

- ゴムの超弾性解析の肝 ダイジェスト版 -

ゴムの解析の基本、たった3項目を守れば格段に予測精度向上

第1弾

自己紹介

ゴムの解析の難しさ

これさえ押さえれば簡単



第2弾

超弾性解析の基本

粘弾性解析の基本

第3弾

防振ゴム設計

疲労寿命

2022.9.29. 寺子屋

寺子屋/CAE解援隊

連絡先 hagi@terakoya2018.com

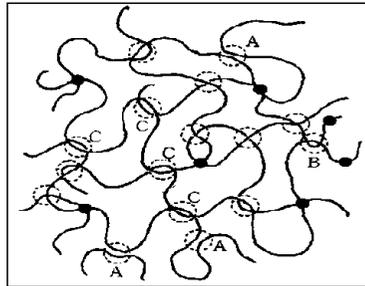


ゴムの基本から解析方法、材料について

ゴムの分子鎖構造概念

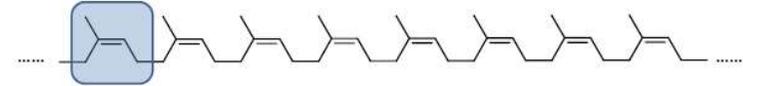


ゴムの分子鎖構造概念



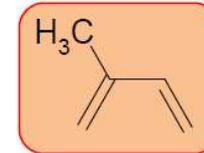
● 架橋点
A,B,C 分子間力

天然ゴムの構造



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C₅H₈ユニット(イソプレン)
のポリマーである

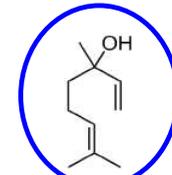


イソプレン
2-メチル-1,3-ブタジエン

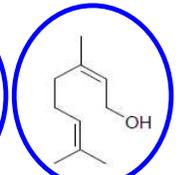
モノテルペン



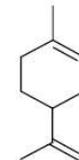
ミルセン(月桂樹、松など)



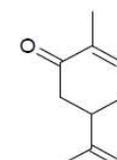
リナロール
(ラベンダーなど)



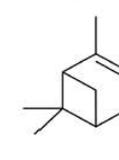
ネロール
(ダイダイなど)



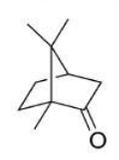
リモネン
(柑橘類)



カルボン
(スベアミント)



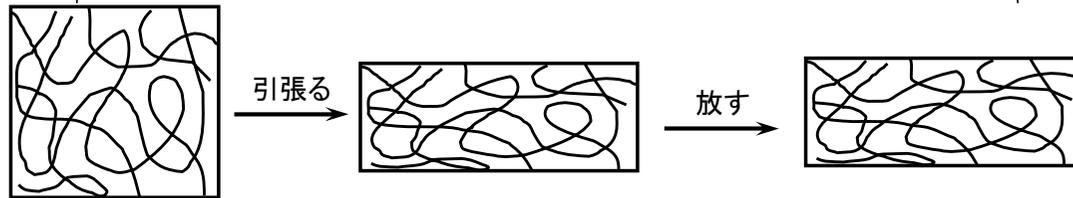
α-ピネン
(松など)



カンファー
(クスノキ)

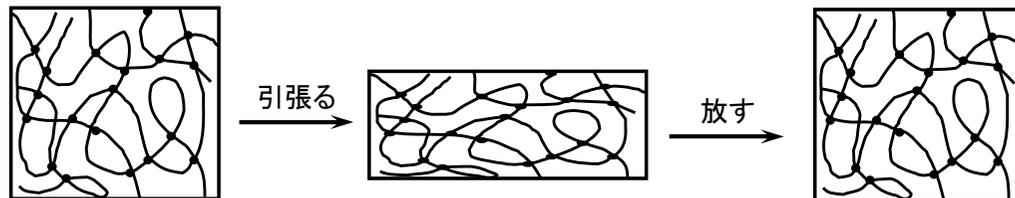
快い香りのものが多い

生ゴム



塑性変形

架橋ゴム



弾性変形



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 $\lambda = 1 + \varepsilon$ として表現

テンソルとして、

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

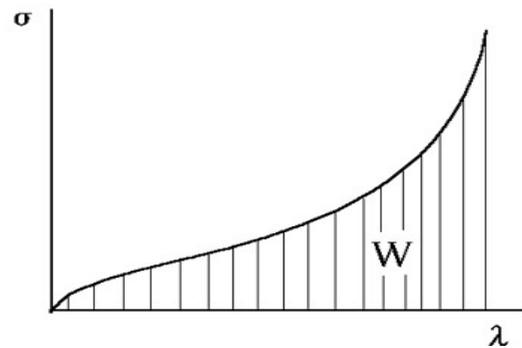
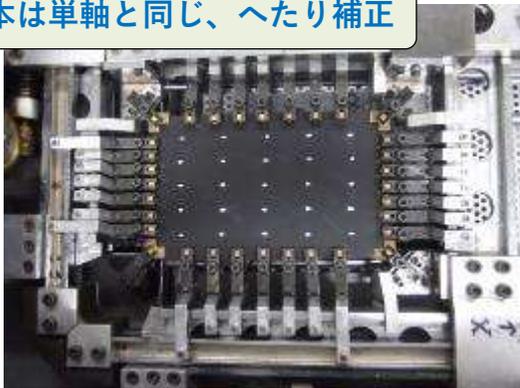
$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$$

[対角線効果]

[面積効果]

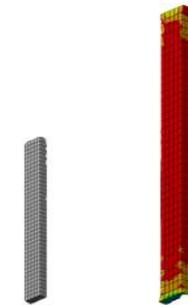
[体積効果]

基本は単軸と同じ、へたり補正



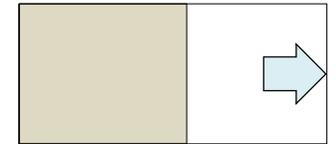
二軸試験概要

単軸試験

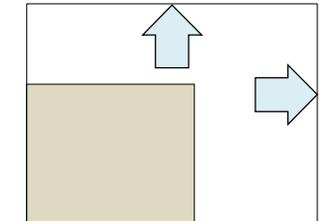


短冊

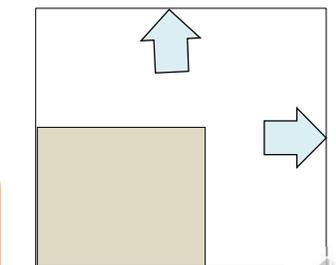
一軸拘束二軸試験



二軸試験(不均等)



均等二軸試験



よく聞かれる話ですが、**単軸、一軸拘束二軸伸張(純せん断)、均等二軸**のすべてのデータを使うと精度が上がります。

嘘ではありませんが、かなり課題が大きいです。



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 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

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

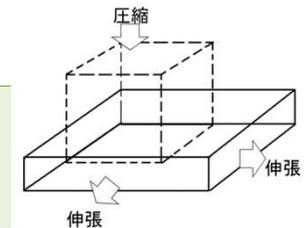
$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad \text{[対角線効果]}$$

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

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

※ $I_3=1$ 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。

元のデータが同じ
予測精度は同じ

1960年ころ、現JSR様

川端先生

Mooneyさん

河合先生

坂口先生

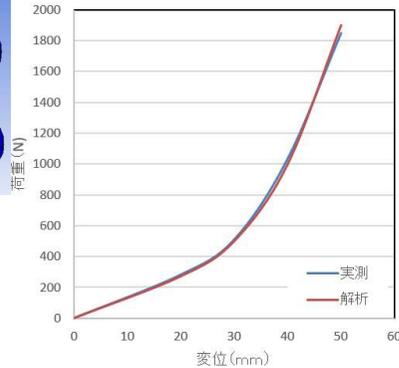
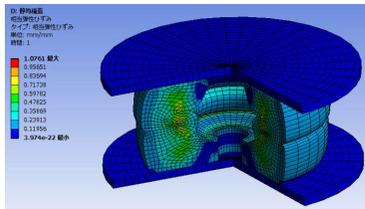
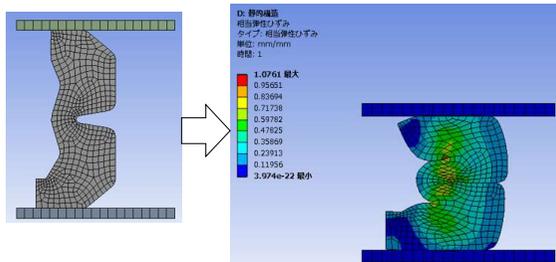
JSR社員 薮田氏

このころ二軸試験機が出来てきた。(ほぼ完成型)

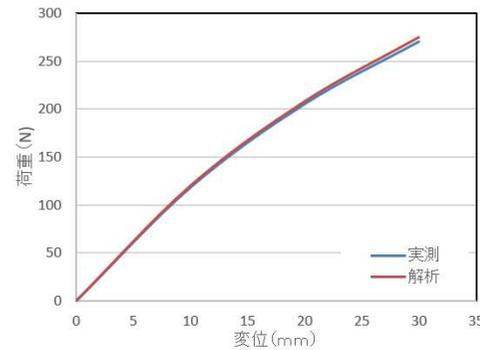
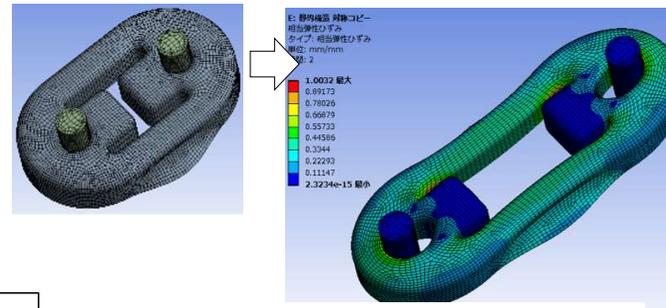
ひずみエネルギー密度関数定義

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

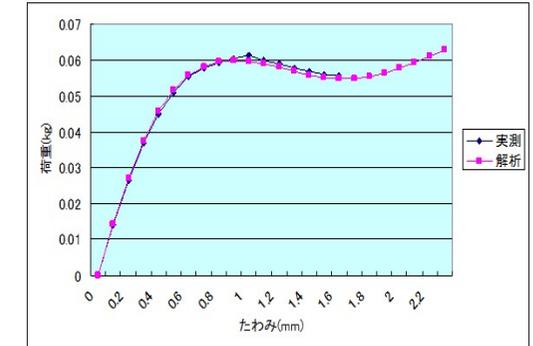
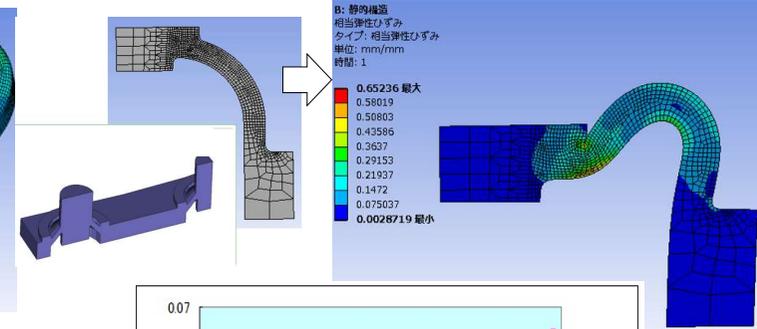
ラバースプリングの変形解析



マフラーマウントの変形解析



ラバーコンタクト変形解析

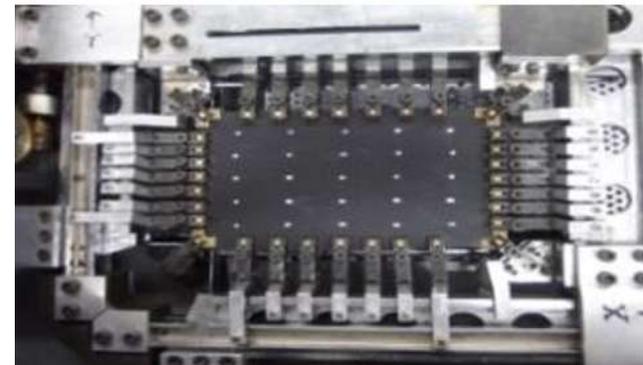


実測と解析が1本の線に見えるように二軸試験からのデータでの解析は、予測精度がアップします。

従来の二軸試験機

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

※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

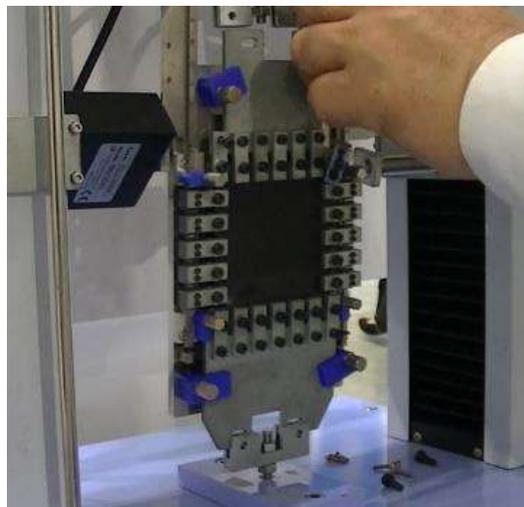
従来の試験機は、横置き型・大型 非常に高価
800～1,000万円 定価ベース

新規縦型の簡易二軸試験機 一軸拘束二軸伸張（純せん断）専用

解析精度向上に、この簡易二軸試験機の一軸拘束の領域で十分と考えます。（証明、根拠あり）



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



- ・一軸拘束二軸伸張専用
- ・富山試験場もご紹介（前ページ試験機）
- ・群馬館林近郊でも使用
- ・福山通運便でもお届け／レンタル

自宅の一室で使用
半日開放、方法、回帰方法
ご指導します。

従来型に比べて、安価な製作費でできます。（4分の1程度製作費）
一軸拘束二軸伸張試験専用（変形状態3ページ）です。
製品の解析には、最も適した変形状態から解析データを構築します。

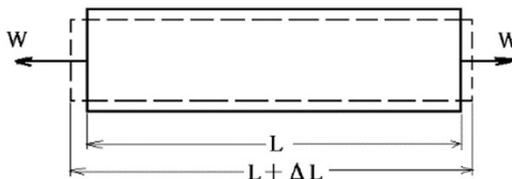
ひずみエネルギー密度関数定義がなくて単軸試験でも

単軸試験の課題 - 形状依存について -

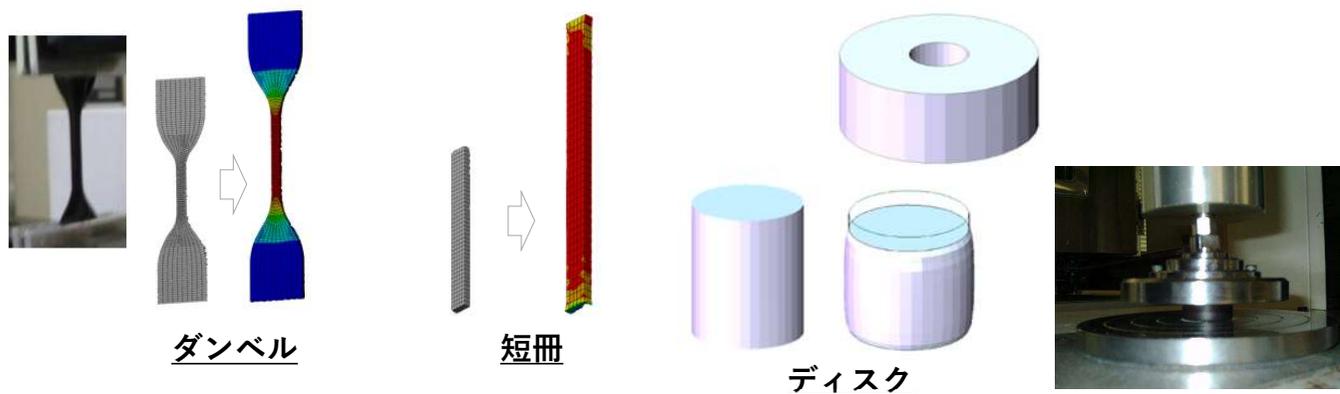
材料力学から

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

応力とひずみの関係の基本式

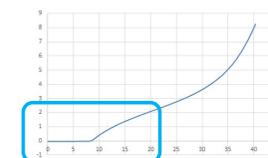
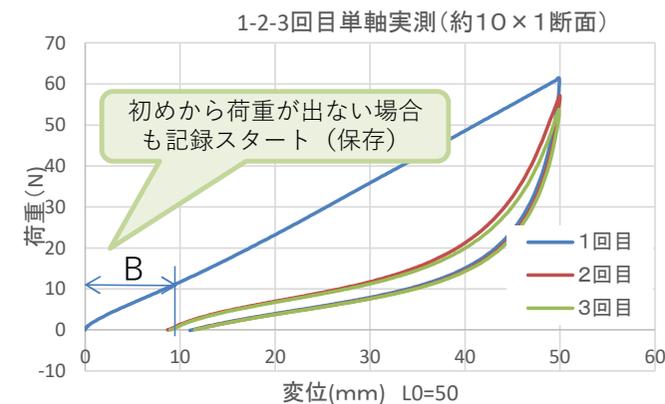


形状率依存性



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。

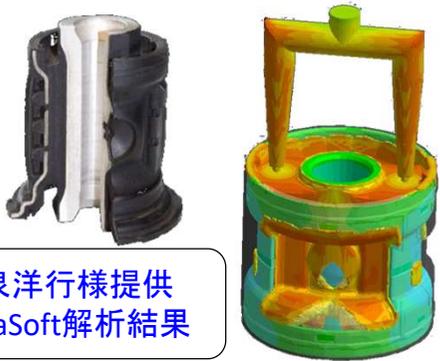
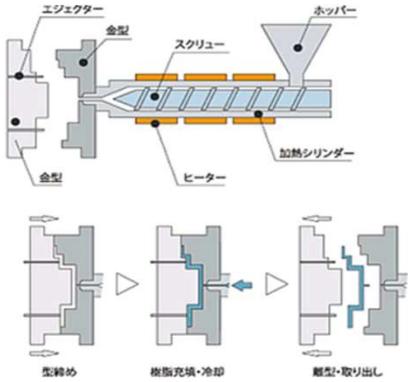
守るべきポイント1



守るべきポイント2

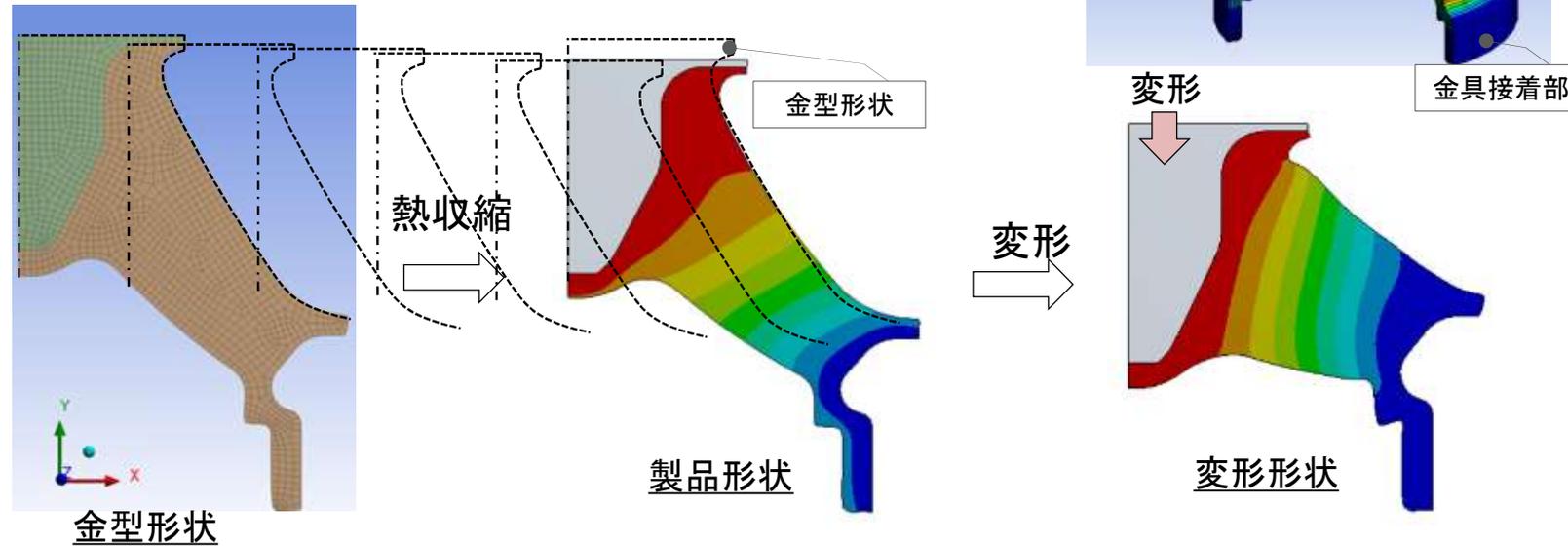
ゴムのFEM解析 基本フロー

ゴムは厚い金型で成型...



平泉洋行様提供
SigmaSoft解析結果

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。



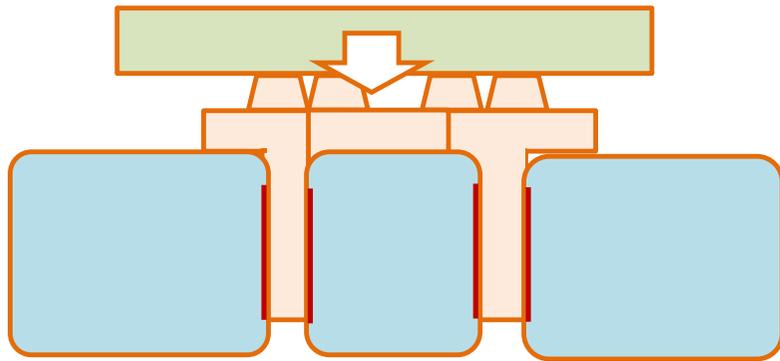
製品の加工工程を考慮することは、ゴム製品のみではなくすべての製品に当てはまります。
金型形状 ⇒ (熱履歴)熱収縮 ⇒ 変形解析 の手順を守ること、
解析による**予測精度を格段に向上**させることができます。



守るべきポイント3

ゴムの公差 60Hs、3mmという大きさ、摩擦は？

圧縮時の荷重



摩擦

摩擦で大きく特性が変化する

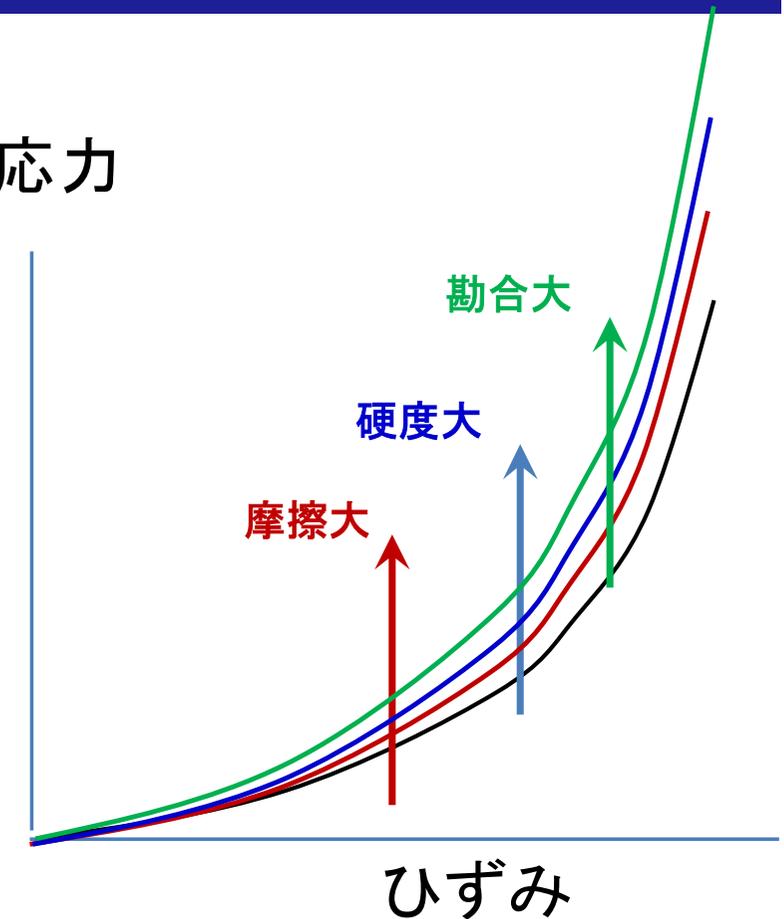
硬度

硬度は1~2Hsくらいずれる
剛性は1Hs-5%異なる。

寸法公差/勘合他

例えば、 $\Phi 3\text{mm}$ のOリングでも
 $\pm 0.3\text{mm}$ 10%も寸法が違う

応力

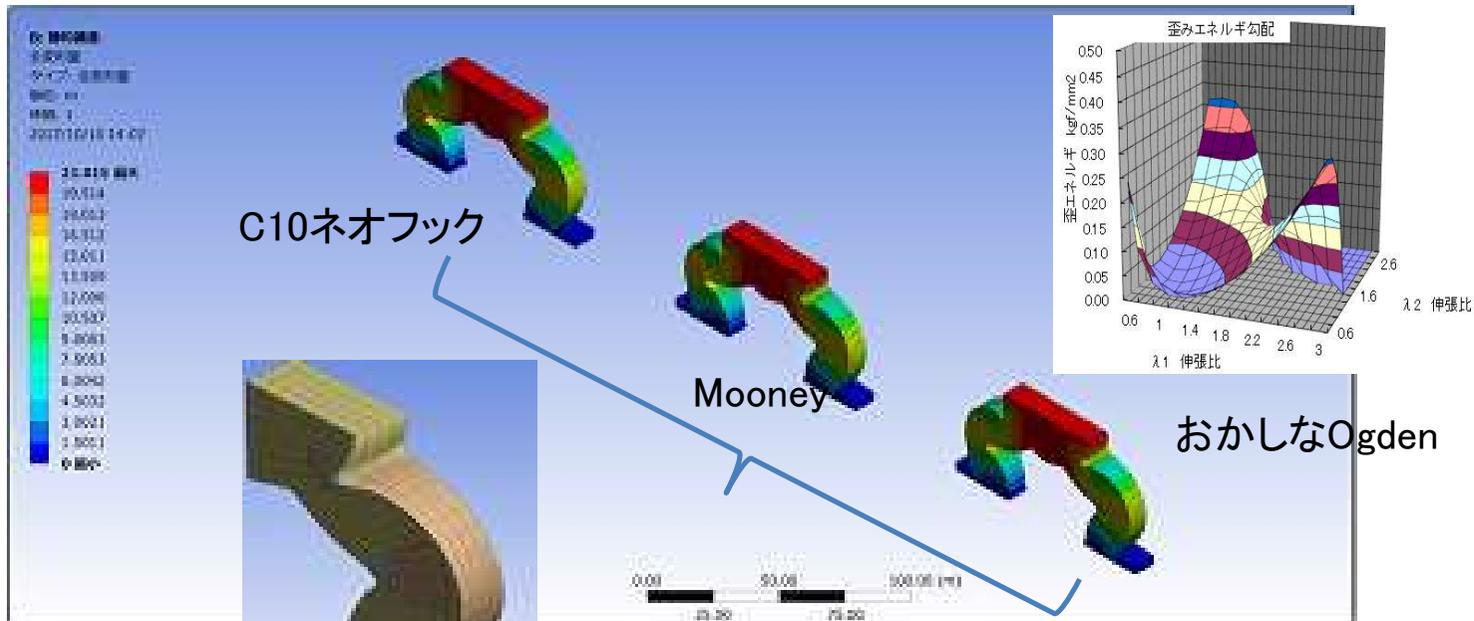


ゴムの様々なばらつきから安定品質の難しさ



その他

非圧縮性ゆえの変形図が同じになる（防舷材）

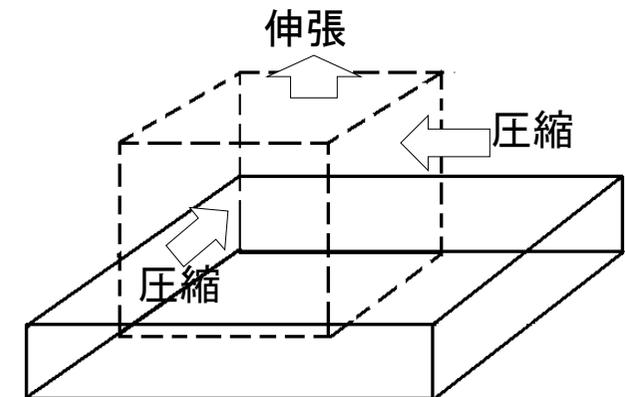


形状比較

特性が全く異なっても形状はほぼ一致。
⇒形状が一致したから
予測が合っているという過ち。

ポアソン比

$$\text{ポアソン比 } \nu = \frac{\Delta \text{幅} / \text{幅}}{\Delta \text{長さ} / \text{長さ}}$$



最近0.3に近いポアソン比の情報が
出回っているので注意。
(ポアソン比≒0.5で充分)

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

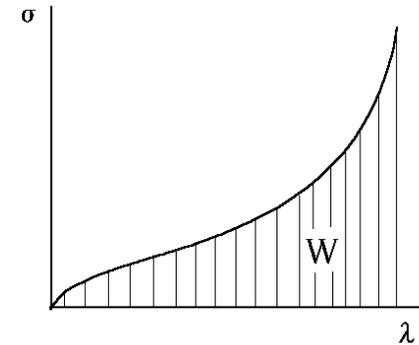
$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$$

[対角線効果]
[面積効果]
[体積効果]



1) Neo-Hookeanモデル

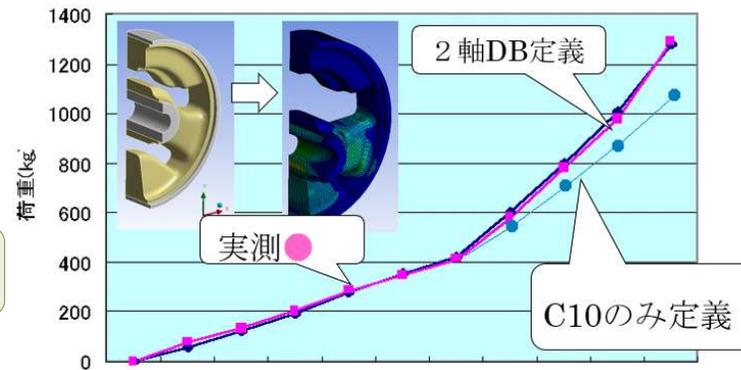
$$W = C_{10}(I_1 - 3) \dots \text{最も単純な材料表現}$$

$$C_{10} = E/6 \quad \text{の関係}$$

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



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

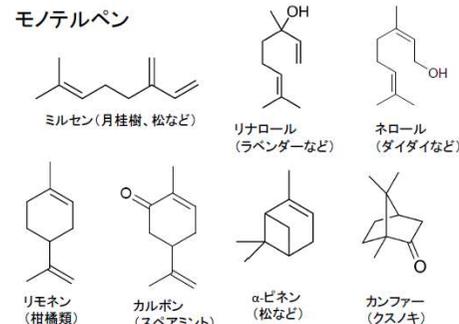
中学 ⇒ 高校

大学

物理が苦手な化学専攻
香水の合成

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



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

現在

物理系
FEM解析での仕事



英語での講師 2000年ころ
海外からの研修・講師

化学系出身でもこの程度できます。

寺子屋代表 自己紹介YouTube ご覧ください

https://www.youtube.com/watch?v=fpEvkk_wow8&t=17s

広 告

検索：ゴムの解析 寺子屋2018

解析のお手伝い

ゴムの解析用データ構築
超弾性・粘弾性～耐久まで

ゴムの各種測定

二軸伸張試験

セミナーの開催

基礎の無料セミナー

解析自動化・効率化

予測精度向上

オンサイトサポート

お客様向け有料セミナー

ご要望に合わせてカスタマイズ

解析立ち上げ

解析実用化

全体をまとめた書籍

初心者のための
ゴムの有限要素法解析

Finite element analysis of rubber
for beginners

萩本光広 著

寺子屋は発展するCAEと一緒に学びながら成長していく会社です。

寺子屋/CAE解援隊

連絡先 hagi@terakoya2018.com



寺子屋 サポート概要

ノウハウを提供する会社です。自立して頂く・・・
ゴムのお困りごと、何でも相談ください。

CAE適用

立ち上げお手伝い

・セミナー、育成サポート（座学）

・解析初心者ご指導

・ゴム材料定義

・解析条件の定義方法、見直し/間違え易い定義

・結果の見方、処理

実用化・運用

線形～大変形解析

・クリープ～応力緩和解析

・動解析

・熱・金型設計

・衝撃、落下解析

・疲労寿命/耐久性予測

効率化

・CAD自動化

・解析自動化/条件設定、結果処理

・リバースエンジニアリング
変形状態のCAD化、Assy組み込み

品質管理

・不良原因解明

・原因の可視化

・工程改善

知識集約情報発信
標準化はCAEの役割です

寺子屋/CAE解援隊

連絡先 hagi@terakoya2013.com



1991年から同志社大学で坂口教授のもとで研究スタート、今も勉強中

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

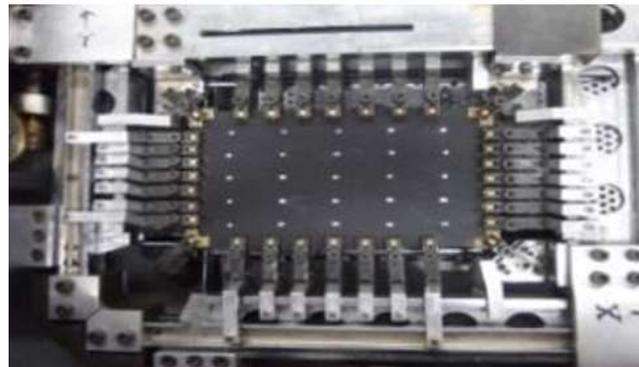
二軸伸張試験実施 ⇒ひずみエネルギー密度関数(Mooney, Ogden等回帰、係数算出。 25万円～複数割あり

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

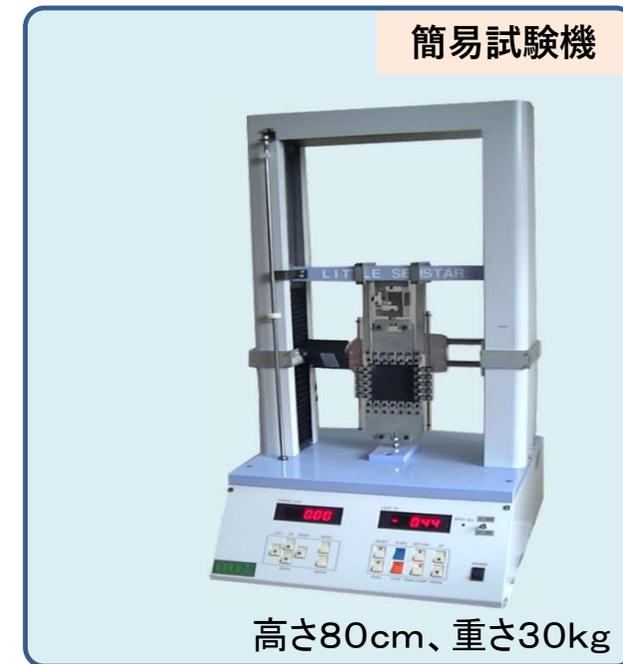
Ogden定義も可能です。



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



サンプル取り付け部



現地（富山）の二軸試験機

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。



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。

The screenshot shows the homepage of the Toyama Prefecture Industrial Technology Research and Development Center. At the top, there is a Google search bar and navigation links for 'WWWを検索' and 'センター内を検索'. Below this is a main navigation menu with icons and text for 'HOME', '技術支援 Program', 'センター概要 About', 'お知らせ News', '主要設備 Facility', '刊行物 Publication', '研究開発 Development', and '産業財産権 Industrial property rights'. A breadcrumb trail reads 'ホーム > 概要 > 組織・研究職員 > 生活工学研究所'. Below the breadcrumb, there are links for '概要・沿革', '組織・研究職員', and '交通案内'. The main content area is titled '生活工学研究所' and features a photograph of a modern building. To the left of the photo, there is a text block describing the center's focus on research and development for products related to '衣' (clothing), '住' (living), and '遊' (leisure). At the bottom of the page, contact information is provided: 〒939-1503 富山県南砺市岩武新35-1 TEL:0763-22-2141 FAX:0763-22-4604. A speaker icon is visible in the bottom right corner of the screenshot.

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

連絡先 hagi@terakoya2018.com

080-2230-8785

富山県産業技術研究開発センター (pref.toyama.jp)

無料セミナーはご招待いただき開催も検討

セミナーのご案内

ホームページに無料・有料セミナー順次更新

ゴムの解析基礎・応用

防振ゴム設計・解析基礎
応用

シール設計・解析基礎
応用

ゴムの粘弾性から耐久性

解析・CAD自動化

解析実習
1日でMARC習得

ひずみエネルギー密度関数
サンプル無料プレゼント

第2弾ゴムタイムス社様から発売中
アマゾンからも購入可
第1弾(超弾性部のみ)プレゼント

問い合わせの方 第1弾(超弾性部のみ)ゴムのFEM解析 まもなく完売
メール: hagi@terakoya2018.com

初心者のための
ゴムの有限要素法解析

萩本光広 著

コロナ社

