji@terakoya2018.com](mailto:haji@terakoya2018.com)  
080-2230-8785

## 寺子屋 サポート一覽

### CAE適用

- ・CAD自動化
- ・解析自動化/条件設定、結果処理
- ・解析ソフト導入だけですか？
  - 1) 線形ソフト(SolidWorksなど)でゴムの解析
  - 2) 公共機関の利用、解析指導から実用化まで

予測精度向上

- ・材料再定義
- ・方法、条件再定義

### ゴムの大変形

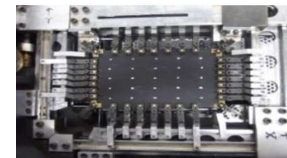
- ・ゴム材料定義:ひずみエネルギー関数
- ・大変形テクニック～運用実用化

### 立上げサポート技術者育成

- ・セミナー、育成サポート(座学含む)  
ゴムタイムス社様、日本テクノフォート様
- ・解析初心者ご指導:基本から実用化
- ・ゴムの設計・解析・製造の技術者育成
- ・線形から金属樹脂の塑性域、材料定義方法構築



単軸伸張試験概要



2軸伸張試験概要

### ベース

### 線形材料からゴムのひずみエネルギー関数構築

Mooney高次式

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3$$

Ogden式

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad n=5 \sim 7 \text{程度}$$

