

©☆シゴムの解析の基本-注意すべきこと250320.pptx

ゴムの解析の基本

1. ゴムの特性の基本：1回目、2回目、3回目以降の特性
2. 測定時にへたりを考慮する必要がある。
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。
4. ゴムの解析は熱履歴を考慮する必要がある[必須]
5. 製品は、ほとんどが圧縮なのに 材料試験は、なぜ引張試験なのか？
6. よく、単軸、一軸拘束二軸伸張、均等二軸のすべての領域のデータが必要といわれるが。
7. その他、解析誤差を拡大するもの
 - ・寸法公差
 - ・硬度誤差
 - ・摩擦

2025.3.24 寺子屋 萩本

二軸試験機

単軸試験



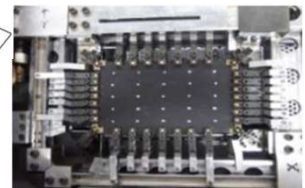
一軸拘束二軸伸張試験



簡易型



汎用型



サンプル取り付け部



動き

シートが用意できる場合、単軸若しくは二軸試験を次ページのへたり等を注意しながら実施。

材料試定義について

■ 材料定義の方法-ひずみエネルギー密度関数をいかに定義するか

二軸試験からひずみエネルギー密度関数を定義できれば最良の方法であるが、残念ながら測定用の短冊（1辺長さ30mm）、二軸シート（□75mm）、シートすら用意できないお客様も多い。よって、製品から定義する方法を記録する。

二軸伸張試験からの定義は、最後に記載する。

ひずみエネルギー密度関数

定義については、様々な式が提唱されているが、高次になればカーブフィットを優位にするが、高次の式で5項程度で定義することで優位差はない。同じ実験データからは同程度の実測の予測精度になる。

- 1) Neo-Hookeanモデル $W = C_{10}(I_1 - 3)$
- 2) Mooney-Rivlinモデル $W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$
- 3) Mooney高次 (JGS)式

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

- 4) O g d e n $W = \sum \frac{\mu_i}{\alpha_i} \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3$
- 5) Arruda-Boyce

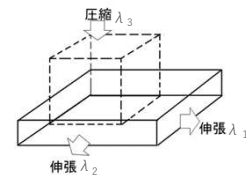
$$W = nk\theta \left[\frac{1}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{20N} \left(\frac{I_1^2 - 9}{1} \right) + \frac{11}{1050N^2} \left(\frac{I_1^3 - 27}{1} \right) + \frac{19}{7000N^3} \left(\frac{I_1^4 - 81}{1} \right) + \frac{519}{673750N^4} \left(\frac{I_1^5 - 243}{1} \right) \right]$$

テンソル II は、伸長比 λ (=ひずみ $\varepsilon + 1$)で定義される。

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad \text{【対角線効果】}$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad \text{【面積効果】}$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad \text{【体積効果: 非圧縮性】}$$



3

1. ゴム特性の基本知識

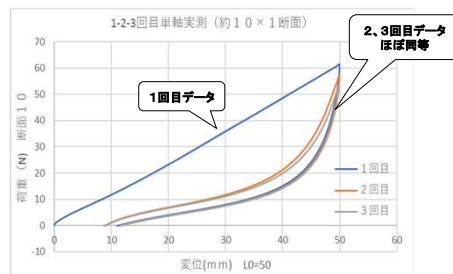
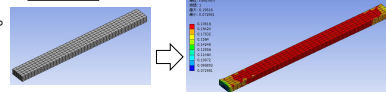
ゴムは、そのままのヤング率で定義しませんが

ヤング率 $E = 6 \times C_{10}$ の関係から

最も簡単なネオフック関数 $W = C_{10}(I_1 - 3)$ で表される。

単軸試験から正確なヤング率を求めること。

短冊試験



1回目と2回目は大きく異なり、
2回目と3回目は少し異なります。

3回目以降はほぼ重なります。

ゴムの3回の伸張データは、上記のように安定性から“3回目のデータとJISでは規定”しています。

しかし、それだけでは解析に使うことが難しいです。/JISは解析用に定義されていません。

シールのように1階で組付けてしまうものは1回目、防振ゴムのように繰り返し使用するものは3回目特性を使用。

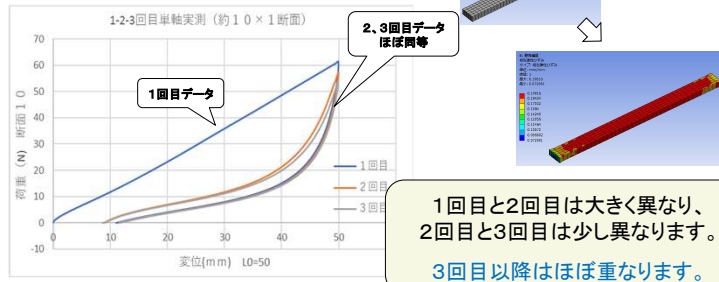
2. 測定時にへたりを考慮する必要がある。

ゴムは、そのままのヤング率で定義しません

ヤング率 $E = 6 \times C10$ の関係から

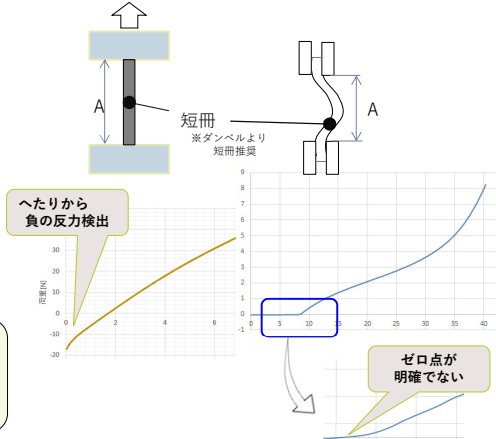
最も簡単なネオフック関数 $W = C10(I1 - 3)$ で表される。短冊試験

単軸試験から正確なヤング率を求めること。



ゴムの3回の伸張データは、上記のように安定性から“3回目のデータとJISでは規定”しています。しかし、それだけでは解析に使うことが難しいです。/JISは解析用に定義されていません。

単軸試験手順：重要ポイント



5

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 -

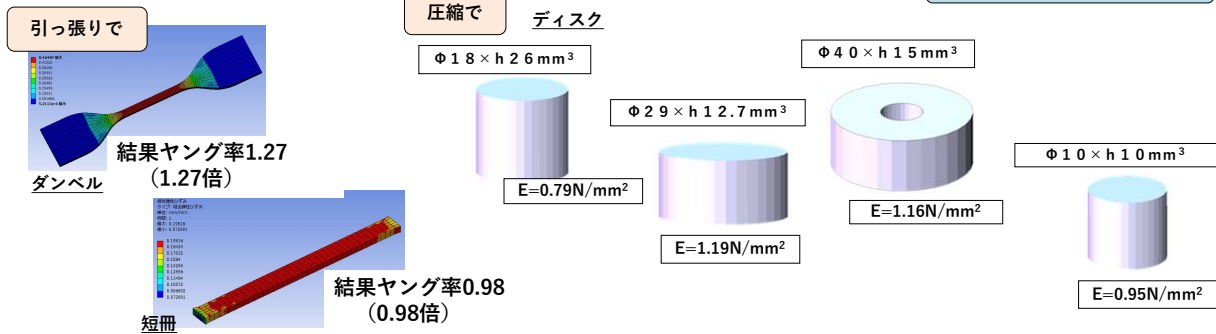
材料力学から

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

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いけません

ヤング率1.0の材料で解析



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。

6

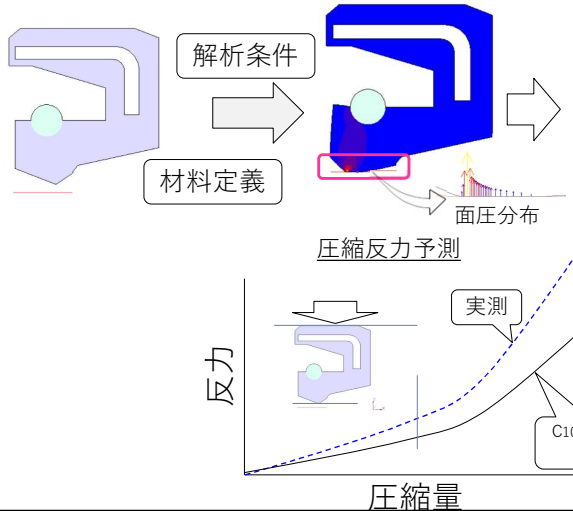
ただし製品しか入手できないお客様も

製品から材料定義も可能、お試しデータもご用意

シート、短冊が入手できない

製品測定から

シールの解析



製品試験

解析

材料データ
ベース

推定 構築

解析用
パラメータ

サンプルデータの提供

材料名	硬度(Hs)
天然ゴム	35-80
スチレンゴム	35-80
ニトリルゴム	35-80
クロロプレンゴム	48-75
エチレン・プロピレンゴム	50-80
フッ素ゴム	55-80
シリコンゴム	35-60

- 1) 短冊測定からデータ特定
- 2) 手掛かりない場合、お話し
無料サンプルの提供も。

せん断 弾性率	C10	C01	C11
9.500	2.8654E-01	3.3348E-02	-4.5506E-03

寺子屋/CAE解援隊

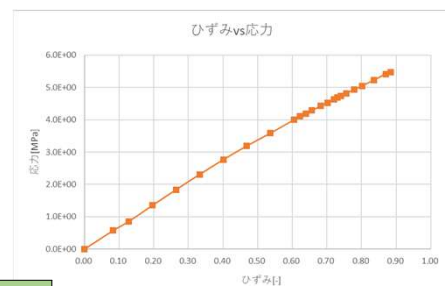
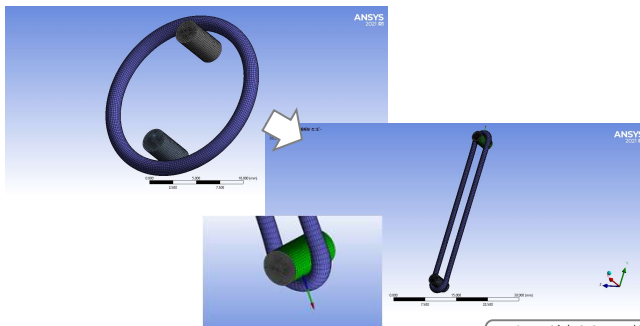
連絡先 hagi@terakoya2018.com

7

7

1) 製品からの算出

・Oリングから定義



ヤング率
[Mpa]

6.18E+00

ヤング率6.0での解析結果は
ひずみ1.0で等価になる。

※通常0.1で算出するが、0.1時6.7
1割程度高めに出る。

変位[mm]	反力Y[N]	反力	ゼロ点 (自由端部点)	反力Y	ひずみ[-]	応力[MPa]	2 半断面 ひずみ0.1で等価 ヤング率6 くらい	ヤング率 [Mpa]
0.02	1.75	4.03E-02						
0.14	3.5	0.10216						
0.21	5.25	0.21309						
0.315	7.875	0.70878		7.14E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.021239	6.18E+00
0.35175	8.79375	1.1419		8.79375	1.1419	8.19E-02	5.68E-01	
0.3885	9.7125	1.7168		9.7125	1.7168	1.27E-01	8.54E-01	
0.44362	11.0905	2.7095		11.0905	2.7095	1.96E-01	1.35E+00	
0.49875	12.46875	3.6917		12.46875	3.6917	2.64E-01	1.84E+00	
0.55387	13.84675	4.6417		13.84675	4.6417	3.32E-01	2.31E+00	

Oリングからの定義はひな型を利用すること測定結果に6.7分の6.0を乗ずることでDBから定義可能。

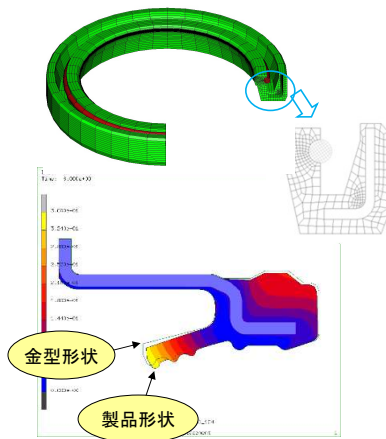
8

8

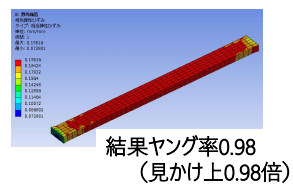
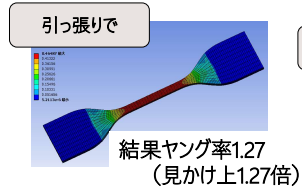
1) 製品からの算出

ヤング率 1.0 の材料で解析

・ シール形状



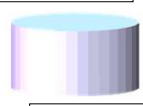
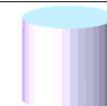
・ その他の形状：必ずしもヤング率 $E = \text{応力 } \sigma / \text{ひずみ } \varepsilon$ が成り立たない場合もあり、短冊測定が良好。



圧縮で

$\Phi 18 \times h 26 \text{ mm}^3$

$\Phi 29 \times h 12.7 \text{ mm}^3$

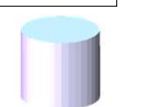
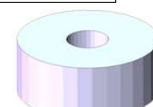


$E = 0.79 \text{ N/mm}^2$

$E = 1.19 \text{ N/mm}^2$

$\Phi 40 \times h 15 \text{ mm}^3$

$\Phi 10 \times h 10 \text{ mm}^3$



$E = 1.16 \text{ N/mm}^2$

$E = 0.95 \text{ N/mm}^2$

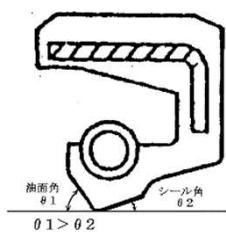
次ページに示す熱履歴を考慮した解析を
リング同様に解析を行い材料定義が可能になる。

見かけ上のヤング率に注意しながら解析/実測から定義を行う。

9

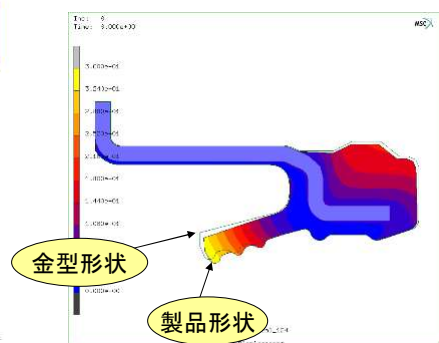
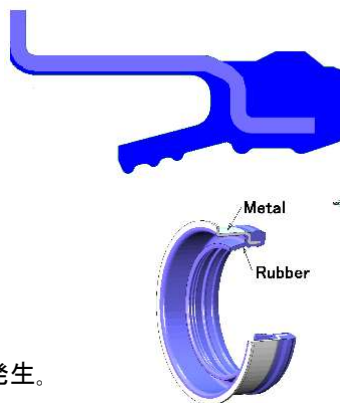
9

2) シール設計方法基礎から解析を利用した形状定義



シールとは圧力分布である。

- ・ 圧力の絶対値ではない。
- ・ 面圧分布である。
- 分布が逆になると漏れが発生。

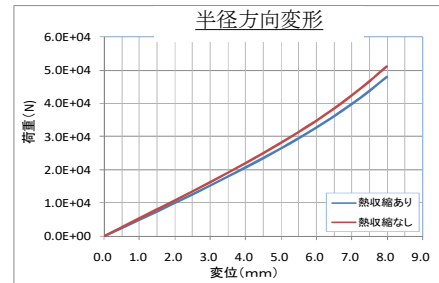
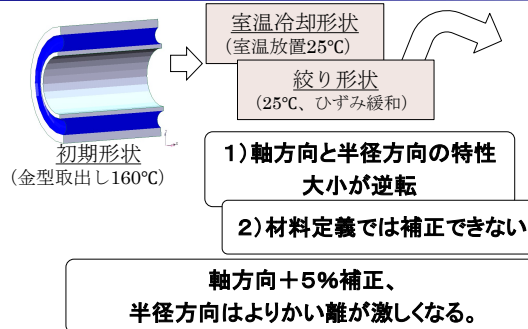


熱収縮解析での型設計から製品形状決定まで、ノウハウもしくはFEM解析で行う。
ノウハウが主流のようですが、解析で補う。

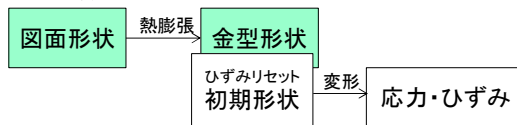
10

ゴム製品の解析では、

BUSH

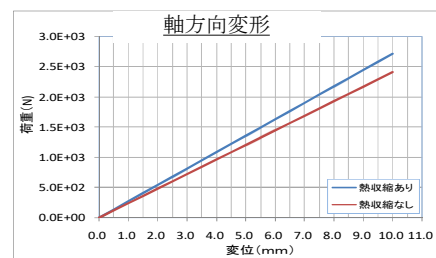


[具体的手順]



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

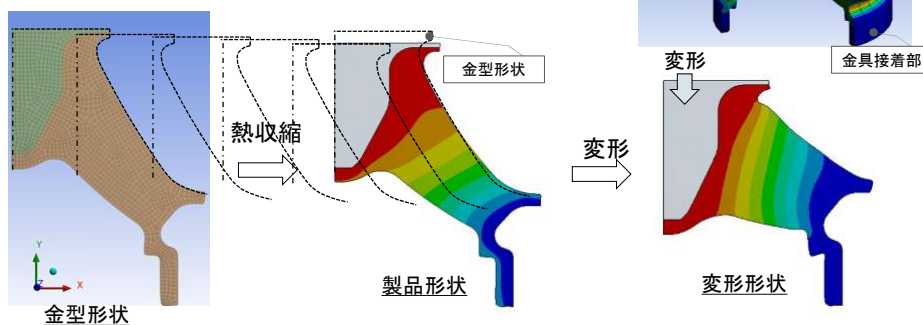


11 11

4. ゴムの解析は熱履歴を考慮する必要がある[必須]

ゴムの F E M 解析 基本フロー

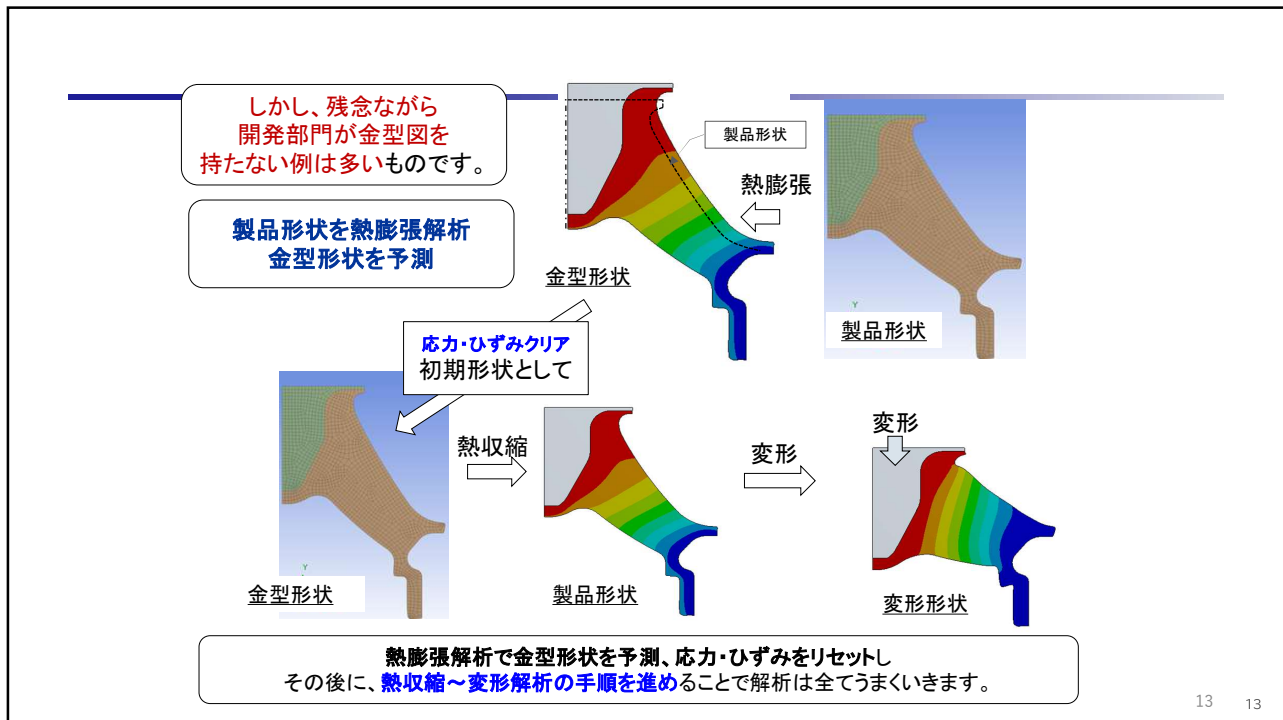
ゴム単製品は、そのまま変形解析を行えばいいですが、
金具接着タイプは、熱収縮解析が必須だと考えます。



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 の手順を守って、
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。

12 12



二軸の必要性と・・・

5. 製品は、ほとんどが圧縮なのに 材料試験は、なぜ引張試験なのか？

ゴムの非圧縮性
 $I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$

二方向を引っ張ると、一方が圧縮
エネルギー関数を明確に定義できます
(全ての方向の伸張比 λ が定義できる)

圧縮

伸張

伸張なら均等に
変形可能です。

圧縮試験で
均等変形は難しい
圧縮荷重は非常に
大きくなる。

ラバースプリングの変形解析

変形解析の結果、変形後の形状と変形後の応力分布が示されています。

変形後の形状と変形後の応力分布のグラフが示されています。

どの表現関数を使っても同等です。よく質問を受けますが、
元のデータが同じなら、解析に予測精度は同じです。式の優劣はありません。

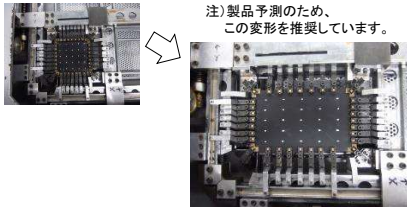
14 14

6. よく、単軸、一軸拘束二軸伸張、均等二軸のすべての領域のデータが必要、精度が上がるといわれるが。

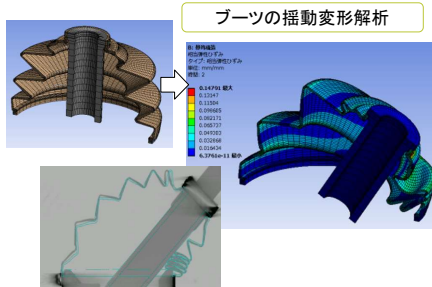
嘘ではありませんが、かなり課題が大きいです。

定義及び解析の注意点を守れば簡単に精度がアップする

一軸拘束二軸伸張試験



ゴム製品の解析例



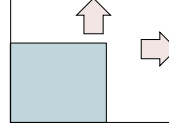
ブーツの揺動変形解析

二軸試験概要

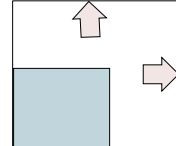
一軸拘束二軸試験



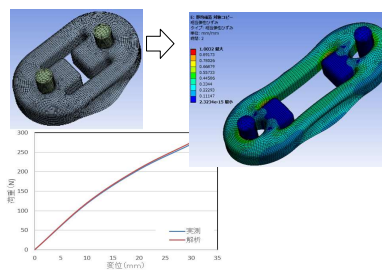
二軸試験



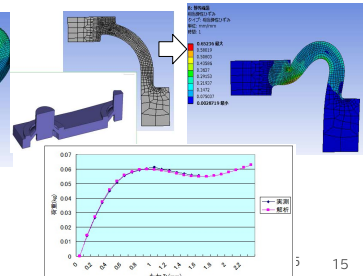
均等二軸試験



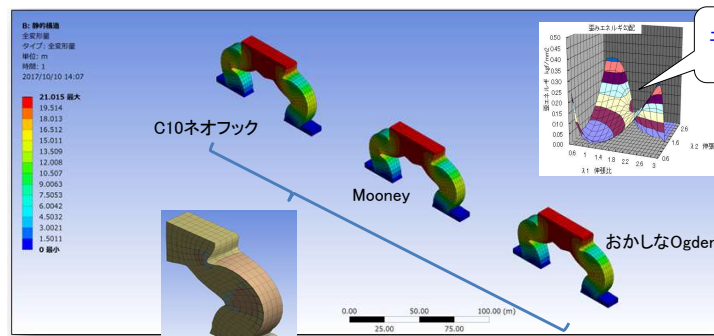
マフラーマウントの変形解析



ラバーコンタクト変形解析



非圧縮性ゆえの変形図が同じになる（防舷材）



形状比較
形状は薄皮一枚の違い

ひどい材料係数を使っても
変位条件での変形は、ほぼ同じ
⇒これが勘違いを生む。

特性が全く異なっても変形形状はほぼ一致。

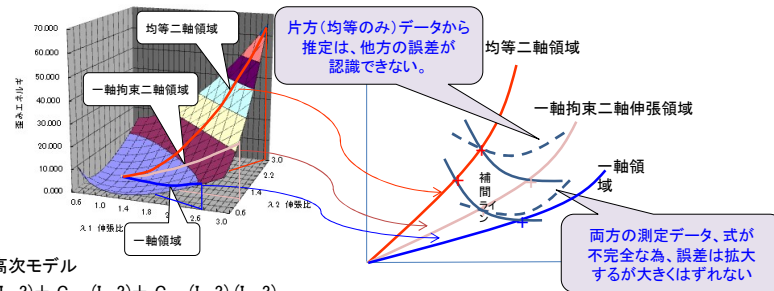
⇒ 形状が一致したから予測が合っているという過ち。
このような形状は、材料が正しい加減でも形状はよく合う。

これらのことを理解するのみで精度は格段に向上する。

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

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

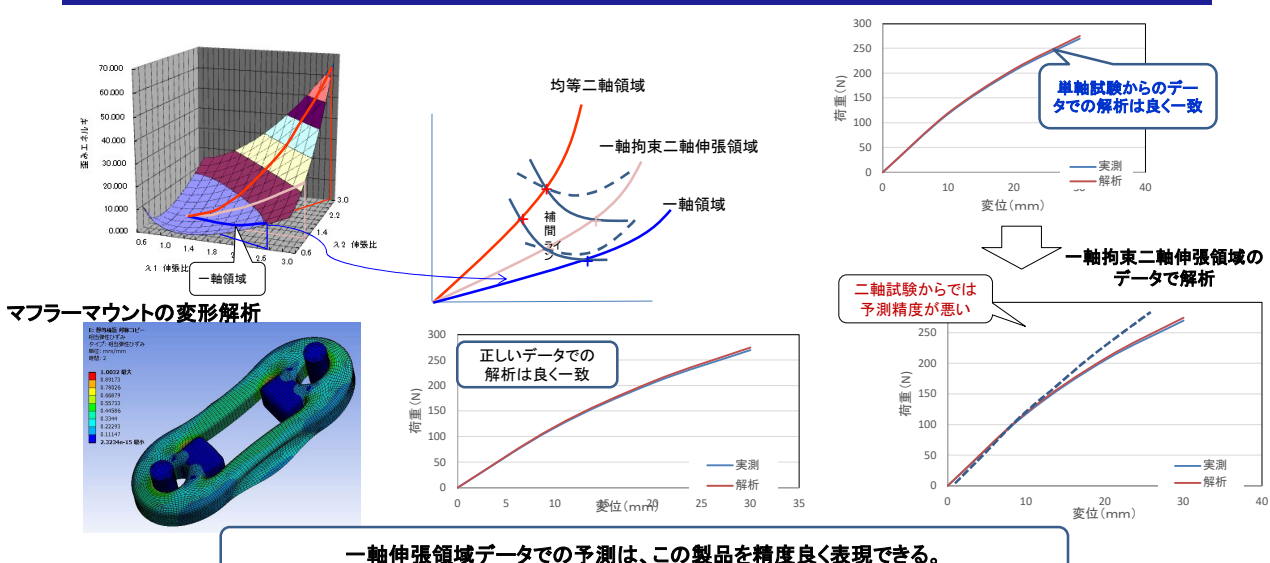
2) Ogdenデル

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

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

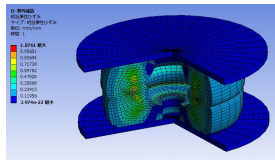
エネルギー関数導出の落とし穴

一軸拘束二軸伸張（純せん断）など適正なデータから回帰すると



エネルギー関数導出の落とし穴

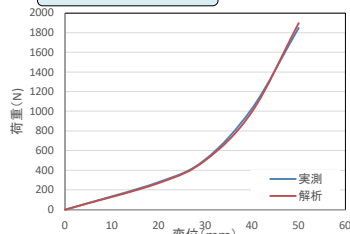
クッションラバーの変形解析



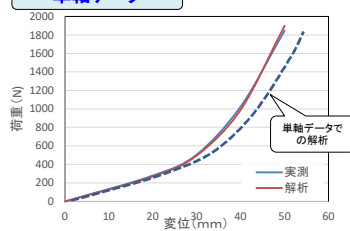
各部のひずみを確認すると、
単軸よりも二軸、それも純せん断のひずみ
分布に近い

⇒ 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

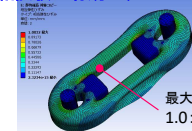


単軸データ



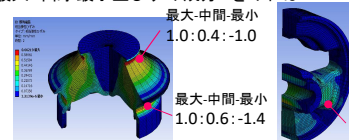
風船は均等二軸

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

まとめ

解析予測が実測とあ合わない3つの原因

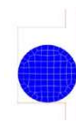
1. 正確な正しいヤング率定義 (ヤング率/6=C10 ネオフック)

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。

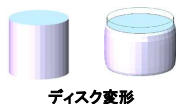
寸法	公差・1級	2級	3級[単位:mm]
3mm以下	±0.2	±0.3	±0.4
3~6mm	±0.2	±0.4	±0.5

一般的には2級を採用、O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

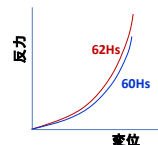


ディスク変形

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。

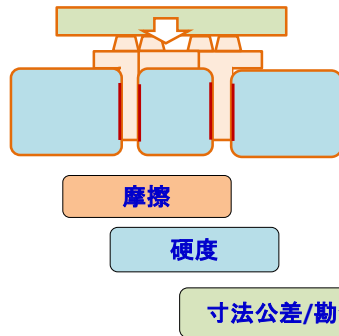


4. 摩擦係数の誤解 寸法公差/勘合他

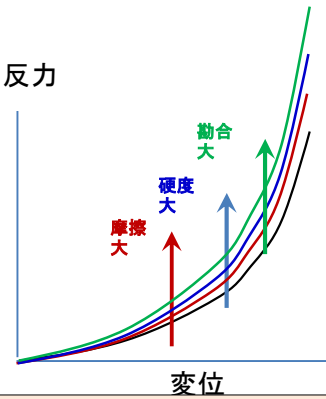
まとめ

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

21

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

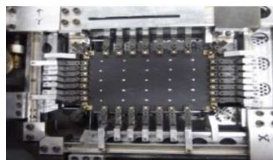
$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 + C_{30}(I_2 - 3)^3$$

Ogden定義も可能です。

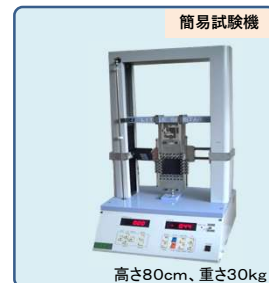
- ・エネルギー関数の真実、注意すべき点
- ・ゴムの解析への適用方法
- ・線形解析での間違いやすい点、その他サポート



現地（富山）の二軸試験機



サンプル取り付け部



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・・・

22

材料定義をご自身で修得

お問い合わせリンク

<https://terakoya2018.com/question>

公共試験場を利用して ゴムの解析用ひずみエネルギーを構築しませんか。

－ 候補日をいただければ調整します。1社4名様くらいまで －

1. 富山県でご希望の日程で、6時間程度で修得できます。
操作は簡単で、ひな型を使って回帰も簡単です。
※ひな型販売もしています。
2. 公共試験場ですので、安価に、(修得すれば)いつでも
ご利用いただけます。
アフターフォローも万全です、問い合わせに回答します。



現在、現役の試験機ですが何分、昭和生まれですので..
使えるうちに覚えましょう。

寺子屋/CAE解援隊
URL <https://terakoya2018.com>
連絡先 hac@terakoya2018.com
080-2230-8785

富山県産業技術研究開発センター (pref.toyama.jp)

富山試験場へ(試験機はもらって..)

試験場の環境、雪、ホテル...

低画質

