

解析でできること/サポート可能な内容

ゴムの関連解析について、導入後の実用化でできること

- I 線形解析でも注意が必要
- II ゴム、樹脂の基本解析
- III ゴムの整形に関する解析
- IV 動的、粘弾性
- V ゴムの耐久性検討
- VI 解析技術**
周期対称、AxiTo 3D（2次元から3次元解析へ）、ほか
- VII 予測精度と勘違い
- VIII スポンジゴム/発泡材料への展開
- IX 効率化、自動化

Cyclic_symmetry機能

〔機能概要〕

モデル及び条件が周期対称であるもの。
全モデルでなくN分の1モデルで解析可能。

例) 切り欠きを持つモデルの振じり変形解析

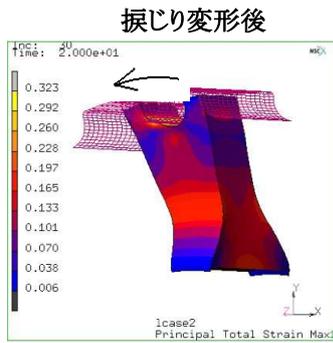
センタマックス

切り欠きが無ければ
2D軸対称モデル
解析可能



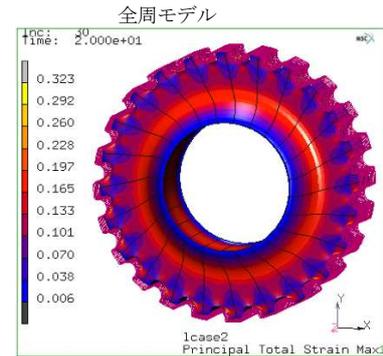
Cyclic_symmetry機能

効果1 解析時間の大幅短縮



	時間	メモリー
1/24	32分	53MB
全周	10時間	1GB

客先提出時
→ポスト処理で
コピー



効果2 簡単に使用可能

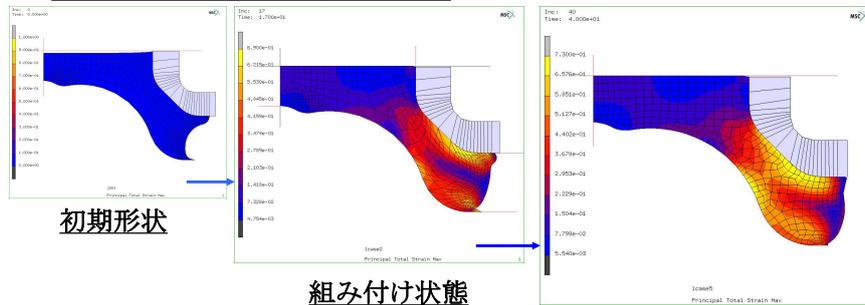
下記の5行の入力のみ

Cyclic_symmetry
0, 0, 1,
0, 0, 0,
15,
0,

Axiと3Dの応用1

リゾーニングとの組み合わせ

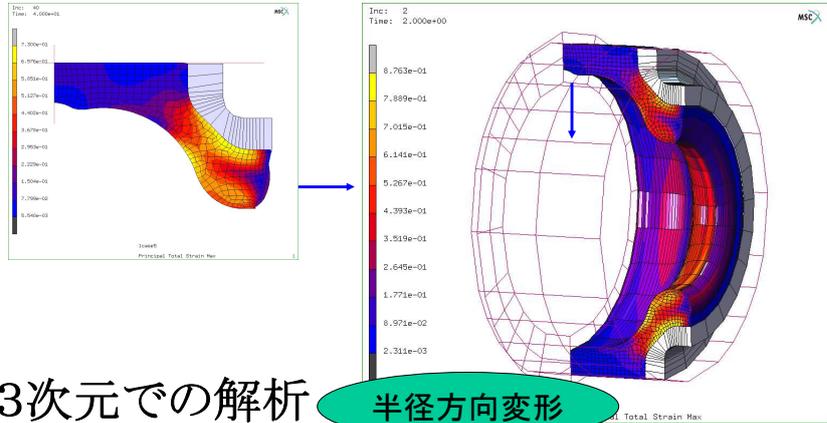
ブッシュの半径方向変形解析



2次元での解析

Axiと3Dの応用1

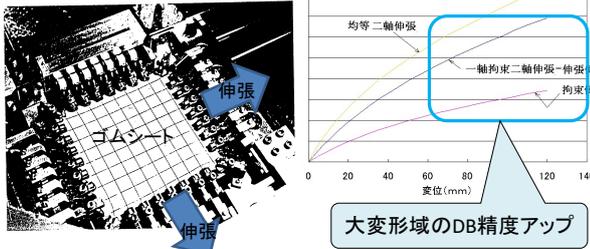
リゾーニングとの組み合わせ



3次元での解析

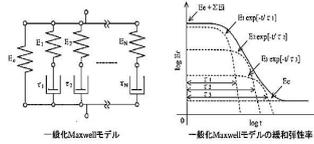
半径方向変形

大変形時の2軸伸張によるひずみエネルギー密度関数



大変形域のDB精度アップ

+粘弾性効果の考慮



組み付け時の応力緩和効果

新解析技術の検討

組み付け時に大変形、要素のゆがみ発生をリメッシングで、それ以降を解析



特性予測データベースの精度アップと解析技術の構築が必要。

解析でできること/サポート可能な内容

ゴムの関連解析について、導入後の実用化でできること

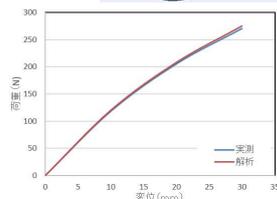
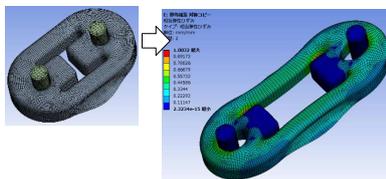
- I 線形解析でも注意が必要
- II ゴム、樹脂の基本解析
- III ゴムの整形に関する解析
- IV 動的、粘弾性
- V ゴムの耐久性検討
- VI 解析技術
- VII 予測精度と勘違い**
ひずみエネルギー密度関数の適用範囲、ゴムの解析は簡単
- VIII スポンジゴム/発泡材料への展開
- IX 効率化、自動化

1. ゴム、樹脂の性能予測のシミュレーションのご紹介

各製品の性能予測：会社員としての入社時に防振ゴム設計として配属

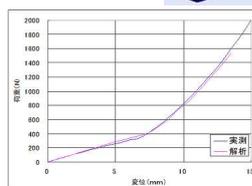
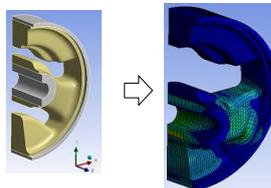
防振ゴム

マフラーマウントの変形解析



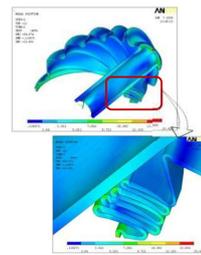
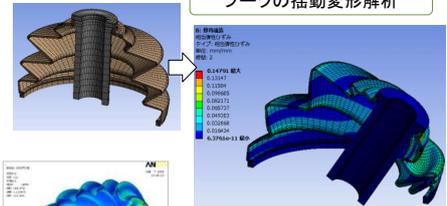
実測値を解析で精度よく予測できている。

ハの字型マウント変形解析



等速ジョイントブーツ

ブーツの揺動変形解析



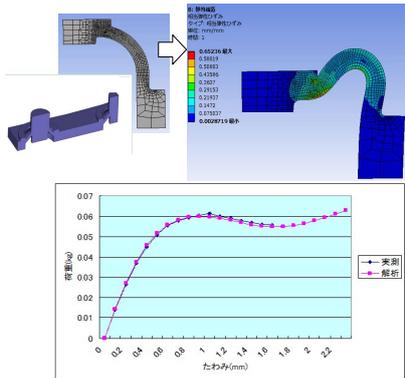
変形を精度よく表現

解析例

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

機能性部品

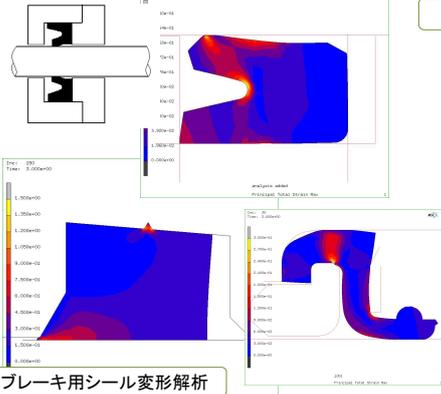
ラバーコンタクト変形解析



実測値を解析で精度よく予測

シール部品

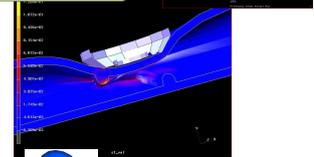
カップシール変形解析



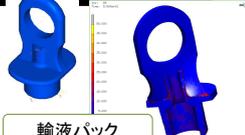
ブレーキ用シール変形解析

医療用部品

輸液チューブ



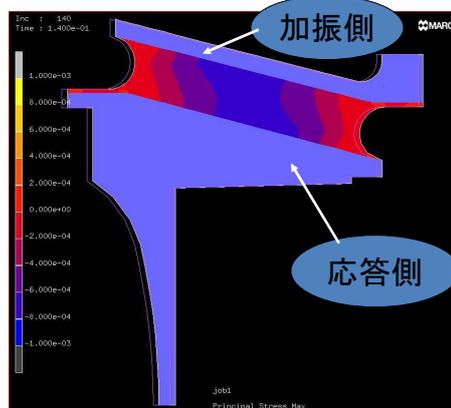
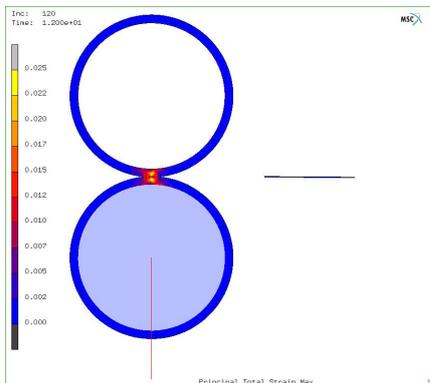
輸液針



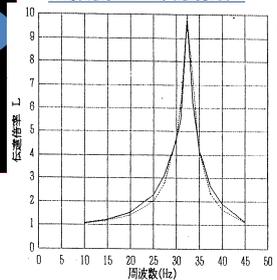
輸液パック

FEMによる変形解析予測

コピー用紙送りローラーの解析 ラダー型防振ゴムの応答解析

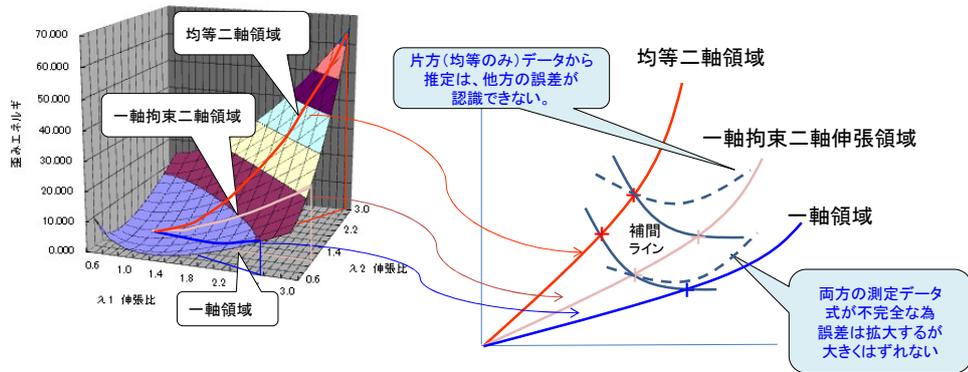


加振-応答振動特性
加振側vs.応答側変位



いずれも容易に解析でき、予測精度も良好である。

エネルギー関数導出の落とし穴

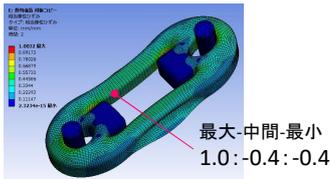


二軸均等伸張データで予測できるのは、風船のような製品
割合は少ない

2方向に均等に伸張する製品は
ゴム製品でも少ない
⇒あまり均等二軸伸張の領域データは使用しない

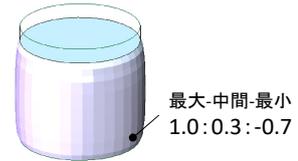
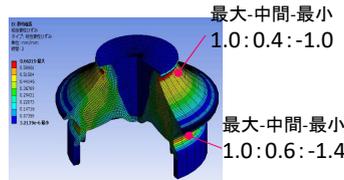


単軸試験が有効

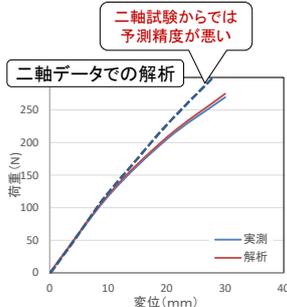
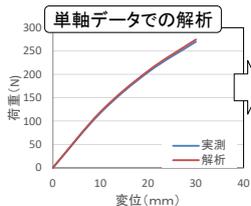
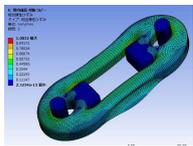


一軸拘束二軸伸張試験が有効な理由

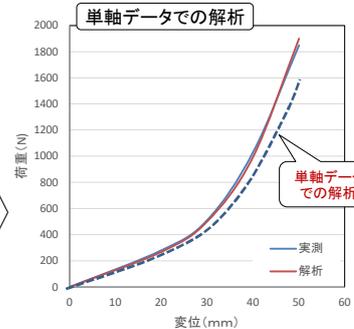
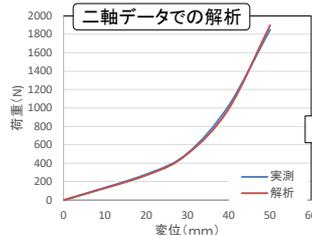
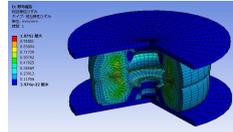
最大-中間-最小主ひずみ成分をみれば一目瞭然



マフラーマウントの変形解析

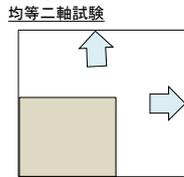


クッションラバーの変形解析



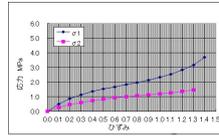
一軸拘束二軸伸張試験では2本の特性データが必須？

均等二軸試験であれば、2方向同じひずみvs反力となり1本の特性



一軸拘束二軸伸張試験では、2方向の反力が異なる。

一軸拘束二軸伸張試験



2方向の特性から

$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$

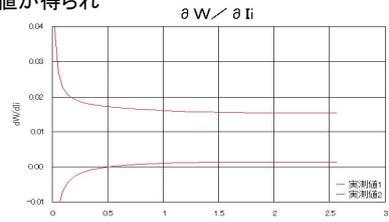
$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$

それぞれの微分線図から各係数を回帰で求める。

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

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} + C_{11}(I_1 - 3)$$

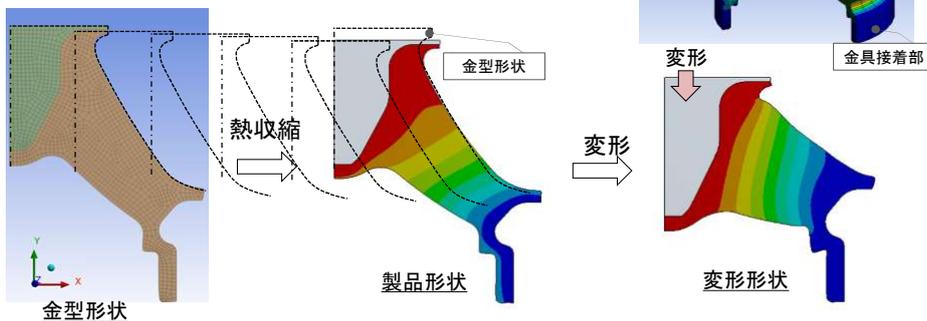
エネルギーの微分値が得られ



2本の応力ひずみ（伸張比）線図が無いと、すべての係数が特定できない。
ソフトの中でどのような処理がされているかは不明ですが、
EXCEL標準回帰機能で求めることができます。

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。

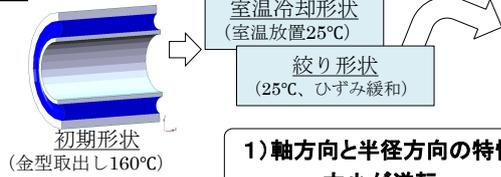


製品の加工工程を考慮することは、ゴム製品のみではなくすべての製品に当てはまります。

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

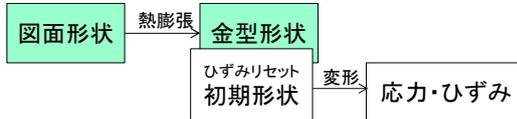


1) 軸方向と半径方向の特性
大小が逆転

2) 材料定義では補正できない

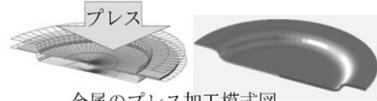
軸方向+5%補正、
半径方向はよりかい離が激しくなる。

[具体的手順]

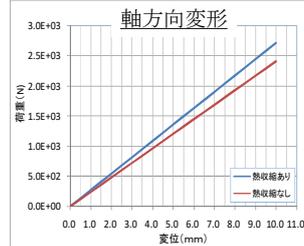
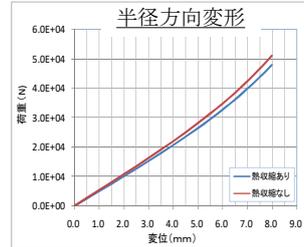


金型形状を初期形状として、熱収縮から
変形解析への熱-応力連成解析とすることが基本。

ゴムの解析は、金具接着タイプで熱を考慮することが基本。

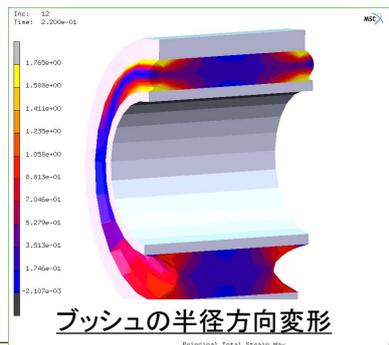
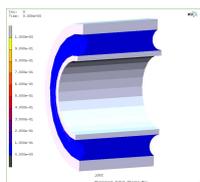


金属のプレス加工模式図

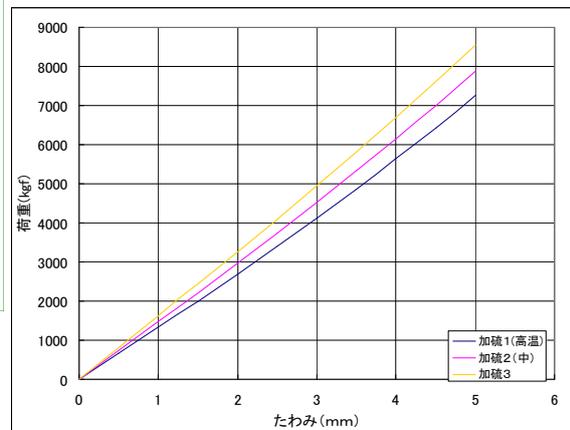


熱により性能も変化する、

熱を考慮しないと性能予測精度が落ちる

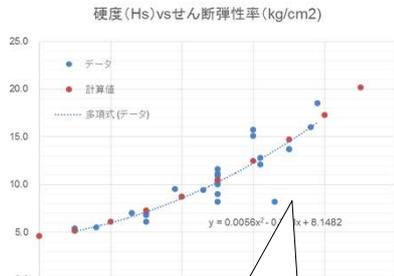


加硫温度で
特性も変化する。



ゴムの勘違い

硬度とせん断弾性率の関係



正しい測定値です。
68Hs⇒49Hs相当剛性

旧JIS測定法

必ずしも
硬度と剛性の関係はない

(株)メカニカルデザイン様
テクニカルレポート

Hs 硬度、横弾性係数、Mooney 定数の関係

Hs 硬度と横弾性係数 G の関係は次の近似式で表すことができる。Hs 硬度と JIS A 硬度はほぼ同値である。

$$Hs = \frac{G}{G + G_{50}} \times 100 \dots (1)$$

G_{50} は $Hs=50$ のゴムの横弾性係数をあらわす。ゴムの種類によって多少の差があるが、シリコンラバーのデータがなかったので、ここでは NR(天然ゴム)について記述する。NR の G_{50} は $G_{50}=7.45$ である。よって (1) 式に代入すると

$$Hs = \frac{G}{G + 7.45} \times 100 \dots (2)$$

となる。この (2) 式に今回のシリコンラバー硬度 40° を代入し、横弾性係数 G を求める。

$$40 = \frac{G}{G + 7.45} \times 100$$

$$\therefore G = 4.967 [kg/cm^2] \dots (3)$$

Mooney 定数と G の関係は次式で表すことができる

$$G = 2(C_{10} + C_{01}) \dots (4)$$

横弾性係数 G をエネルギー関数に換算する方法として、Neo-Hookean 式に換算する方法がある。(4) 式に $G=4.967$ 、 $C_{01}=0$ を代入すると

$$\therefore C_{10} = \frac{G}{2} = 2.483 [kg/cm^2] = 0.24$$

硬度とせん断弾性率
ヤング率の関係式

ゴム材料の基本知識

金属と違いへたりをどう考えるか...

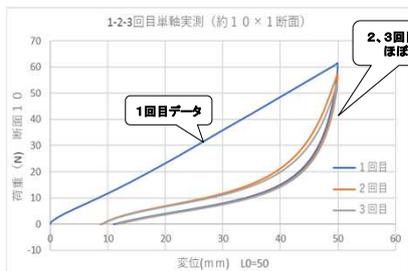
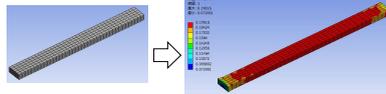
ゴムは、そのままのヤング率で定義しませんが

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。

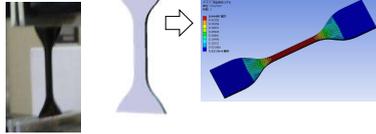
たりを考慮したヤング率の算出、解析の工程(熱履歴)を考慮すると
飛躍的に解析予測精度が改善されます。

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。

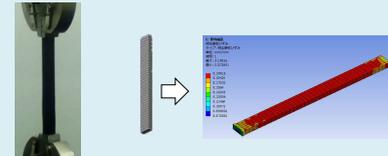
必ずしもヤング率 $E=応力\sigma/ひずみ\epsilon$ は形状によっては成り立ちません

更に根本的な原因は、材料定義用サンプル形状

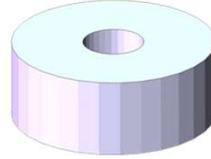
ダンベル



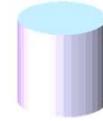
短冊



非線形材料なので
ヤング率をどこで定義するかありますが



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



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



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



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

正しい材料が定義できるのは、短冊、二軸試験などでは **シート形状**です。
他の形状は形状率が邪魔をして、正しい値ではありません。/一般的失敗例

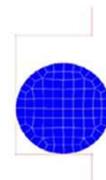
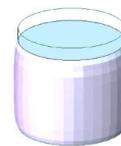
解析予測が実測とあ合わない3つの原因

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。

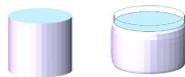
寸法	公差・1級	2級	3級[単位: mm]
3 mm以下	± 0.2	± 0.3	± 0.4
3~6 mm	± 0.2	± 0.4	± 0.5



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

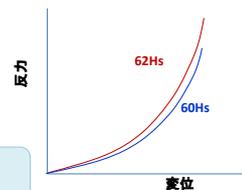


ディスク変形

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」。

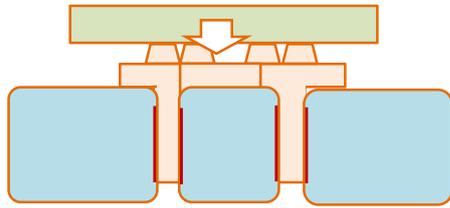
1Hs 5%の差になり、一般的には ± 2 or ± 3 Hs ($\pm 10 \sim 15\%$)の幅を持ちます。

ゴムは寸法公差、硬度(中心 ± 3 Hs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。



複合的要因

圧縮時の荷重

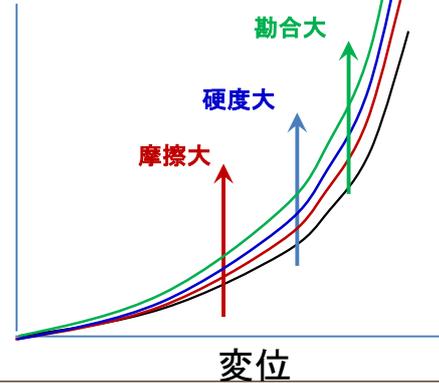


摩擦

硬度

寸法公差/勘合他

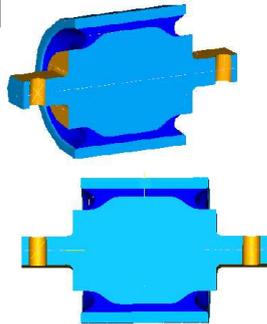
反力



ゴムの様々なばらつきから安定品質の難しさ

製品ばね測定時

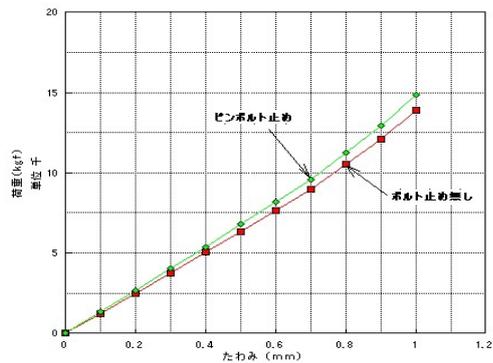
失敗事例と...



製品剛性に負けて曲がる

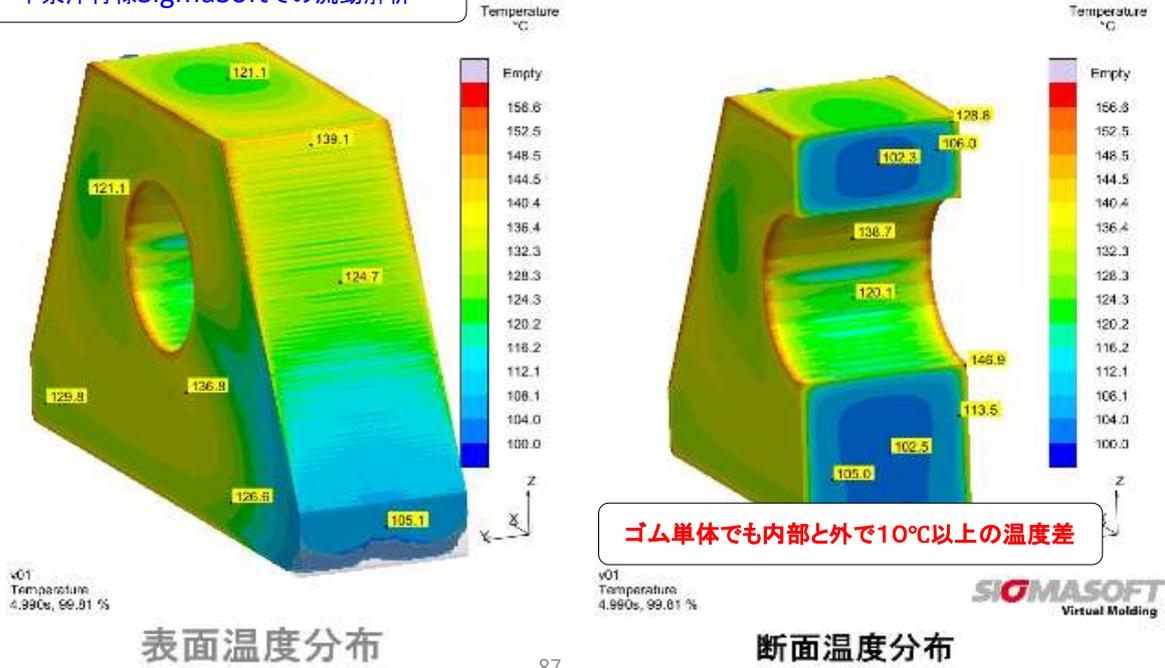


写真提供：富山県生活工学研究所提供



ボルト止め	有り	無し
ばね (ton/mm)	13.6	12.6
	誤差 7.5%	

平泉洋行様SigmaSoftでの流動解析

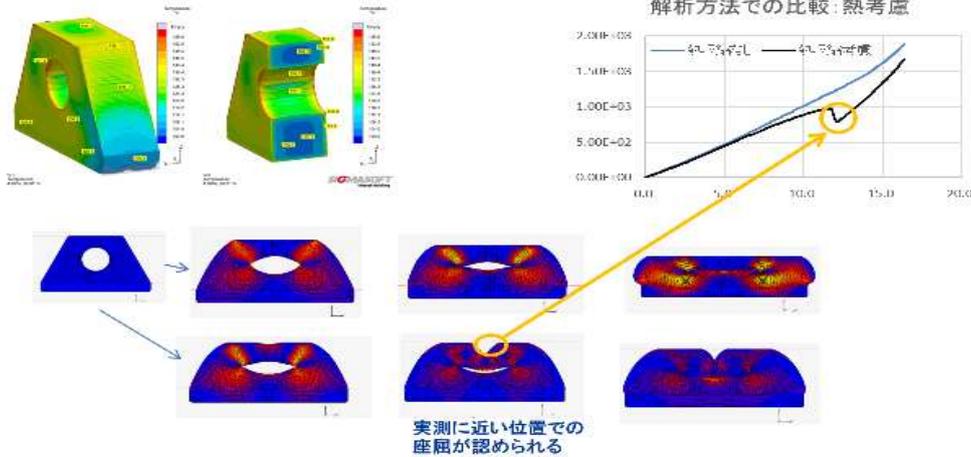


トピック

金具接着部品でなければ熱収縮不要
⇒ 熱収縮を考慮する例も

非線形CAE協会の例題

穴あき台形ゴムの解析/非線形CAE協会の例題



製造工程の熱分布による収縮の差が、特性の座屈減少に関与するかもしれない。
金具付き以外(ゴム単品)でも考慮が必要?

解析でできること/サポート可能な内容

ゴムの関連解析について、導入後の実用化でできること

- I 線形解析でも注意が必要
- II ゴム、樹脂の基本解析
- III ゴムの整形に関する解析
- IV 動的、粘弾性
- V ゴムの耐久性検討
- VI 解析技術
- VII 予測精度と勘違い
- VIII スポンジゴム/発泡材料への展開**
ゴムの解析材料定義からスポンジへの展開
- IX 効率化、自動化

特性予測精度を向上するには

ひずみエネルギー密度関数

ひずみエネルギー密度関数 様々な表現式

1) Neo-Hookeanモデル

$$W = C_{10}(I_1 - 3)$$

2) Mooney-Rivlin

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

3) Mooney高次式

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

4) O g d e n

$$W = \sum \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

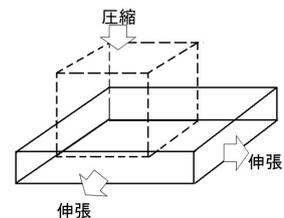
5) Arruda-Boyce

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

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

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

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



適切に定義すると、1)2)の式でもある程度、3)4)5)の高次の式は次ページに示すように解析予測精度が良いと言われる。

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

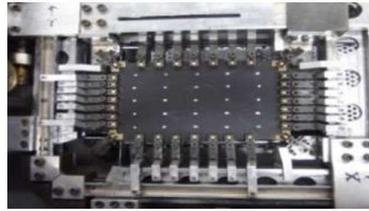
$$W=C10(I1-3)+C01(I2-3)+C11(I1-3)(I2-3)+C20(I2-3)^2+C30(I2-3)^3$$

Ogden定義も可能です。

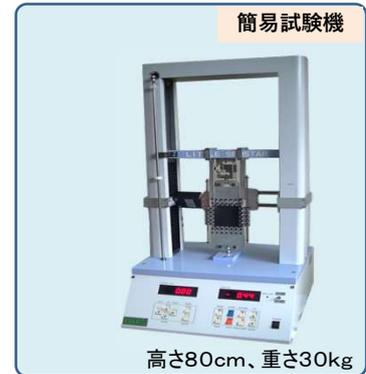


現地（富山）の二軸試験機

- ・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



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。

91

材料定義をご自身で修得

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。

お問い合わせリンク

<https://terakoya2018.com/question>

- 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。



生活工学研究所 (Life Engineering Research Institute)



〒939-1503 富山県南砺市若武町35-1 TEL:0763-22-2141 FAX:0763-22-4604

富山県産業技術研究開発センター (pref.toyama.jp)

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

連絡先 hagi@terakoya2018.com
080-2230-8785

3. 発砲製品

各材料の定義式

FORM材定義式

$$W = \sum \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum \frac{\mu_i}{\beta_i} (I - J)^{\beta_i}$$

二軸ではなく単軸で、且つ圧縮での定義が良好ですがポアソン比を調整することがカーブフィットのカギになります。

ソリッドゴムの定義式

1) Mooney高次式

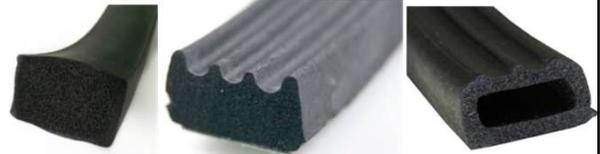
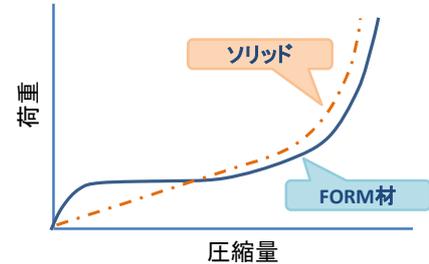
$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3) (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3$$

2) O g d e n

$$W = \sum \frac{\mu_i}{\alpha_i} \lambda_1^{\alpha_i} \lambda_2^{\alpha_i} \lambda_3^{\alpha_i} - 3$$

様々な用途で用いられるFORM材
いわゆるスポンジゴムは、大きく連泡と独泡として
様々な用途で使用されます。

特性はゴムと大きく異なり、若干の工夫が必要です。



Web(モノタロウ様画像より)

93

粘弾性特性の定義

文献や解析などがネット検索すると紹介されている。

下記文献2つほどPDF版がありますが、ご紹介可能かは、現在確認中です。

190311解析-スポンジ文献.pdf

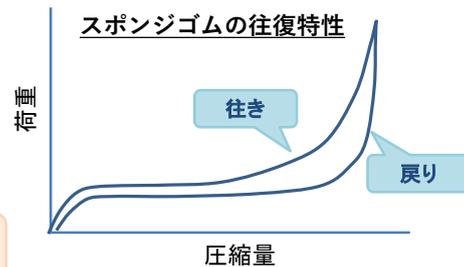
1126528スポンジ検討検討文献Nさん.pdf

ゴムと特性状態は異なるものの、ゴム同様に往きと戻りの差、つまりヒステリシロスが発生します。

(海外の) 文献の中では、**往きと戻りの特性を共に往きの特性として定義している**ようです。

粘弾性Proney係数定義

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \sum_{i=1}^N E_i e^{-t/\tau_i} + \varepsilon(t) \sum E_e$$



実的には**Proney係数を定義**すると、
しっかり**往復の材料定義**が可能です。

問合せ先 hagi@terakoya2018.com

解析や適用事例が少ないため、トラブルもなく順調に定義できています。

往きの特性はソフトのカーブフィット機能で充分でした。しかし、**粘弾性は少し厄介**でした。

(たまたま非線形CAE協会様の粘弾性データがあり、それを調整することでフィットできました。)

94