はじめてのゴム解析
ゴムの解析に必要な知識と押さえるべきポイント

寺子屋　萩本 光広



本日の内容

・ゴム材料の基本的な特性と特異性を理解できます
・ゴム材料の試験方法と同定方法を理解できます
・ゴム解析の精度を上げるための知識を習得できます

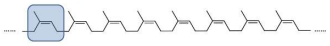
1. ゴムとは
2. ゴム解析の基礎
   ・弾性解析と超弾性解析、超弾性解析に必要なデータ（ひずみエネルギーとは）
   ・超弾性解析の基本
   ・もっとも簡単で予測精度を向上させる方法とその必要なデータ

3. 粘弾性解析、振動、熱、耐久性解析の紹介
   ・・・知識として、カードを増やすとお考え下さい。
4. まとめ

1．ゴムとは　　-ゴムとは何か-

ゴムは図に示す構造の高分子
構造式では表せますが、電子顕微鏡でやっと分子が確認できるくらいのミクロ構造の集合

天然ゴムの構造



天然ゴムは、ゴムの木の樹液

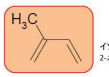


乾燥させて使用
寒天みたいなもの・・

無色透明、光を遮り白っぽい（黄色）

Z-配置の二重結合を含むポリマー
これがらせん状に巻いた構造をとり、
ばねのように伸び縮みする

下図のようなC_5H_8ユニット（イソプレン）
のポリマーである



イソプレン
2-メチル-1,3-ブタジエン

出展：http://www.org-chem.org/yuuki/TUS/6terpene.pdf

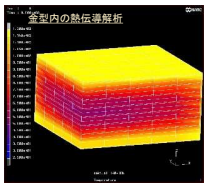
混ぜ物、特にカーボンブラックの**黒色**、他

最近は、ホワイトカーボンなど使って白
後に、着色（カラーワイパーなど）

・加硫材（硫黄、過酸化物）　・充填剤
・加硫促進剤　・補強材（カーボン等）
・老化防止剤　・加工助剤

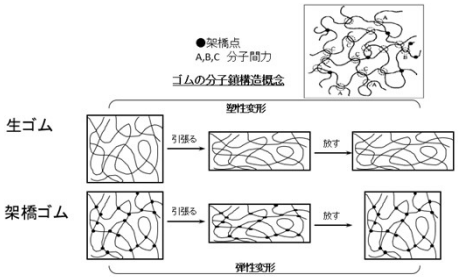
ゴム支承



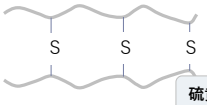


閉空間で
熱と圧力を加え加硫

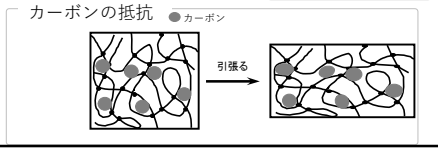
熱と圧力を加えて形を作りながらゴムを反応（加硫）させる。



元の高分子が、二重（電子）結合、一部と手を栂ぐ

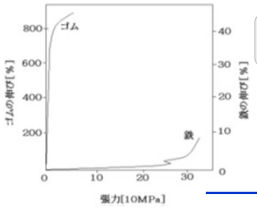


硫黄での加硫・架橋



ゴムの剛性の発現について

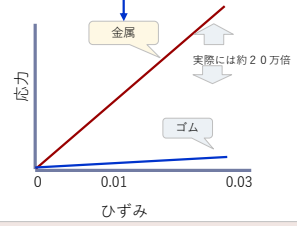
金属との比較
なぜ、非線形性が発現するのか？

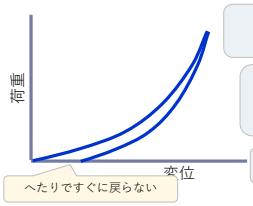


剛性は５桁以上異なる
（非常に大きい）

金属は弾性域が小さい

小変形域で比較する

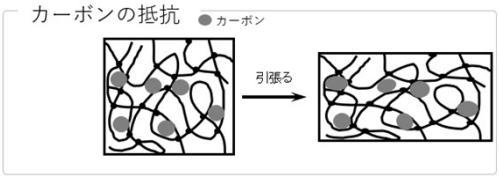




引っ張って戻すと、
ロスとへたりが発生

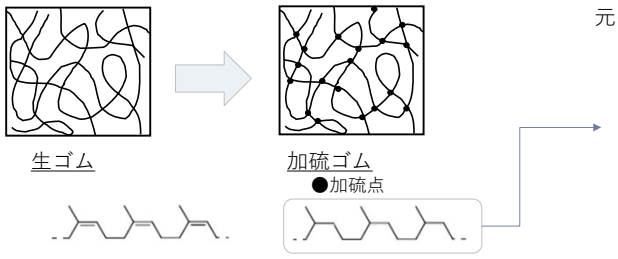
カーボンがない場合は
剛性、ロス共に小さい
（非線形性も小さい）

ゴムの**非線形性も発現**

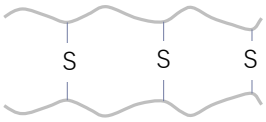


微小変形ではゴムの線形でも解析可能（別の意味での難しさはある、ペイン効果などありますが無視して大丈夫）

ゴムの剛性の発現について



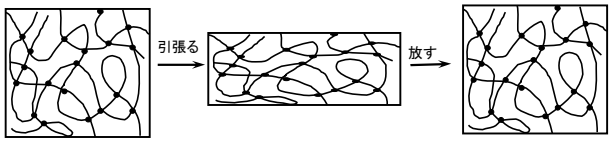
元の高分子が、二重（電子）結合、一部と手を栂ぐ



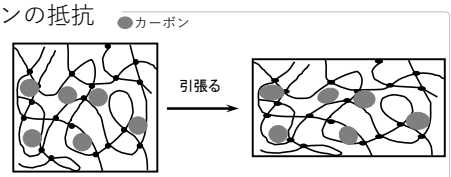
※過酸化物での加硫は、二十結合ではなく単結合も
ラジカル結合によって反応させている。（説明略）

余談：加硫とはもともと硫黄“硫”での反応をいう。
しかし、近年発達した過酸化物での反応も一般的な架橋という言葉ではなく、ゴム屋さんは加硫と言います。

加硫ゴムの伸張



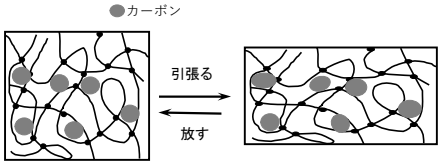
カーボンの抵抗



非線形性について

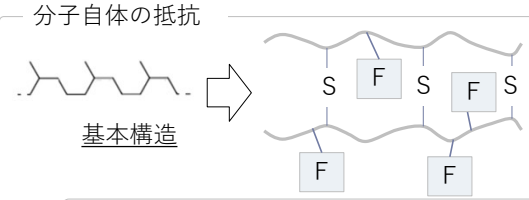
非線形性は、

カーボンの抵抗



カーボンが多いほど非線形性が大きい

分子自体の抵抗



官能基が大きいほど非線形性が大きい

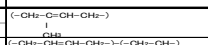
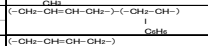
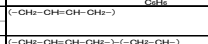
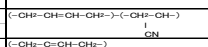
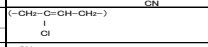
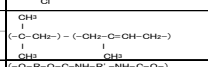
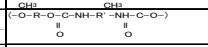
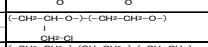
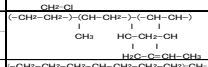
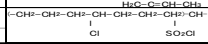
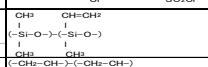
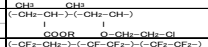
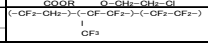
F　天然ゴム：CH３　　ニトリルゴム：CN
スチレン：　　クロロプレンゴム：Cl

大きさのみではなく、極性ということもあるが・・（ここでは省略）

特にシール性は・・・

カーボンの量や官能基の大きさのみではなく、
カーボンの粒子径、官能基の極性で抵抗が決まり剛性やロスに効いてくる。

材料選定方法

ｺﾞﾑ名 ASTM名称	構造式	適用温度範囲 （目安）℃	主な性質 長所	短所
ｲｿﾌﾟﾚﾝｺﾞﾑ IR NR		−50～+80	機械的強度	耐油性 耐候性
ｽﾁﾚﾝｺﾞﾑ SBR		−40～+100	耐植物油性 防振特性	耐鉱物油性
ﾌﾞﾀｼﾞｴﾝｺﾞﾑ BR		−70～+100	耐摩耗性 低温性	耐油性 耐候性
ﾆﾄﾘﾙｺﾞﾑ NBR		−40～+120	耐鉱物油性 耐摩耗性	耐薬品性 耐候性
ｸﾛﾛﾌﾟﾚﾝｺﾞﾑ CR		−40～+120	耐候性 耐疲労性 耐ｸﾞﾘｰｽ性	耐油性 （低アニリン点）
ﾌﾞﾁﾙｺﾞﾑ IIR		−50～+130	防振特性 低ｶﾞｽ透過性 耐薬品性	耐鉱物油性
ｳﾚﾀﾝｺﾞﾑ AU EU		−60～+100	耐油性 耐摩耗性 機械的強度	耐圧縮永久歪 耐水性
ﾋﾄﾞﾘﾝｺﾞﾑ ECO CO		−30～+130	物性ﾊﾞﾗﾝｽ （耐油,低温）	金属腐食性 熱軟化劣化性
ｴﾁﾚﾝﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝｺﾞﾑ EPDM EPM		−50～+150	耐水性,耐候性 電気絶縁性 耐圧縮永久歪	耐鉱物油性
ｸﾛﾛｽﾙﾌｫﾝ化ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ CSM		−40～+130	電気絶縁性 耐薬品性 難燃性,耐候性	加工性
ｼﾘｺｰﾝｺﾞﾑ VMQ		−60～+230	耐寒性,耐候性 耐圧縮永久歪 清浄性 電気絶縁性	耐油性 透過性 機械的強度
ｱｸﾘﾙｺﾞﾑ ACM		−30～+170	耐油性	機械的強度
ﾌｯ素ｺﾞﾑ FKM		−30～+250	耐油性 耐燃料油性 耐薬品性	耐寒性 価格

耐油性NBR、耐候性CRなど用途にあわせて選択する。
正確には、耐油でも各々の油に対する試験での確認が必要。

耐油性、耐水性、耐候性、耐摩耗性など確認から選定

1．耐流体性
　1）水系
　　水、海水、温水、熱水、水蒸気etc
　2）油系
　　ガソリン、潤滑油、アルコール系etc.
　3）腐食性/耐薬品性（フッ素など）
　　酸、アルカリetc.
　4）ガス系
　　空気、窒素、可燃ガス、支燃ガス、毒性ガス
　5）低温系
　　液化エチレン、LPG、LNG、液体窒素etc.

2．気体透過性（ブチルゴムなど）

3．耐候性/耐オゾン性（CRなど）

4．耐熱性

5．耐摩耗性

6．引き裂き性

7．接着性

硬度、へたり、緩和、その他、

近道として、メーカーに丸投げの方法もあります。
条件を提出、候補材料を絞り、実際の確認試験を実施。

本日の内容

・ゴム材料の基本的な特性と特異性を理解できます
・ゴム材料の試験方法と同定方法を理解できます
・ゴム解析の精度を上げるための知識を習得できます

1. ゴムとは
2. **ゴム解析の基礎**
   - **・弾性解析と超弾性解析、超弾性解析に必要なデータ（ひずみエネルギーとは）**
   - ・超弾性解析の基本
   - ・もっとも簡単で予測精度を向上させる方法とその必要なデータ

3. 粘弾性解析、振動、熱、耐久性解析の紹介
   ・・・知識として、カードを増やすとお考え下さい。
   - ・超弾性から粘弾性、振動、熱、耐久性までの考え方

4.まとめ

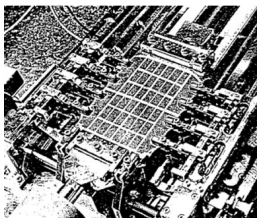
ひずみエネルギー密度関数定義

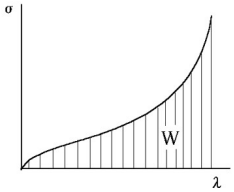
定義方法

基本式

$W=W(I_1, I_2, I_3)$

伸張比 $\lambda = 1 + \varepsilon$





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）Ogden

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

5）Arruda-Boyce

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

一般的にこれら定義で解析予測精度が良いと言われる。

$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$ **［対角線効果］**

$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2$ **［面積効果］**

$I_3=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=1$ **［体積効果］**

※I3=1は非圧縮性
最近、紛らわしい論文（圧縮性を示す誤り）

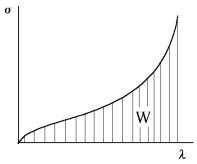
へたり考慮で十分予測精度アップ

ひずみエネルギー密度関数定義

ひずみエネルギー密度関数の表現式

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ ［対角線効果］
$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2$ ［面積効果］
$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 = 1$ ［体積効果］



1）Neo-Hookeanモデル

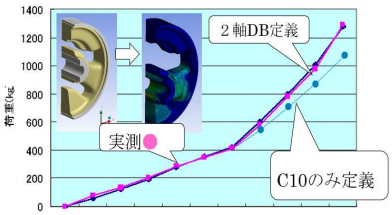
$W = C_{10}(I_1 - 3)$ ・・・ 最も単純な材料表現

$C_{10} = E/6$ の関係

エネルギー関数定義すると
非常に精度上がりますが、
基本のヤング率=6C10でも
ある程度の精度アップします。

根本的な問題は、

ハの字型マウントの特性予測解析



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）Ogden

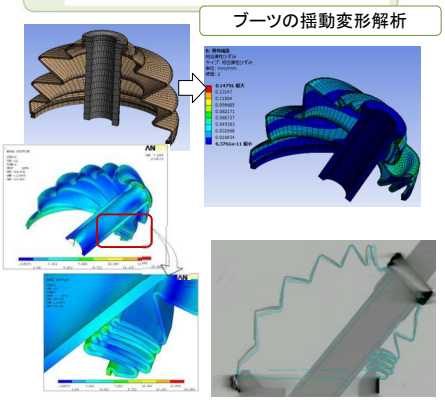
$W = \sum \frac{\mu_i}{\alpha_i}(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$

一般的にこれら定義で解析予測精度が良いと言われる。

5）Arruda-Boyce

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

ブーツの揺動変形解析



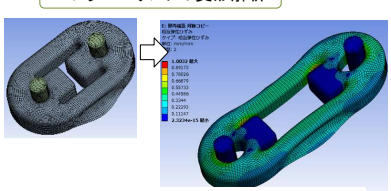
ひずみエネルギー密度関数定義

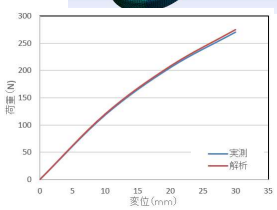
解析例 -定義及び解析の注意点を守れば簡単に精度がアップする

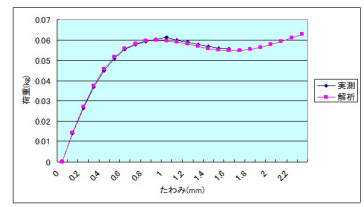
ラバーコンタクト変形解析

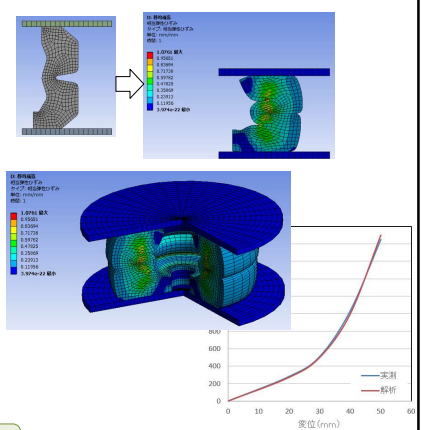
ラバースプリングの変形解析

マフラーマウントの変形解析









実測と解析予測が良く一致（良好）

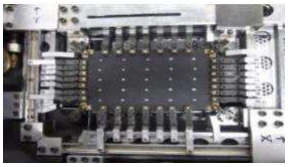
試験機

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

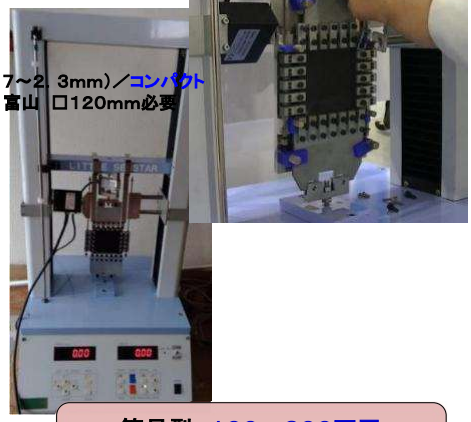


※もちろん、、式はどれでも精度は出ます。

サンプルサイズもコンパクト　□75mm（厚み0．7～2．3mm）／コンパクト
＊富山　□120mm必要



サンプル取り付け部

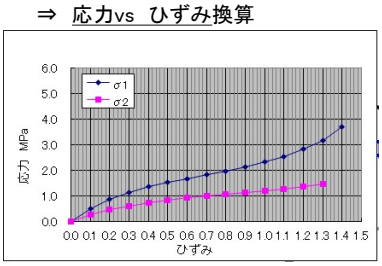


従来の試験機は、横置き型・大型　非常に高価
800～1，000万円　定価ベース

簡易型　100～300万円
一般試験機へアタッチメント可能

ひずみエネルギー密度関数の回帰方法

測定した荷重vs変位
⇒ 応力vs ひずみ換算



※共に有効断面がポイントで、
どちらも同じ結果

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

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

$$\sigma_3 = 0$$

Mooney高次モデルの定義

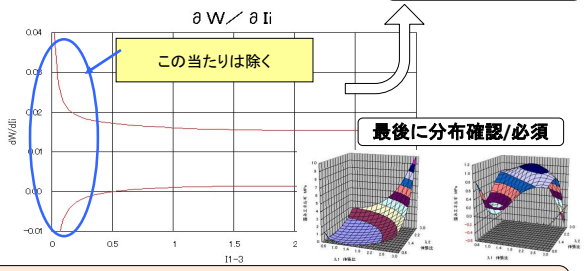
$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)+C_{20}(I_1-3)^2+C_{30}(I_1-3)^3$$

$$\frac{\partial W(I_1,I_2)}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2-\lambda_2^2)}\left[\frac{\lambda_1^3\sigma_1}{\lambda_1^3-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^3\sigma_2}{\lambda_2^3-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}\right] \Rightarrow = C_{10} + C_{11}(I_2-3) + 2C_{20}(I_1-3) + 3C_{30}(I_1-3)^2$$

$$\frac{\partial W(I_1,I_2)}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2-\lambda_1^2)}\left[\frac{\lambda_1\sigma_1}{\lambda_1^3-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2\sigma_2}{\lambda_2^3-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}\right] \Rightarrow = C_{01} + C_{11}(I_1-3)$$

EXCELの回帰機能で
係数をもとめるられる。

実測からプロット
（赤線）



最後に分布確認/必須

二軸試験機の実習から回帰のご指導
承ります。

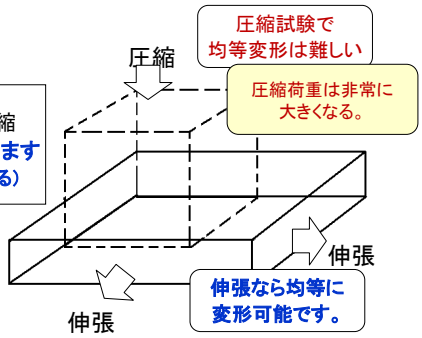
全ての係数を特定するには2方向のデータ（伸張側と拘束側）が必須ですが、ソフトの回帰機能は
（伸張側の）1方向データで回帰可能、何らかの前提を取り入れるか？　優秀な機能かもしれません。

二軸の必要性と‥

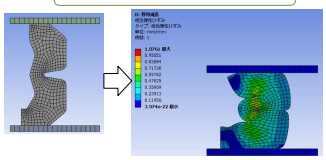
5．製品は、ほとんどが圧縮なのに　材料試験は、なぜ引張試験なのか？

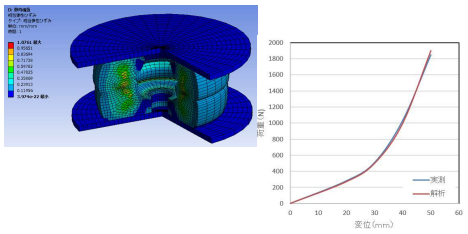
ゴムの非圧縮性
$I_3=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=1$

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）



ラバースプリングの変形解析





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。**

本日の内容

・ゴム材料の基本的な特性と特異性を理解できます
・ゴム材料の試験方法と同定方法を理解できます
・ゴム解析の精度を上げるための知識を習得できます

1.　ゴムとは
2.　ゴム解析の基礎
　・弾性解析と超弾性解析、超弾性解析に必要なデータ（ひずみエネルギーとは）
　・**超弾性解析の基本**
　・もっとも簡単で予測精度を向上させる方法とその必要なデータ

3. 粘弾性解析、振動、熱、耐久性解析の紹介
　　・・・知識として、カードを増やすとお考え下さい。
　・超弾性から粘弾性、振動、熱、耐久性までの考え方
4.まとめ

ひずみエネルギー密度関数定義

基本式

$W=W(I_1, I_2, I_3)$

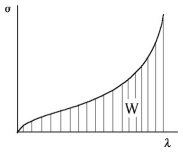
伸張比 $\lambda = 1 + \varepsilon$　として表現

テンソルとして、

$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$　［対角線効果］

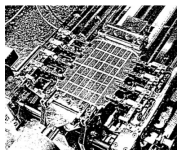
$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2$　［面積効果］

$I_3=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=1$　［体積効果］





基本は単軸と同じ、へたり補正



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）Ogden

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

5）Arruda-Boyce

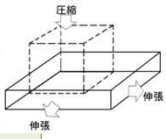
$W = nk\theta\left[\frac{1}{2}(I_1-3)+\frac{1}{20N}\left(I_1^2-9\right)+\frac{11}{1050N^2}\left(I_1^3-27\right)+\frac{19}{7000N^3}\left(I_1^4-81\right)+\frac{519}{673750N^4}\left(I_1^5-243\right)\right]$

$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$　［対角線効果］

$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2$　［面積効果］

$I_3=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=1$　［体積効果］

※$I_3=1$は非圧縮性
最近、紛らわしい論文（圧縮性を示す誤り）



一般的にこれら定義で
解析予測精度が良いと言われる。

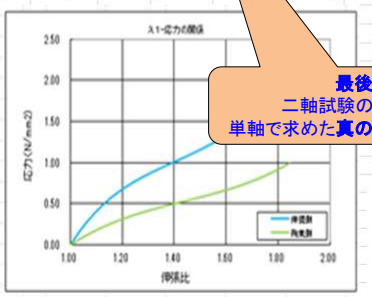
材料のヤング率は1つです。

どんな方法でも求められればいいが、2軸から難しい。

単位：N/mm2

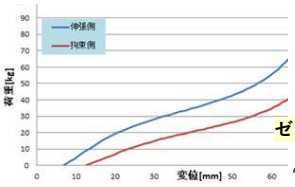
C10	C01	C11	C20	C30
5.2827E-01	5.5064E-02	1.5588E+00	-7.7942E-01	0.0000E+00
係数	2.1509E+00			
	（参照）			
真ヤング率	3.5			
算出ヤング率(下記)	1.6272E+00	6(C10+C01)		

C10	C01	C11	C20	C30
2.4560E-01	2.5600E	7.2473E-01	-3.6237E-01	0.0000E+00
入力		C11+2C20=		
		3C30=		



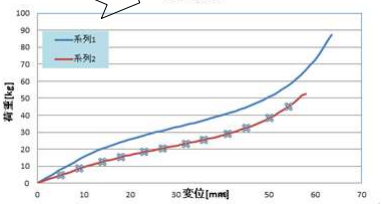
最後に
二軸試験の都合から
単軸で求めた**真のヤング率**を確認

もともとゼロ点が求めにくい、シフトして回帰

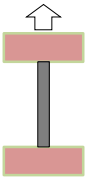


ゼロ点シフト

伸張側と拘束側の
へたりが異なる。
⇒補正が難しい。



単軸であればへたりを補正
⇒ヤング率が求め易い

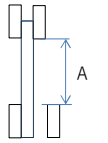


ゴム材料の測定について

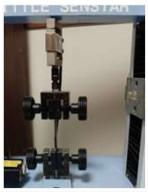
Point:本当のヤング率

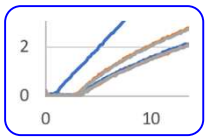
短冊測定

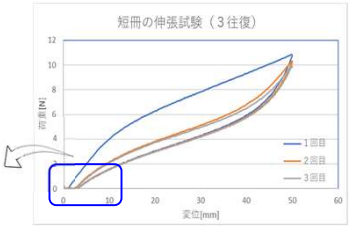
上からチャック　　下をチャック



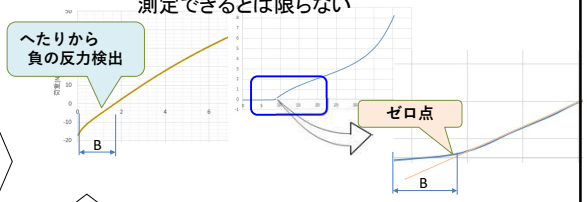
たるみ発生

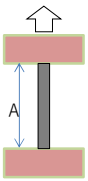






きれいにゼロ点から始まり
測定できるとは限らない





ヤング率E＝応力σ/ひずみε
10%伸張時で算出
Point:**へたりを考慮したひずみ算出**
＝変位/(チャック間A=50＋へたりB)

１０％で算出、証明は簡単です。
解析で入力と出力ヤング率が同じになればいい。

※**10%算出の意味**
鉄の微小変形1%、ゴムではへたりの影響で難しい
100%等では非線形性から10%と仮定
⇒ **10%として算出、この値で短冊の解析、出力一致**

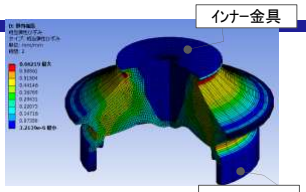


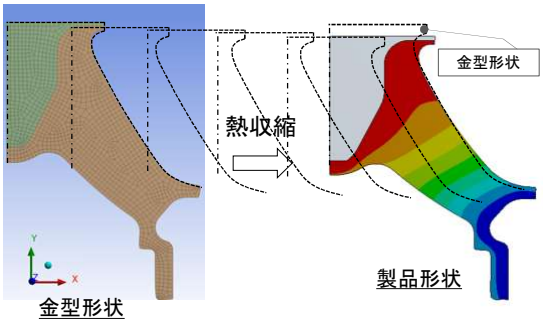
金属伸張用JISダンベル

金属ではセットして、このへたり等考慮しなくてもよい。
ゴムについてはへたりを考慮して定義が必用。

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。

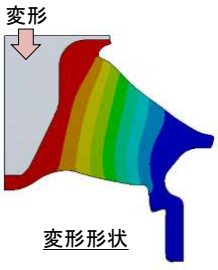




金型形状

製品形状

変形

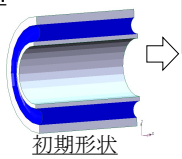


変形形状

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　の手順を守ることで、
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



初期形状
（金型取出し160℃）

室温冷却形状
（室温放置25℃）

絞り形状
（25℃、ひずみ緩和）

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。

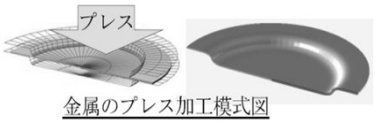
［具体的手順］

図面形状 → 熱膨張 → 金型形状

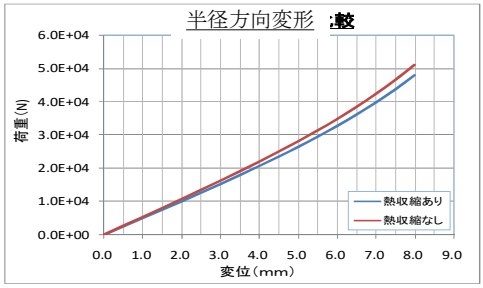
ひずみリセット 初期形状 → 変形 → 応力・ひずみ

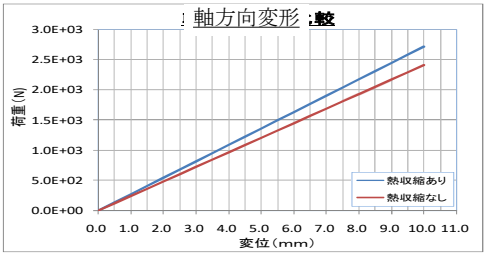
金型形状を初期形状として、熱収縮から変形解析への熱-応力連成解析とすることが基本。

精度が格段に向上



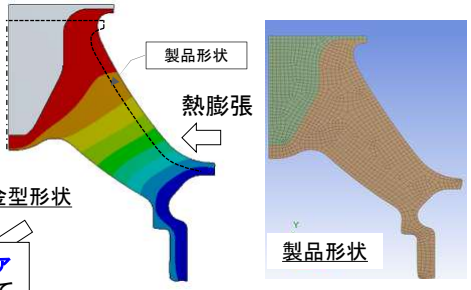
金属のプレス加工模式図



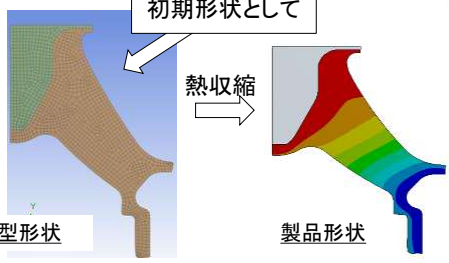


しかし、残念ながら
開発部門が金型図を
持たない例は多いものです。

製品形状を熱膨張解析
金型形状を予測



応力・ひずみクリア
初期形状として



熱膨張解析で金型形状を予測、応力・ひずみをリセットし
その後に、**熱収縮～変形解析の手順を進め**ることで解析は全てうまくいきます。

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

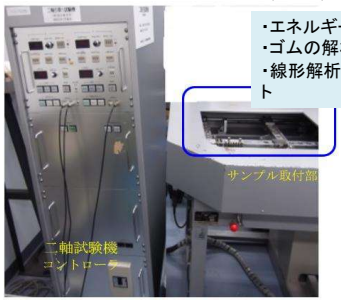
ゴムの二軸伸張試験、承りります。 -ゴムの専門家として解析適用までサポートします。-

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

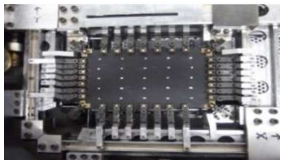
$W=C10(I1-3)+C01(I2-3)+C11(I1-3)(I2-3)+C20(I2-3)^2+C30(I2-3)^3$

Ogden定義も可能です。

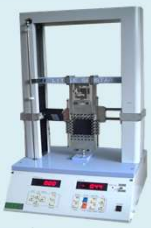
・エネルギー関数の真実、注意すべき点
・ゴムの解析への適用方法
・線形解析での間違えやすい点、その他サポート



現地（富山）の二軸試験機


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・・・

23

寺子屋 サポート一蘭

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

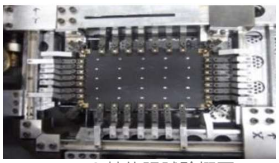
・ゴム材料定義：ひずみエネルギー関数
・大変形テクニック～運用実用化

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

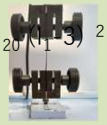
Mooney高次式

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

Ogden式

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

n＝５～７程度



低画質



25

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

- 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 -

お問い合わせリンク
https://terakoya2018.com/question

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。



富山試験場へ（試験機はもらって‥）

試験場の環境、雪、ホテル‥‥

本日の内容

・ゴム材料の基本的な特性と特異性を理解できます
・ゴム材料の試験方法と同定方法を理解できます
・ゴム解析の精度を上げるための知識を習得できます

1. ゴムとは
2. **ゴム解析の基礎**
   ・弾性解析と超弾性解析、超弾性解析に必要なデータ（ひずみエネルギーとは）
   ・超弾性解析の基本
   ・**もっとも簡単で予測精度を向上させる方法とその必要なデータ**

3. 粘弾性解析、振動、熱、耐久性解析の紹介
   ・・・知識として、カードを増やすとお考え下さい。
   ・超弾性から粘弾性、振動、熱、耐久性までの考え方
4. まとめ

27

ゴムの解析が合わないのは単なる誤解

材料の本質は１つ、ヤング率は１材料１つ

金属も心太（ところてん）も同じ試験機で・・・

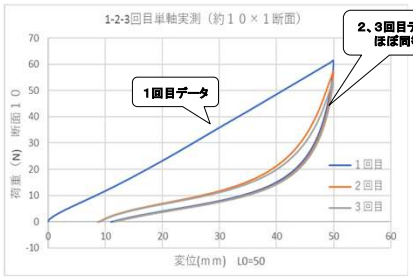
令和7年9月12日　寺子屋　　萩本光広

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

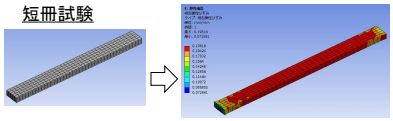
そしてヤング率は1材料で1つです。

ゴム材料の基本知識：何回目のデータを使うか

単軸試験から正確なヤング率を求めること。



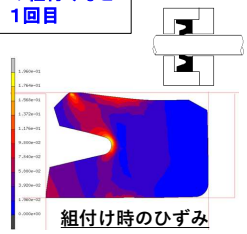
短冊試験



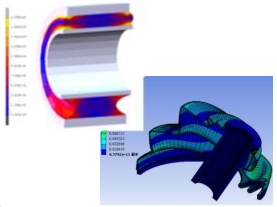
1回目と2回目は大きく異なり、
2回目と3回目は少し異なります。

3回目以降はほぼ重なります。

シールの組付けなど
1回目



防振ゴムなど
繰り返し3回目

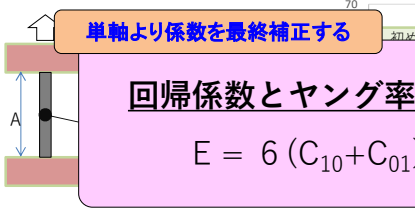


ゴムの3回の伸張データは、上記のように安定性から“3回目のデータとJISでは規定”しています。
しかし、それだけでは解析に使うことが難しいです。/JISは解析用に定義されていません。

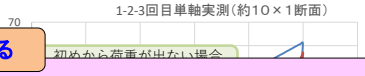
ゴム材料の基本知識

Point:本当のヤング率

単軸試験手順：重要ポイント



単軸より係数を最終補正する



回帰係数とヤング率の関係

$$E = 6(C_{10}+C_{01}) = (3/2)\ \Sigma\ \alpha_i \mu_i$$

ヤング率E＝応力σ/ひずみε
10%伸張時で算出

たひずみ算出
間A=50＋へたりB）

ゴムではへたりの影響で難しい
形性から10%と仮定
、この値で短冊の解析、出力一致

へたりを考慮して10%伸張で算出、真のヤング率と同じ

ひずみエネルギー密度関数係数とヤング率の関係

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

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

n＝5～7程度

本当のヤング率は１つであり、エネルギー関数との整合を採ることが必須

剛性の高い材料もゴムの試験機で測定可能

材料定義の方法

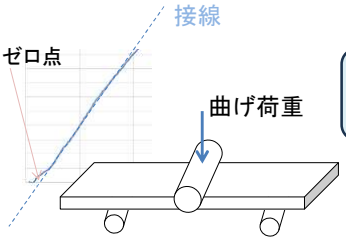
直接伸張による定義方法





伸張用JISダンベル

伸張方法による誤差



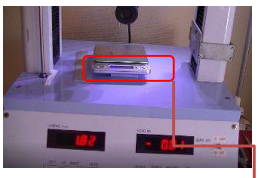
なぜ、丸棒
治具を使うか？

片当たりによる
測定誤差を避けるため

片当たりの補正が必用

ゴムの試験機で十分金属のヤング率が想定可能。解析で表現して形状依存性を取り除く。

剛性の非常に小さいもの-試験機のロードセルが検知できないとき



上から数値が両方見える位置











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

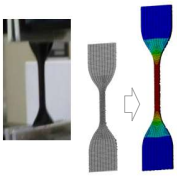
ヤング率E　＝　応力σ／ひずみε

応力とひずみの関係の基本式

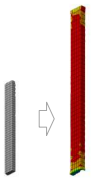


形状率依存性

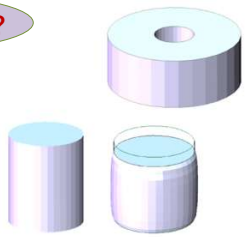
果たしてそうでしょうか？



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

ヤング率E　＝　応力σ／ひずみε

応力とひずみの関係の基本式

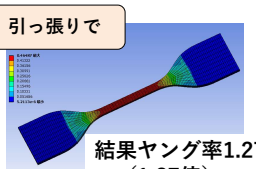


形状率依存性

果たしてそうでしょうか？　**非線形性も考慮しないといけませんが**

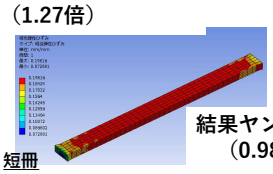
ヤング率１.０の材料で解析

引っ張りで



ダンベル

結果ヤング率1.27
（1.27倍）



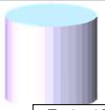
短冊

結果ヤング率0.98
（0.98倍）

圧縮で

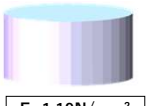
ディスク

Φ１８×ｈ２６mm³



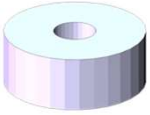
E=0.79N/mm²

Φ２９×ｈ１２.７mm³



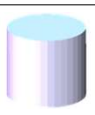
E=1.19N/mm²

Φ４０×ｈ１５mm³



E=1.16N/mm²

Φ１０×ｈ１０mm³



E=0.95N/mm²

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

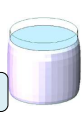
1．正確な正しいヤング率定義（ヤング率/６=C10 ネオフック）

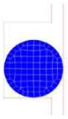
2．寸法公差

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。



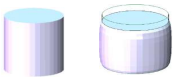


3．硬度差

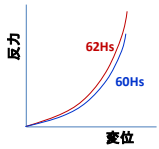
例えば60Hs 必ずしも60Hsとは限りません。
62Hs のときも「あります。

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

剛性と硬度の関係



ディスク変形



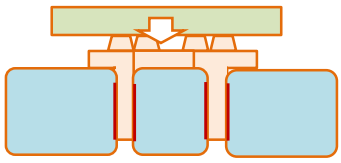
ゴムは寸法公差、硬度（中心±3Hsなど）差が大きい。
解析が合ってないと考えることも多い。⇒実際は合っている。

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

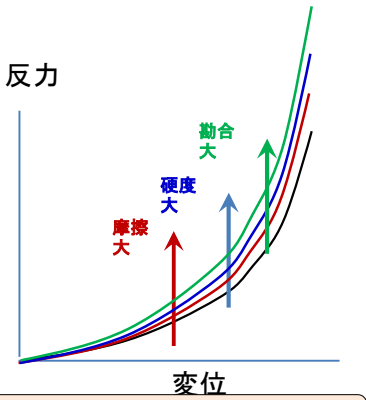
圧縮時の荷重



摩擦

硬度

寸法公差/勘合他

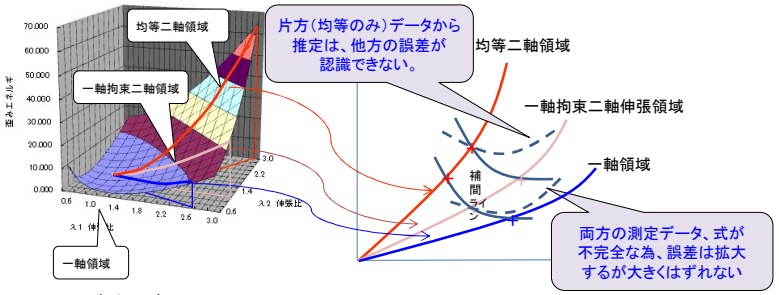


ゴムの様々なばらつきから安定品質の難しさ

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

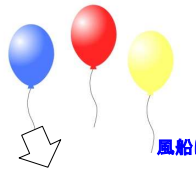
$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)+C_{20}(I_1-3)^2+C_{30}(I_1-3)^3$$

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

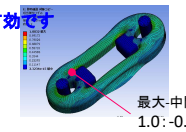
二軸均等伸張データで予測できるのは、風船のような製品



風船は均等二軸

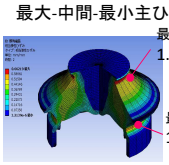
2方向に均等に伸張する製品はゴム製品でも少ない
⇒ **均等二軸伸張の領域データは不要**

単軸試験が有効です



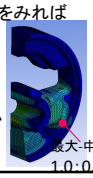
最大-中間-最小
1.0：-0.4：-0.4

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

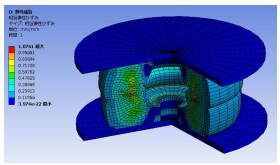
最大-中間-最小
1.0：0.6：-1.4



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

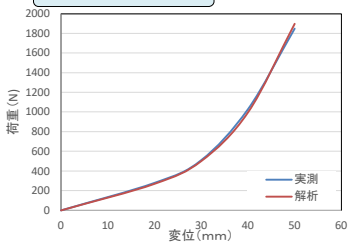
クッションラバーの変形解析



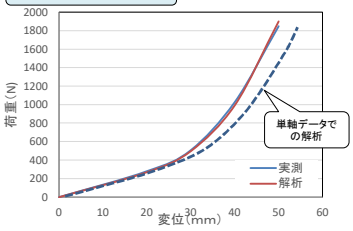
各部のひずみを確認すると、単軸よりも二軸、それも純せん断のひずみ分布に近い

⇒ **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



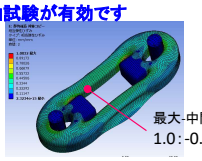
単軸データ





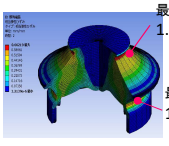
風船は均等二軸

単軸試験が有効です



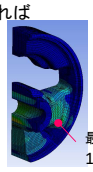
最大-中間-最小
1.0：-0.4：-0.4

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

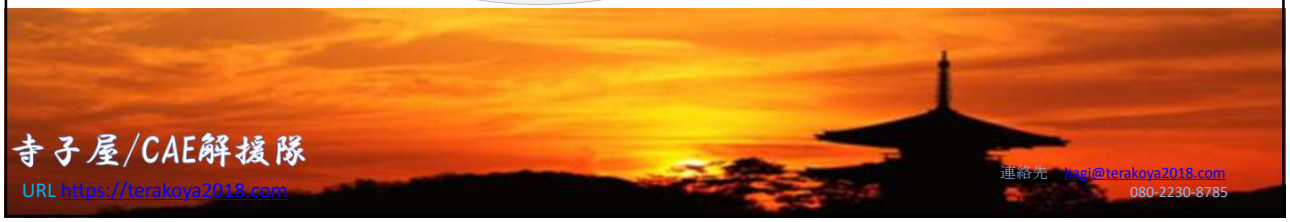
モデリング・メッシングの注意点

材料定義の真実
☆彡2022.6.13追加

解析条件、摩擦等の注意点

その他

解析



本日の内容

・ゴム材料の基本的な特性と特異性を理解できます
・ゴム材料の試験方法と同定方法を理解できます
・ゴム解析の精度を上げるための知識を習得できます

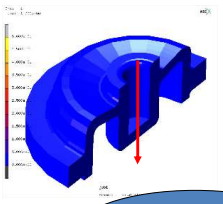
1. ゴムとは
2. ゴム解析の基礎
   ・弾性解析と超弾性解析、超弾性解析に必要なデータ（ひずみエネルギーとは）
   ・超弾性解析の基本
   ・もっとも簡単で予測精度を向上させる方法とその必要なデータ

3. **粘弾性解析、振動、熱、耐久性解析の紹介**
   ・・・知識として、カードを増やすとお考え下さい。
   ・超弾性から粘弾性、振動、熱、耐久性までの考え方
4. まとめ

粘弾性解析

粘弾性解析は、

超弾性（Mooney、Ogdenなど） ＋ **粘弾性緩和係数**（Proney級数） **で定義します。**



粘弾性特性は静解析の領域

実際の解析 超弾性定義 ＋ 粘弾性定義

一般的にMooney、Ogdenが使われます。

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

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

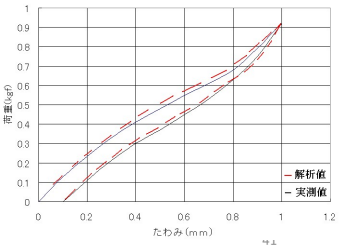
軸方向変形

Proney級数

Viscelmoon/(viscelogd)

1	8
0.05000	1.0000e-10
0.35000	1.0000e-08
0.30000	1.0000e-07
0.20000	1.0000e-05
0.02000	1.0000e-01
0.03000	1.0000e+01
0.01500	1.0000e+03
0.01200	1.0000e +05

剛性（Ei） 時間（τ）



これだけ記憶してください。

別々に定義しますが、

それぞれ 超弾性係数 ＋ 粘弾性係数 では解析できません。

必ず調整が必要になります。 **その理由は、**

無料相談へ、相談ください。

$\sigma(t)=\varepsilon(t)\sum_{i=1}^{N}E_i e^{-t/\tau_i}+\varepsilon(t)E_e$ これらの定義の仕方、精度が影響します。

粘弾性解析用のデータ定義として

基本は・・・

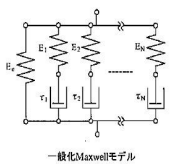
瞬間から順次exp関数で

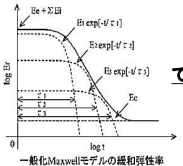
1）瞬間 E0から引き算するか

2）永久時間Eeから足し算するか

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

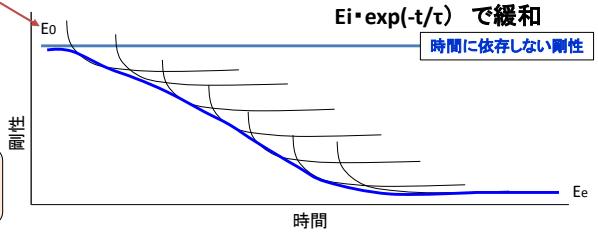
$\sigma(t)=\varepsilon(t)E_0-\varepsilon(t)\sum_{i=1}^{N}E_i e^{-t/\tau_i}$





Ei・exp(-t/τ) で緩和

時間に依存しない剛性



どちらもソフトの癖で正しい方法です。

できるだけ広範囲（広い周波数領域）を定義するには

時間温度換算則が必要です。

WLF(Willams, Landel, Fervy)式

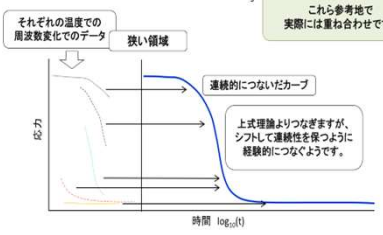
$\log\alpha_T=\frac{-C_1(T-T_g)}{C_2+(T-T_g)}$

Tg ：ガラス転移温度

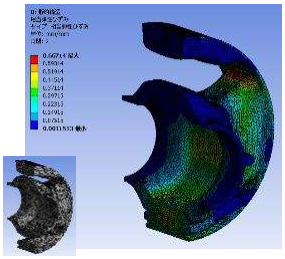
C_1=886 C_2=101.6 （参考値）

$T_g=T_g+50$

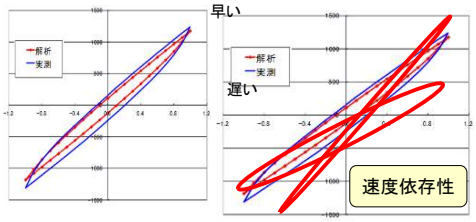
これら参考地で実際には重ね合わせです。



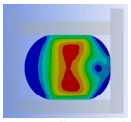
振動解析の例 /動的な粘弾性

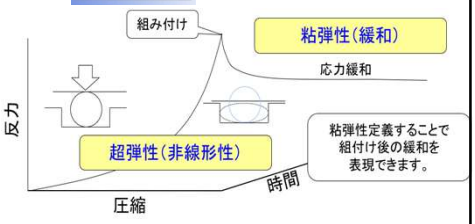


リサージュ波形

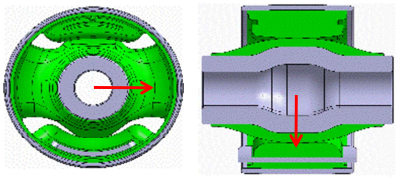


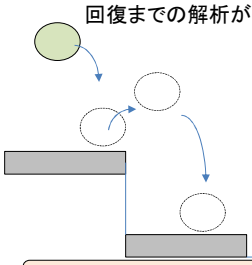
シール組み付け





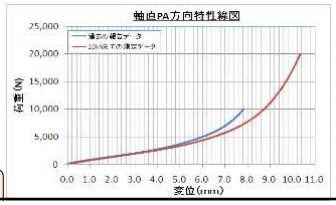
粘弾性（Viscelmoon等）で解析、
1）最初にバウンドするとき
2）次にバウンドするとき
回復までの解析ができます。



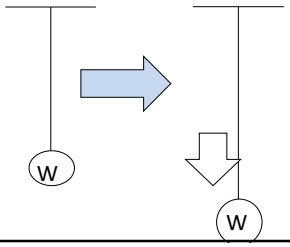


同様の定義で
ダメージ(Mullins)
効果も定義可能

クリープも同じデータで解析可能。



ゴムに重りを・・



まとめ＜要約＞

1. 粘弾性解析の定義は、
   超弾性定義　＋　粘弾性定義　で解析しますが、それだけではありません。

2. 2つの定義方法がありますが、**残念ながらどちらも誤差が大きい**です。

3. 基本になる超弾性データ、その基本ヤング率
   テストピースや測定方法で**正確な剛性が**
   求められません。



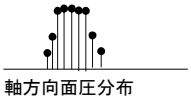
書籍

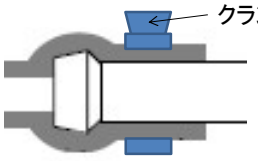
ゴムのFEM解析　：第１弾　超弾性域

＊＊ゴムタイムス様より **第２弾　＋粘弾性（動解析、応力緩和）、熱解析、耐久予測**まで
出版です。

ホースの熱老化後の挙動予測

履歴効果（Mullins'効果）





構成部品・材料（解析用材料定義）

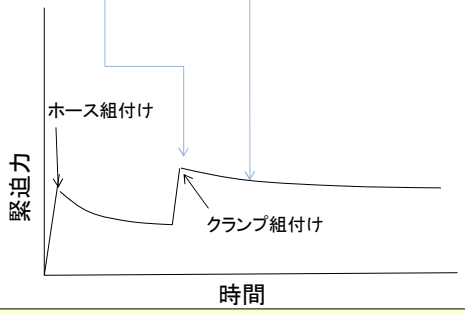
- チューブ・クランプ
- 金属
- ホース

粘弾性定義（緩和）に合わせた
超弾性材(Mooney)定義

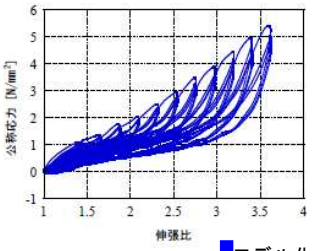
これまでの方法
組み付け時間を考慮した
ひずみエネルギー密度関数での解析
（緩和想定した剛性低下材料）

ヘタリを予測

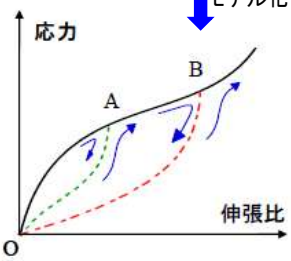
今回の適用方法
初期剛性
＋緩和解析



履歴効果



モデル化



今回比較する緊迫力は、経時変化点なので時間に注意が必要です。

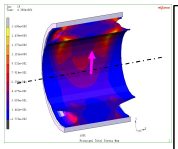
静特性、往きの特性でも必要なものも

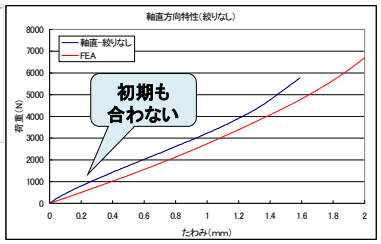
ペイン効果・BUSH特性予測技術

超弾性でもある程度の予測が可能ですが、難しい面も・・・

BUSH製品；初期及び大変形領域も予測精度が悪い。
MTに比べて、**粘弾性特性効果が非常に大きく、その因子も含めて検討**が必要。

単純なBUSHの解析例

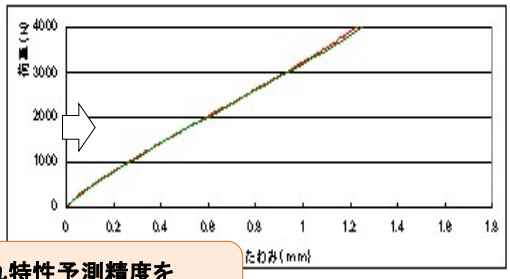




[粘弾性特性]

$Y = K(x) \cdot G(x,t) \cdot X + \cdots$

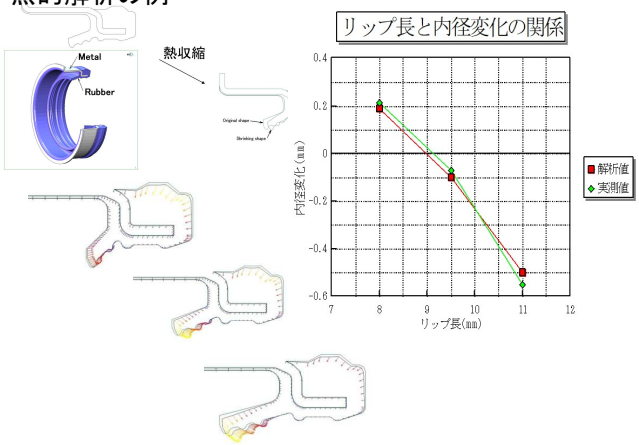
超弾性　粘弾性



**自由表面が小さくなるにつれて、粘弾性効果が大きく現れ特性予測精度を
ひずみエネルギー密度関数のみでは表現できない。**

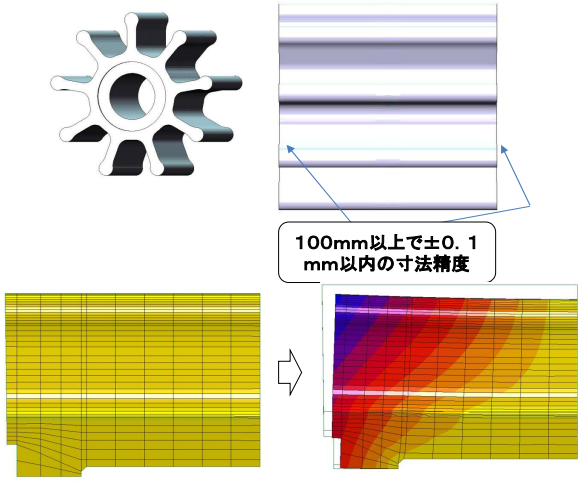
熱的解析、振動解析の例

熱的解析の例



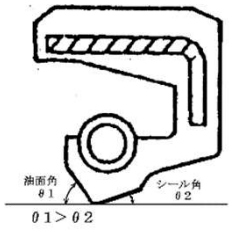
リップ長さで収縮の方向が変化し予測が難しい。

熱的解析の例 /インペラの金型形状予測

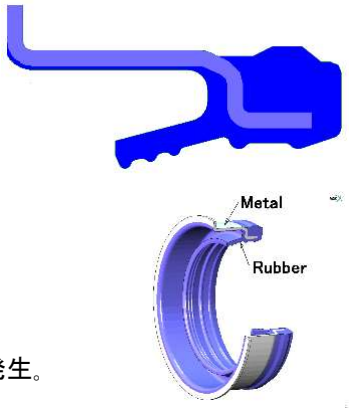


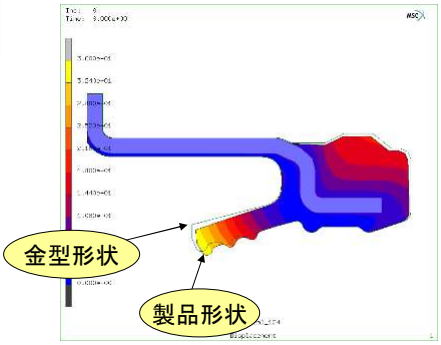
後のグラインダー研磨工程の廃止、環境としてゴムの粉を吸い込むことをなくす。

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。



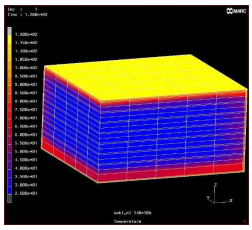


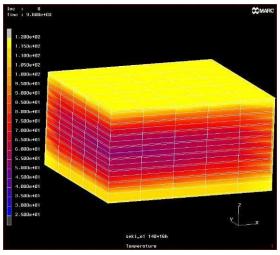
熱収縮解析での型設計から製品形状決定まで、ノウハウもしくはFEM解析で行う。
ノウハウが主流のようですが、解析で補う。

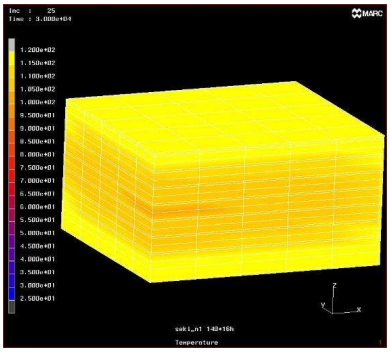
熱的解析、振動解析の例

熱的解析の例 /支床（大型）ゴム熱伝導解析

1辺が1m以上の大型モデル（4分の1モデル解析）
加硫時間24時間　⇒解析で8時間加硫/夜勤の廃止





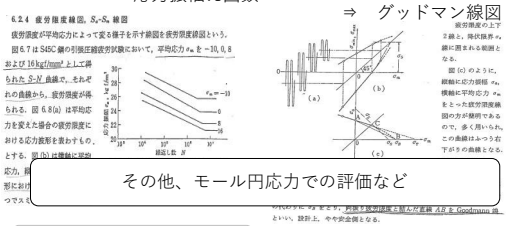


耐久性の見方

金属材料

金属材料の種類により、
①ミゼス応力説　②せんだん応力説　③最大主応力説
など、それぞれ相応の指標がある。

1.スミス線図　　2.疲労限度線図
応力振幅vs回数　⇒　グッドマン線図



その他、モール円応力での評価など

ゴム材料

・滋賀県立大学山下先生（現福井大）
2軸試験による疲労寿命の研究
・豊田合成殿の論文
日本ゴム協会誌(第66巻, 第4号, 1993) 防振ゴム材料の耐久性評価

参考となる文献は少ない。

金属は専門の研究機関あり
ゴムは各社でノウハウを持つ
公開しない。大学研究者激減

内容の一部紹介／豊田合成殿

Ⅱ．方法
1.ゴム部品の耐久疲労性
製品台上ベンチ試験　繰り返し定荷重振動
（分担荷重１、２、３±１Wで加振周波数３Hz）
→亀裂の発生部分はFEM結果と一致
→疲労寿命と最大引張りひずみは反比例の関係
⇒FEM解析による最大引張りひずみを変数とする

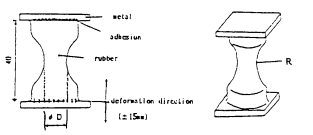


図１　TP形状

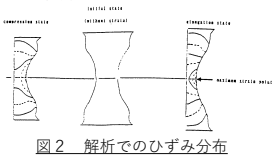
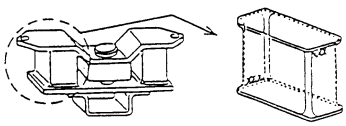


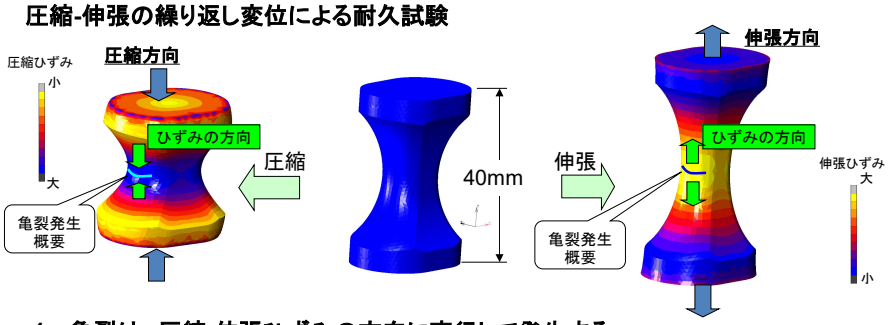
図２　解析でのひずみ分布



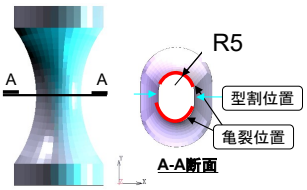
伸張ひずみの解析値と耐久回数のデータベースを構築。
↓
エンジンマウントの耐久回数の予測を試みる。

耐久性指標の検討　　文献の検証

実際に、豊田合成殿の疲労寿命予測用TP作成、耐久試験を実施。
圧縮-伸張の繰り返し変位による耐久試験



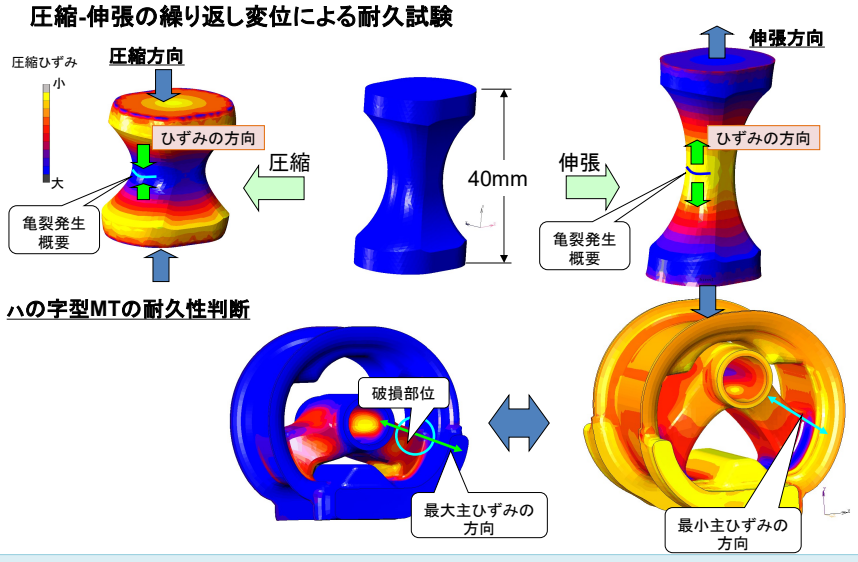
1. **亀裂は、圧縮-伸張ひずみの方向に直行して発生する。**
   即ち、ひずみの方向に直行して亀裂が発生する。
2. **断面形状を長円とすることで、亀裂位置に金型のパーティションの影響のないTPを作成する。**



亀裂の方向は、発生するひずみと直行方向に発生する。

亀裂はひずみに直行方向に発生する

圧縮-伸張の繰り返し変位による耐久試験

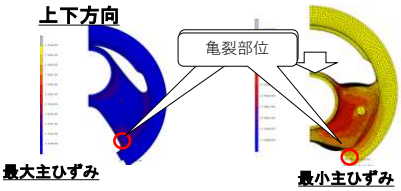


必ずひずみの方向に直行して亀裂が発生する/金属と同様

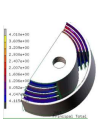
実際の例

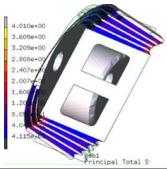
ハの字型MYの耐久試験結果

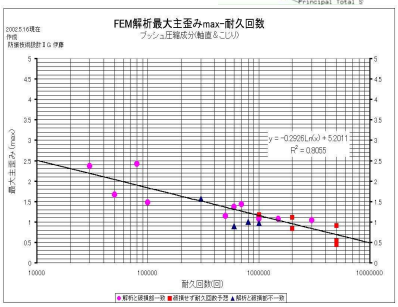
上下方向



鉄道車両

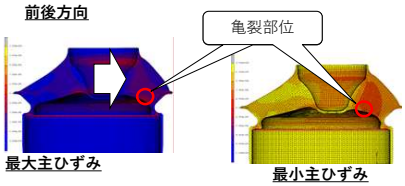




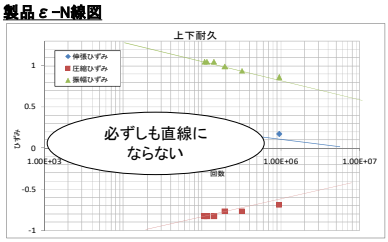


円錐MYの耐久

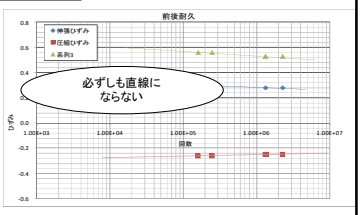
前後方向



製品 ε -N線図



製品 ε -N線図



本日の内容

・ゴム材料の基本的な特性と特異性を理解できます
・ゴム材料の試験方法と同定方法を理解できます
・ゴム解析の精度を上げるための知識を習得できます

1. ゴムとは
2. ゴム解析の基礎
   ・弾性解析と超弾性解析、超弾性解析に必要なデータ（ひずみエネルギーとは）
   ・超弾性解析の基本
   ・もっとも簡単で予測精度を向上させる方法とその必要なデータ

3. 粘弾性解析、振動、熱、耐久性解析の紹介
   ・・・知識として、カードを増やすとお考え下さい。
   ・超弾性から粘弾性、振動、熱、耐久性までの考え方

4.まとめ：ゴムの解析の勘違いから合わないと・・・

まとめ

ゴムの解析が難しい、実験値と合わない理由

荷重、反力に影響するものは、主に**要因は・・・**

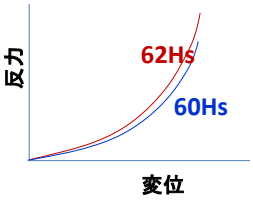


摩擦　硬度　寸法公差

があります。

摩擦について　摩擦については非常に複雑、誤解もありますので
別途、詳しく説明します。（資料は掲載しています）
YT版-ゴムの解析が難しいと言われる所以220918.pptxorYouTube

硬度について



60Hsのゴム製品を製造しても**60Hsとは限りません。**製造能力の面から一般的に、60±2Hsの製品です。

解析用の材料データを60Hs、製品が62Hsということは良くあります。
1HS補正する場合、5%を考慮します。
つまり、±2Hsとは、－10～＋10%の変化、レンジで20%異なります。

製品の硬度が必ずしも解析用データと一致していない場合もあり、硬度の確認が必要です。

55

まとめ

解析予測が実測とあ合わない３つの原因

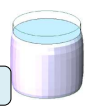
1．正確な正しいヤング率定義（ヤング率/６=C10 ネオフック）

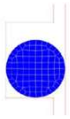
2．寸法公差

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

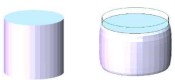
一般的には2級を採用、Oリングなど直径3mm以下の製品は10%程度差があり、面積では20%。
反力は20%差がみられる。





3．硬度差

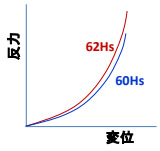
剛性と硬度の関係



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。



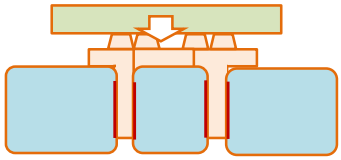
ゴムは寸法公差、硬度（中心±3Hsなど）差が大きい。
解析が合ってないと考えることも多い。⇒実際は合っている。

4．摩擦係数の誤解　寸法公差/勘合他

まとめ

複合的要因

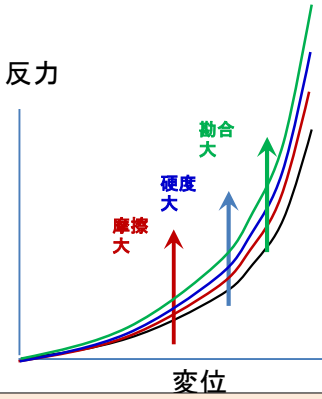
圧縮時の荷重



摩擦

硬度

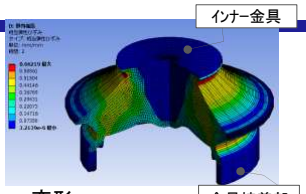
寸法公差/勘合他

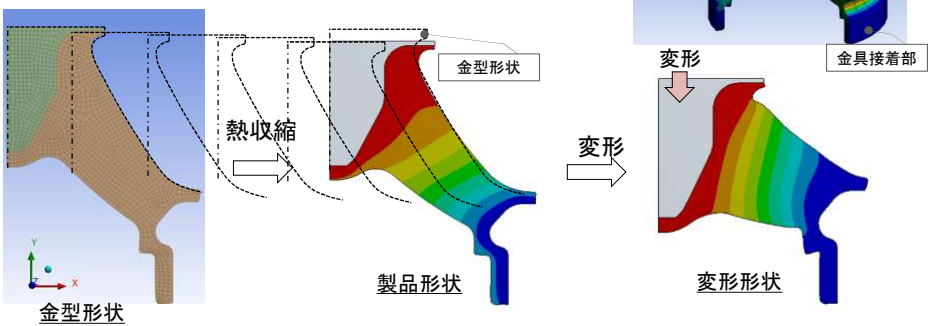


ゴムの様々なばらつきから安定品質の難しさ

ゴムのＦＥＭ解析　基本フロー

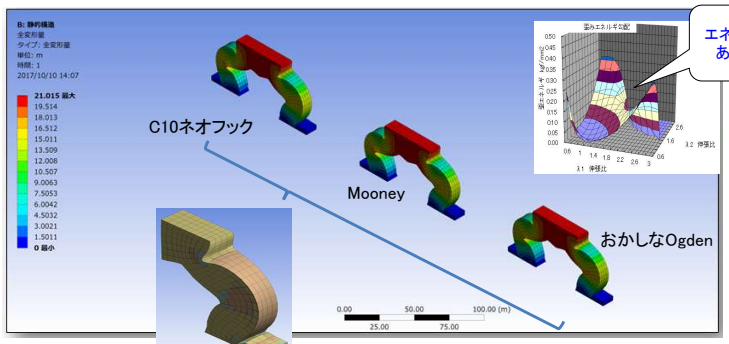
ゴム単製品は、**そのまま変形解析**を行えばいいですが、
金具接着タイプは、**熱収縮解析が必須**だと考えます。





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　の手順を守ることで、
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。

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、材料がい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。

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

<m(__)m>新人教育・解析実用化、なんでもサポートします。 オンサイト講習会から立ち上げ、実用化お任せください。<m(__)m>

寺子屋　サポート一覧　-ノウハウまでお届け、自立を支援する会社です-

CAE

FEM解析　材料定義からゴム・樹脂の大変形解析
線形解析の落し穴、課題解決

CAD　効率化～自動化のお手伝い
ノウハウからお届けします。

ABAQUS・MARCはじめすべてのソフト実用化～効率化、
サポートとの通訳対応します。どう質問していいのか～

ソフト選定・導入・運用・実用化まで

解析無料診断

材料定義

解析用材料定義、ゴム材料測定～回帰まで
Mooney、Ogden他対応します。

樹脂のヤング率、加工硬化係数
動解析のための粘弾性係数、
～緩和粘弾性係数（Proney級数）

富山など二軸伸張試験機習得サポート

二軸試験機ご提供から測定方法、公共機関の利用方法等

定義方法が不明という方から何でもご相談ください。

測定・計測

密度、ヤング率～ゴム非線形材料まで何でも
ところてん（心太）のような柔らかいゲルから金属まで定義

設計・開発サポート

ゴムの専門家ですが、樹脂他、なんでもご相談ください。
製造工程、品質管理まで

シミュレーションを通じたゴム製品の設計・開発・製造までお手伝い

ゴムに限らず 解析、設計、計測、信頼性（耐久性）評価までなんでもご相談ください。

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

講師の履歴書



進学校の予定が
推薦入学で
オリンピックめざし
インターハイまで

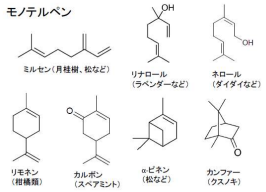
英語勉強せず
（化学と数学で突破）

ちょっとしたこと
推薦でなく受験

中学　⇒高校

大学

物理が苦手で化学専攻
香水の合成



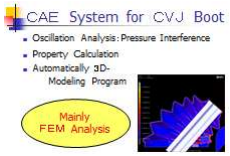
快い香りのものが多い

就職

防振ゴムの設計/**物理系**

1991年～　FEM解析
主担当・海外研修
解析マニュアル全て英語

2000年ころ
海外からの研修・講師



英語での講師

現在

物理系
FEM解析での仕事

化学系出身でもこの程度できます。

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

講師の履歴書

1986年　明治大学大学院工学研究科**工業化学専攻**で進学、
1988年3月　同大学修士課程修了。
1988年　株式会社フコク（自動車及びOA、一般ゴム部品メーカー）に入社
　防振（マウント、サスペンションブッシュ）設計に3年間配属
　研究部発足に伴い参画。
　　主としてFEM解析を主担当として導入提案から立ち上げ、運用に至るまで
　　実務・管理を担当し、防振製品・シール製品・樹脂ブーツ・超音波モーターの解析からの開発者自身の解析システムを効率化ともに推進。
　　設計・開発者ノウハウの構築を設計者と共に行い、解析及びCADの自動化導入で設計者による解析を展開、自部門は開発的解析に専念。
1991年～　**同志社大学に於ける二軸試験機でのエネルギー関数測定開始**
2003年～　アンシスジャパン様、ニュートンワークス様、日本ゴム協会様などで講師
2005年株式会社フコクを退社、山下ゴム株式会社に入社し、CAE部門技術構築

CAE解援隊HPを2008年より開設し、解析方法、材料データ構築についての技術情報配信に協力しながら、**2016年に独立、**
現在数社のコンサルタント業務と材料測定から解析用エネルギー関数の導出を受託。

化学系出身でもこの程度できます。

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

-2016年独立からのコンサルタント業務-

2016.4.　2016.7.　2020.9　2024.9　2026.4

起業

中國地域　土木・建築関係ゴムメーカー様

※6か月1期として、現在20期目継続中

2017.8. 関西地域 ゴムキャスト メーカー様

2018.8. 関東地域 ゴムホース メーカー様

2019.8. 北陸地域 家電ゴム メーカー様

中部 地域

ベン チャー 企業

化学メーカー 解析指導

九州・ゴム メーカー様

中部地域 土木関係ゴム メーカー様

関東地域 建機 メーカー様

デンソー メーカー様

関東 制振 部品

中部地域 デンソー関係ゴム メーカー様

関東地域 建築工具 メーカー様

中部地域 生活製品M様

関東防 振部品

関東 防振 部品

関東地域 建機 メーカー様2

関東地域 ゴムホース メーカー様

東北車 載部品

※オンサイト講習会　12社様（東北から四国、中部）

関東地域 建機メーカー様

中部地域 寝具・生活用品T様

42社様の解析及び効率化コンサルタント（10年、6年超も各1件）
92件ゴムシートの二軸測定から回帰受託試験
2016-1019年山形大学客員研究員（学生の教育係）ムラタソフト様へゴム材料提供（継続）他、メールベースでのコンサルティング業務上記以外多数

関東地域 防振メーカー様

韓国 2社

中部地域 寝具・生活用品M様

現状4社様 継続中

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

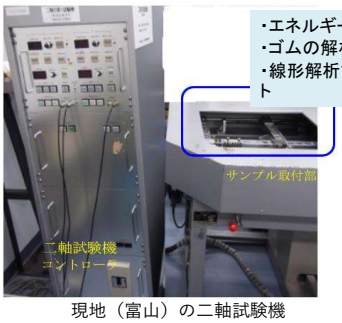
ゴムの二軸伸張試験、承ります。　-ゴムの専門家として解析適用までサポートします。-

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

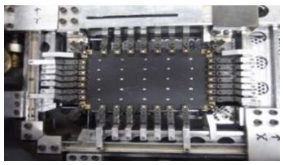
$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)+C_{20}(I_2-3)^2+C_{30}(I_2-3)^3$$

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
・線形解析での間違えやすい点、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

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・・・

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

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。



富山県産業技術研究開発センター（pref.toyama.jp）

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。



富山試験場へ（試験機はもらって‥）

試験場の環境、雪、ホテル‥‥

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

寺子屋　サポート一蘭

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

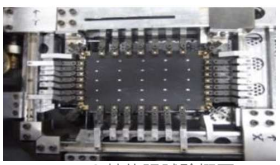
- **ゴム材料定義：ひずみエネルギー関数**
- **大変形テクニック～運用実用化**

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

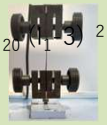
Mooney高次式

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

Ogden式

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

n＝５～７程度



寺子屋サポートサービス

シミュレーションを通じたゴム製品の設計・開発・製造までお手伝い
形状設計・型設計・工程改善

広島デジタルイノベ

{設計からゴムの大変形非接触解析までサポート可]

解析診断

条件設定見直し～予測精度改善

・予測精度が悪いは、勘違いが多い

設計・解析技術者の育成可能
・**ノウハウから提供します**ので自立支援です。

解析実用化

育成の
お手伝い

材料定義

解析情報発信

ソフト選定・導入・運用

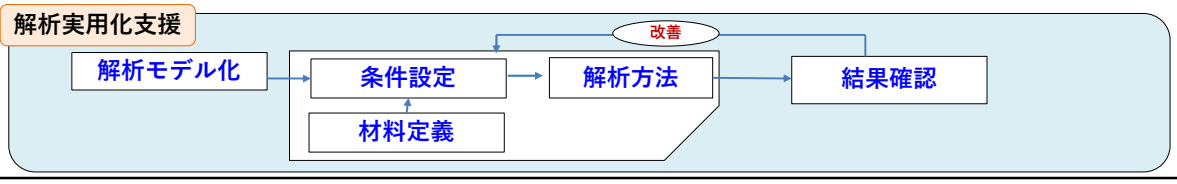
ソフトがない、導入にお困りの方、
導入・運用費用削減したい方歓迎です。

ゴム・樹脂の定義～**ゴム材のエネルギー密度定義**まで
・**公共試験場での測定から定義**、単軸試験機改良
・金属、樹脂の組成から加工硬化係数
・受託試験（できれば覚えて頂きたい、費用削減）

解析でできること
※落とし穴、やってはいけない解析定義、ソフトのバグ

2016年より解析実用化支援企業１５社様、材料試験３５０以上、ゴムの二軸試験ご指導１９社様他

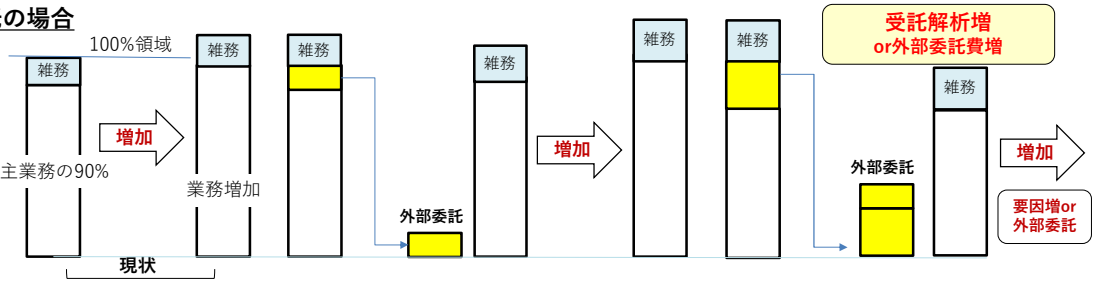
解析実用化支援



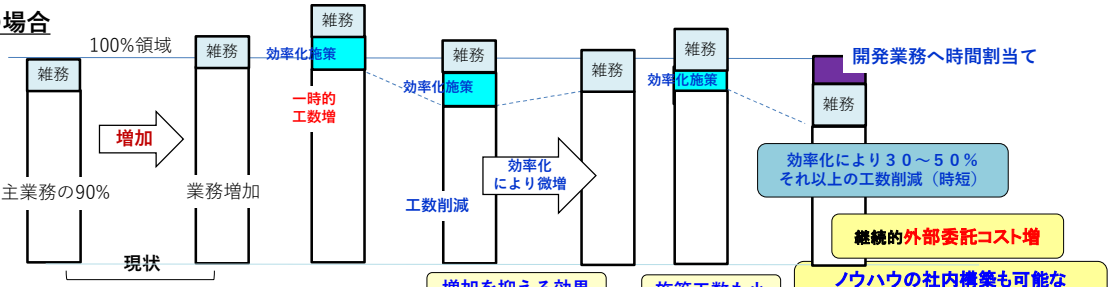
67

作図～解析・作業・業務の効率化に関する考え方

外部委託の場合



効率化の場合



© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

ＭＡＲＣ解析を公共機関で修得しませんか

だれでもできる解析・ＣＡＤの自動化/効率化
これとの組み合わせで１日で修得可能です。

20名程度、
1時間程度の実習で修得しています。

問合せはこちらから
https://terakoya2018.com/question

寺子屋/CAE解析隊
連絡先 mail@terakoya2018.com

兵庫県 工業技術センターでMARC習得しませんか

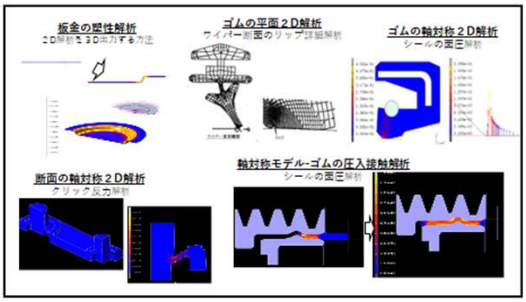
1日で基本修得でき、その後電話サポートなど。試験場使用料込み20万円～



１日でFEM/MARC-ゴム製品の解析を修得 –タイムスケジュール

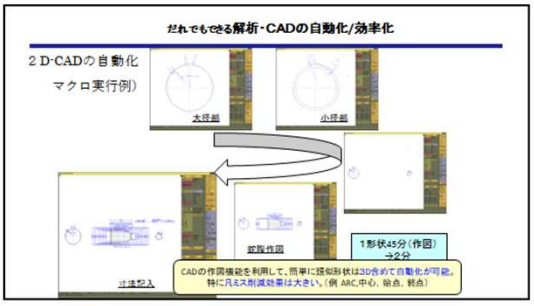
週末を利用して、神戸・秋田でMARCを１日で修得しませんか。講習後は、バックアップ万全です。
製品・設計業務にゴムのCAEを効果的に活用するための基礎理論とFEM解析技術を展開　理論、実習両

1、解析の基礎　理論及び実習
　1）メッシュの作成からモデル化：平面ひずみ、平面応力、軸対称要素の説明と解析
　2）メッシングの基本実践と理論：ご要望により講座、解析モデル持ち込み可
　　メッシュ作成の基本から解析まで簡単なモデル、もしくは お持ち込みモデルでの解析
　3）解析結果の見方：ひずみ、応力、剛塑なひみ特性、面圧、その他
　　ゴムの基本として応力評価してはいけない！理論説明含めて
2、解析応用　2D～3次元への展開
　1）モデリング手法/拡張　2）解析条件設定　3）結果の見方と結果を簡単に出力する仕組み
　2）解析の自動化～CAD自動化への展開　ここまでAM/実習中心・理論は補助
　3）詳細求及び収束解析
3、解析の活用事例
　1）スムージング解析（面粗度など）　2）ズーミング解析：局部の詳細解析への展開
　3）鏡形解析でも絵りやすいポイント、改善方法
※理論：ゴムのFE解析[参照]プレゼント、詳細の説明あり。また、オペレーションのみではなく、
順次、解析の基礎及び注意すべきポイント、ゴムの解析用材料データの構築について説明。
導入検討・即開発適用、３０万円-税ですぐに2次元（平面、軸対称）から3次元展開まで使えるようになります。

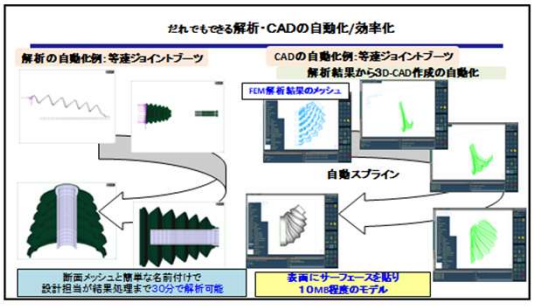


69

だれでもできる解析・CADの自動化/効率化

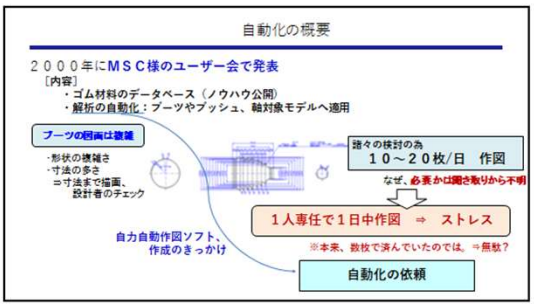


だれでもできる解析・CADの自動化/効率化



自動化の概要

２０００年にＭＳＣ様のユーザー会で発表
［内容］
・ゴム材料のデータベース（ノウハウ公開）
・解析の自動化：ブーツやブッシュ、軸対象モデルへ適用



自動化の概要

打ち合わせ時のキーワード、（ソフト作成する予定の方の）たった一言。
“はじめから寸法入れて描いてしまえば・・・”

寸法分かれば描ける
あちこちメール出して
CADの先生探し
CADでの書き方の勉強

EXCELの計算式利用
各部の寸法計算
（三角関数など）

週末、全曜15～17時 CADの基本を教えて頂く
・作図（線を描く、円を描く、フィレットを描くetc.）　・寸法の描き方
・寸法の位置決め・編集　・前例のご指導に対する質疑⇒質問

4週、週末の勉強会 ⇒ 終了後大文で、飲み会
「指導料5万円商品券 ＋懇親会費2万円（交通費）」×4
別途、先生の紹介料 商品券5万円　⇒ 約33万円(交通費含め40万円以下)

全曜の勉強会、土日に振れないように作業 ⇒次週質問を持って勉強会 ⇒ 自力でソフト作成

70

解析材料提供から解析見直しまで

1）二軸試験からひずみエネルギー密度関数　導出

2）単軸試験からデータベース検索、ひずみエネルギー密度関数　推定

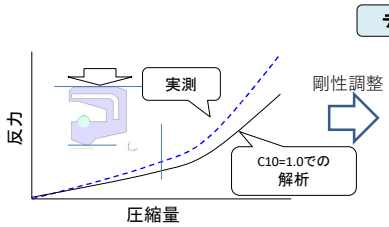
Mooney式：　$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{01}(I_1-3)(I_2-3)+C_{20}(I_1-3)^2+C_{30}(I_1-3)^3$

N/mm2

せん断弾性率	C10	C01	C11	C20	C30
9.500	4.27702E+00	6.56858E-01	-1.39251E-01	-2.14736E-02	1.15420E+00

豊富なデータベースから適切なデータを推定。Ogdenも提供可。

3）材料試験ができない場合、製品の測定と解析から**特定**



データベース検索

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

試験なしで硬度から・・
ただし注意が必要

経験を生かしたいろいろな方法で定義可能です。

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

セミナーのご案内

PR

ゴム関連の技術セミナーを定期開催しています。
個別にオンライン及びオンサイトでのセミナー開催も可能ですので、お気軽にご相談ください。

スライドショーでリンクします

ゴム解析の基本から製品開発への展開		2026年9月4日　10:30～16:30 ゴムタイムス社様
系統的に学ぶ 実践　ゴム製品のCAEを利用した設計開発 ～製品開発から製造への型設計、耐久性向上の実践とポイント～		2026年10月13日　10:30～17:30 日本テクノセンター様（予定、告知前）
ゴム解析入門 二軸引張試験から超弾性材料モデルの構築について事例を交えて紹介	無料	2026年7月2日　10:30～11:30 日本テクノフォート社主催
防振ゴム設計入門 設計の考え方からCAE解析のポイントを事例を交えて紹介	無料	2026年7月2日　13:30～14:30 日本テクノフォート社主催
ゴムシール設計入門 設計の考え方からCAE解析のポイントを事例を交えて紹介	無料	2026年7月2日　15:30～16:30 日本テクノフォート社主催

CAE解析、Office自動化ヒント

管理者必見 CAE･FEM解析の効率的活用術
-CAD作図自動化・解析自動化を絡めた開発者、設計者解析と運用コスト削減法-

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

ゴム二軸試験サービス

PR

当社で開発したゴム専用の二軸引張試験機を使い、低コストでゴムの二軸引張試験サービスを提供しています。
また、二軸試験データからCAE解析に必要な超弾性材料モデル（Mooney、Ogden等）の材料定数を算出するサービスの提供も行っています。

ゴム材料試験サービス - 超弾性材料モデルMoony高次係数 -	単軸試験　19.8万円～ 二軸試験　29.8万円～
二軸引張試験機 ~~貸出~~/販売	~~貸出　20万円～~~ 販売　295万円



ゴム専用
二軸引張試験機

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

寺子屋　サポート一覧　-ノウハウまでお届け、自立支援する会社です-

CAE

FEM解析　**材料定義**からゴム・樹脂の大変形解析
線形解析の落し穴、課題解決

CAD　**効率化～自動化**のお手伝い
ノウハウからお届けします。

ABAQUS・MARCはじめ**すべてのソフト実用化～効率化**、
サポートとの通訳対応します。**どう質問していいのか～**

ソフト選定・導入・運用・実用化まで

解析無料診断

材料定義

解析用材料定義、ゴム材料測定～回帰まで
Mooney、Ogden他対応します。

樹脂の**ヤング率、加工硬化係数**
動解析のための粘弾性係数、
～緩和粘弾性係数（Proney級数）

富山など二軸伸張試験機習得サポート

二軸試験機ご提供から測定方法、公共機関の利用方法等

定義方法が不明という方から何でもご相談ください。

測定・計測

密度、ヤング率～ゴム非線形材料まで何でも
ところてん（心太）のような柔らかいゲルから金属まで定義

設計・開発サポート

ゴムの専門家ですが、樹脂他、**なんでもご相談ください。**
製造工程、品質管理まで

シミュレーションを通じたゴム製品の設計・開発・製造までお手伝い

ゴムに限らず 解析、設計、計測、信頼性（耐久性）評価までなんでもご相談ください。

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

ご清聴ありがとうございました

寺子屋
https://terakoya2018.com/
TEL：080-2230-8785
MAIL：hagi@terakoya2018.com

日本テクノフォート株式会社
https://monocollab.jp/
TEL：03-5050-2665
MAIL：inf@monocollab.jp

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.