

# ゴム材料の二軸試験からひずみエネルギー密度関数の導き方 ～【ノウハウ直伝】二軸試験実習付き講習会～

2019年10月4日(金) 寺子屋 萩本

於: 富山県産業技術研究開発センター生活工学研究所



CAE  
コンサル

Free  
CAD

産学公の「コラボレーション」  
を通じて  
「もの創り」を支援します

技術  
セミナー

CAE  
解析

材料  
試験

もの創りコラボ

# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~10:40

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率について

サンプルゴムを選ぶ上で、本当に求めたいヤング率が求められない現実を理解し、サンプルゴムをどのように選定し、ゴム製造メーカーへの上手な問い合わせ方法を提案します。

### 1-3. 二軸理論と実習前の試験機の操作概要と注意点

ネオフックからムーニー高次関数、またオグデンでの定式化を説明します。

## 2. 単軸試験実習 10:45~11:30

昼食休憩

## 3. 二軸試験実習 12:15~15:00

## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ 15:00~16:00

EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~11:00

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率について

サンプルゴムを選ぶ上で、本当に求めたいヤング率が求められない現実を理解し、サンプルゴムをどのように選定し、ゴム製造メーカーへの上手な問い合わせ方法を提案します。

### 1-3. 二軸理論と実習前の試験機の操作概要と注意点

ネオフックからムーニー高次関数、またオグデンでの定式化を説明します。

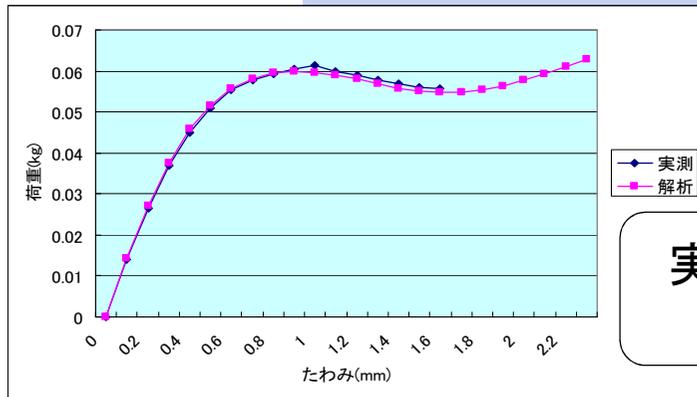
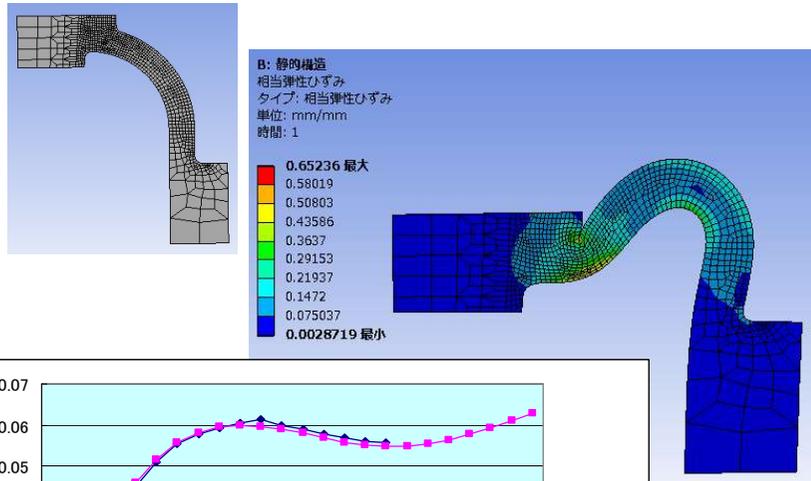
## 2. 単軸試験実習 11:00~12:00

## 3. 二軸試験実習 13:00~15:00

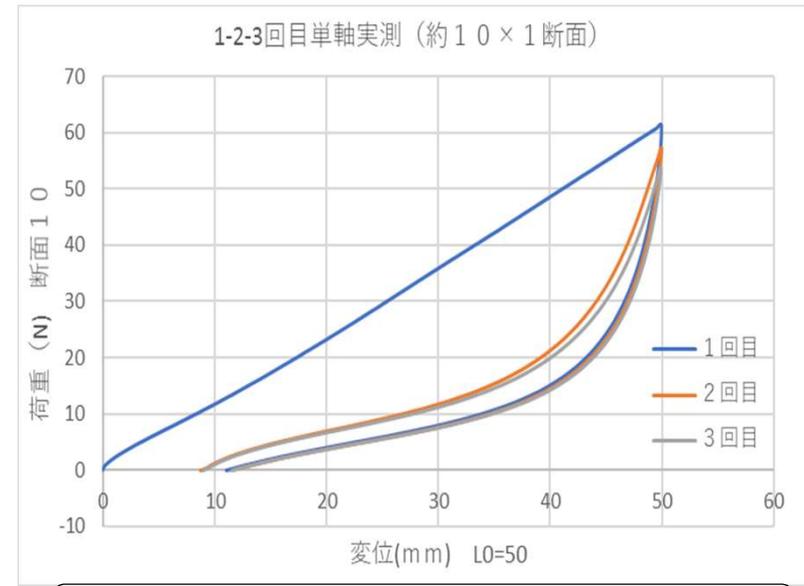
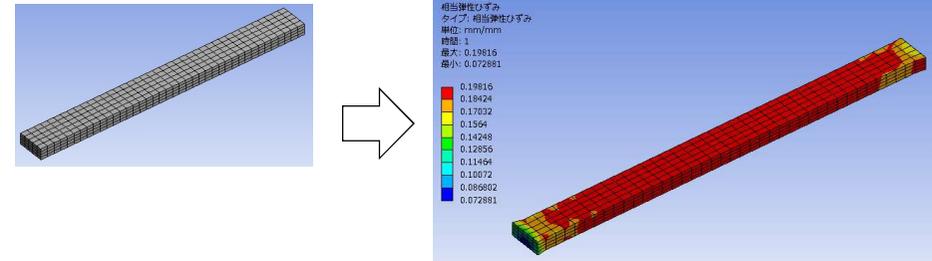
## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ 15:00~16:00

EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

# 特性予測がなかなか合わないことありませんか？ 製品測定は1回目なのに材料測定は3回目という間違いはないですか？



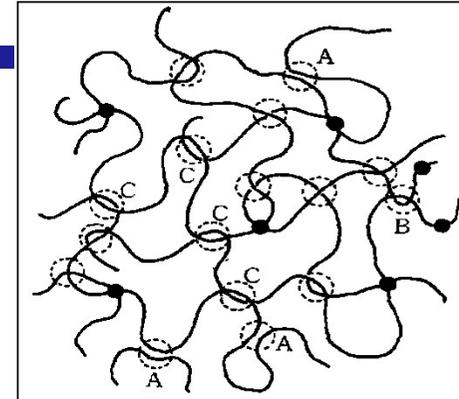
実測と解析が  
よく一致



短冊でも1, 2, 3回目の特性は違います。

ゴムの1, 2, 3回の伸張データは違います。JISで防振ゴムは安定性から3回目のデータと規定していますが製品に合せた適用が必要です。

# ゴムとは

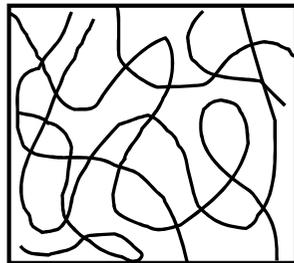


● 架橋点  
A,B,C 分子間力

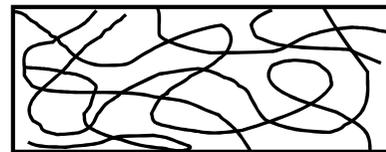
ゴムの分子鎖構造概念

ゴムの分子鎖構造概念

生ゴム



引張る

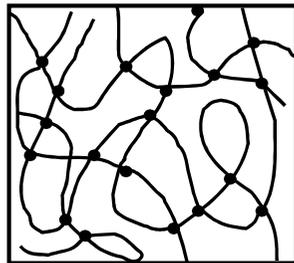


放す

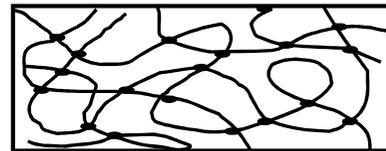


塑性変形

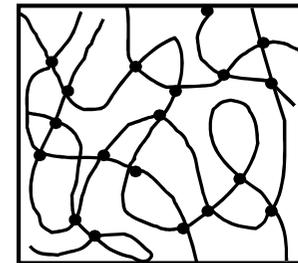
架橋ゴム



引張る

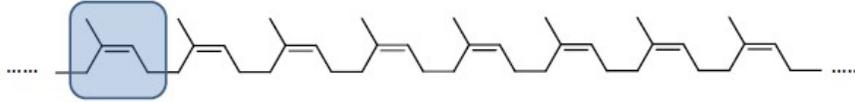


放す



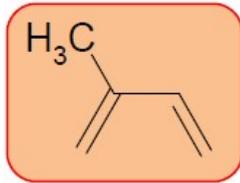
弾性変形

## 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C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>ユニット(イソプレン)  
のポリマーである

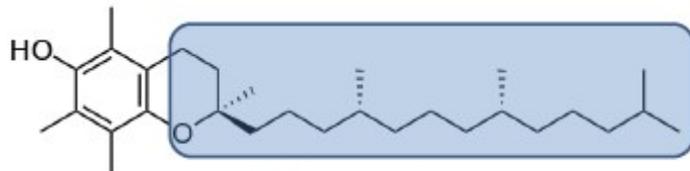


イソプレン  
2-メチル-1,3-ブタジエン



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

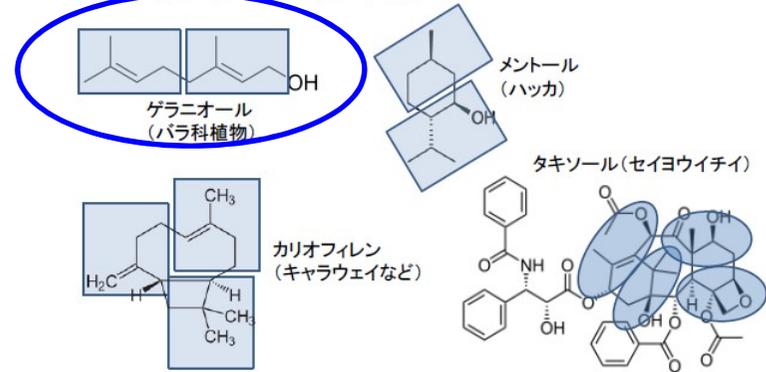
○印のジイソプレンの香料の研究を大学で  
共通と考え私はゴム部品の製造会社へ



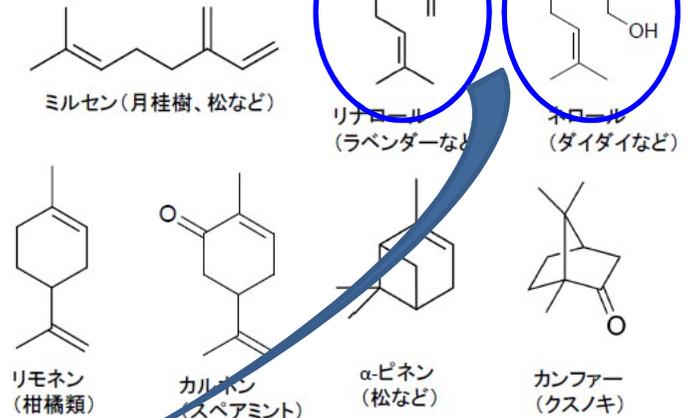
ビタミンE(α-トコフェロール)

## テルペンとは

- ・イソプレン単位がいくつかつながった構造を基本としてできた化合物群
- ・植物・動物・細菌類など、幅広い生物群がテルペン類を生産する
- ・Diels-Alder反応、各種骨格転位により、複雑な環構造をとるものが多い
- ・香料・医薬など付加価値の高い化合物が多い



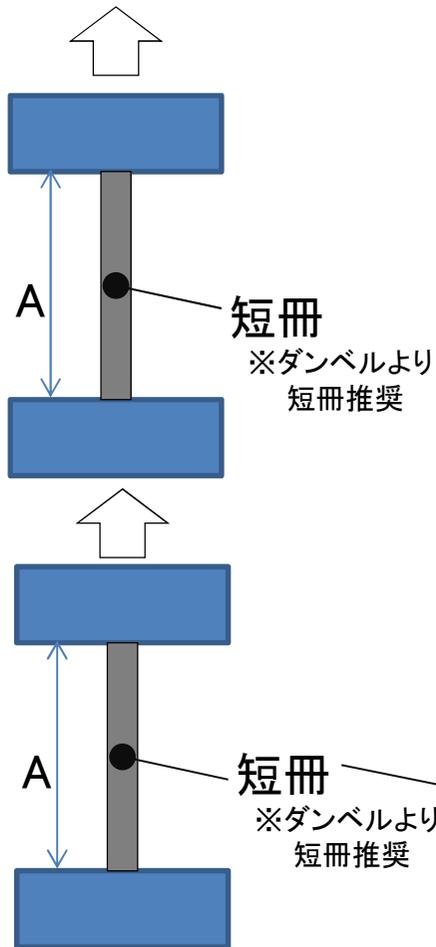
## モノテルペン



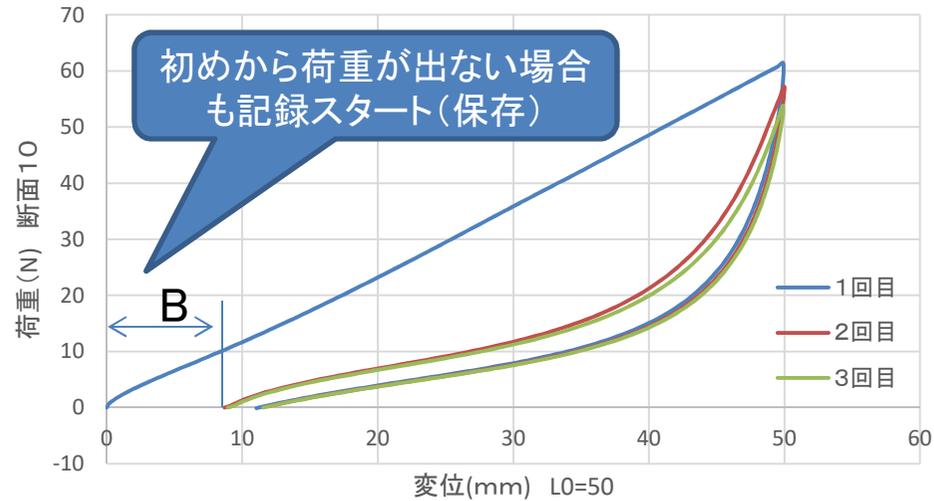
快い香りのものが多い



# 単軸試験手順書：重要ポイント

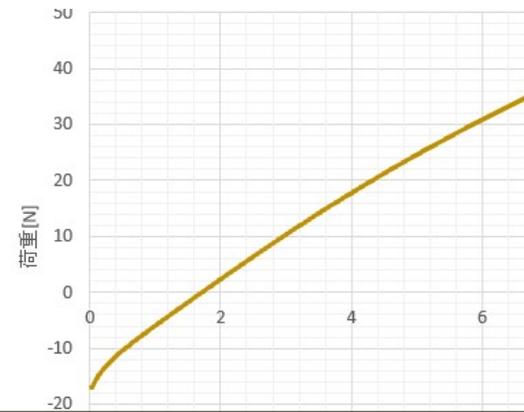
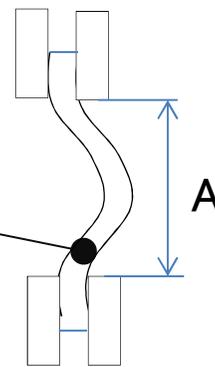


1-2-3回目単軸実測(約10×1断面)



記録

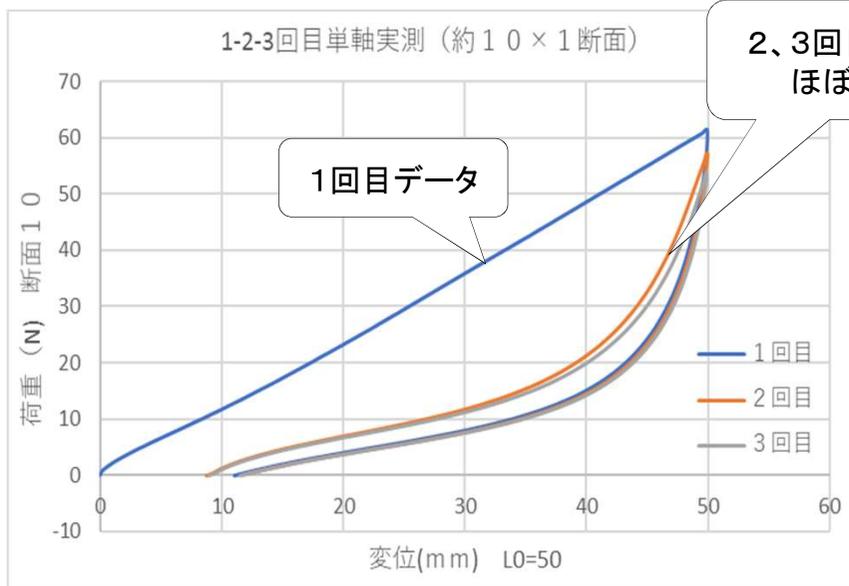
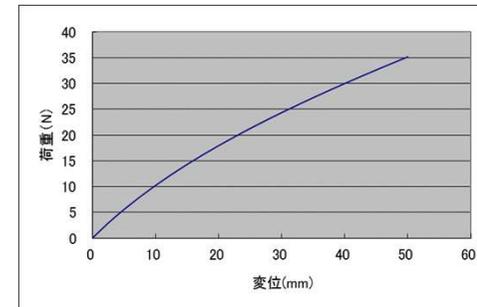
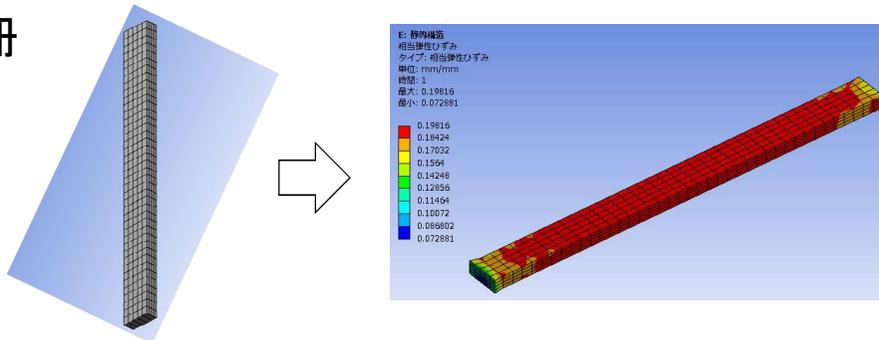
- ・A
  - ・幅
  - ・厚さ
- 1/10mm単位



二軸も同様

# 一軸試験 1、2、3回目の特性

短冊

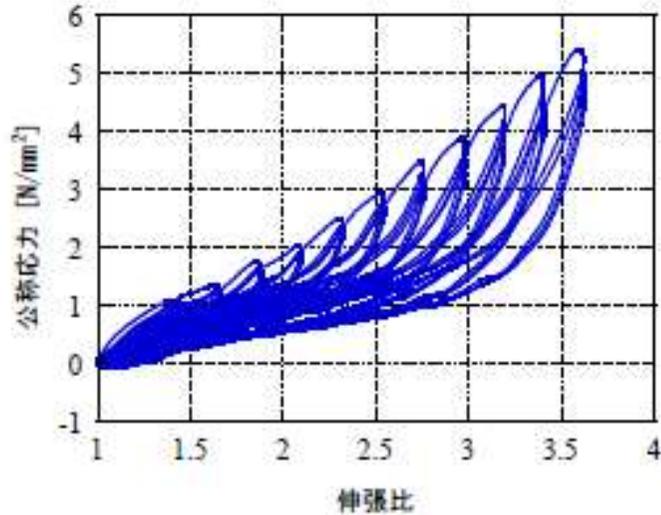


1回目と2回目は大きく異なり、  
2回目と3回目は少し異なります。  
3回目以降はほぼ重なります。

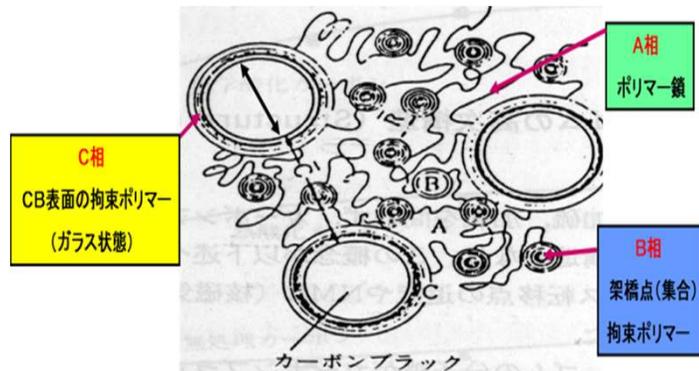
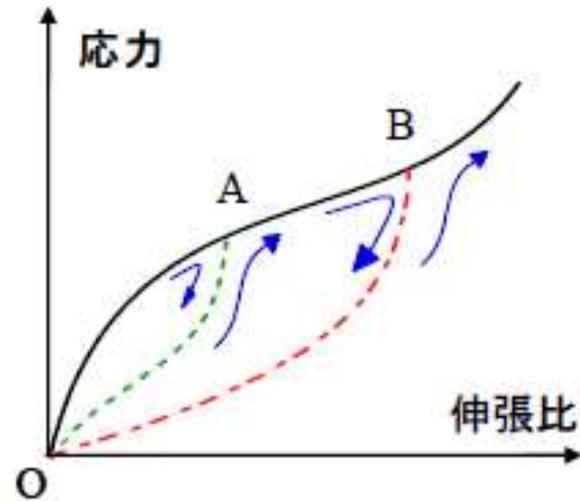
ゴムの3回の伸張データは、上記のように  
安定性から3回目のデータとJISでは規定しています。

# ゴムの特性・履歴効果 (Mullins' 効果)・ペイン効果

## 履歴効果



モデル化



履歴効果、ほか  
初期特性に影響する  
ペイン効果がある。

# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~11:00

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率について

サンプルゴムを選ぶ上で、本当に求めたいヤング率が求められない現実を理解し、サンプルゴムをどのように選定し、ゴム製造メーカーへの上手な問い合わせ方法を提案します。

### 1-3. 二軸理論と実習前の試験機の操作概要と注意点

ネオフックからムーニー高次関数、またオグデンでの定式化を説明します。

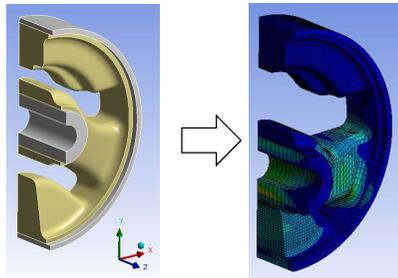
## 2. 単軸試験実習

## 3. 二軸試験実習

## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ 15:00~16:00

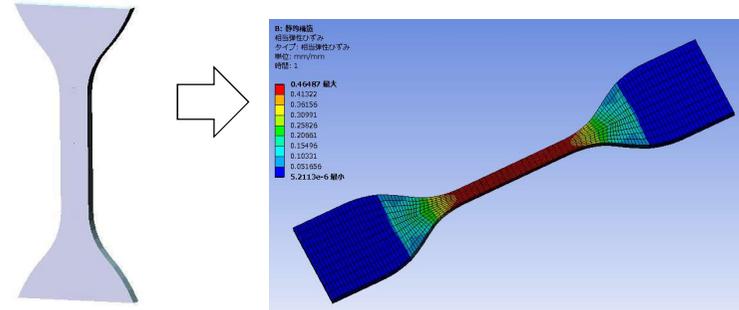
EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

ネオフック  $W=C_{10}(I_1-3)$  での解析で、初期特性から合わない経験ありませんか？  
 丁寧に材料試験を実施して、ネオフックなら大丈夫と思ったのに・・・。

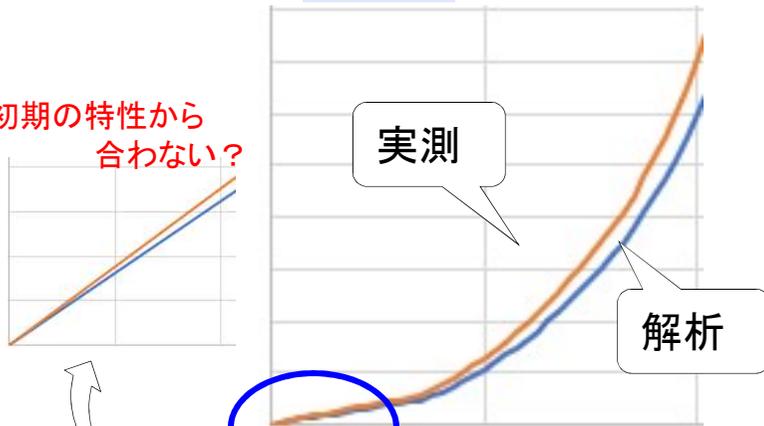


- ・工学ひずみ  $\epsilon = \text{変位} / \text{チャック間距離}$
- ・工学応力  $\sigma = \text{荷重} / \text{断面積}$

ヤング率  $E = \sigma / \epsilon$

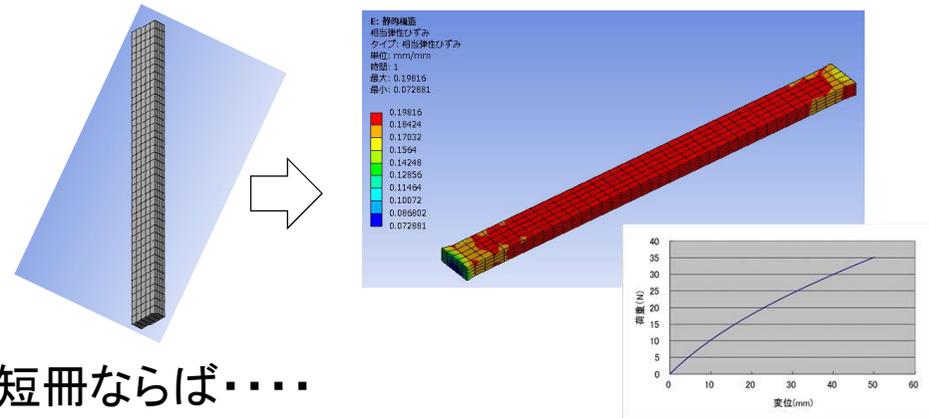


初期の特性から  
合わない？



こんな経験ありませんか？

残念ながらダンベルは  $\sigma = \epsilon E$   
 が成り立ちません。なぜでしょうか、



短冊ならば・・・

単純なネオフック、ヤング率でも注意しないと合わないこともあります。

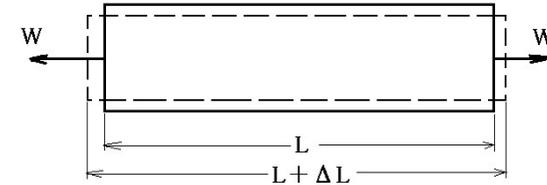
# 材料力学と解析用データベースの関係

材料力学から

はじめに疑問を  
投げかけたもの

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

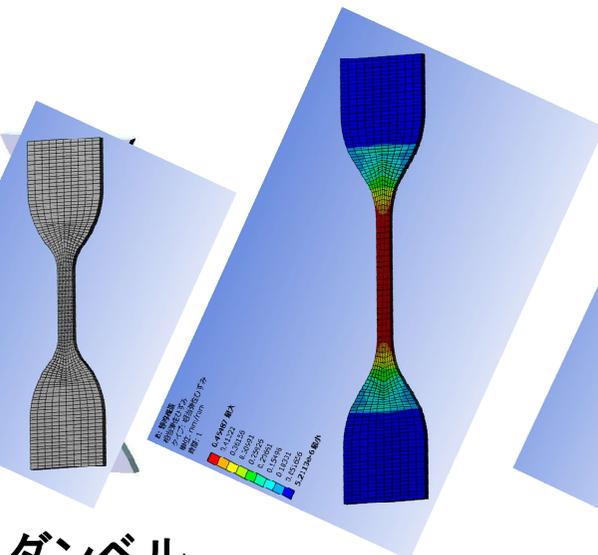
応力とひずみの関係の基本式



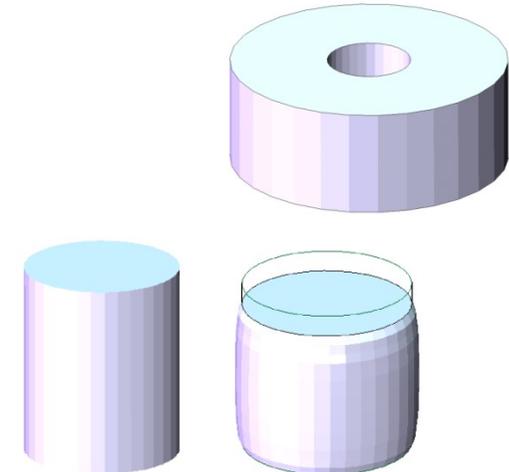
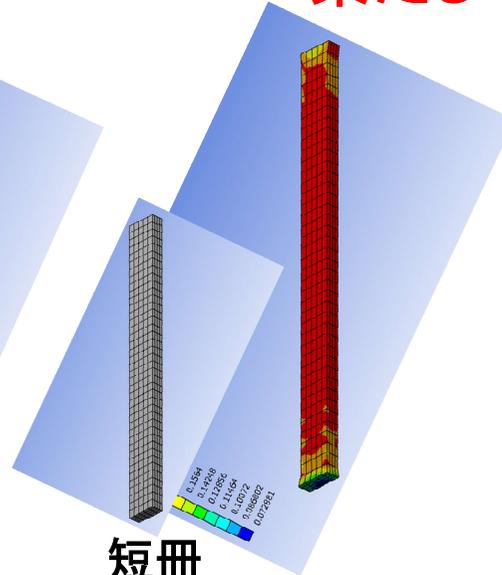
果たしてそうでしょうか？



ダンベル



短冊



ディスク

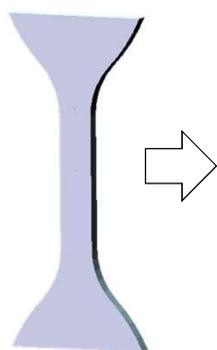
# ダンベルによるヤング率算出と・・・

ひずみ  $\varepsilon$  = 変位 / チャック間距離

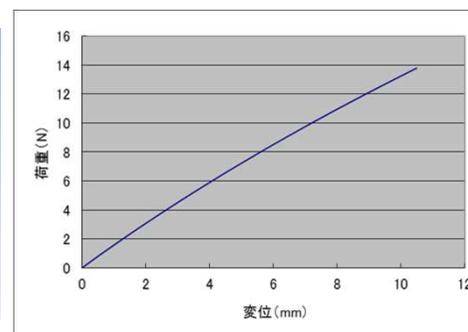
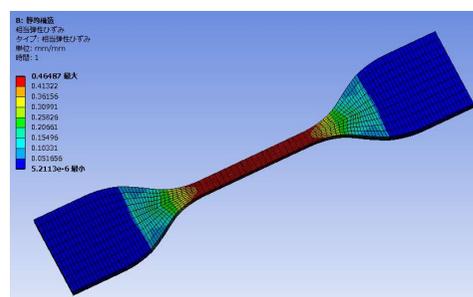
応力  $\sigma$  = 荷重 / 断面積

$$\Rightarrow E = \sigma / \varepsilon$$

ダンベル

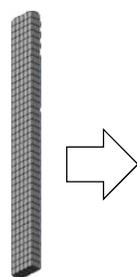


ヤング率  $E=1.0$  での解析・計測  $\Rightarrow$  結果  $E=1.27$

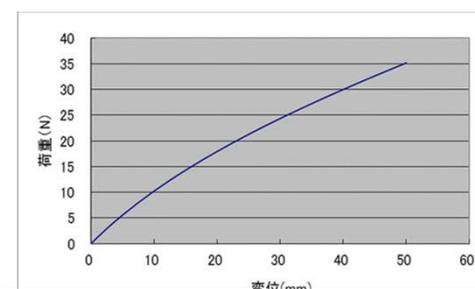
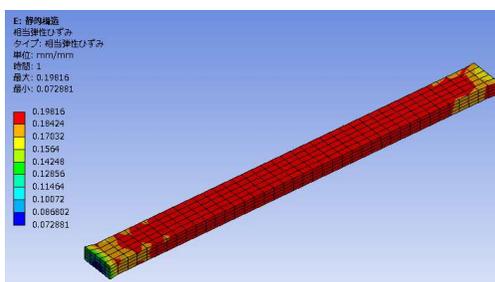


参考: 標線間1.05

短冊



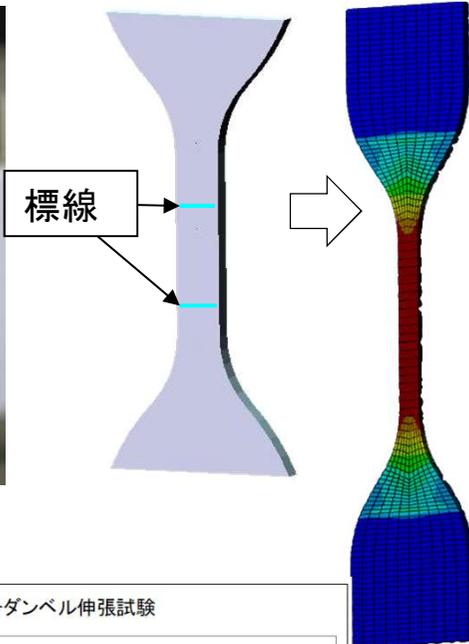
ヤング率  $E=1.0$  での解析・計測  $\Rightarrow$  結果  $E=0.98$



ダンベルと短冊で異なるヤング率を示す

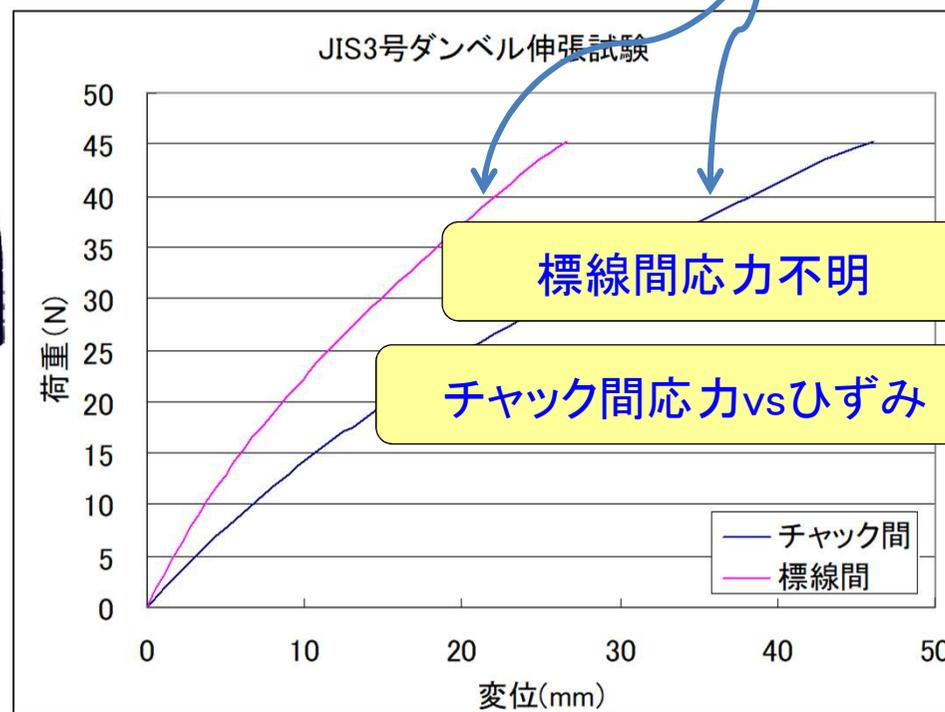
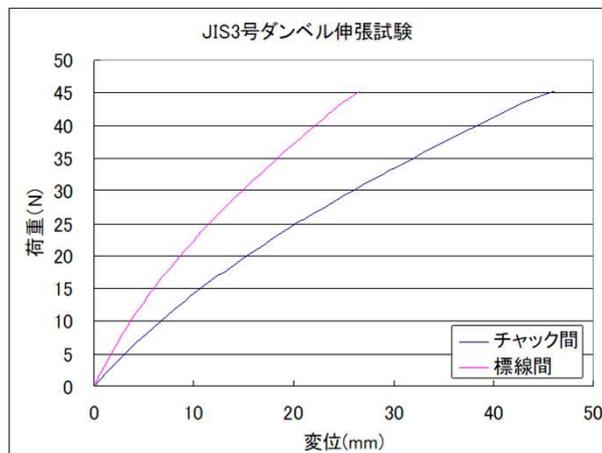
解析に必要な測定法を明確にする

# 伸び、強度測定方法

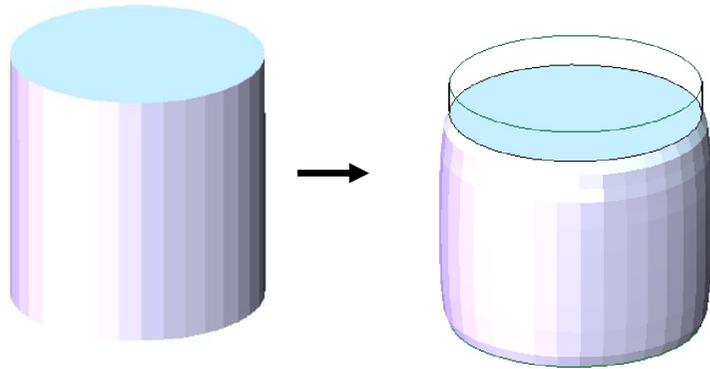


まず、ゴム材扱う部門  
⇒ 標線間ひずみで測定

チャック間に換算  
⇒ 30%程度大きいヤング率



# ディスクによるヤング率算出



$\Phi 18 \times h26\text{mm}^3$

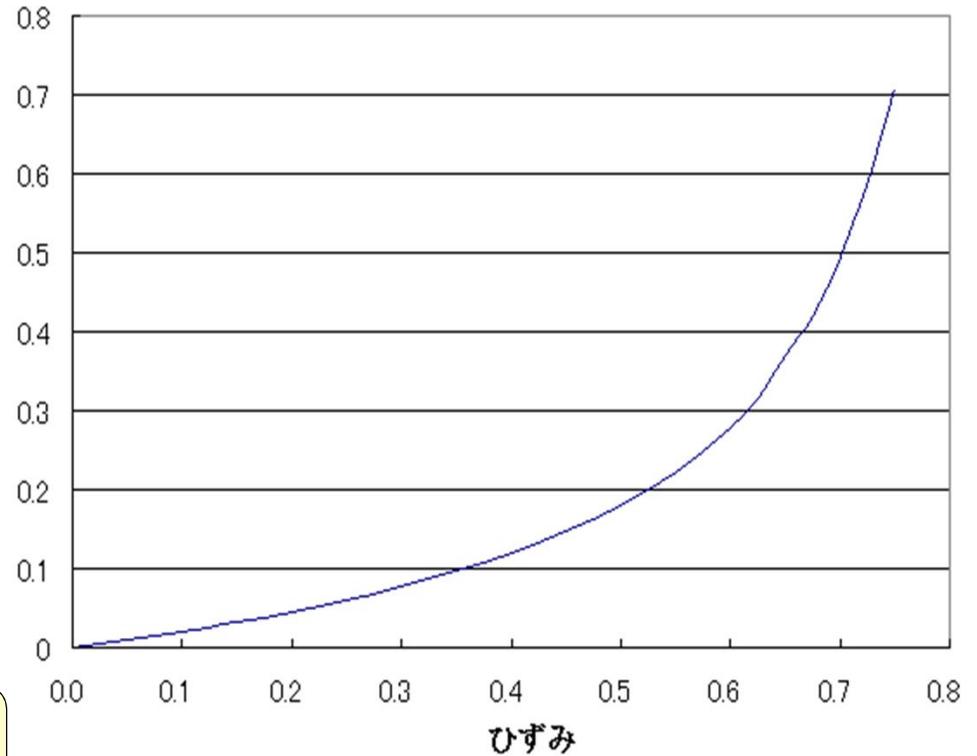
入力(材料)  
ヤング率  $E=1.0$

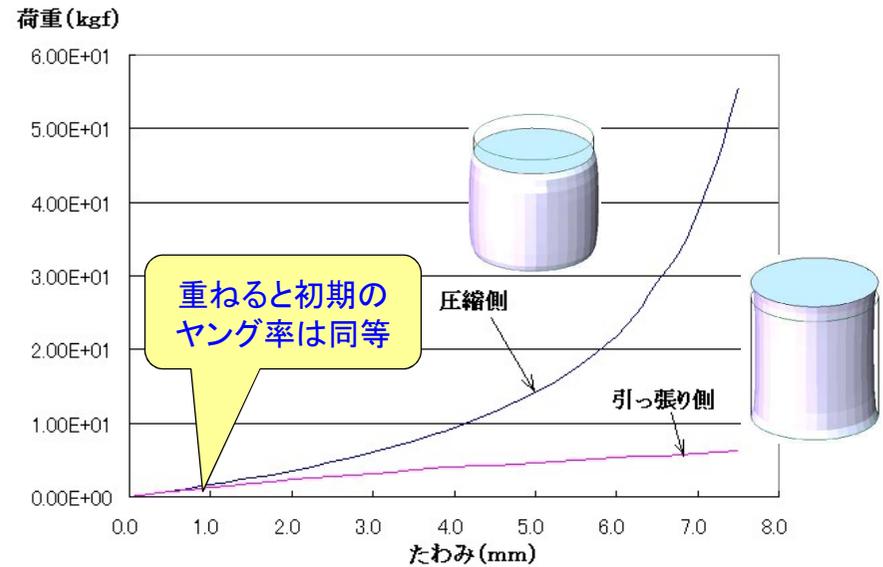
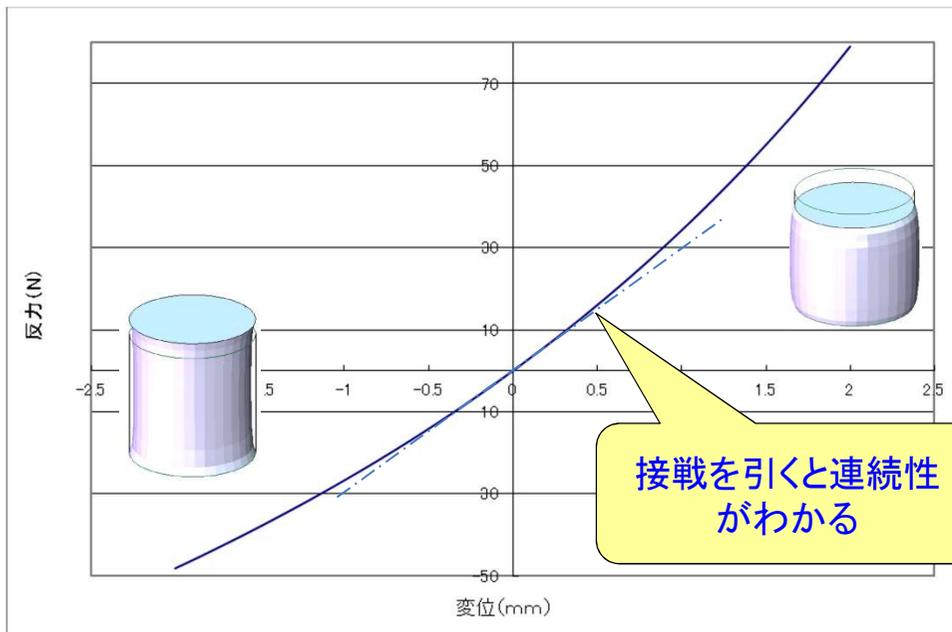
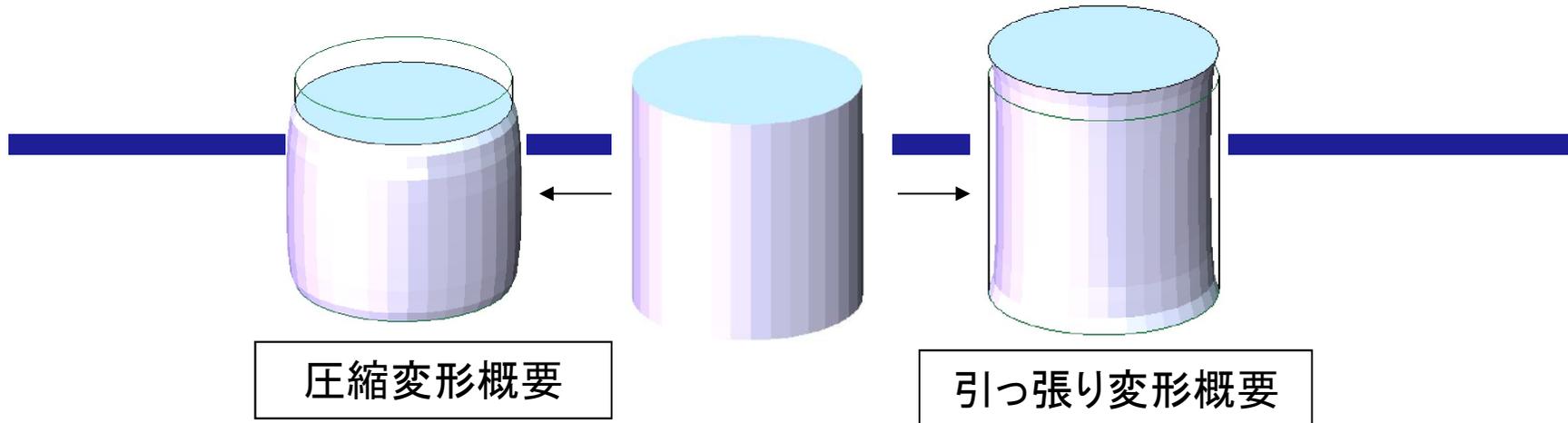


結果  $E=0.79$

真のヤング率は求められない。

応力(kgf/mm<sup>2</sup>)



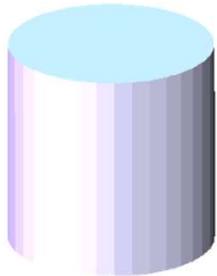


圧縮、引っ張り共に連続性があり、同じヤング率になる。  
 よって、圧縮を引っ張りで代用できるので、短冊の引っ張り試験が推奨。

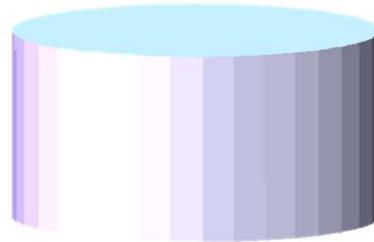
# 特性からヤング率を計算してみると

## いろいろな形

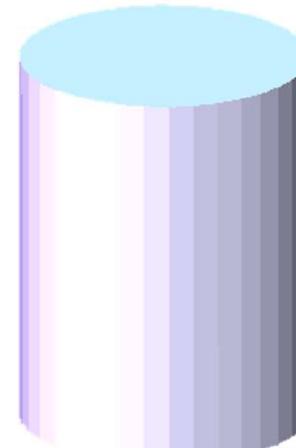
ゴム屋さんで一般的に使用



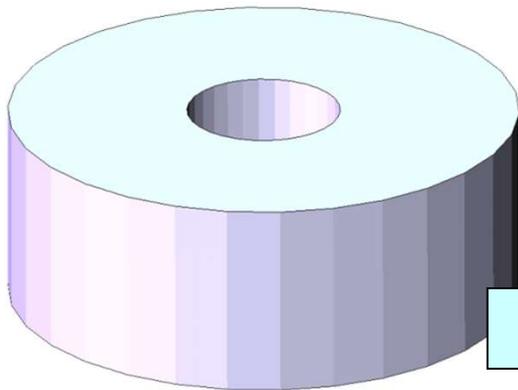
$\Phi 10 \times h10\text{mm}^3$



$\Phi 29 \times h12.7\text{mm}^3$



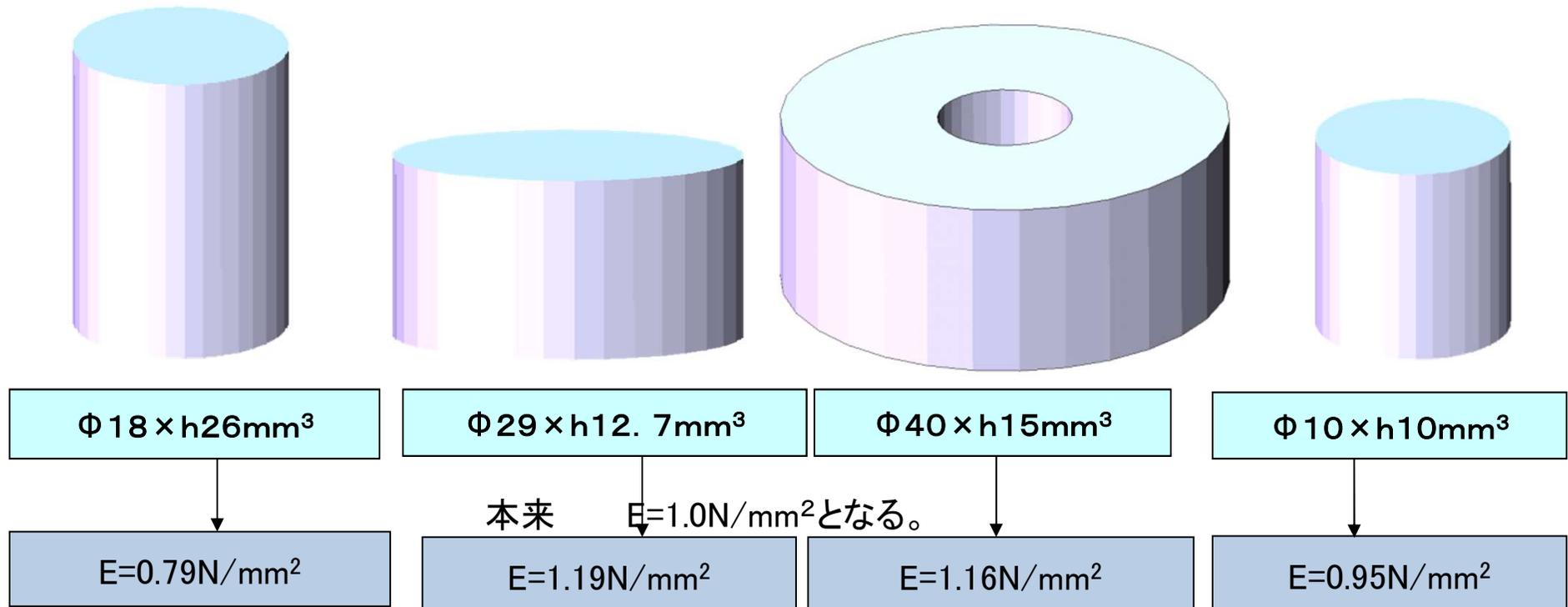
$\Phi 18 \times h26\text{mm}^3$



$\Phi 40 \times h15\text{mm}^3$

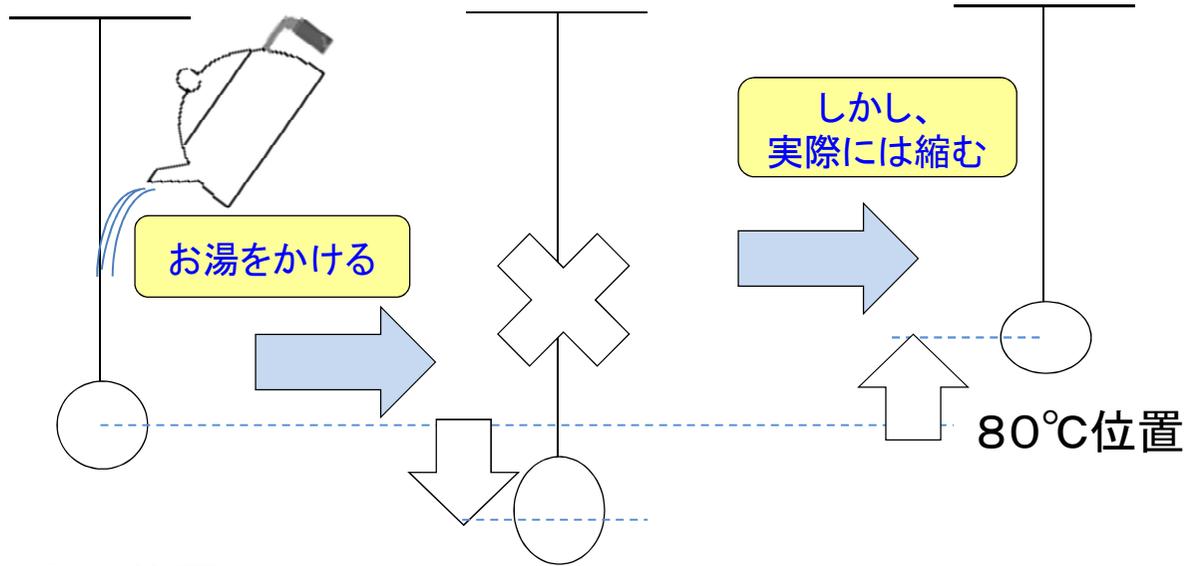
# いろいろなディスクで確認

同様に、ヤング率 $E=1.0$ の材料で解析(測定)したら...



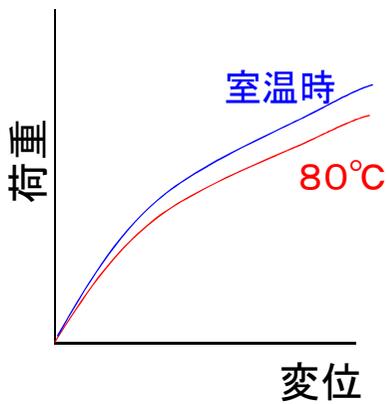
材料測定用TPの違いで見かけ上のヤング率が異なります。  
正確なヤング率が求められない。

短冊での試験が現在の最良のヤング率の求め方



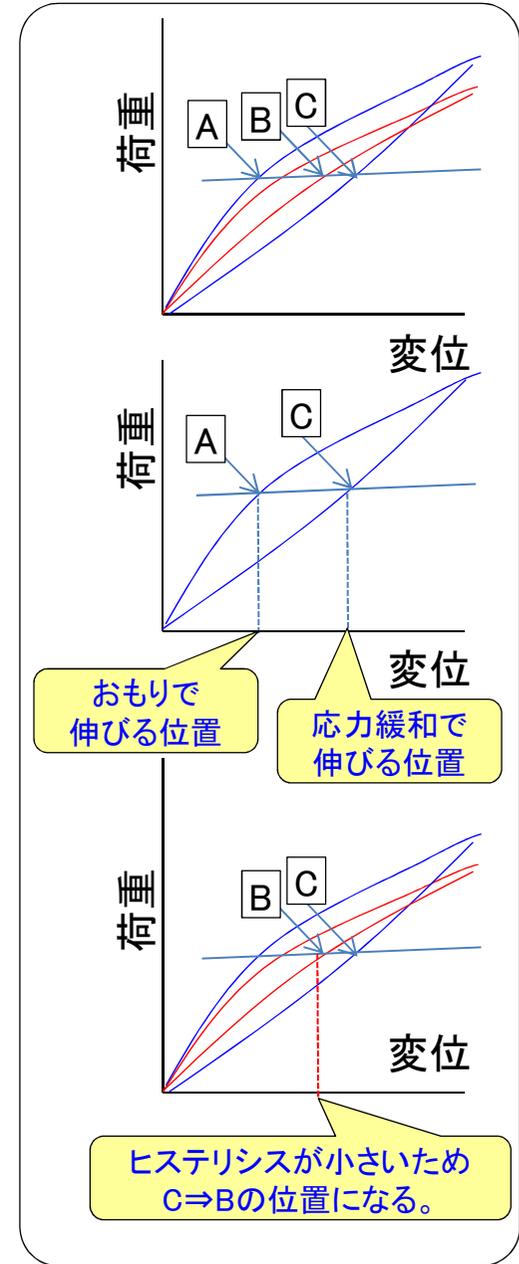
室温位置

高温時剛性低下  
伸びるはずである



この現象一つでも、勘違いが発生している。ゴムの分かり難い、難しいという所以であるが、実際謎解きすれば簡単である。

その理由は  
ヒステリシスと考えられる



# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~10:40

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率について

サンプルゴムを選ぶ上で、本当に求めたいヤング率が求められない現実を理解し、サンプルゴムをどのように選定し、ゴム製造メーカーへの上手な問い合わせ方法を提案します。

### 1-3. 二軸理論と実習前の試験機の操作概要と注意点

ネオフックからムーニー高次関数、またオグデンでの定式化を説明します。

## 2. 単軸試験実習

## 3. 二軸試験実習

## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ 15:00~16:00

EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

# ひずみエネルギー密度関数

## 基本式

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

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

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

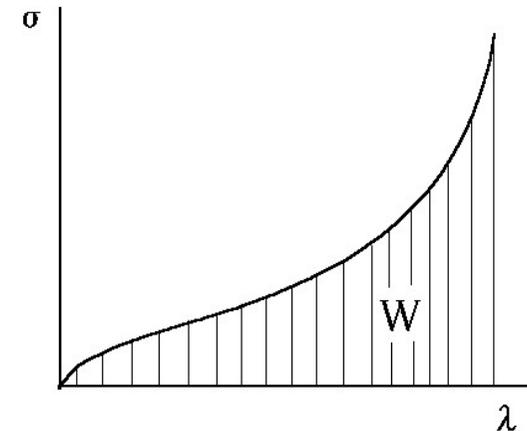
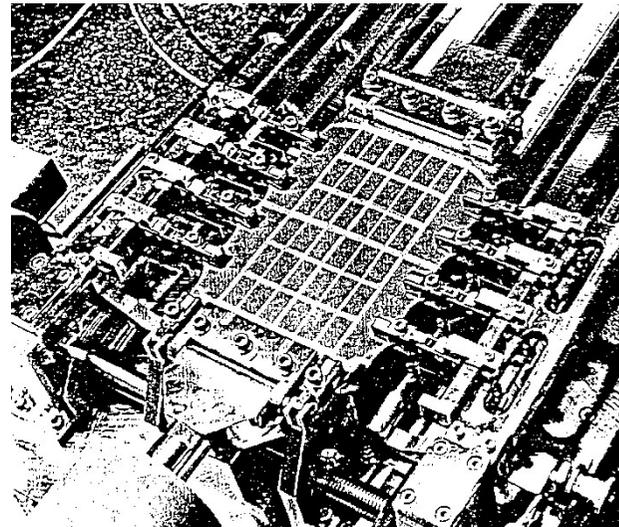
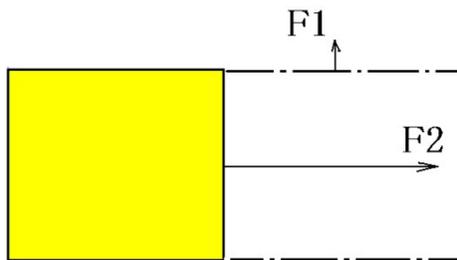
$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$$

[対角線効果]

[面積効果]

[体積効果]

## 一軸拘二軸伸張試験



# ひずみエネルギー密度関数 様々な表現式

## 1) Neo-Hookeanモデル

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

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

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

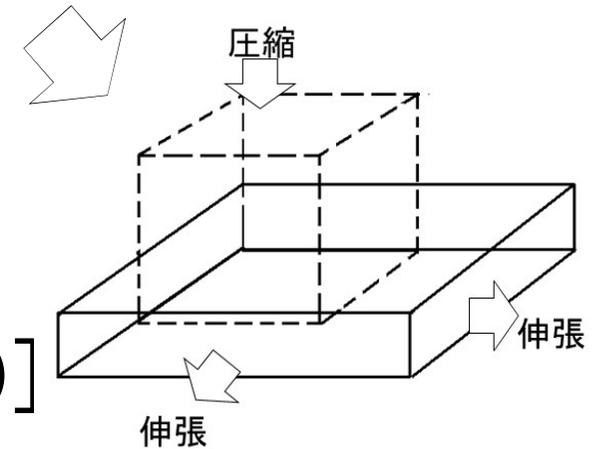
$$I_3=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=1 \quad \text{[体積効果]}$$

## 2) Mooney-Rivlin

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

## 3) Baltz-Ko

$$W= \frac{1}{2}\mu [(I_1-3)+\frac{1}{\beta} (I_3^{-\frac{\beta}{r}}-1)]$$



## 4) Signiorin、石原他

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

## ひずみエネルギー密度関数 様々な表現式

### 5) Mooney高次式

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

今回この係数を求める

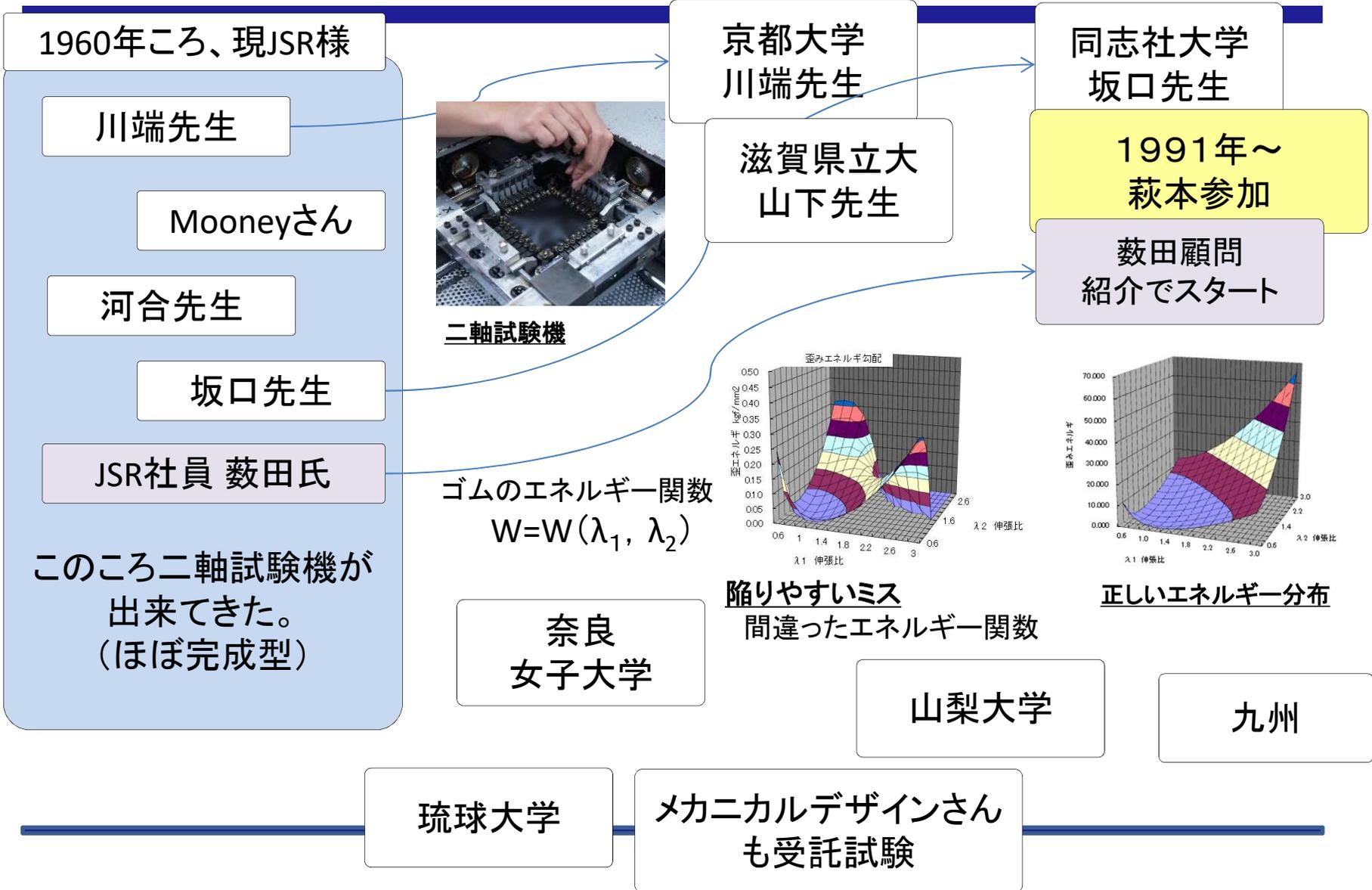
### 6) Ogden

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

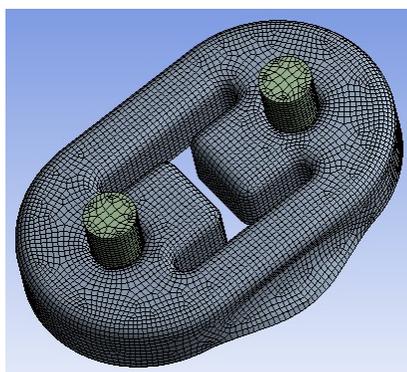
### 7) Arruda-Boyce

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

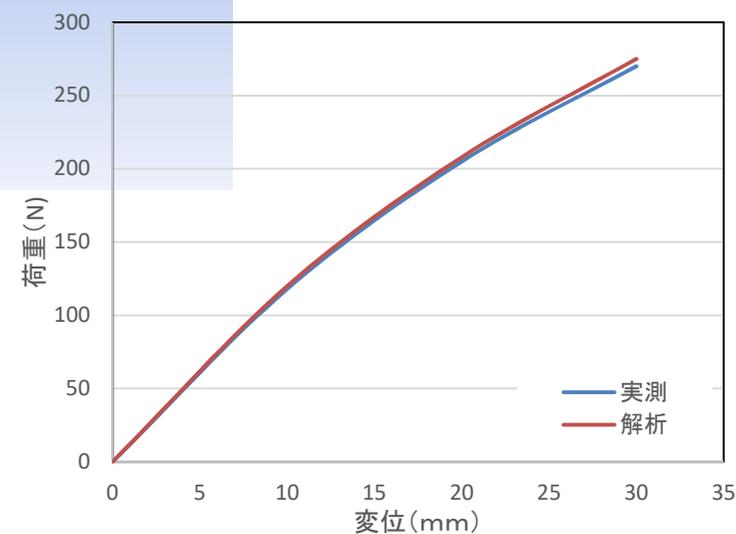
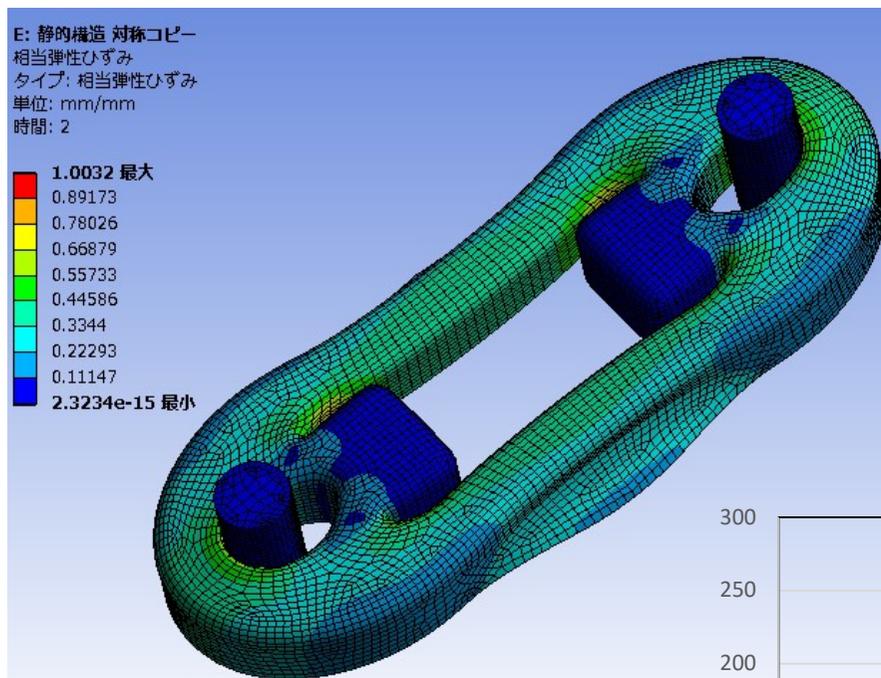
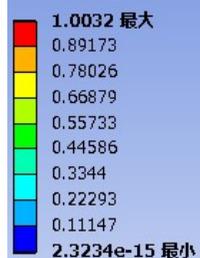
# ゴムのエネルギー密度関数の研究



# 解析事例：マフラーマウントの解析

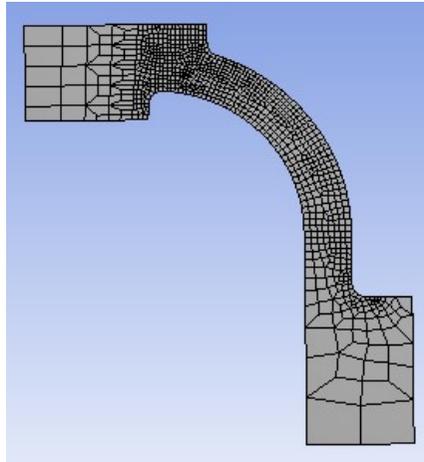


E: 静的構造 対称コピー  
相当弾性ひずみ  
タイプ: 相当弾性ひずみ  
単位: mm/mm  
時間: 2

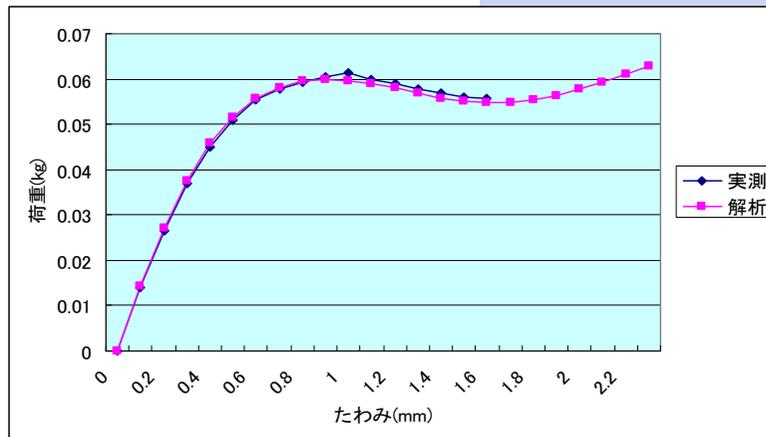
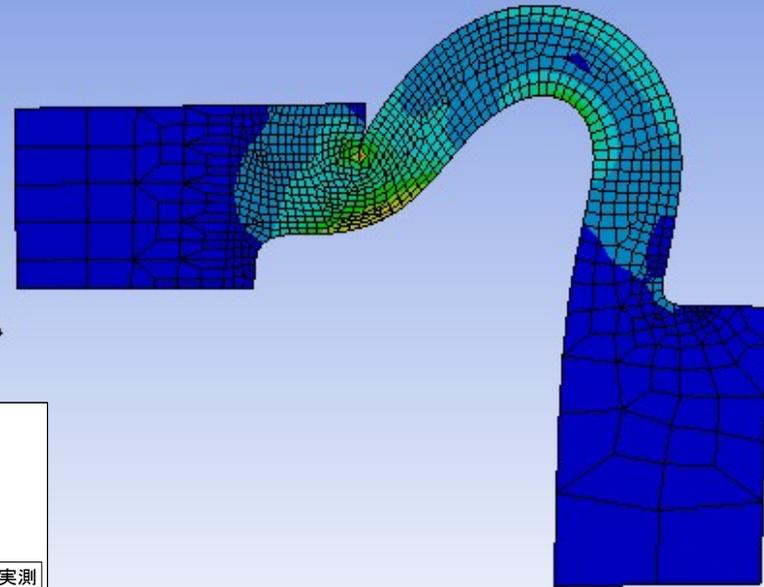
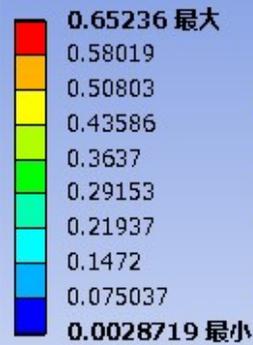


実測と解析がよく一致

# 解析事例：ラバーコンタクト クリック特性

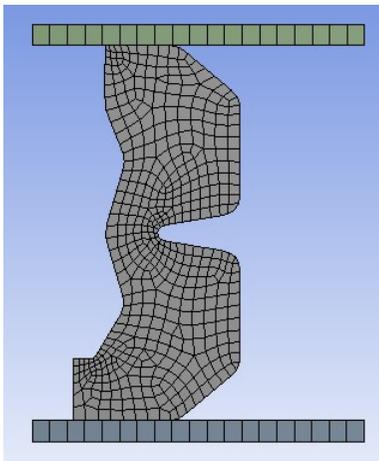


B: 静的構造  
相当弾性ひずみ  
タイプ: 相当弾性ひずみ  
単位: mm/mm  
時間: 1

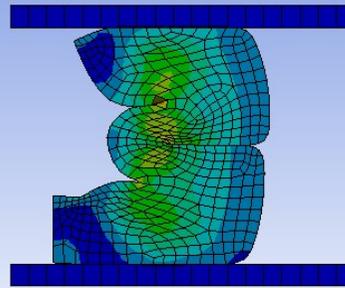
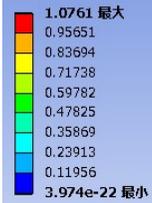


実測と解析がよく一致

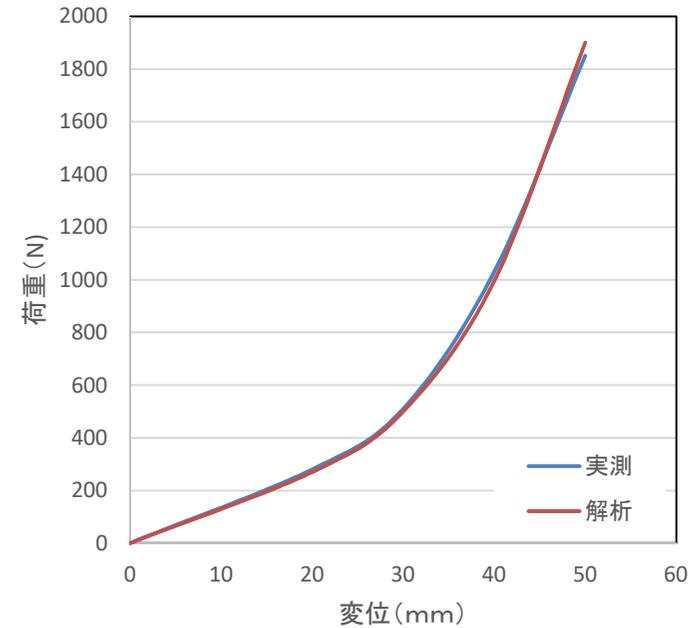
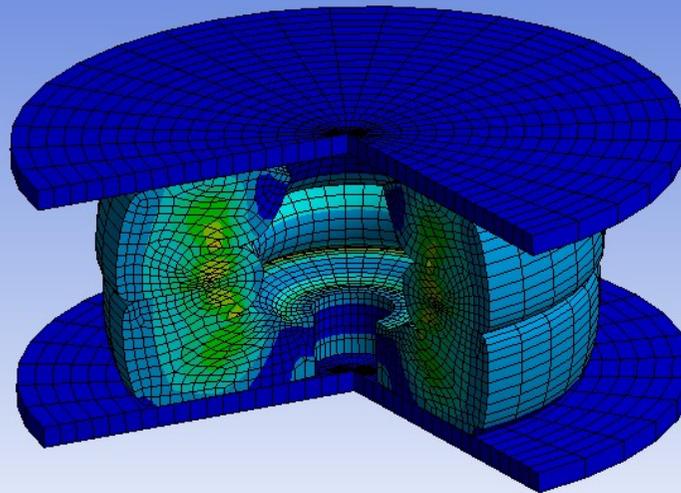
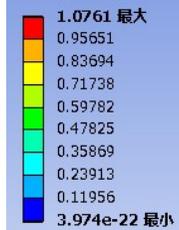
# 解析事例：ラバースプリングの変形解析



D: 静的構造  
相当弾性ひずみ  
タイプ: 相当弾性ひずみ  
単位: mm/mm  
時間: 1

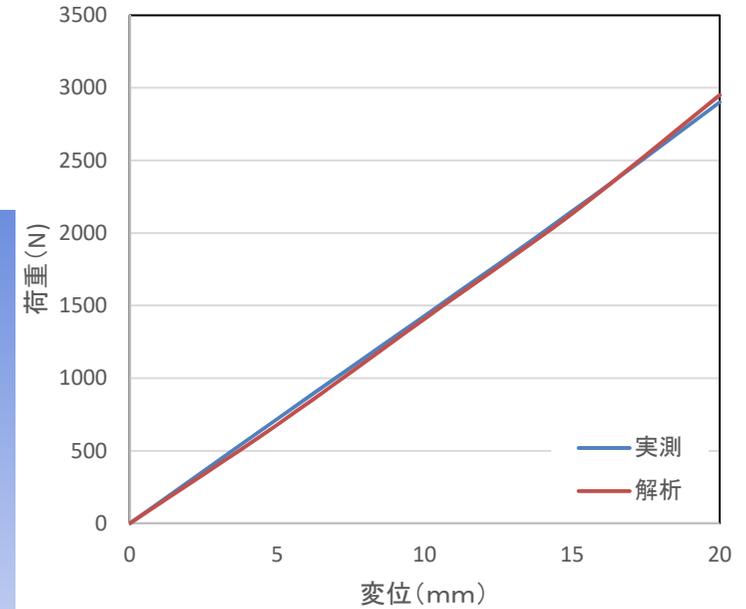
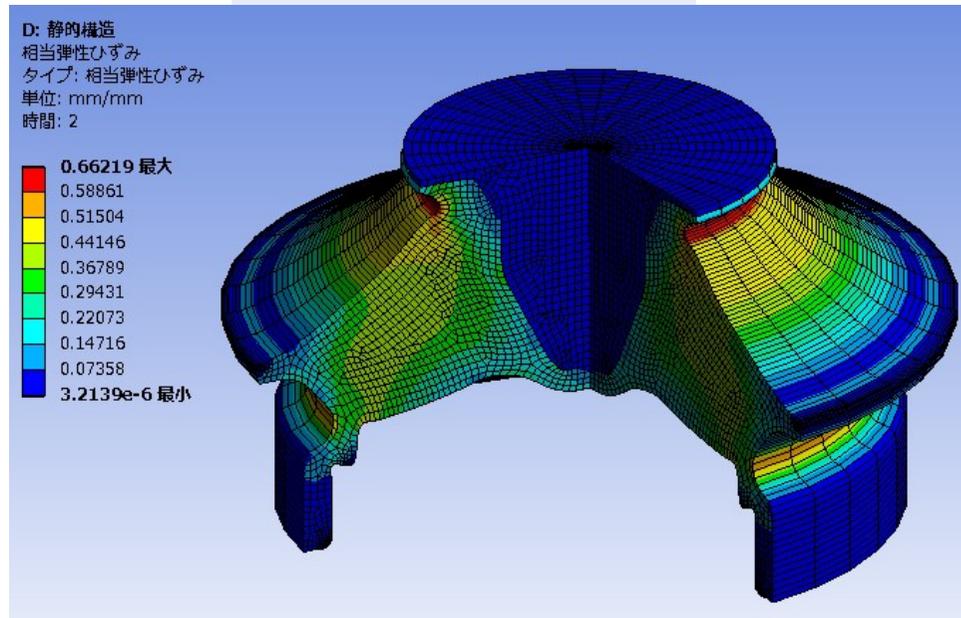
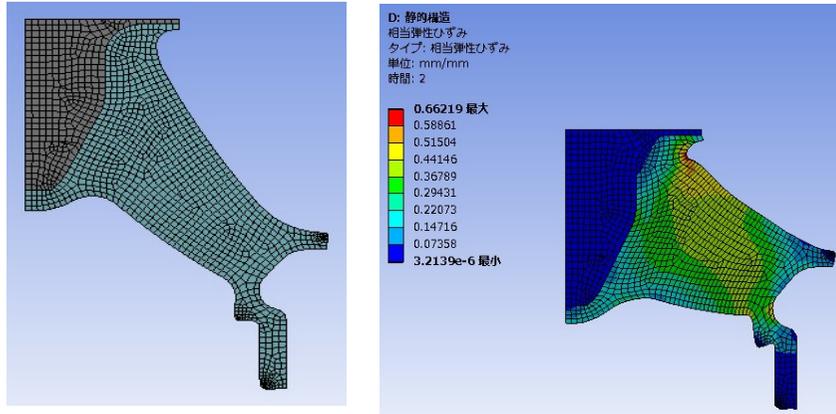


D: 静的構造  
相当弾性ひずみ  
タイプ: 相当弾性ひずみ  
単位: mm/mm  
時間: 1



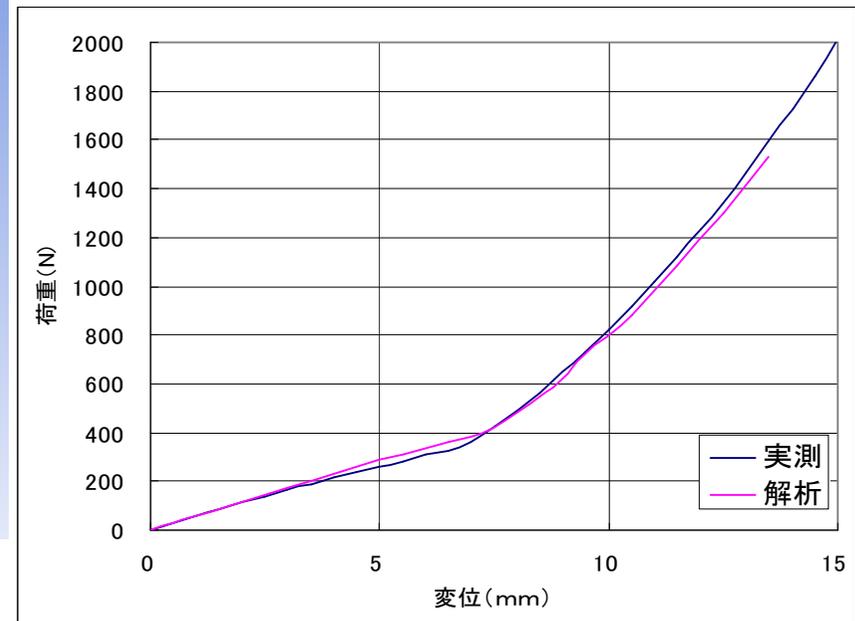
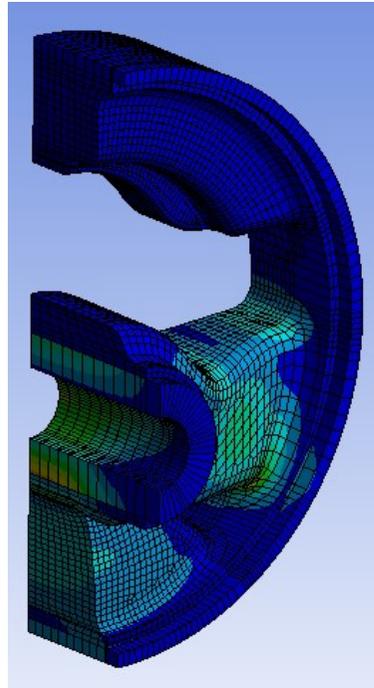
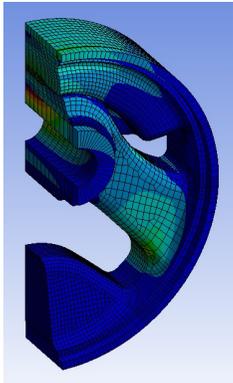
実測と解析がよく一致

# 解析事例：円錐型マウントの変形解析



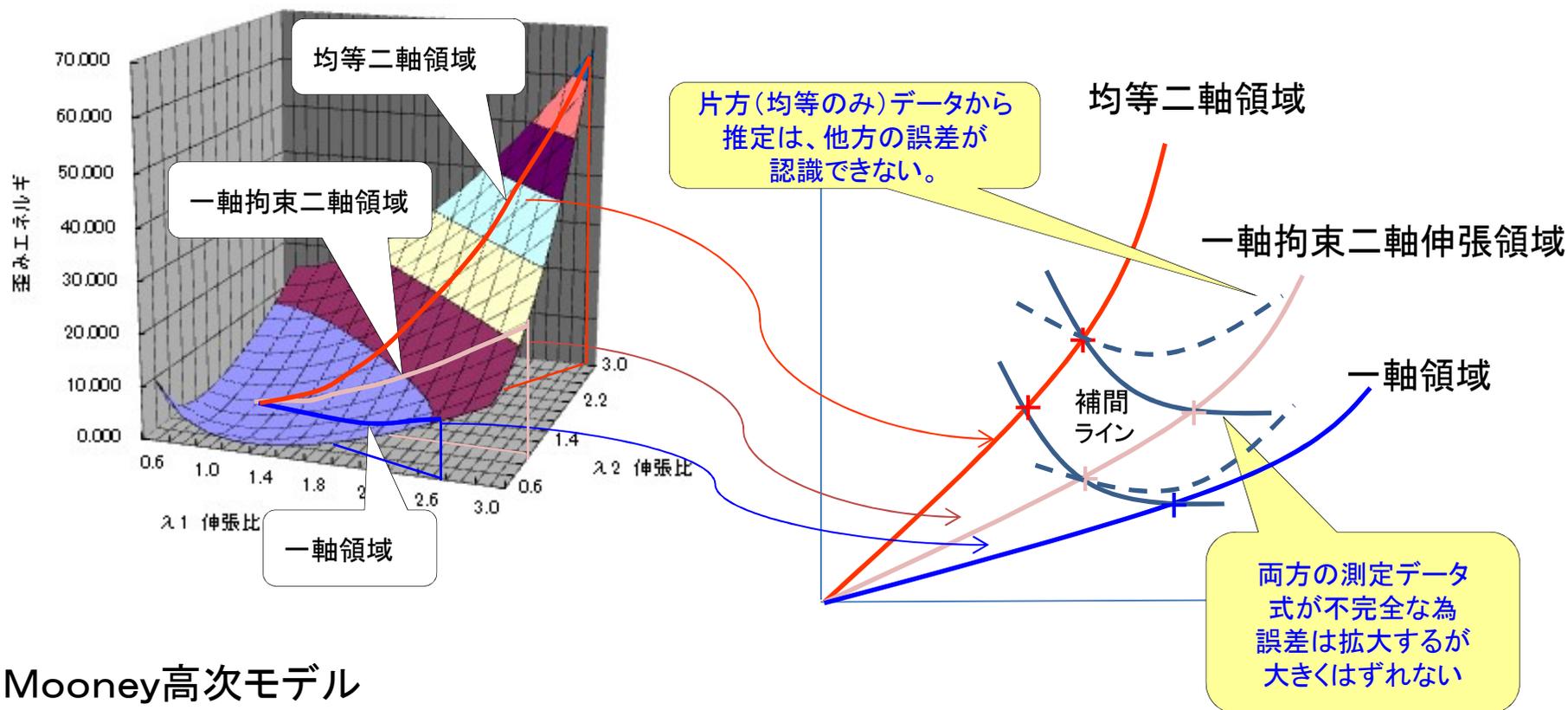
実測と解析がよく一致

# 解析事例：ハの字型マウントの変形解析



実測と解析がよく一致

# エネルギー関数導出の落とし穴



## 1) Mooney高次モデル

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

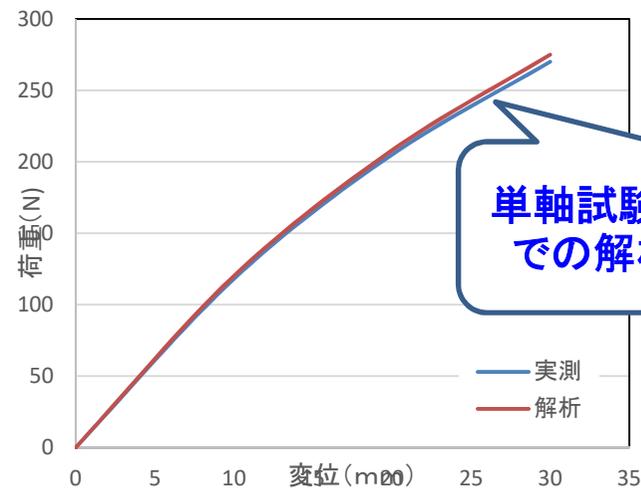
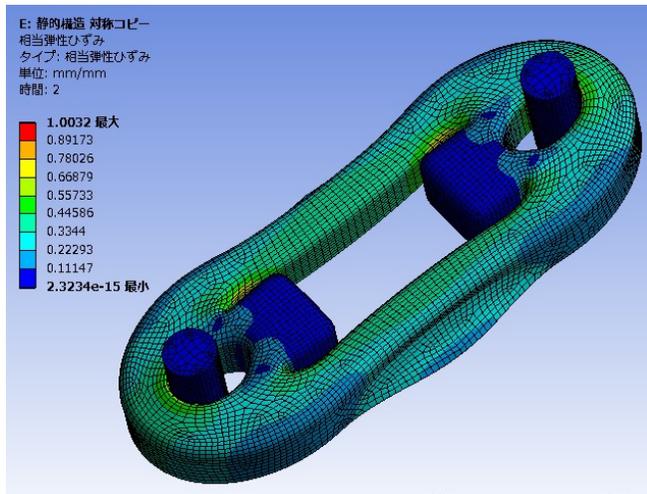
## 2) Ogdenデル

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

すべての領域を網羅できる、  
完ぺきな式ではありません。

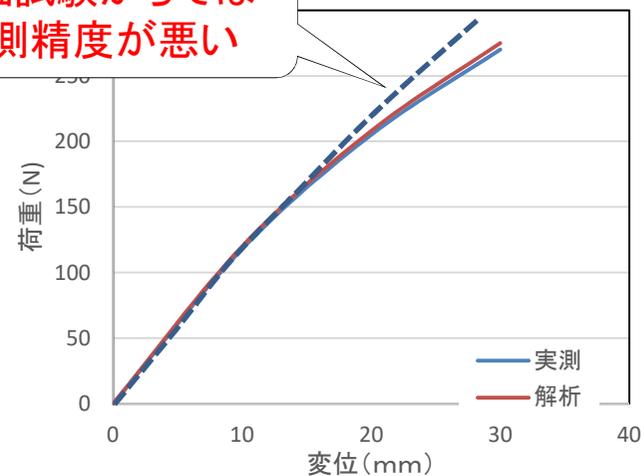
→ 製品のターゲットに合せたエネルギーデータ収集

# マフラーマウントの変形解析



## 一軸拘束二軸伸張領域のデータで解析

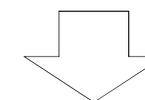
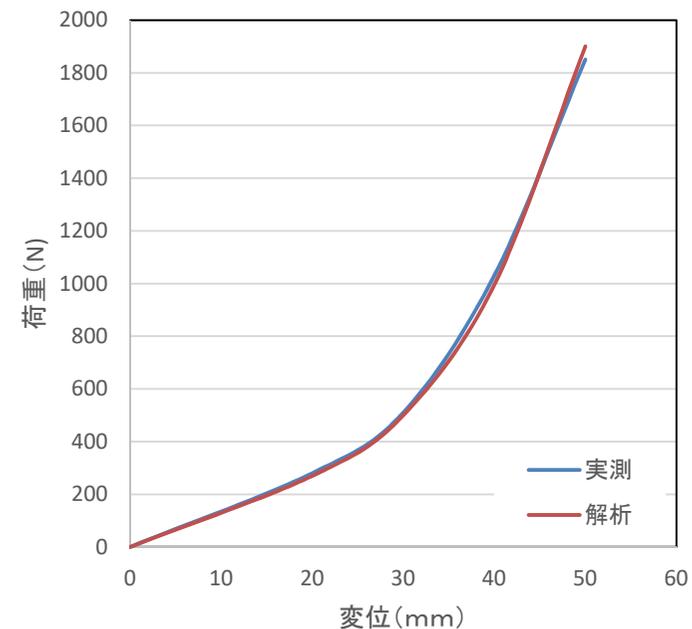
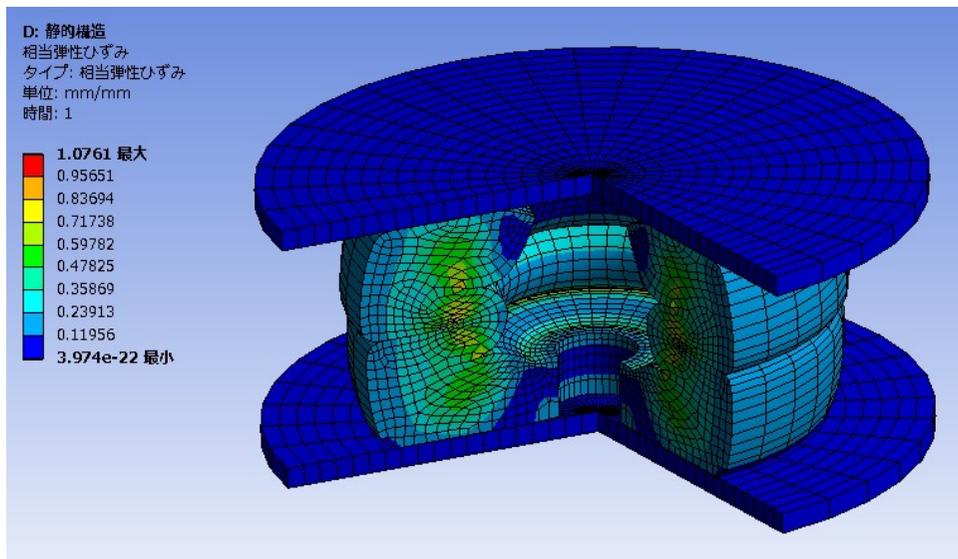
二軸試験からでは  
予測精度が悪い



この製品は、一方向に伸張  
第二、第三方向は圧縮ひずみ

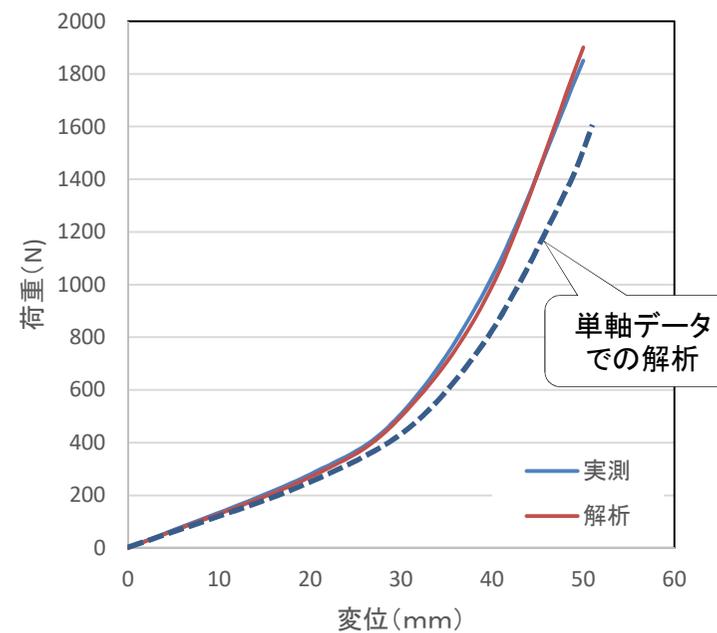
輪ゴムの変形に近く  
単軸試験データが有効

# 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

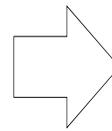
⇒ **二軸試験、純せん断データが有効**  
**(均等二軸伸張ではありません)**



# 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

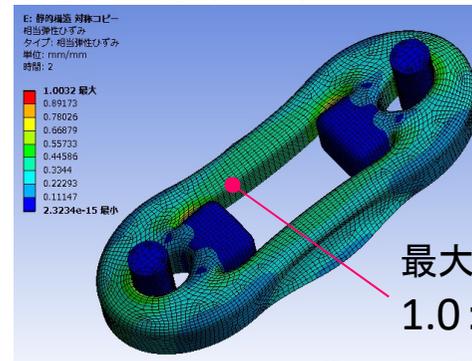


風船は均等二軸



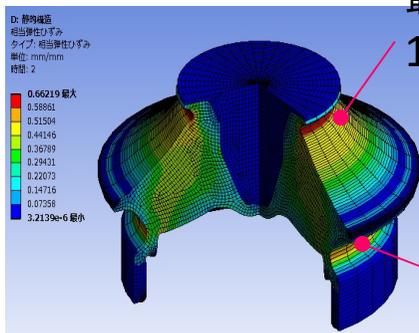
2方向に均等に伸張する製品は  
ゴム製品でも少ない  
⇒ 均等二軸伸張の領域データは不要

単軸試験が有効です



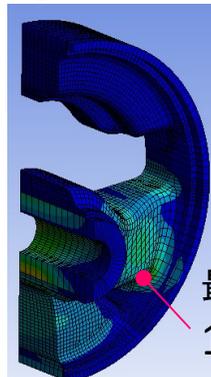
最大-中間-最小  
1.0:-0.4:-0.4

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

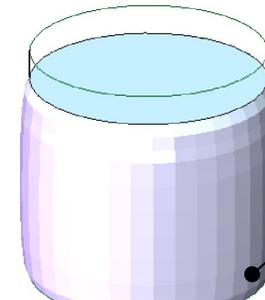


最大-中間-最小  
1.0:0.4:-1.0

最大-中間-最小  
1.0:0.6:-1.4



最大-中間-最小  
1.0:0.5:-0.9



最大-中間-最小  
1.0:0.3:-0.7

いずれもひずみを確認すればわかるように  
均等二軸とよりも純せん断(一軸拘束二軸伸張)、単軸試験が有効です。

# 一軸拘束二軸伸張試験が優位な理由

## 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

式による優位差はありません。

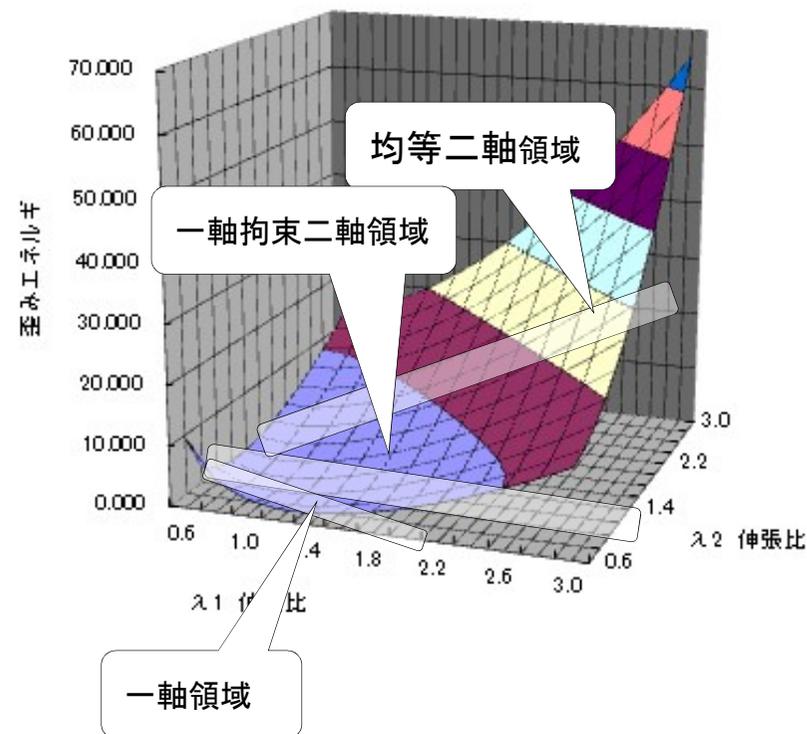
## 2) Mooney-Rivlinモデル

予測精度は、元のデータに起因します。

解析ターゲットのひずみ成分と同等の領域のデータを収集することが重要です。

## 3) Ogdenモデル

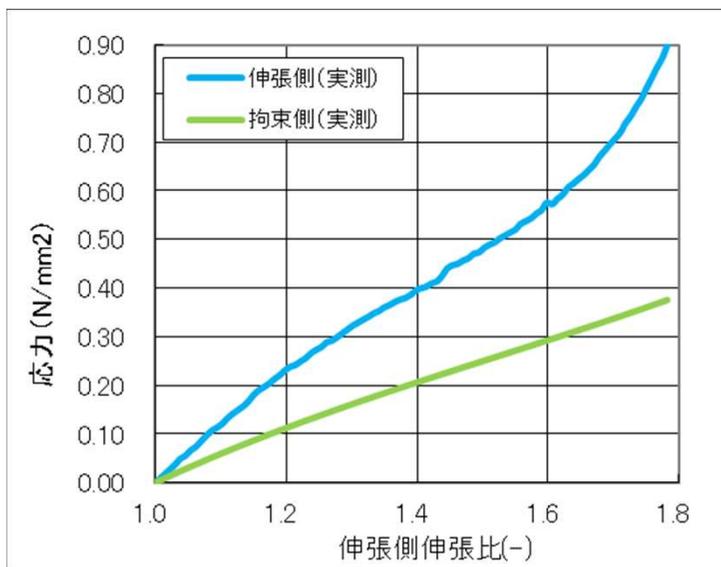
$$W=\sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$



残念ながらすべての領域を網羅できる回帰式は

提案されていませんので、解析する製品に合わせた領域の回帰が必要になります。

# [一軸拘束二軸伸張試験の実測]



回帰

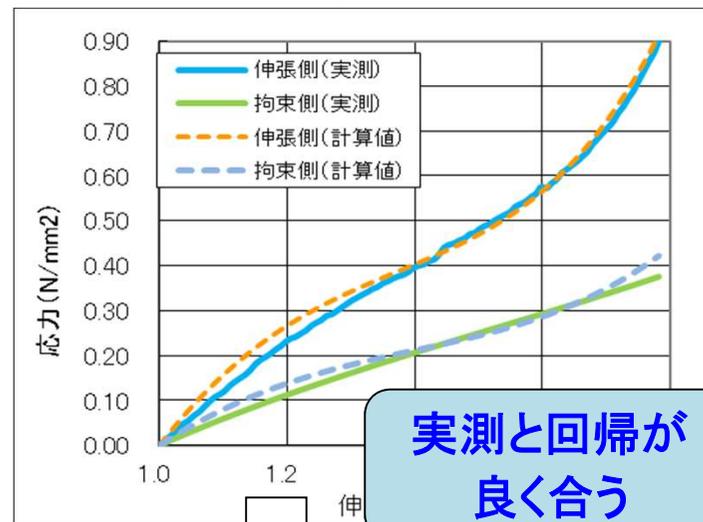


# 一軸拘束二軸伸張試験からの回帰係数

単位: N/mm<sup>2</sup>

C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>20</sub>	C <sub>30</sub>
1.9189E-01	2.6448E-02	-1.0841E-02	-4.8180E-02	3.4297E-02

回帰精度確認

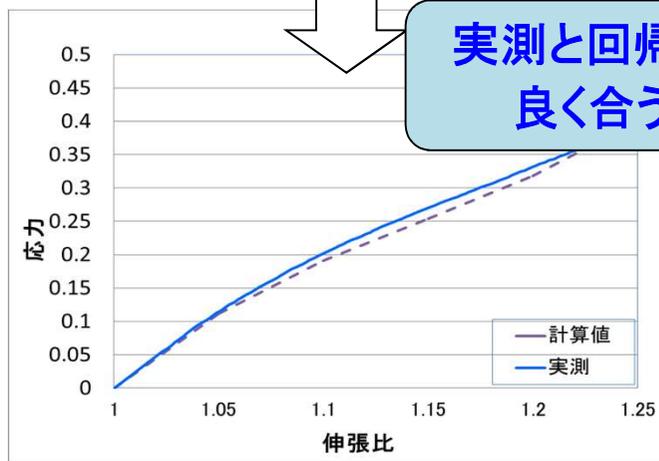


実測と回帰が  
良く合う

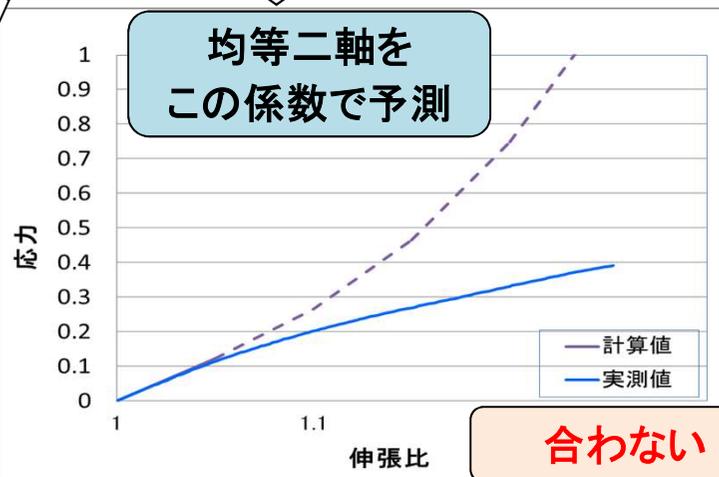
# 均等二軸伸張試験からの回帰係数

単位: N/mm<sup>2</sup>

C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>20</sub>	C <sub>30</sub>
3.0360E-01	-8.5264E-02	1.3040E-01	-3.0036E-01	3.4198E-01



実測と回帰が  
良く合う

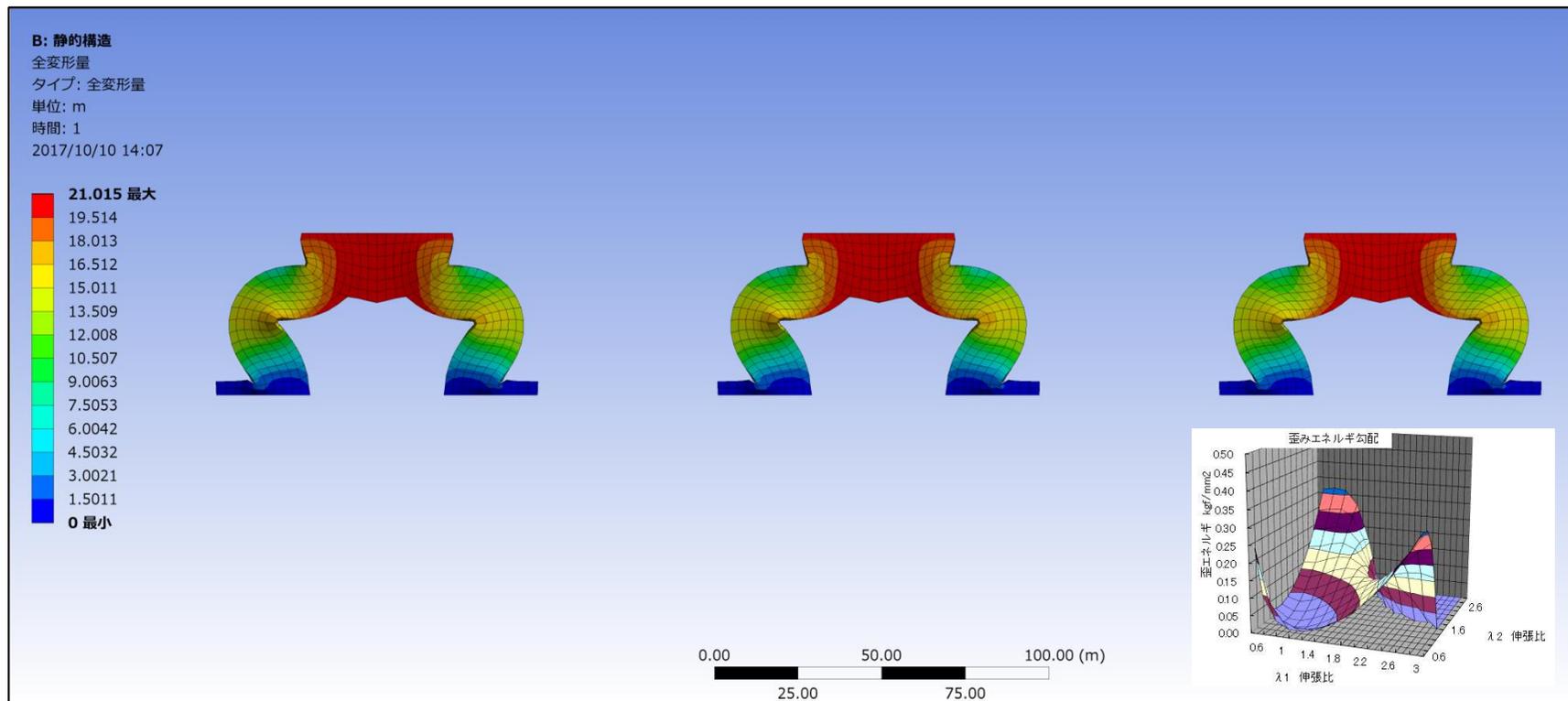


均等二軸を  
この係数で予測

合わない

一軸拘束二軸、均等二軸 共通で精度よく回帰することは難しい。

# 非圧縮性ゆえの変形図が同じになる (防舷材)



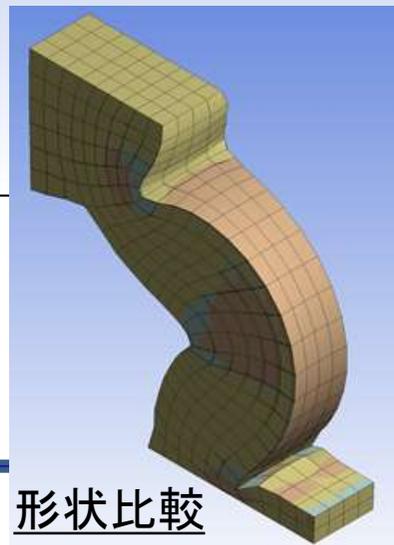
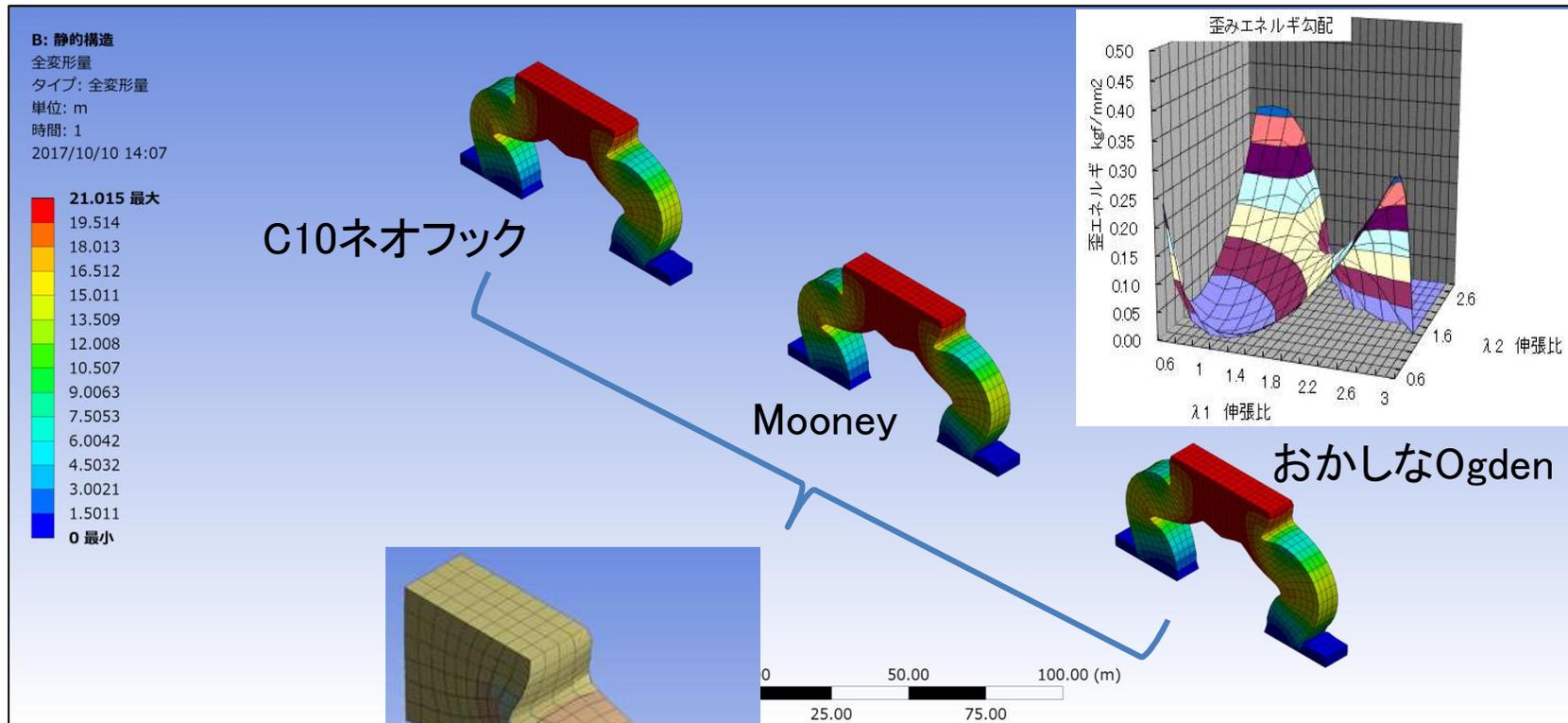
C10ネオフック

Mooney

おかしなOgden

正面視点における変形量コンター図

# 非圧縮性ゆえの変形図が同じになる(防舷材)



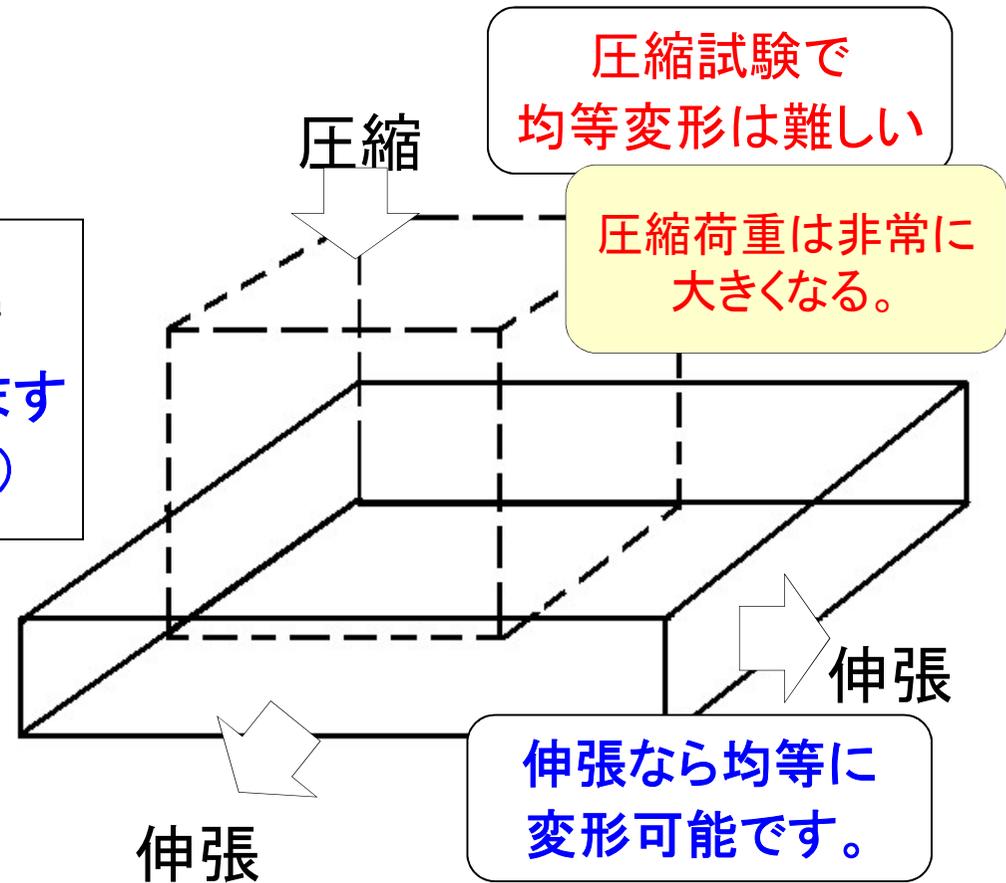
特性が全く異なっても  
変形形状はほぼ一致。  
⇒形状が一致したから  
予測が合っているという過ち。

# 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 $\lambda$ が定義できる)



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。

## ひずみエネルギー密度関数 様々な表現式

### 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) Ogden

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

### 3) Arruda-Boyce

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

一般的にこれらの定義を行うと解析予測精度が良いと言われる。

単軸試験を先に実施しますが、少し二軸概要

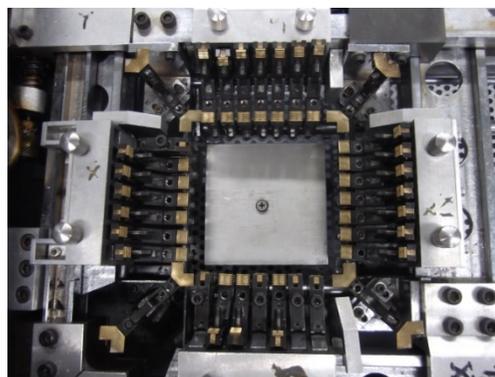
# 材料データ測定方法：二軸伸張試験



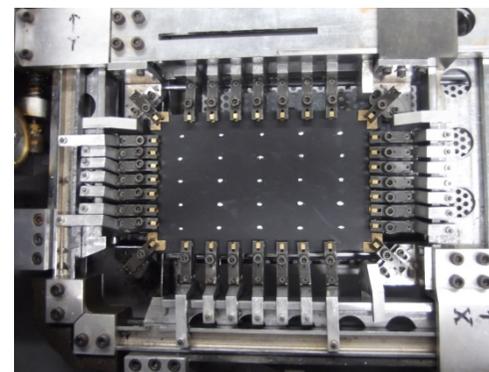
コントローラ

サンプル取付

試験機概要

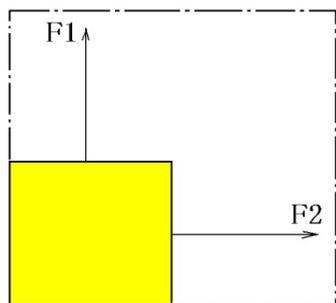


サンプル取り付け部

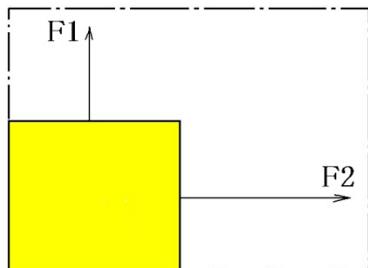


ゴムの変形形態

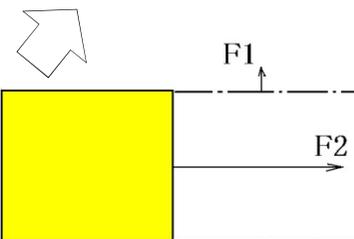
## 変形形態概要



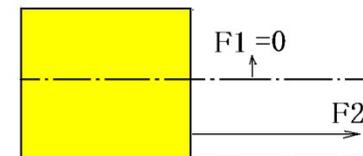
均等二軸伸張



二軸伸張



一軸拘束二軸伸張

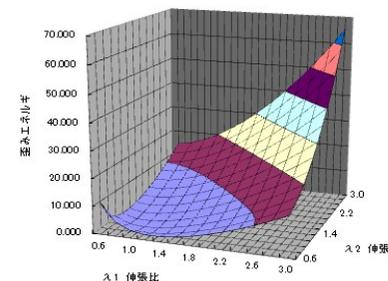


一軸伸張

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

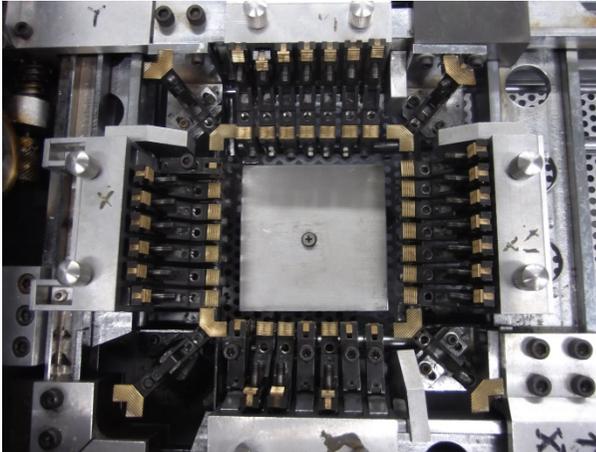
$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left[ \frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^2} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^2} \right]$$

各試験の変位、荷重から回帰

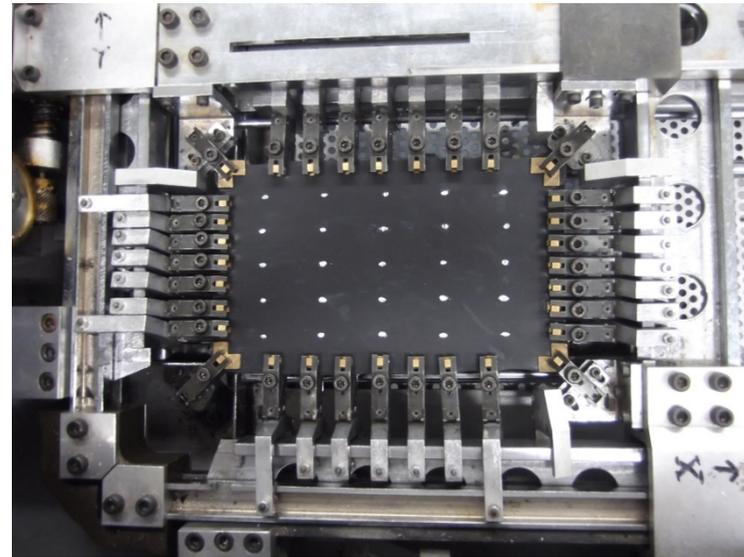
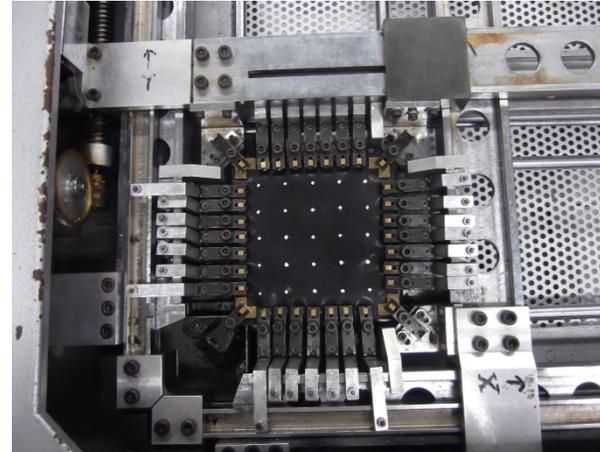
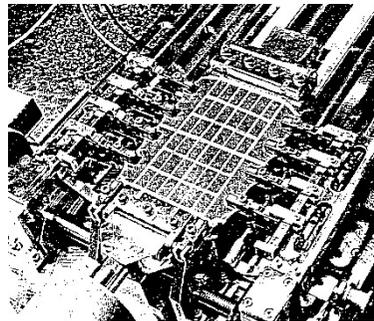
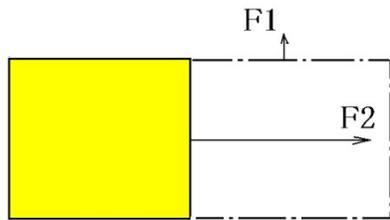


この変形形態が幅広い変形状態を表現できるため、一軸拘束二軸伸張試験での同定が良いと判断。

# 二軸荷重 測定

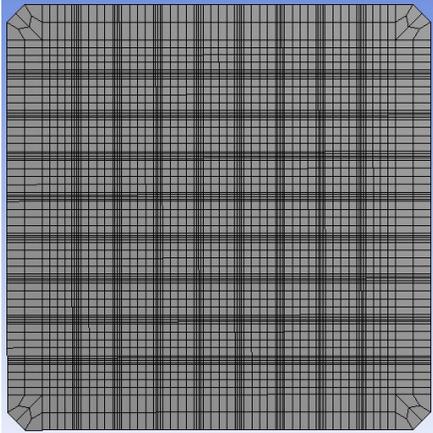


一軸拘二軸伸張試験

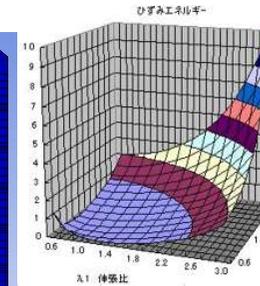
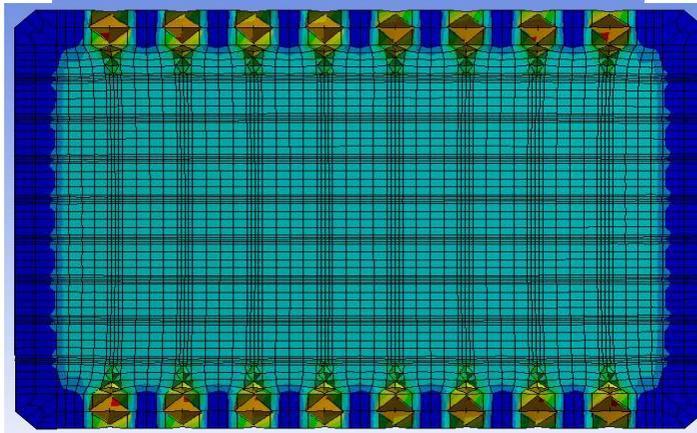


# ゴムの特性測定の基本

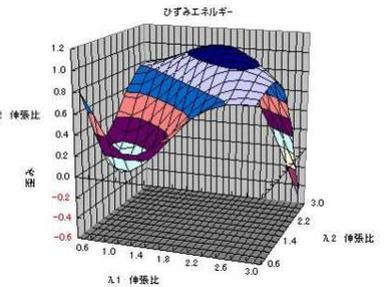
初期形状



変形後形状(ひずみ表示)

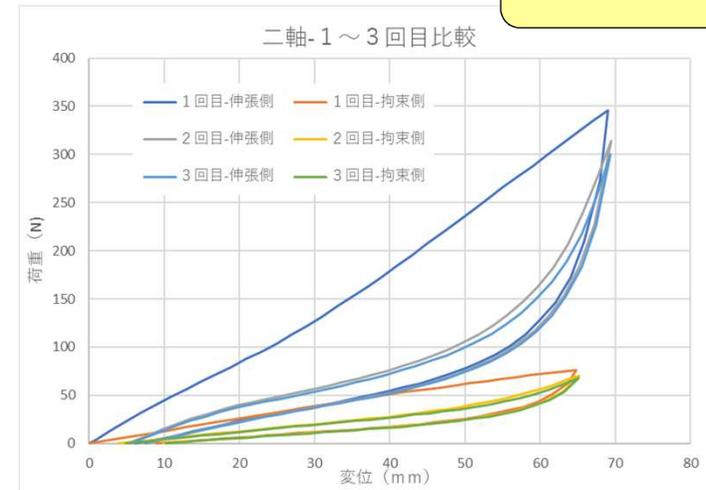


安定したデータ



不安定なデータ

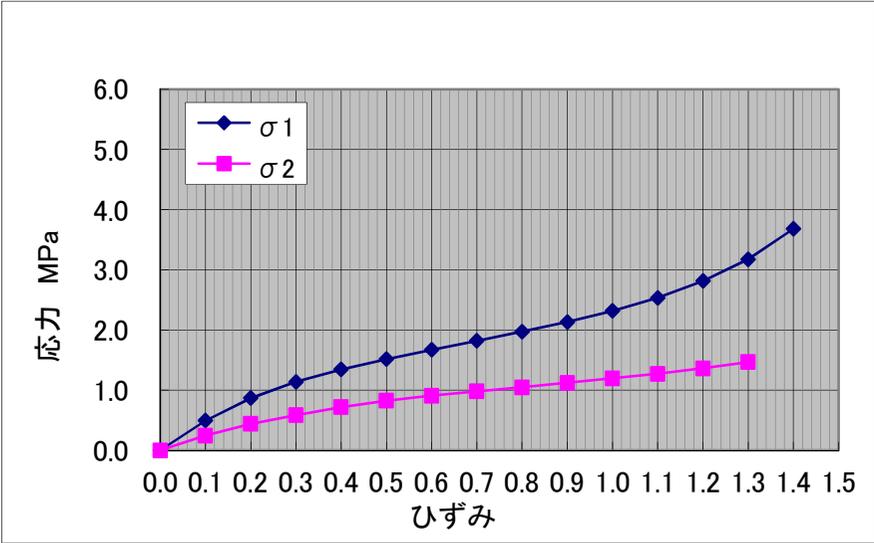
単軸と同様に、  
1回目と2回目は大きく異なり、  
2回目と3回目は少し異なります。  
3回目以降はほぼ重なります。



具体的方法は  
後半

# 荷重、変位から変換

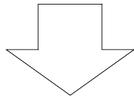
荷重vs変位 ⇒ 応力vs ひずみ換算



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

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

$$\sigma_3 = 0$$



※有効断面がポイント

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

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

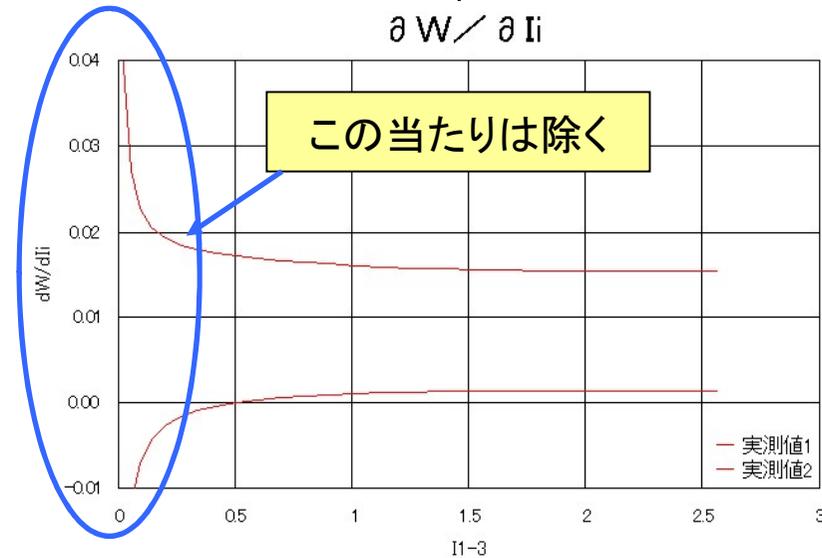
# エネルギー関数の定義

## Mooney高次モデルの定義

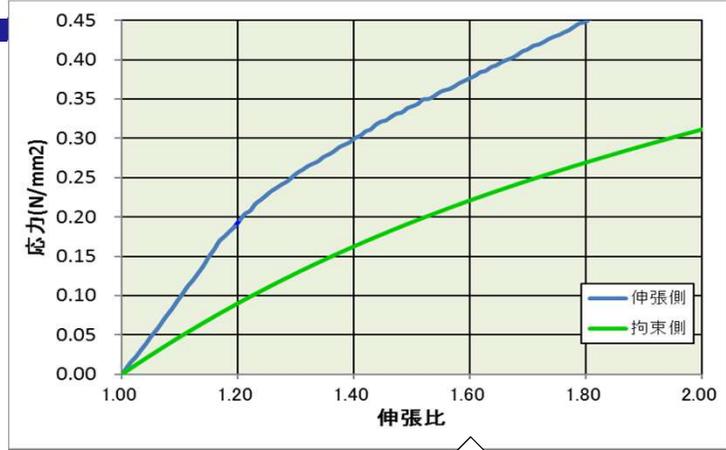
$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3) (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3$$

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

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

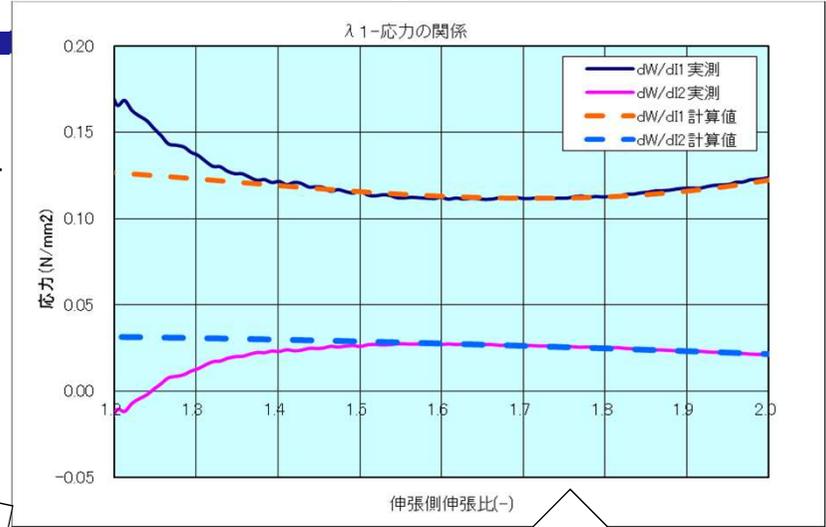


# 4) 回帰 [実際のEXCELシート]



回帰

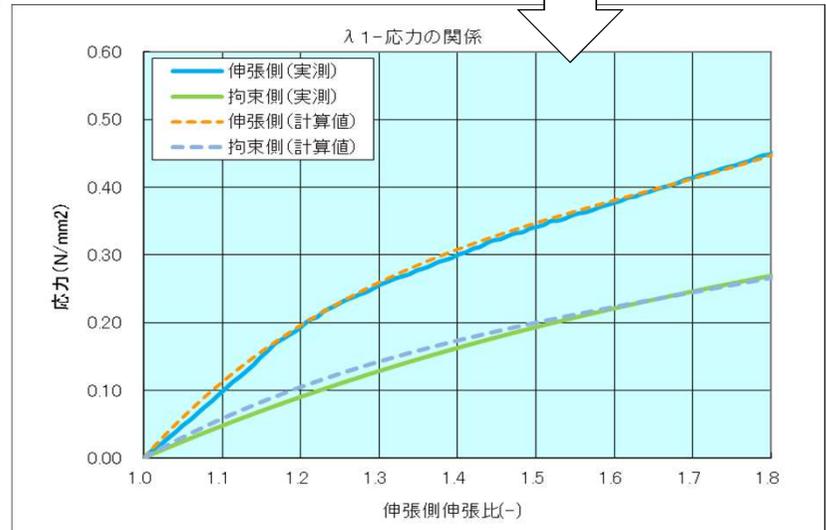
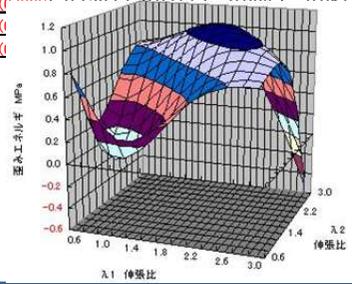
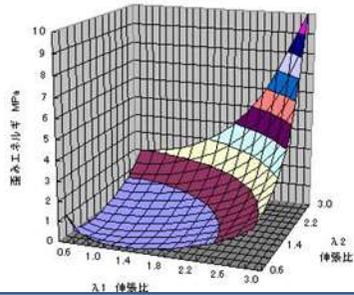
実測値



EXCEL計算

検証

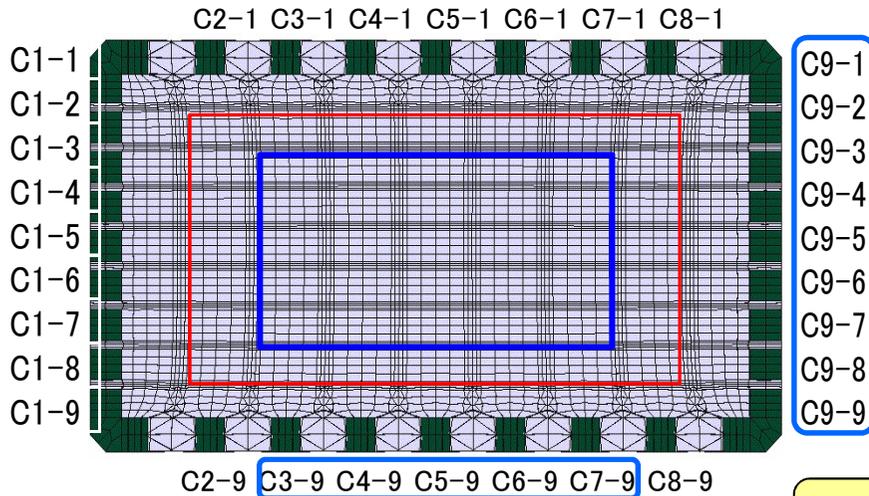
エネルギー計算表(シート)の値								係数からの計算値				
No.	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$l_1-3$	$l_2-3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$dW/dl_1$	$dW/dl_2$	$dW/dl_1$	$dW/dl_2$	$dW/dl_1$	$dW/dl_2$
1	1.00	1.00	0.00	0.00	0	0.00000	#DIV/0!	#DIV/0!	0.1301	0.0319		0.000
2	1.02	1.00	0.00	0.00	0.016	0.008	0.159	(0.031)	0.1301	0.0319	0.026	0.010
3	1.02	1.00	0.00	0.00	0.021	0.011	(0.058)	0.178	0.1300	0.0319	0.028	0.014
4	1.03	1.00	0.00	0.00	0.030	0.016	0.034	0.090	0.1300	0.0318	0.040	0.020
5	1.04	1.00	0.01	0.01	0.039	0.020	0.057	0.068	0.1299	0.0318	0.050	0.026
6	1.05	1.00	0.01	0.01	0.047	0.024	0.111	0.018	0.1298	0.0318	0.059	0.030
7	1.06	1.00	0.01	0.01	0.057	0.029	0.102	0.027	0.1297	0.0318	0.071	0.036
8	1.07	1.00	0.02	0.02	0.065	0.033	0.123	0.009	0.1296	0.0318	0.080	0.041
9	1.08	1.00	0.02	0.02	0.075	0.037	0.139	(0.004)	0.1295	0.0318	0.089	0.046
10	1.09								0.1293	0.0317	0.088	0.051
11	1.10								0.1292	0.0317	0.088	0.054
12	1.10								0.1292	0.0317	0.088	0.054



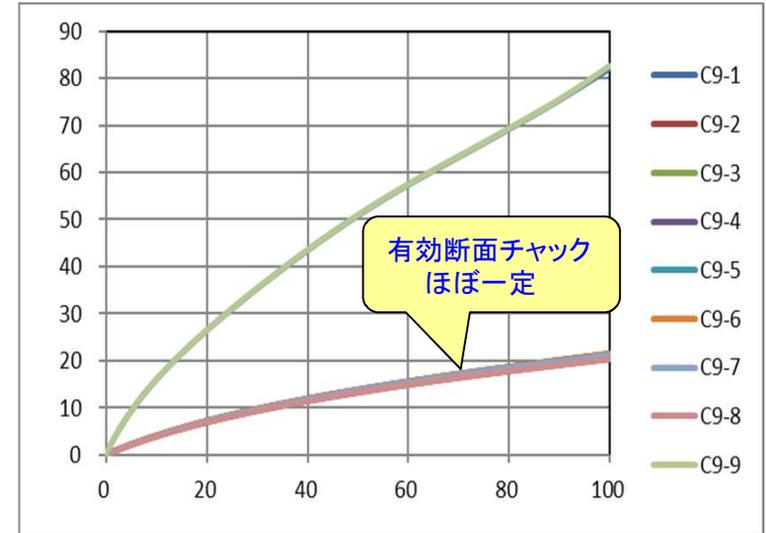
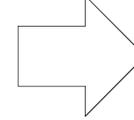
# 均一変形、雑荷重の検証

## ■ チャック部

※シートは厚さ1~2mm



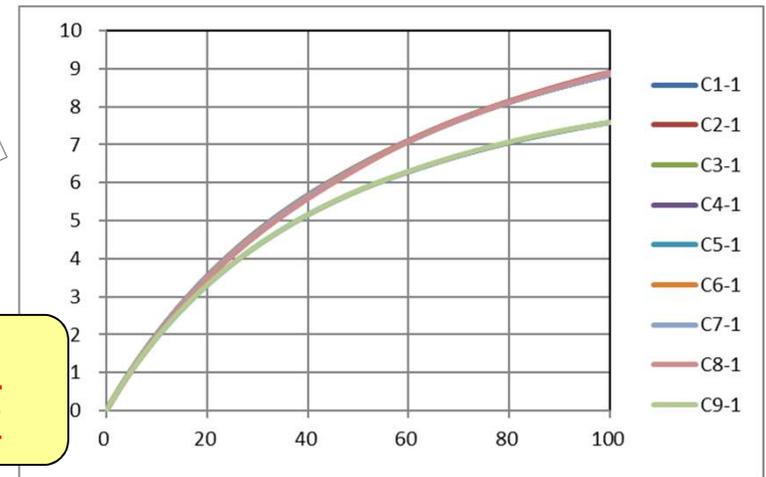
チャック  
ごとの荷重



ほぼ均一に  
変形している。

文献上の有効断面

均一性  
最重要

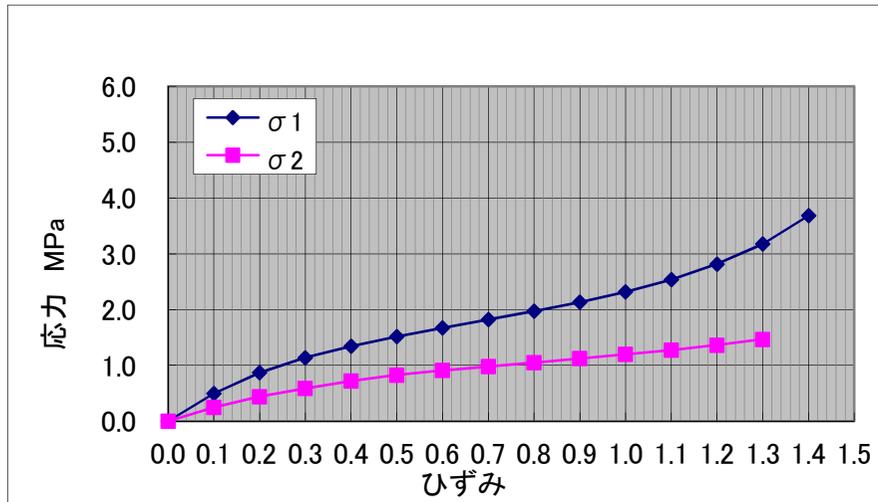


解析用INPUTエネルギーデータとOUTPUTデータが同じになることが重要。

なぜ、各解析ソフトのカーブフィットが  
引張側のみのデータのみで

## 回帰、Mooney、Ogden係数が求められるのか？

二軸試験から荷重vs変位 測定  
⇒ 応力vs ひずみ換算



※有効断面がポイント

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

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

応力とひずみエネルギー密度の関係

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

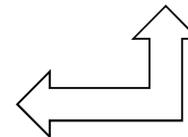
$$\sigma_2 = \frac{2}{\lambda_2} \left( \lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

$$\sigma_3 = 0$$

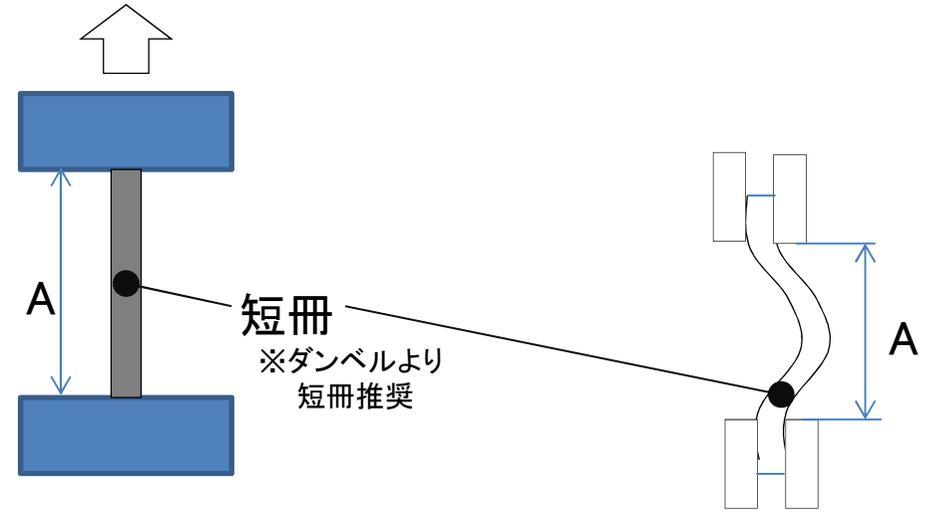
Ogdenでは、

$$\sigma_1 = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_n^{\alpha_n - 1} - \lambda_n^{-\alpha_n - 1})$$

$$\sigma_2 = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{-1} - \lambda^{-\alpha_n - 1})$$



1992年のことですが、この有効断面は  
もちろんですが、サポートからは試験方法  
さえも、どのようなものが良いか、回答を  
頂けませんでした。試験機ごとに異なり  
ますが、実測の処理の難しさは、右図の  
ようなへたり処理の難しさもあります。

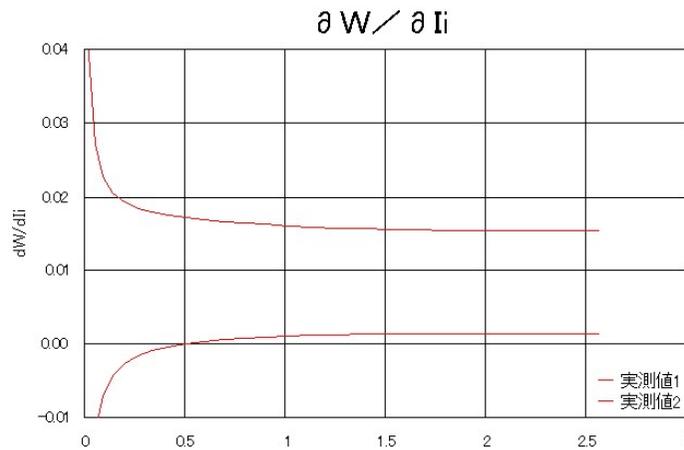


二軸も同様にこのへたり処理が重要

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

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

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



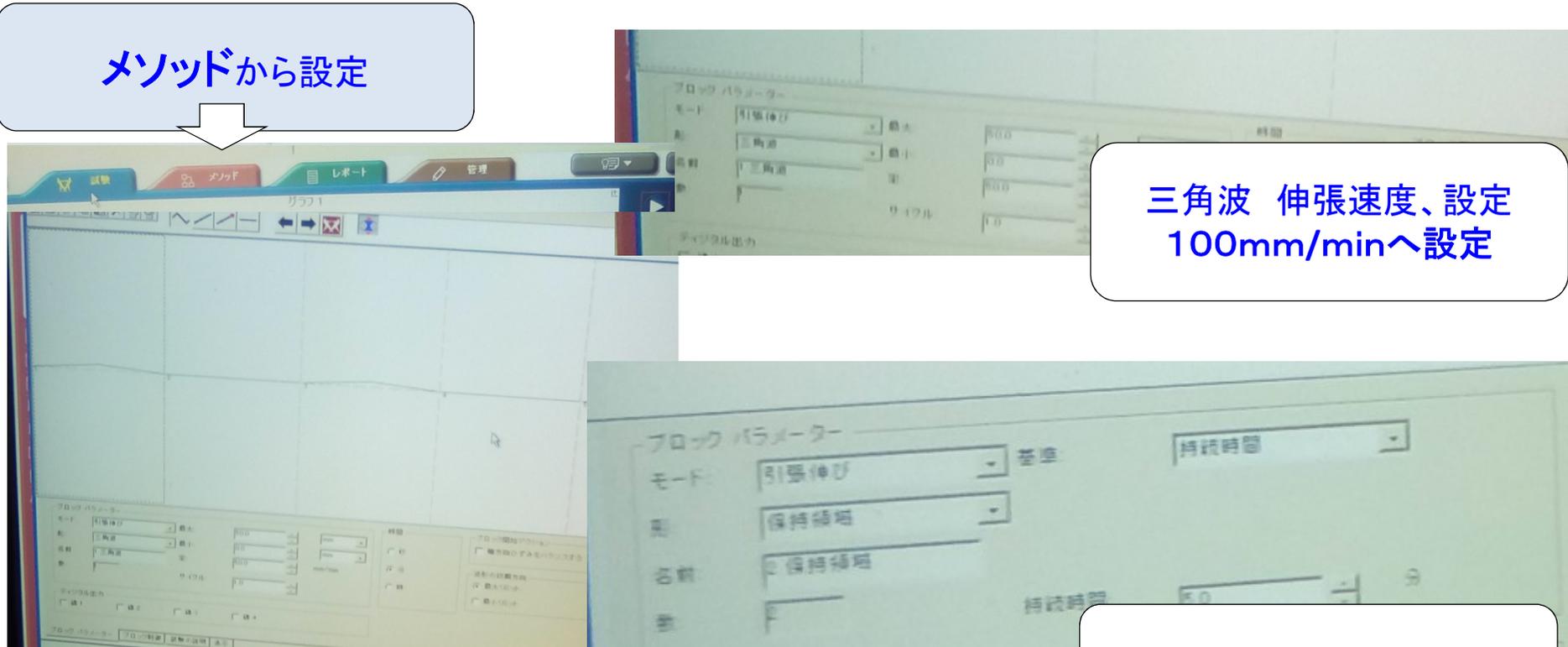
二軸目の応力がないのに  
なぜ、係数が求められるのか？

..わからないので勉強します。

# 単軸試験手順 ／二軸試験の剛性の補正(目的)

## 1) 試験機条件の設定

メソッドから設定

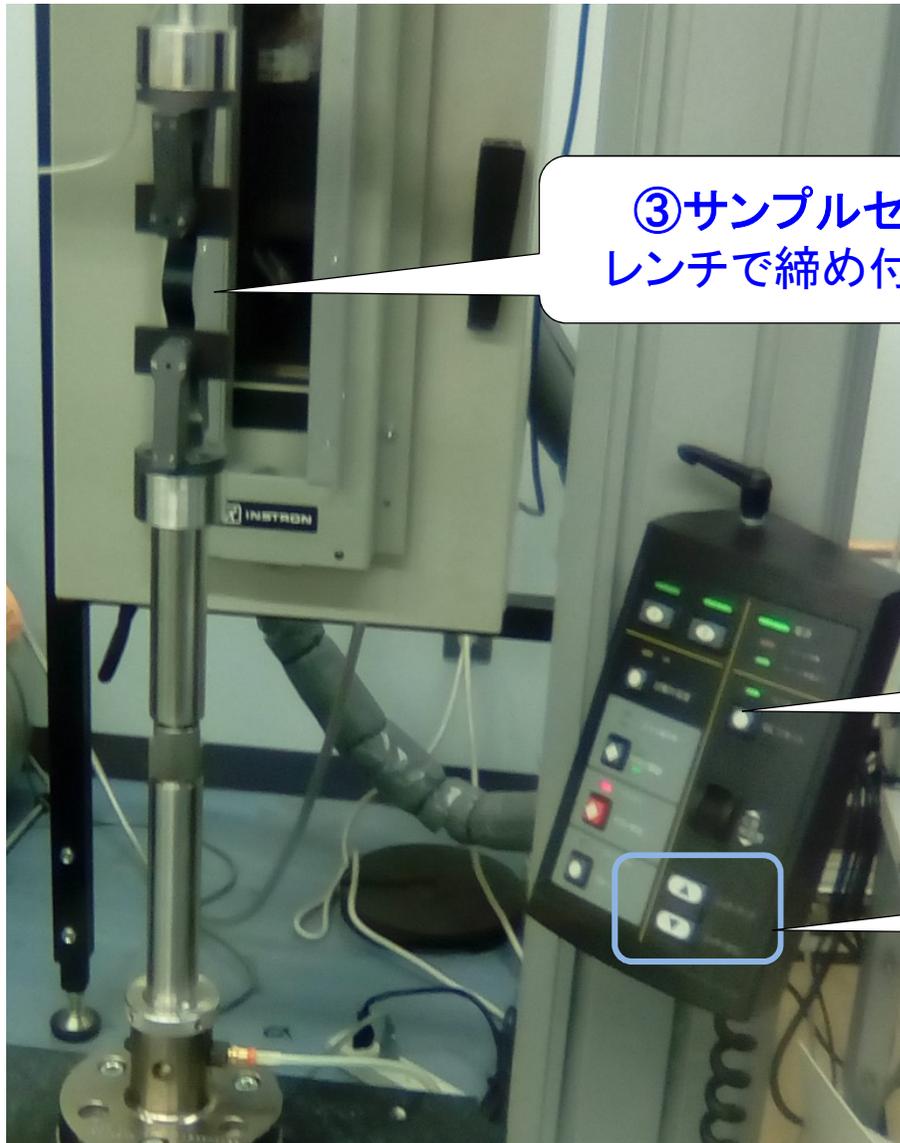


単軸試験の条件は試験場で設定して頂ける

# 単軸試験手順

## 2) サンプルセット

チャック間50mm目安に設定  
①-②-③の順



③サンプルセット  
レンチで締め付ける

②GLリセット  
初期位置を設定

①位置合わせ  
アップ・ダウン

### 3) 試験開始から終了

①～④の順に実施、④終了をクリックすると、自動的にファイル名で設定したディレクトリーにCSVファイルが保管される。

The image shows a software interface for a test machine. At the top, there are tabs for '試験' (Test), 'メソッド' (Method), 'レポート' (Report), and '管理' (Management). The main display area shows a graph and numerical data: '-.0154 N' and '.0000 mm'. On the right side, there is a vertical toolbar with several icons and labels: '開始' (Start), 'リターン' (Return), 'リセット' (Reset), '終了' (End), '保存' (Save), and '名前を付けて保存' (Save with name). A blue box labeled '試験' (Test) has an arrow pointing to the '試験' tab. Four callout boxes provide instructions: ① '荷重バランス クリック' (Click Load Balance), ② 'ファイル名を入力、次へ クリック' (Enter file name, click Next), ③ '開始 試験開始して条件での結果を得る' (Start: Start test to get results under conditions), and ④ '終了 試験終了後、終了すると自動的にデータ保存' (End: After test ends, clicking End automatically saves data).

**試験**

① 荷重バランス クリック

② ファイル名を入力、次へ クリック

③ 開始  
試験開始して条件での結果を得る

④ 終了  
試験終了後、終了すると自動的にデータ保存

# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~10:40

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率

サンプルゴムを運ぶ際に、サンプルゴムをどのように扱うかについて説明します。

二軸試験機の状態から  
 $\lambda$ 補正のため、真のヤング率で補正する。  
<単軸の意味>

実を理解し、サンプルを提案します。

### 1-3. 二軸理論と単軸試験

ネオフックからムーニー-リネンモデルへの変換方法を説明します。

## 2. 単軸試験実習

10:45~11:30

昼食休憩

## 3. 二軸試験実習

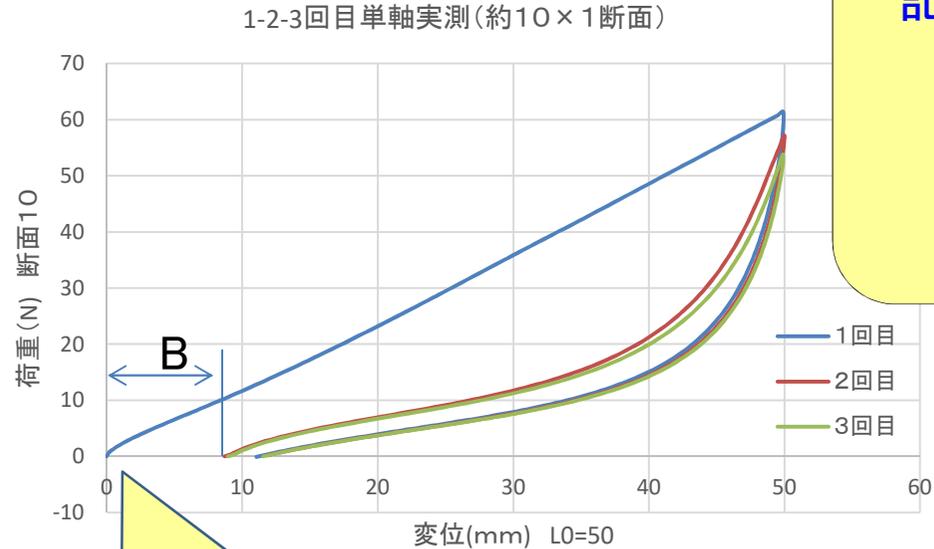
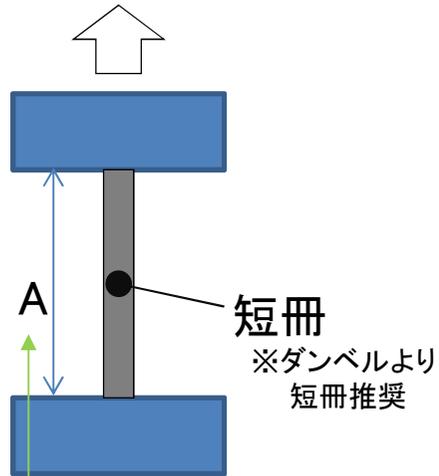
12:15~15:00

## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ

15:00~16:00

EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

# 単軸試験手順書



## 記録

- ・A
  - ・幅
  - ・厚さ
- 1/10mm単位

初めから荷重が出ない場合も記録スタート(保存)

0) 短冊の幅と厚みを測定、記録する。

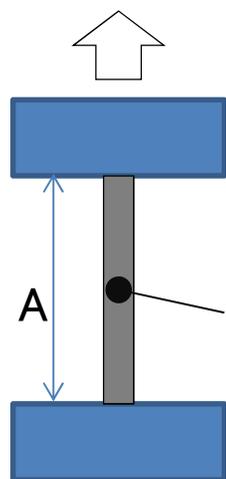
1) チャック間距離を測定する。A寸法を記録、

ひずみ算出時の自由長 $L_0$ とする。(へたり分で補正 $L_0 + \text{へたり} \Rightarrow L_0$ 更新)

2) ゼロ点はのちに補正して求めるが、へたりが明確になるように3回連続で測定する。

このとき、スタートと同時に記録開始、終了まで行きと戻り、全て記録する。

3) ばらつき、測定した各寸法誤差を補正のため、サンプル $N=2$ 以上測定を行う。

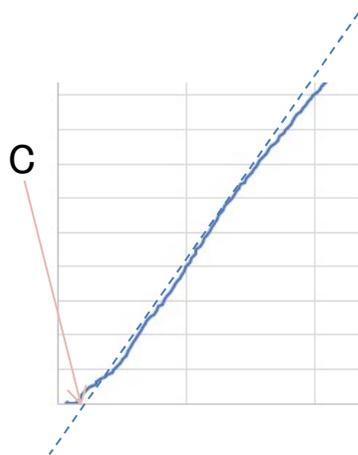
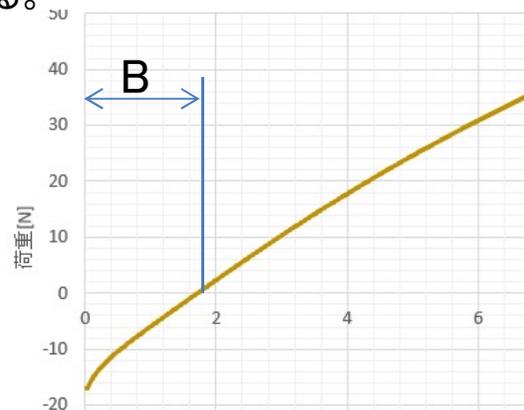
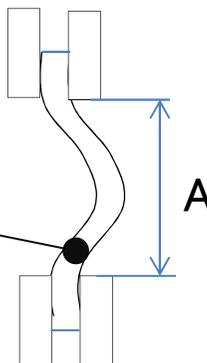


このとき

- ・A ・幅 ・厚さを1/10mm単位で記録する。

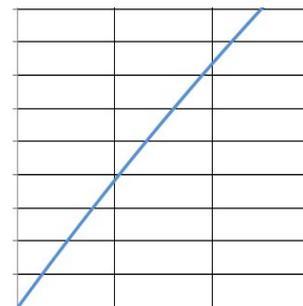
短冊

※ダンベルより  
短冊推奨



接線

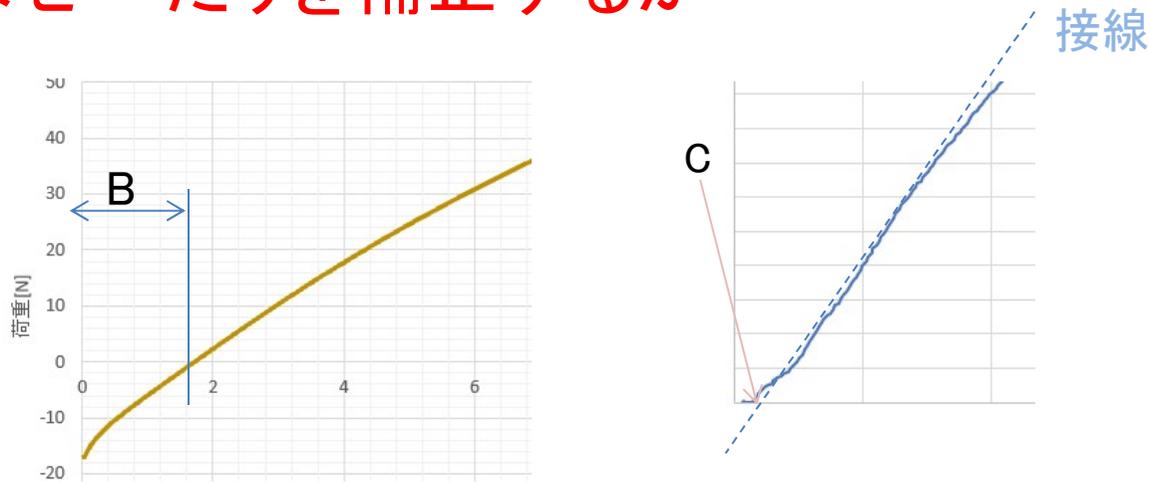
$L0=A+B$  へ更新  
C点を0点へシフトする。



単軸・二軸共に、このようなへたりは必ず発生 ⇒ データ処理で補正  
その為すべて記録する。

# なぜへたりを補正するか

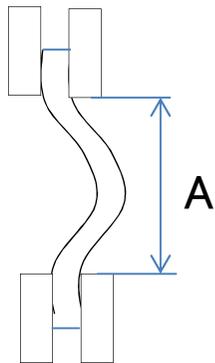
補正方法:補足



へたりにには大きく2つのものがあります。

組み付けると必ず、このようにたるみ(へたります)。この時、

- 硬いサンプルは左のように、  
マイナス荷重から始まりゼロ点を通って、直線的に増加します。
- 柔らかいサンプルは、初期迷走し右上のような曲線になります。



初期のセット量Aで変位を割った値が、ひずみ $\epsilon$ になりますが、

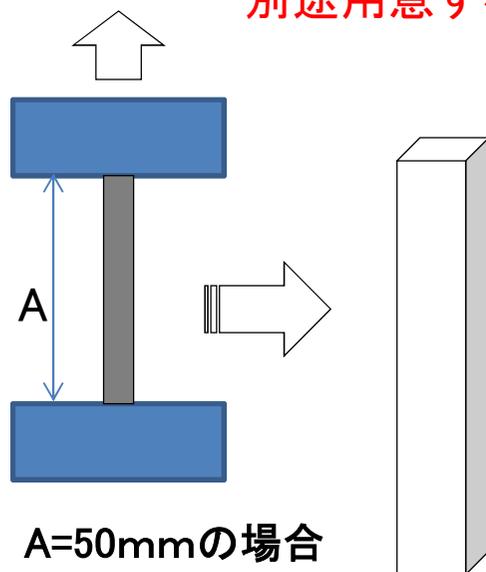
$\epsilon$ は、 $\epsilon = \text{変位}/A$ ではなく、

変位 / (A+B) 若しくは 変位 / (A+C) になります。

なぜ、単軸試験を行うか ⇒ 二軸試験機のベース移動不可。 ⇒ 単軸から補正。

## 単軸用試験片形状

二軸試験の残りで実施、  
二軸試験片が120mmギリの場合  
別途用意する。

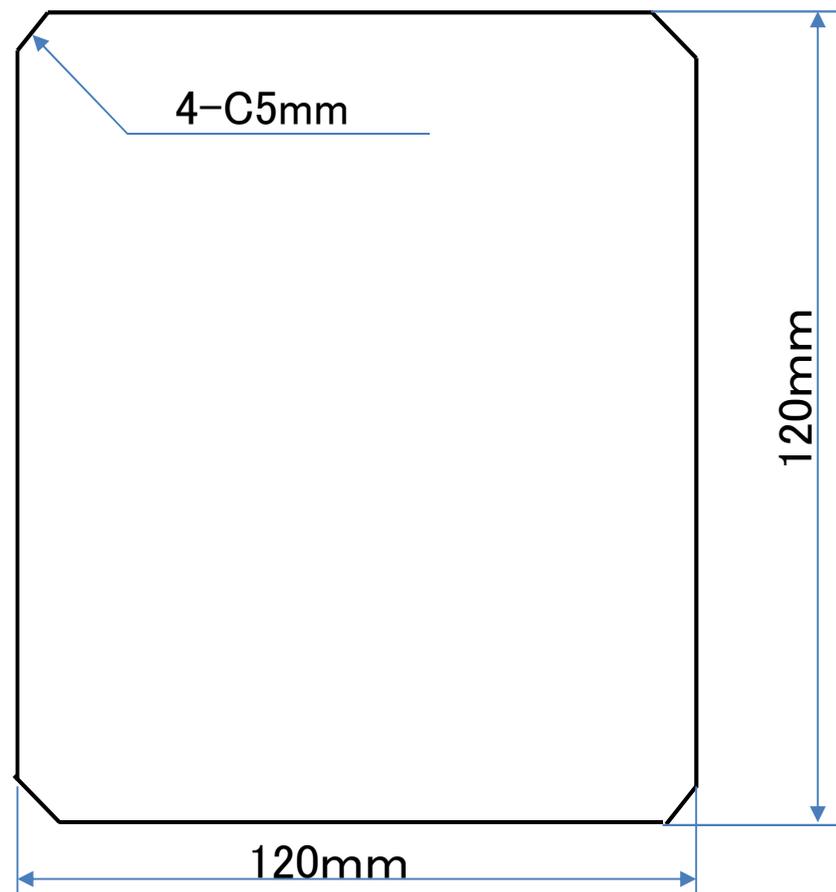


A=50mmの場合

- 幅 10~25 ※幅は剛性によって調整  
長さ 80mm以上  
60mm以下の場合、A寸法を調整  
厚さ 1~2mm
- 短軸試験: 3試験片  
(1試験片予備)

## 二軸用試験片形状

- 120mm × 120mm (厚さ 1~2mm)
- 二軸試験: 3枚 (予備含む)

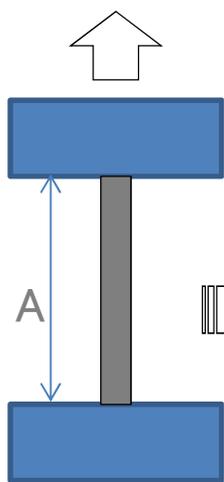


単軸、二軸サンプル共に型紙を配布して、当日カットできますので  
120mm以上のサンプルをそのままお持ちください。

## 記録表

### 単軸用試験片形状

二軸試験の残りで実施、  
二軸試験片が120mmギリの場合  
別途用意する。



A=50mmの場合

0.1mm単位での測定

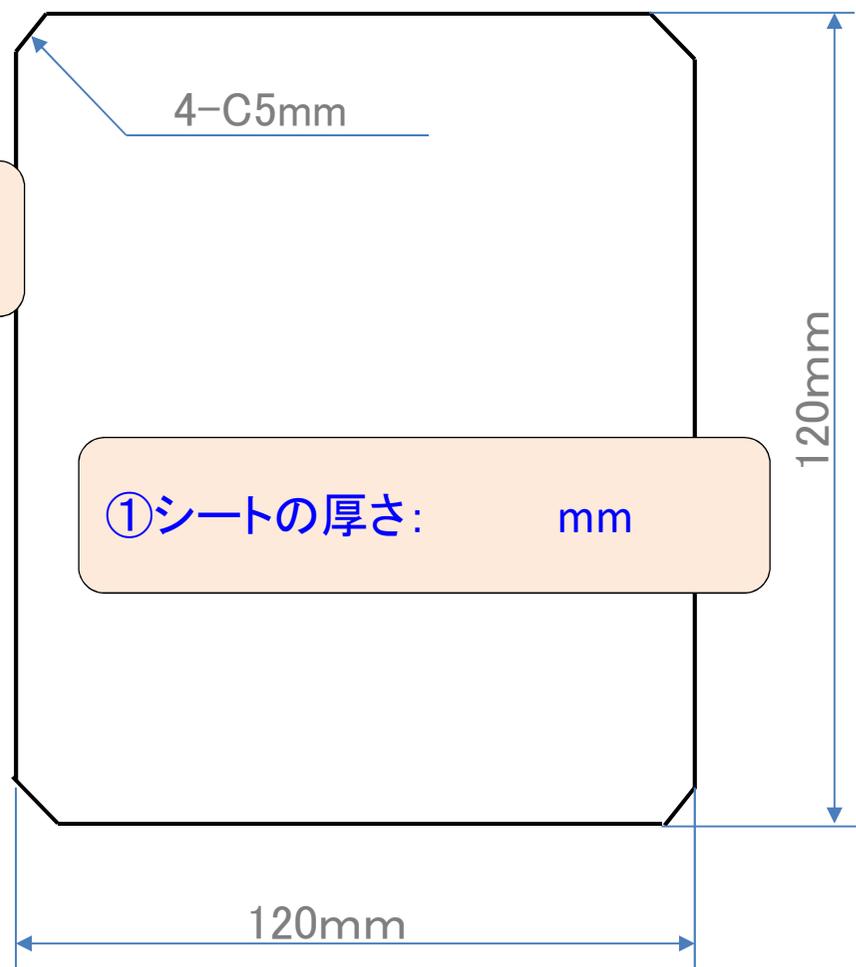
①

幅 : mm  
厚さ: mm  
取付A: mm

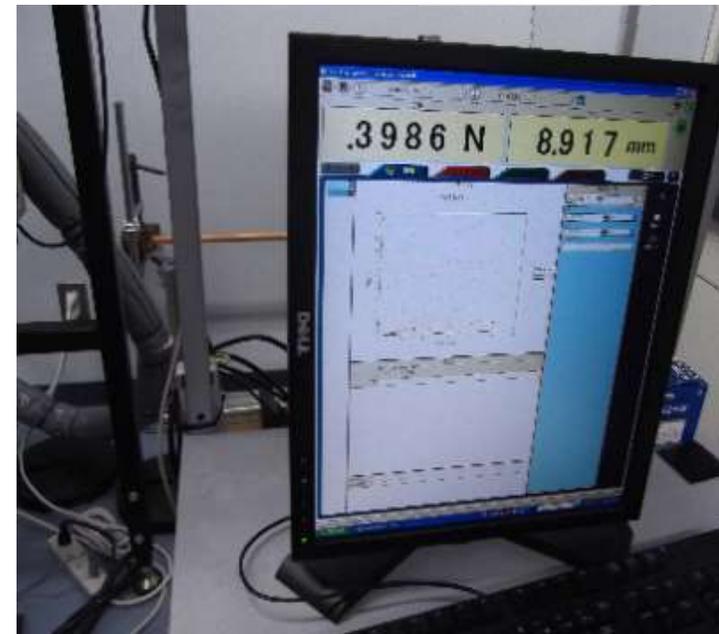
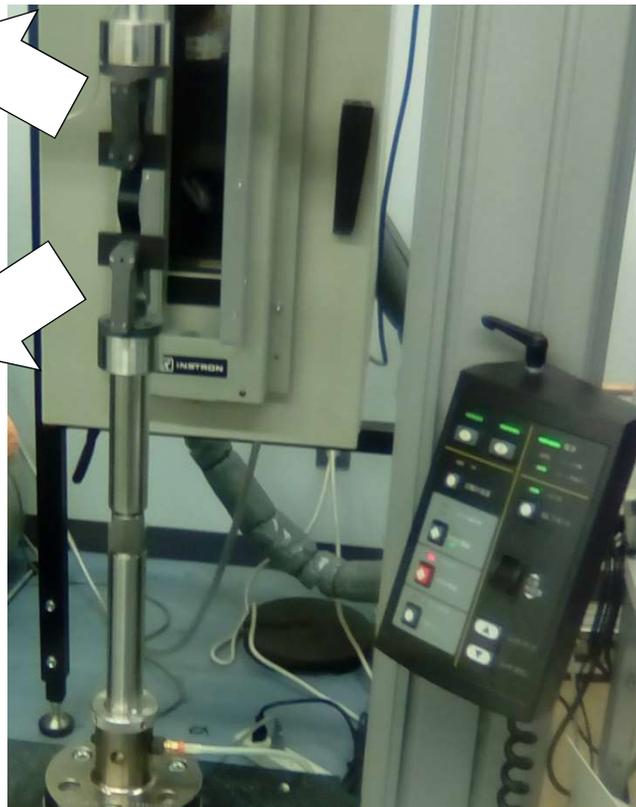
って調整

### 二軸用試験片形状

- 120mm × 120mm (厚さ 1~2mm)
- 二軸試験: 3枚 (予備含む)



# 試験室へ移動



100mm/minへ設定

# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~10:40

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率について

サンプルゴムを選ぶ上で、本当に求めたいヤング率が求められない現実を理解し、サンプルゴムをどのように選定し、ゴム製造メーカーへの上手な問い合わせ方法を提案します。

### 1-3. 二軸理論と実習前の試験機の操作概要と注意点

ネオフックからムーニー高次関数、またオグデンでの定式化を説明します。

## 2. 単軸試験実習 10:45~11:30

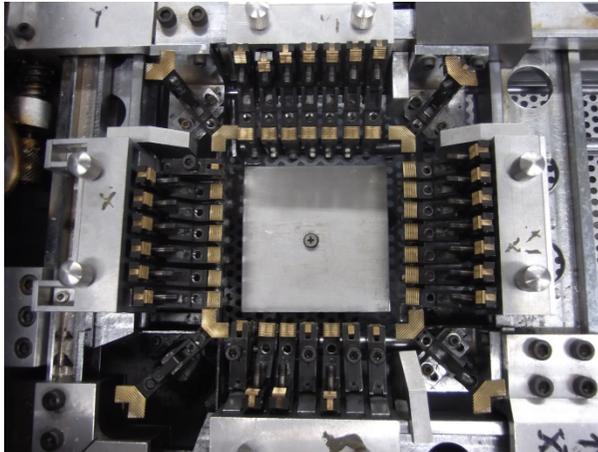
単軸試験のまとめは後程

## 3. 二軸試験実習 12:15~15:00

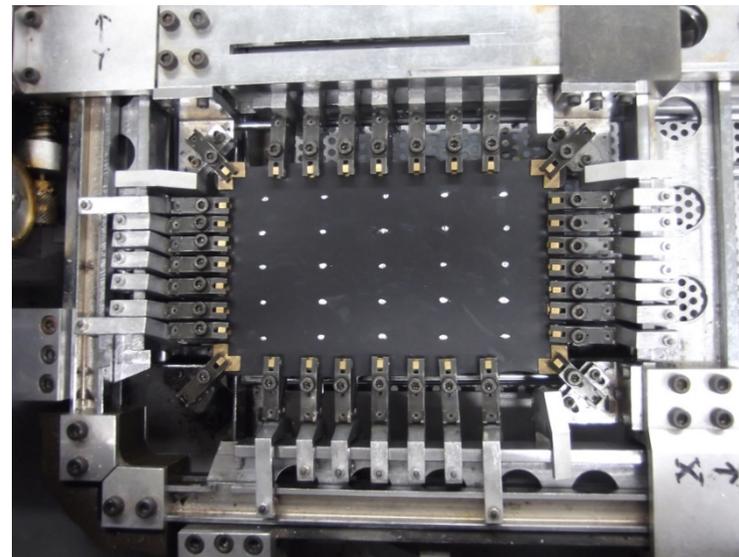
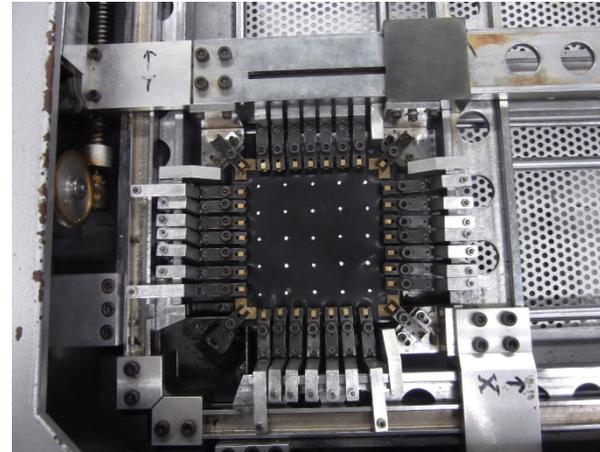
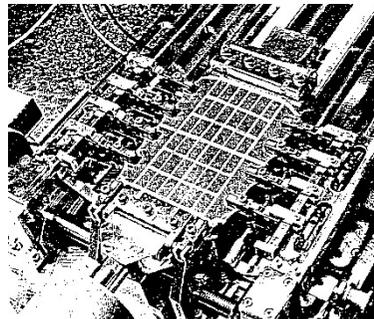
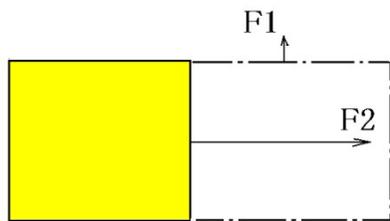
## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ 15:00~16:00

EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

# 二軸荷重 測定

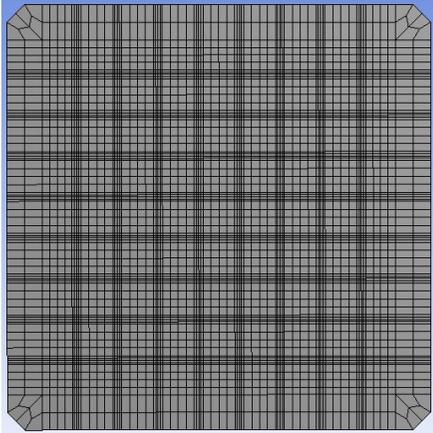


一軸拘二軸伸張試験

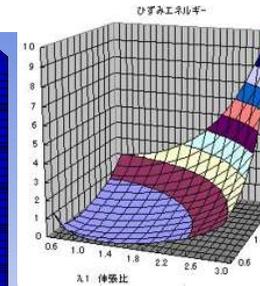
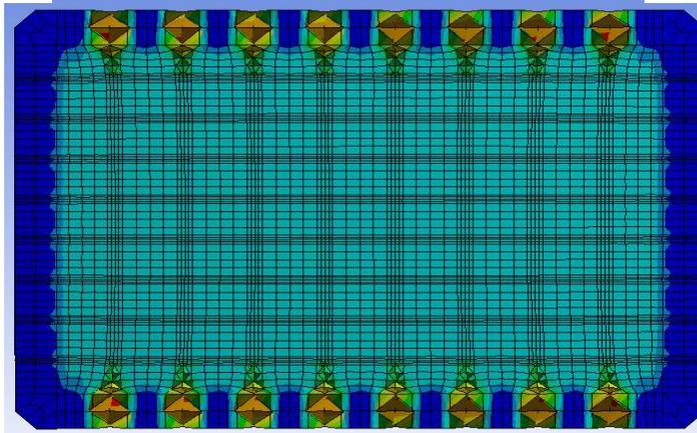


# ゴムの特性測定の基本

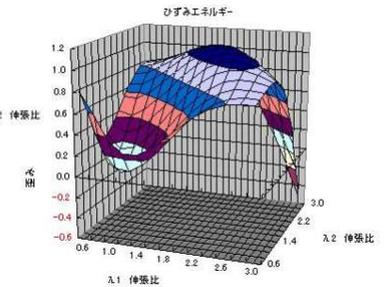
初期形状



変形後形状(ひずみ表示)

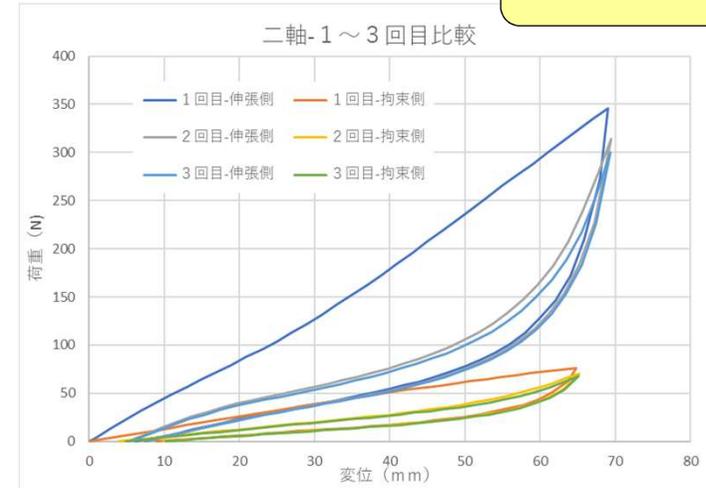


安定したデータ



不安定なデータ

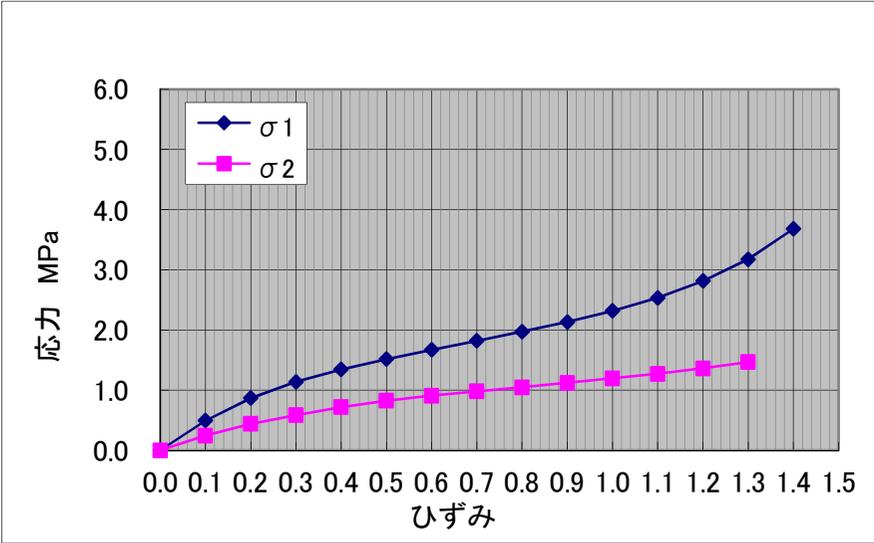
単軸と同様に、  
1回目と2回目は大きく異なり、  
2回目と3回目は少し異なります。  
3回目以降はほぼ重なります。



具体的方法は  
後半

# 荷重、変位から変換

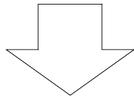
荷重vs変位 ⇒ 応力vs ひずみ換算



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

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

$$\sigma_3 = 0$$



※有効断面がポイント

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

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

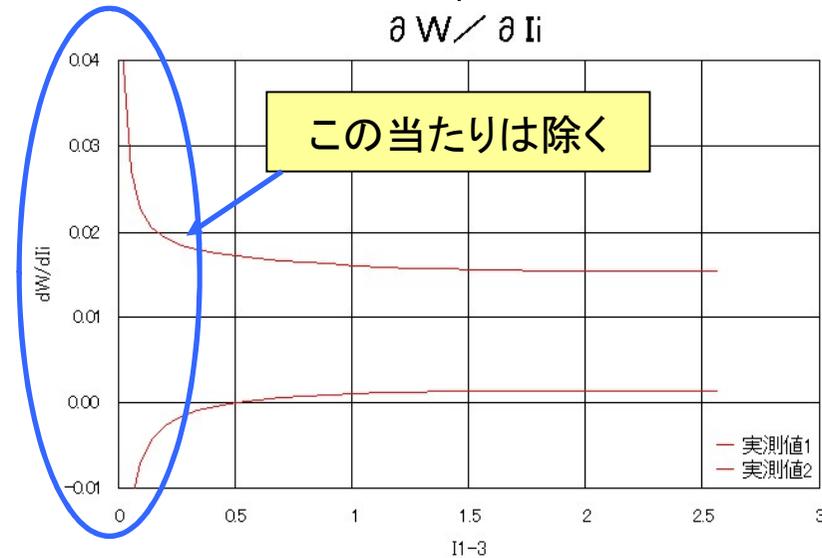
# エネルギー関数の定義

## Mooney高次モデルの定義

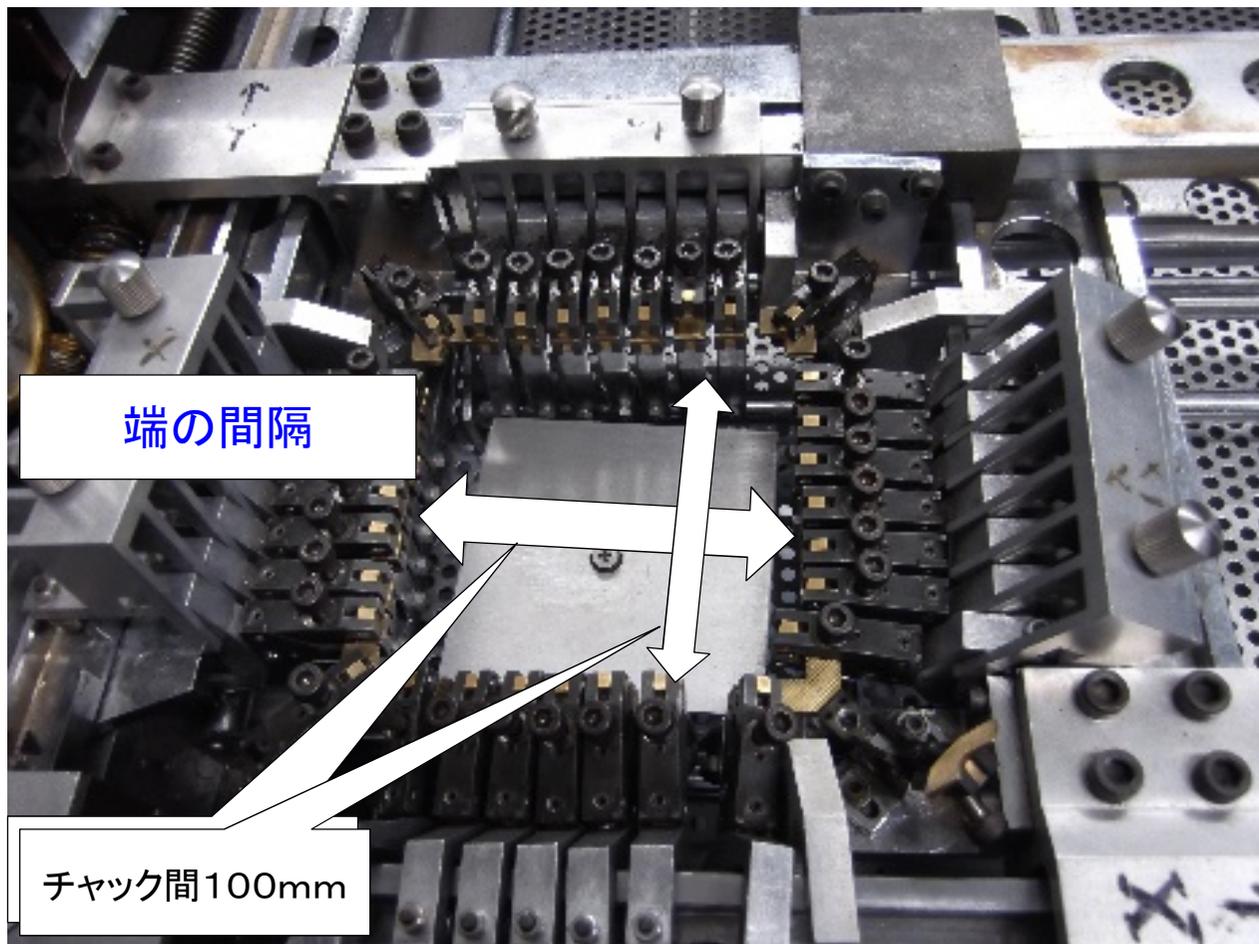
$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3$$

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

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

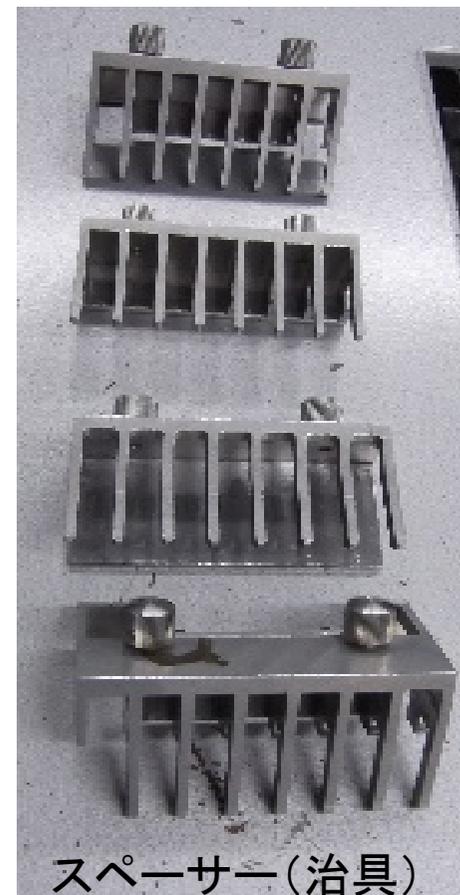


## 二軸試験測定手順 STEP1: サンプル取り付け



0) 試験機はチャック間距離100mm、スペーサーセット状態で貸出しとなる。スペーサーのセット状況をこのとき確認する。

**最大の注意点**  
作動前に必ずスペーサーを外すこと/チャックが壊れる



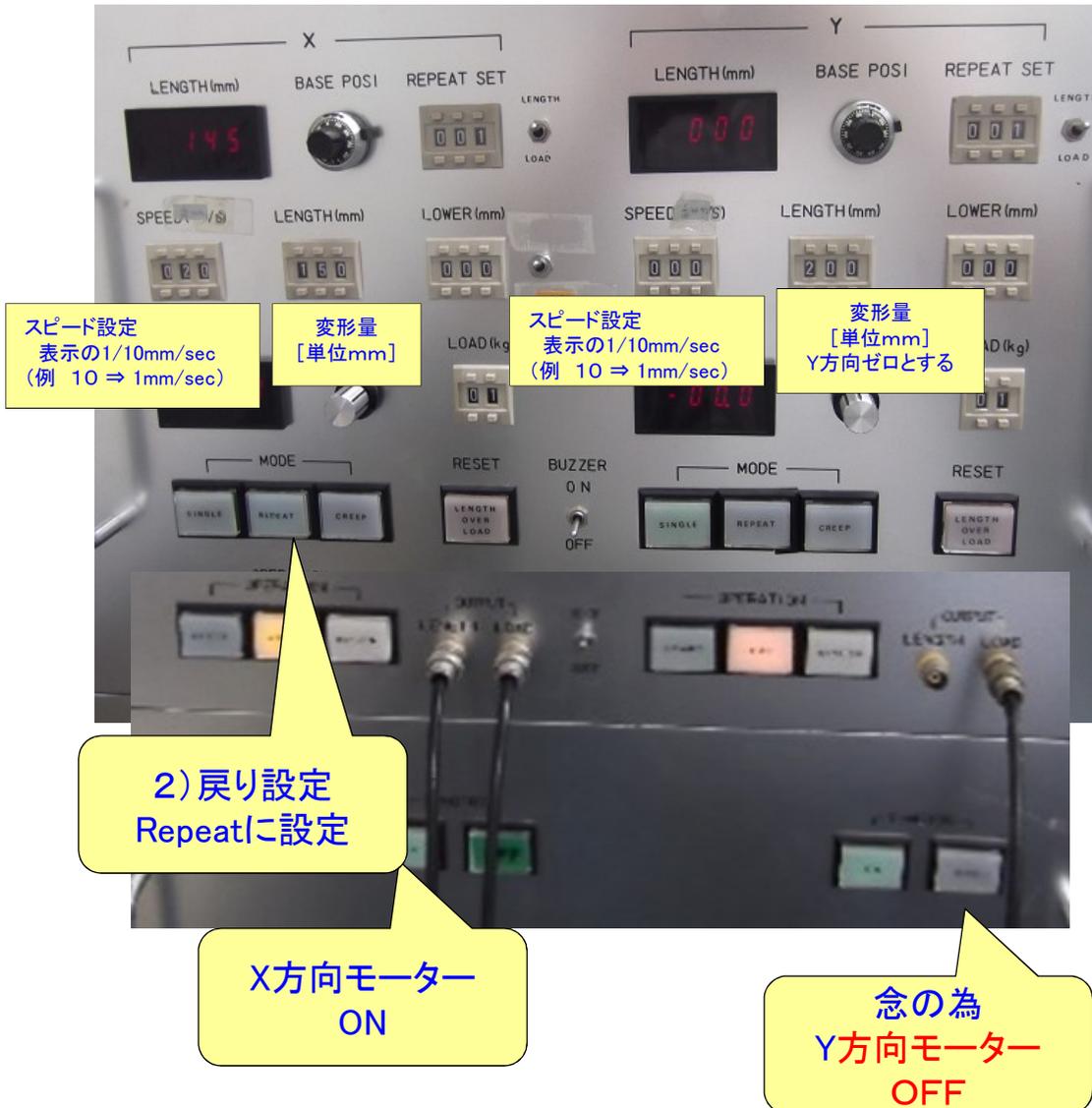
# 測定手順 STEP2:試験条件設定



注意) X及びY方向位置合わせ、4か所は触らないこと(試験場職員のみ設定可能)

# 測定手順 STEP2:試験条件設定

## 変位量及び変形スピードの設定



1) X方向スピードと変位量を設定する。

- ・スピード 20とする。  
設定スピード×1/10のため、  
即ち2mm/sec とする。
- ・変位量は、試験片の伸び  
限界から設定する。

伸張の目安は、ゴム材により設定  
するが100~120mm伸張して  
状況により、大きくしたり小さくしたり  
調整する。

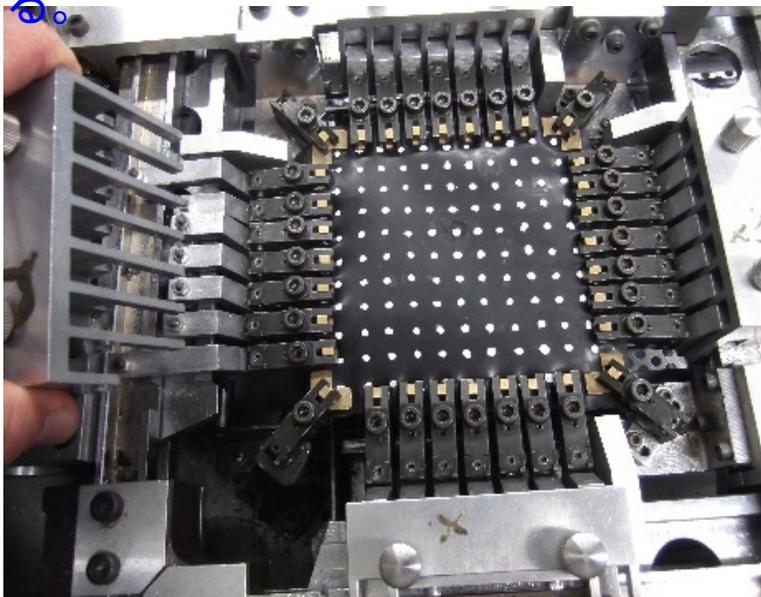
2) Repeatに設定  
伸張後、元に戻すモード。

3) Y方向の伸張は、一軸拘束  
一軸拘束二軸伸張試験のため  
Y方向変位はゼロとする。  
(Y方向モーターも停止で良い)

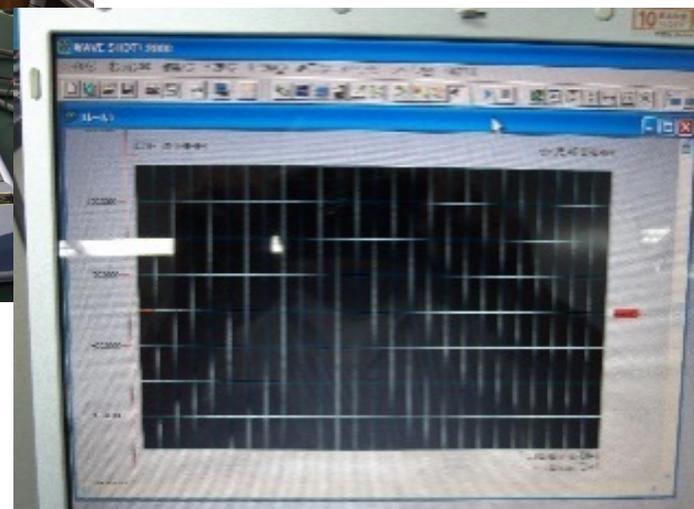
## 測定手順 STEP3:測定

重要事項:スペーサーは必ず測定前に外す。

1) 4方のスペーサーを外し、指さし点検する。

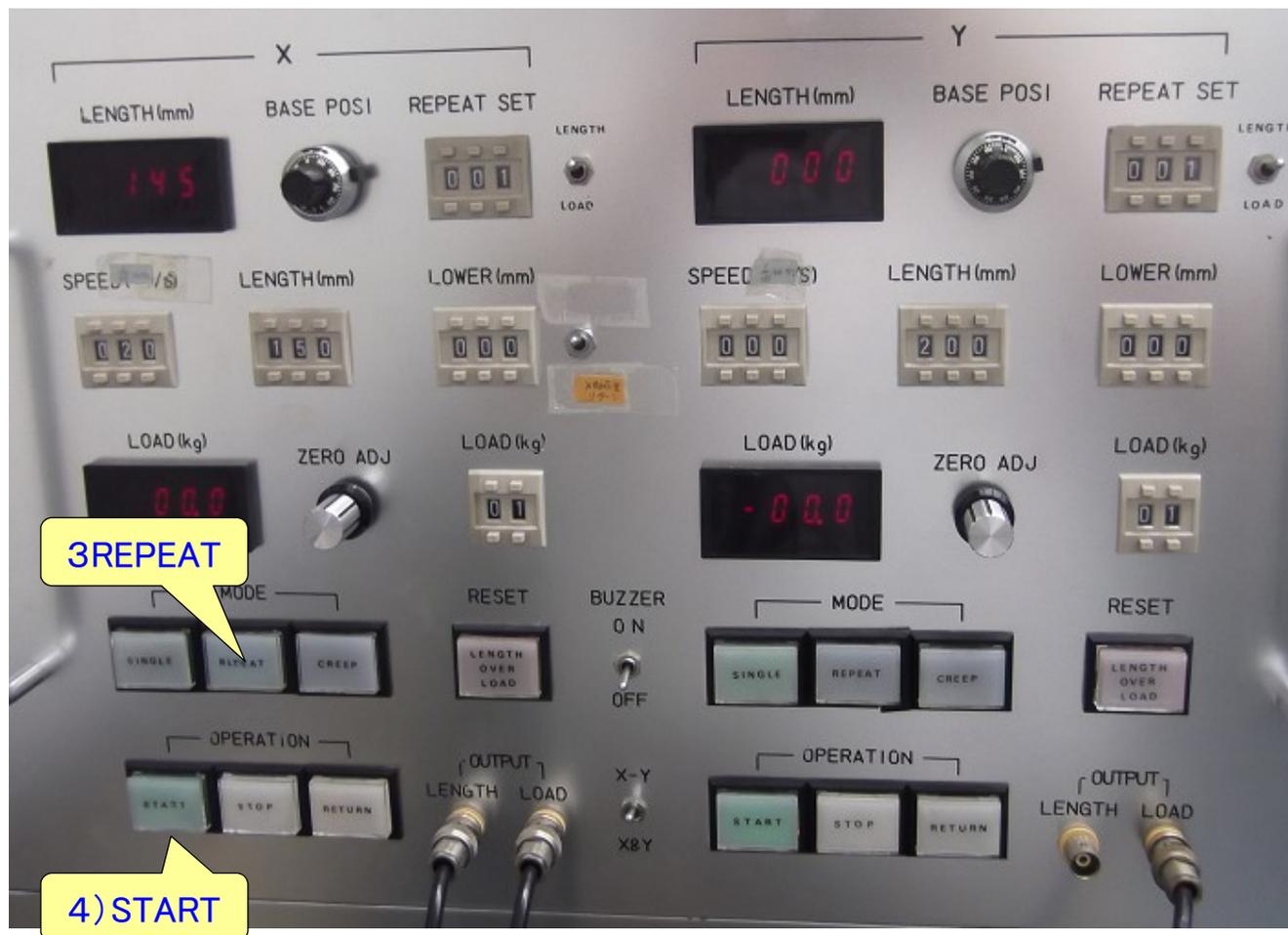


2) パソコンの測定開始スイッチ▶)をクリック  
現在のデータ消去していいですか  
と、聞いてくる。Yesで進む。



3) 試験機のスタート (次ページ参照)

- 3) 試験機をスタートする。 **モードがリピート**になっていることを確認。
- 4) **指差し点検、スペーサーが外れていることを再確認** ⇒ **START** を、押す。

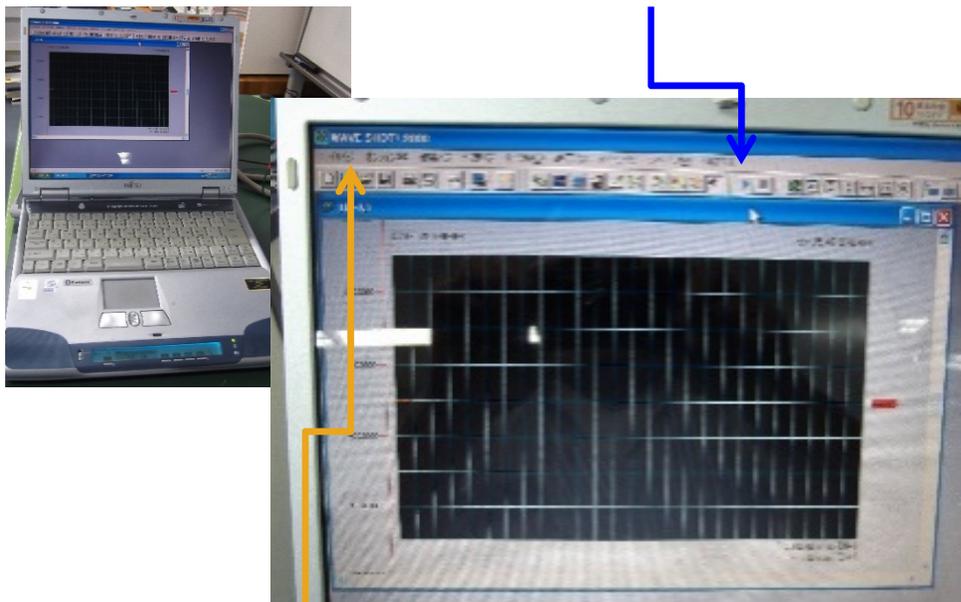


- 5) 設定伸張、変位ゼロに戻ると自動ストップとなる。  
10秒程度、インターバル(待ちをして)、再度STARTを押す。  
**再度戻り、3回目測定で終了(3回目のSTART)**

3往復測定後

## 測定手順 STEP4:データ保存

0) パソコンの測定終了スイッチ(■)をクリック



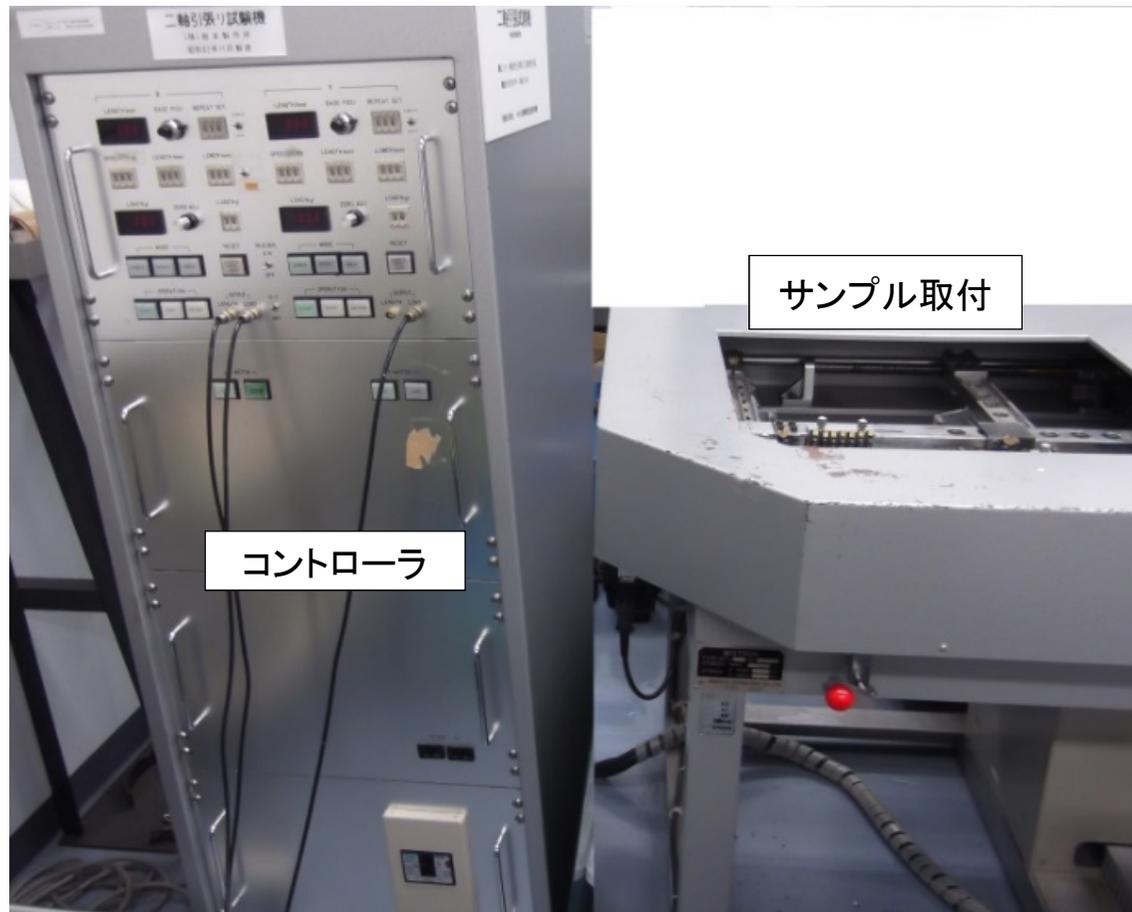
1) データ保管

画面上のファイル ⇒ 試験装置形式(ndh形式) 及びCSV形式ファイルで保存する。  
※特に、後にEXCEL処理する為、CSV形式は必須である。

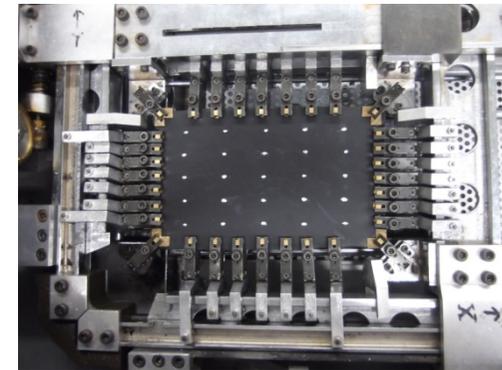
2) 試験場職員の方にデータ送付していただくか、USB保存をお願いする。  
正規手順: 試験場でUSBウイルススキャンしたのち、保存していただく。

以下、回帰手順を別途示す。

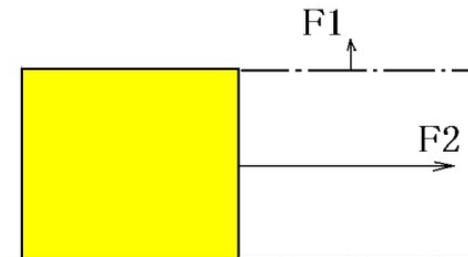
# 試験室へ移動



試験機概要



ゴムの変形形態



一軸拘束二軸伸張

# - 本日の予定 -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点(最重要) 10:00~10:40

### 1-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

実習で行う単軸試験でのセット時のへたり補正方法について説明し、単軸試験でのゴムの挙動を確認します。

### 1-2. 見かけ上のヤング率について

サンプルゴムを選ぶ上で、本当に求めたいヤング率が求められない現実を理解し、サンプルゴムをどのように選定し、ゴム製造メーカーへの上手な問い合わせ方法を提案します。

### 1-3. 二軸理論と実習前の試験機の操作概要と注意点

ネオフックからムーニー高次関数、またオグデンでの定式化を説明します。

## 2. 単軸試験実習 10:45~11:30

昼食休憩

## 3. 二軸試験実習 12:15~15:00

## 4. 単軸及び二軸試験のまとめ 15:00~16:00

EXCELひな形を使って、回帰からエネルギー関数を定義します。その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

## データ処理: 共通事項

単軸、二軸共にデータ数が多いため、間引きを実施  
(EXCELシート使用して特に二軸データは200行以下にする)

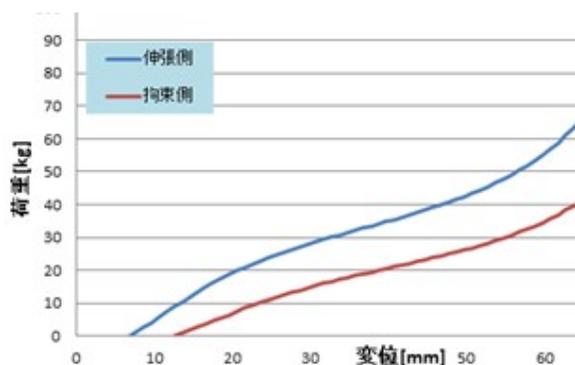
① **間引き**: 処理を楽にするため、データを10分の1に間引く  
基本EXCELファイルに測定データをコピー、データ削減する

記録: 3回 30秒での行き、戻り繰り返し4000行のデータ(参考)

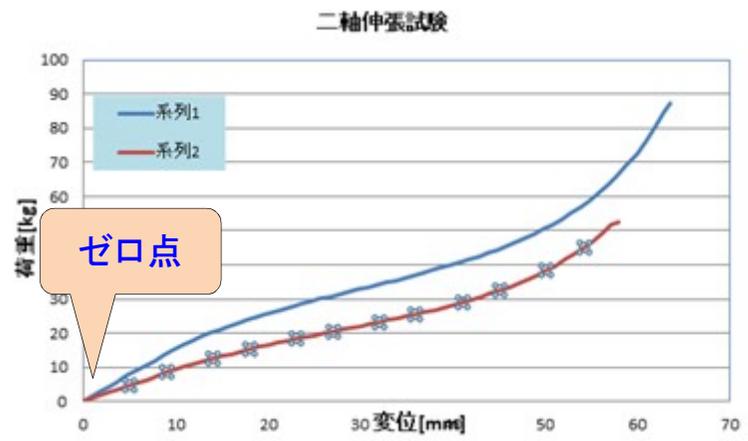
② **不要データの削除**: 1回目データ、若しくは3回目データのみ残す  
必要なデータ以外削除する。

③ **ゼロ点補正 & シフト**: ダレ等いの処理を行い、ゼロ点を求める

単軸、二軸共にシフトしてゼロ変位vsゼロ荷重とする



シフト  
→



# EXCEL機能の簡単な紹介

PCのショートカットキー

**F5** :セルのジャンプ

**CTRL+c** コピー

**CTRL+x** 切り取り

**CTRL+v** 貼り付け 寸法記録及び間引き.xlsで実演



カーソル合わせて  
**CTR+1** セルの書式表示

**CTR+2** 太字  
**CTR+3** 斜字  
**CTR+4** アンダーバー  
**CTR+5** 訂正線

厚み(記録) ⇒ 厚み(記録)

厚み(記録) ⇒ 厚み(記録)

厚み(記録) ⇒ 厚み(記録)

厚み(記録) ⇒ 厚み(記録)

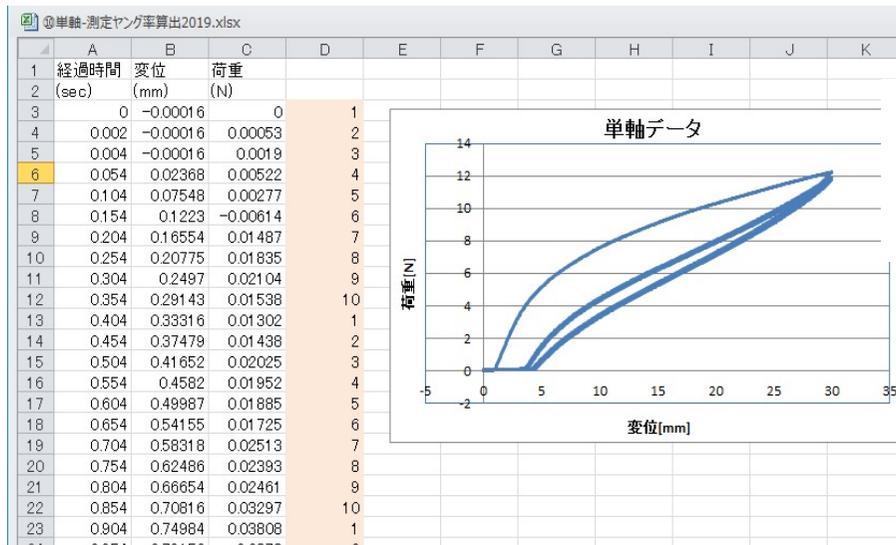
# 単軸データ処理からヤング率算出

※ 1)~順に実施すると、ヤング率が算出でき。

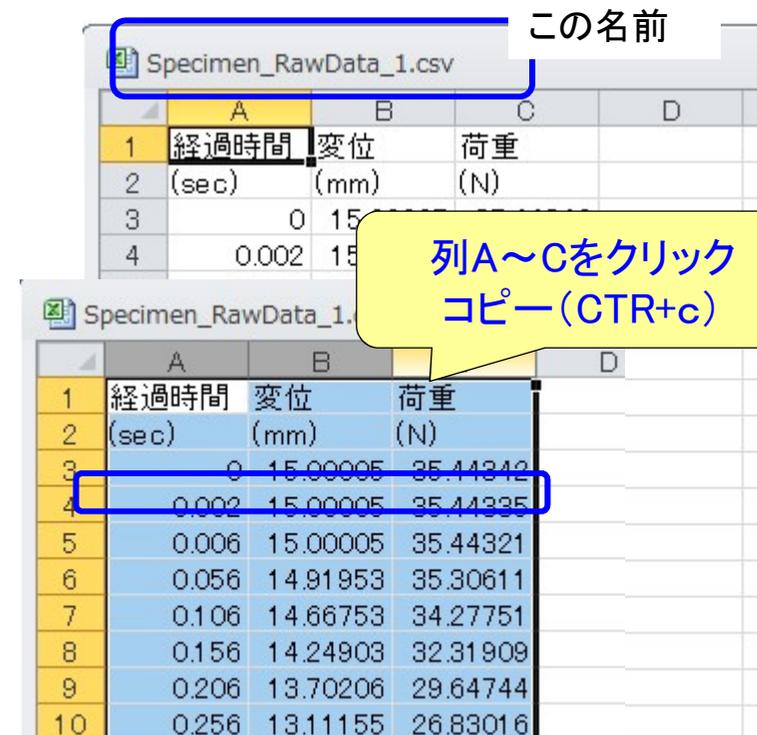
[本日の手順]

## データの間引き

1) ⑩単軸-測定ヤング率算出2019.xlsxm 配布ファイル を開く



2) 測定時名前を付けた  
ディレクトリーのデータを開く  
(ディレクトリー名:任意の名前\_tcylic\_RawData)



列A~Cをクリック  
CTR+c

	A	B	C	D
1	経過時間	変位	荷重	
2	(sec)	(mm)	(N)	
3	0	15.00005	35.44342	
4	0.002	15.00005	35.44335	
5	0.006	15.00005	35.44321	
6	0.056	14.91953	35.30611	
7	0.106	14.66753	34.27751	
8	0.156	14.24903	32.31909	
9	0.206	13.70206	29.64744	
10	0.256	13.11155	26.83016	
11	0.306	12.55992	24.25793	
12	0.356	12.10441	22.41601	
13	0.406	11.67508	20.93203	
14	0.456	11.25326	19.52024	
15	0.506	10.83449	18.15697	
16	0.556	10.41712	16.82997	
17	0.606	10.00017	15.52504	
18	0.608	9.98346	15.47317	

3) コピー&ペースト

	A	B	C	D
1	経過時間	変位	荷重	
2	(sec)	(mm)	(N)	
3	0	-0.0	0	1
4	0.002			
5	0.004			
6	0.054			

A列 若しくは A1をクリック  
貼り付け(CTR+v)

4) 保護のため、ファイルを別名保存

4) マクロ CTR+m 実行      もしくは自力でD列でソートする。

手動作業: マクロ実行されたら次ページ

A3-D3 を選択 ⇒ Shift+CTR+ ↓ ⇒ データ:並べ替え D列の昇順で並べ替え

下まで選択される

単軸データ

Microsoft I

並べ替え

D列で並べ替え

経過時間 (sec)	変位 (mm)	荷重 (N)
0	-0.00016	0
0.002	-0.00016	0.00053
0.004	-0.00016	0.0019
0.054	0.02368	0.00522
0.104	0.07548	0.00277
0.204	0.16554	0.01487
0.254	0.20775	0.01835
0.304	0.2497	0.02104
0.354	0.29143	0.01538
0.404	0.33316	0.01302
0.454	0.37479	0.01438
5520	275.082	0.79318
5521	275.132	0.7515
5522	275.182	0.70987
5523	275.232	0.66814
5524	275.282	0.62646
5525	275.332	0.58484
5526	275.382	0.54316
5527	275.432	0.50148
5528	275.482	0.4598
5529	275.532	0.41818
5530	275.582	0.37645
5531	275.632	0.33482
5532	275.682	0.29309
5533	275.732	0.25152
5534	275.782	0.20989

経過時間 (sec)	変位 (mm)	荷重 (N)	ヤング率 [N/mm <sup>2</sup> ]	幅[mm]
0	-0.00016	0		12.2
0.404	0.33316	0.01302		黄色: 入力
0.904	0.74984	0.03808		
1.404	1.16652	0.35539		
1.904	1.5832	1.09271		
2.404	1.99982	1.79657		

目的とする  
1回目若しくは3回目データのみ残す

### 5) データの間引き : c列2以上のデータを削除

	A	B	C	D
1	経過時間	変位	荷重	
2	(sec)	(mm)	(N)	
3	0	-0.00016	0	1
4	0.404	0.33316	0.01302	1
5	0.904	0.74984	0.03808	1
6	1.404	1.16652	0.35539	1
7	1.904	1.5832	1.09271	1
8	2.404	1.99982	1.79657	1
9	2.904	2.4165	2.45493	1
10	3.404	2.83318	3.06329	1
11	3.904	3.2498	3.60644	1
12	4.404	3.66648	4.05295	1
623	32.954	27.45818	11.77766	2
624	33.454	27.87481	11.8538	2
625				
626				
627				
628				
629	35.954	29.95814	12.21491	2
630	36.358	29.70995	11.96437	2

F列の2以上の数値の  
データを削除

8) 保護のため、シートをコピー  
シート位置クリック⇒CTR押しながらドラッグ  
(ファイル別名保存も必要に応じて)

### D列“1”のみの間引きデータで 6) 目的のデータのみ残す(1or3回目)

B列を確認しながら  
行き⇒戻り⇒行き⇒戻り  
2/3削除

右クリック ⇒ 削除

このバーが下から  
1/3くらいが目安

必ず上にシフト  
を選択

	A	B	C	D
1	経過時間	変位	荷重	
2	(sec)	(mm)	(N)	
3	0	-0.00016	0	1
4	0.404	0.33316	0.01302	1
5	0.904	0.74984	0.03808	1
6	1.404	1.16652	0.35539	1
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

削除 ? X

削除

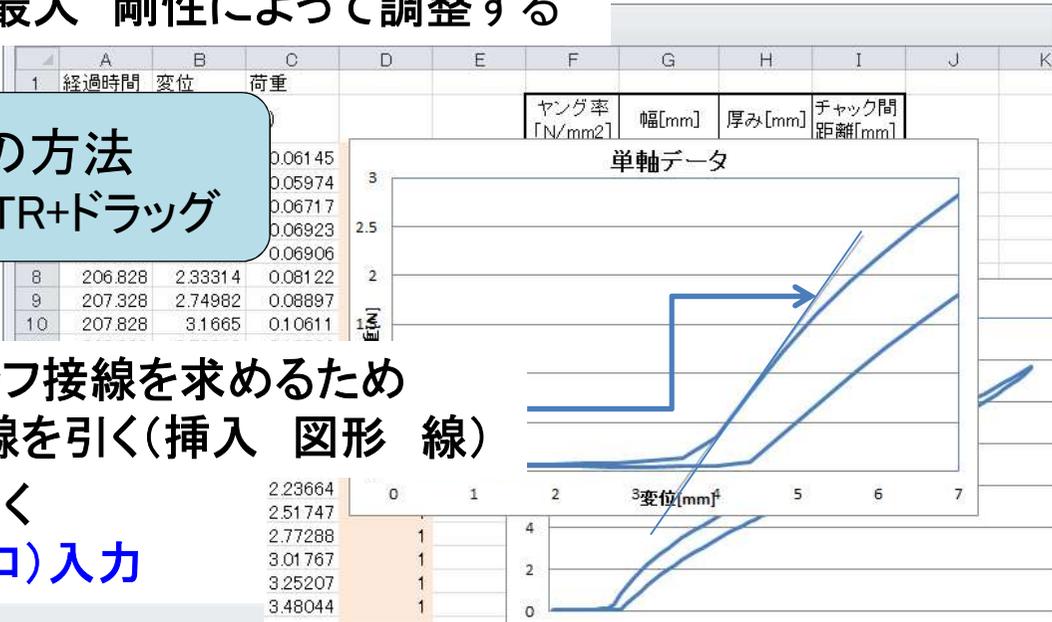
- 左方向にシフト(L)
- 上方向にシフト(U)
- 行全体(R)
- 列全体(C)

OK

**ゼロ点シフト**

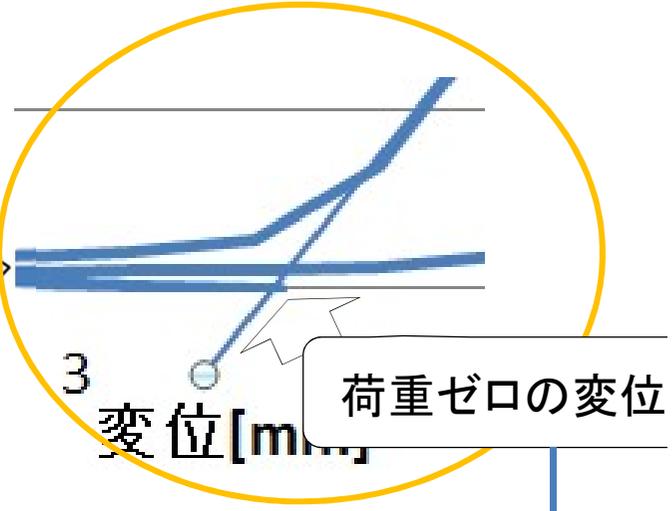
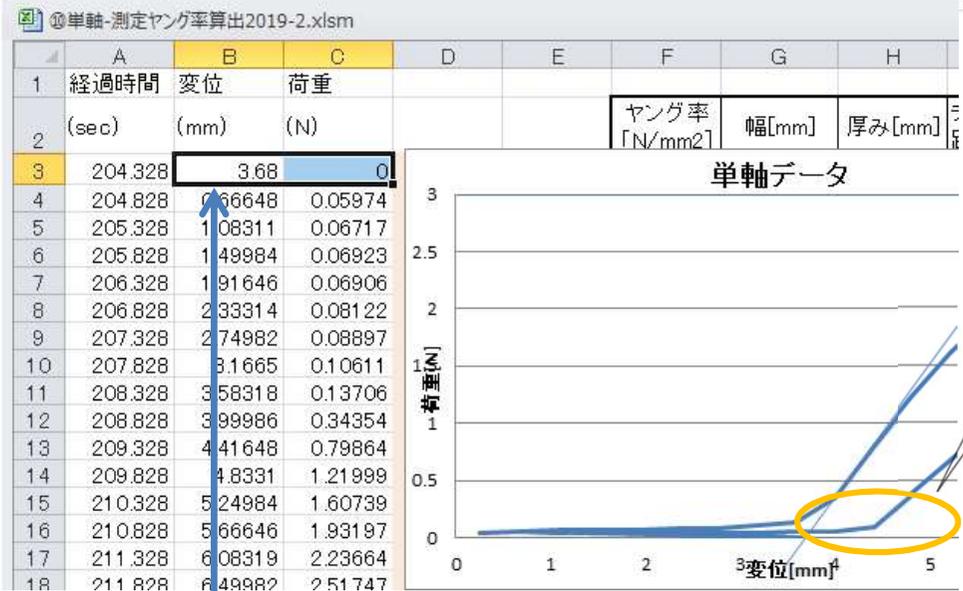
7) グラフをコピーして拡大する  
 拡大目安は、X軸の最大を 6~10mm  
 Y軸を最大 剛性によって調整する

グラフコピーの方法  
 グラフをクリック CTR+ドラッグ



8) グラフ接線を求めるため  
 接線を引く(挿入 図形 線)

9) 目視で接線とゼロ荷重交点を引く  
 B3 に交点変位 C3に0(ゼロ)入力



10) ①G3-I3に必要情報(幅、厚さ)を入力

マクロ CTR+I を実行

マクロが実行されたら次ページ  
若しくは手動で下記②~⑥実施

E	F	G	H	I
ヤング率 [N/mm2]	幅[mm]	厚み[mm]	チャック間 距離[mm]	
	12.2	2.1	50	
	黄色:入力			

②C、D(2列)挿入

③C3に “=(B3-\$B\$3)/(\$ I \$3+ \$B\$3) ..ひずみ計算

④D3に “=E3/\$G\$3/\$H\$3 ...応力計算

⑤C3-D3を選択 D3セルの  
右下をダブルクリック

へたりを考慮した式

⑥C1~D2 ラベル作成(必要に応じて)

単軸-測定ヤング率算出2019-3.xlsx

	A	B	C	D	E
1	経過時間	変位	ひずみ	応力	荷重
2	(sec)	(mm)	[-]	[N/mm2]	(N)
3	204.328	3.68	0	0	0
4	204.828	0.66648	-0.05614	0.002332	0.05974
5	205.328	1.08311	-0.04838	0.002622	0.06717
6	205.828	1.49984	-0.04061	0.002702	0.06923
7	206.328	1.91646	-0.03285	0.002696	0.06906
8	206.828	2.33314	-0.02509	0.00317	0.08122
9	207.328	2.74982	-0.01733	0.003473	0.08897
10	207.828	3.1665	-0.00957	0.004142	0.10611
11	208.328	3.58318	-0.0018	0.00535	0.13706
12	208.828	3.99986	0.005959	0.013409	0.34354
13	209.328	4.41648	0.01372	0.031173	0.79864
14	209.828	4.8331	0.021481	0.047619	1.21999
15	210.328	5.24984	0.029244	0.06274	1.60739
16	210.828	5.66646	0.037006	0.075409	1.93197
17	211.328	6.08319	0.044769	0.087301	2.23664
18	211.828	6.49982	0.05253	0.098262	2.51747

単軸データ

荷重[N]

変位[mm]



## データ処理: 共通事項

二軸も同様に(再確認)

単軸、二軸共にデータ数が多いため、間引きを実施  
(EXCELシート使用して特に二軸データは200行以下にする)

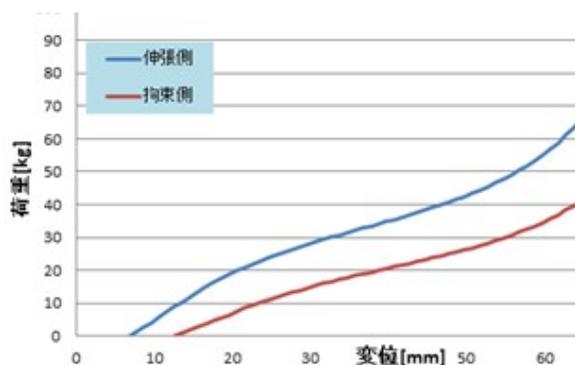
①間引き: 処理を楽にするため、データを10分の1に間引く  
基本EXCELファイルに測定データをコピー、データ削減する

記録: 3回 30秒での行き、戻り繰り返し4000行のデータ(参考)

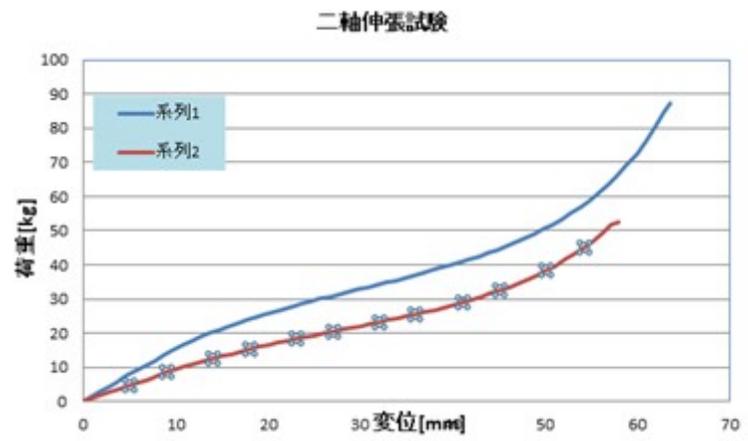
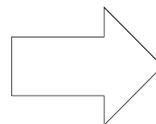
②不要データの削除: 1回目データ、若しくは3回目データのみ残す  
必要なデータ以外削除する。

③ゼロ点補正 & シフト: ダレ等いの処理を行い、ゼロ点を求める

単軸、二軸共にシフトしてゼロ変位vsゼロ荷重とする



シフト



# 二軸データ回帰 手順概要

- 1) 間引き
- 2) 荷重調整-ゼロ点補正

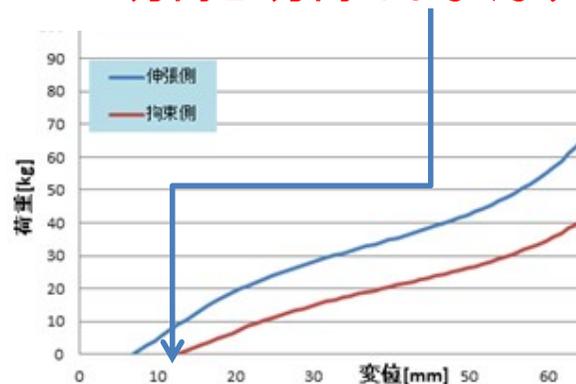
X変位に対する、X及びY荷重(1対2のデータ)が必要なので  
元データは、時間(A列)、X変位(B列)、X荷重(C列)、Y荷重(D列)ですが、  
ゼロ点補正で、X変位に対するX及びY荷重のセットが崩れるので、

- 3) 最初のX変位(A)-X荷重 ゼロ点シフト
- 4) Y荷重も変位をゼロ点シフトした後、数式化して
- 5) X変位に対してY荷重を計算式から求める。

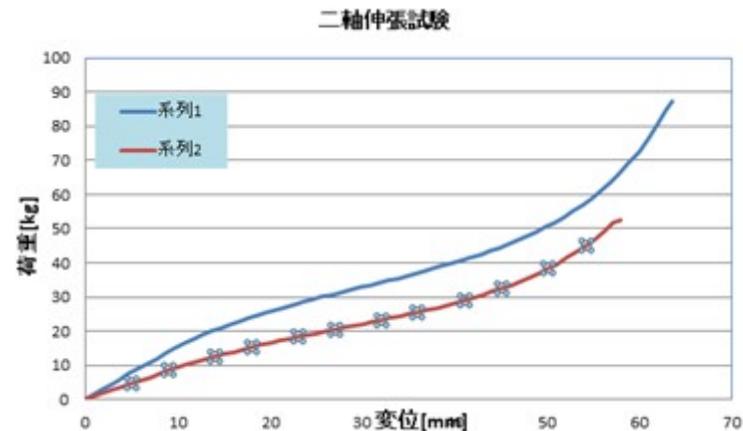
⇒ 3列の値をひな形へコピー(値コピー)して回帰す

## ゼロ点補正

ゼロ点補正すると、同じ変位に対する  
X方向とY方向ではなくなりずれる



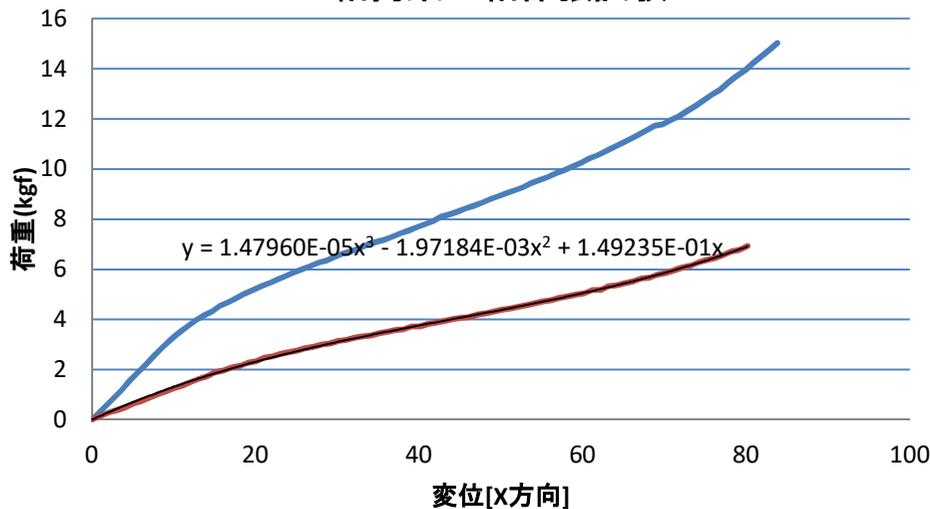
シフト



シフトすると変位がずれたまま

# EXCEL回帰式を求め、同じ変位に対するX方向荷重(既存データ)及びY方向荷重を式から求める。

一軸拘束二軸伸張試験



富山工業技術センター、生活工学研究所  
 2軸引張試験機のみかみ具にゴムシートを固定し、引張る  
 2軸引張試験、1軸固定1軸引張試験(Y軸固定し、X軸を引張った)  
 1.0mm/s  
 ①1回目 事前の予備引張等は行わず、組み付け後、即測定を行った。  
 ②1回目、2回目と同じ伸張量で3回目の身長測定を行った。  
 引張試験結果シートに記載  
 距離[mm]はクロス間ヘッド距離の増加分を示す。  
 荷重は引張荷重[kg]  
 装置引張限界は200mm。

ひな形シートに張り付け回帰

X変位に対する  
X及びY荷重を求め、右に代入

これが目的です。  
では実作業...

サンプル厚さ  
ヤング率 1.102235 N/mm2

入力 コピー

試料No.	No1				[伸長比-応力換算]			
試験片	厚さ[mm]	1.2	へ列[mm]		λ 1	σx [N/mm2]	λ 1	σy [N/mm2]
	変位	荷重 [kgf]	荷重Y [kgf]	変位X				
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.000
2	1.0000	1.0000	0.5000	1.0000	1.0100	0.1307	1.0000	0.065
3	2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0200	0.2613	1.0000	0.130
4	3.0000	3.0000	1.5000	3.0000	1.0300	0.3920	1.0000	0.196
5	4.0000	4.0000	2.0000	4.0000	1.0400	0.5227	1.0000	0.261
6	5.0000	5.0000	2.5000	5.0000	1.0500	0.6533	1.0000	0.326
7	6.0000	6.0000	3.0000	6.0000	1.0600	0.7840	1.0000	0.392
8	7.0000	7.0000	3.5000	7.0000	1.0700	0.9147	1.0000	0.457
9	8.0000	8.0000	4.0000	8.0000	1.0800	1.0453	1.0000	0.522
0	9.0000	9.0000	4.5000	9.0000	1.0900	1.1760	1.0000	0.588
1	10.0000	10.0000	5.0000	0.0000	1.1000	1.3067	1.0000	0.653
2	11.0000	11.0000	5.5000	1.0000	1.1100	1.4373	1.0000	0.718
3	12.0000	12.0000	6.0000	2.0000	1.1200	1.5680	1.0000	0.784
4	13.0000	13.0000	6.5000	3.0000	1.1300	1.6987	1.0000	0.849
5	14.0000	14.0000	7.0000	4.0000	1.1400	1.8293	1.0000	0.914
6	15.0000	15.0000	7.5000	5.0000	1.1500	1.9600	1.0000	0.980
7	16.0000	16.0000	8.0000	6.0000	1.1600	2.0907	1.0000	1.045
8	17.0000	17.0000	8.5000	7.0000	1.1700	2.2213	1.0000	1.110
9	18.0000	18.0000	9.0000	8.0000	1.1800	2.3520	1.0000	1.176
0	19.0000	19.0000	9.5000	9.0000	1.1900	2.4827	1.0000	1.241
1	20.0000	20.0000	10.0000	0.0000	1.2000	2.6133	1.0000	1.306

# 二軸データ回帰 手順概要

## データの間引き

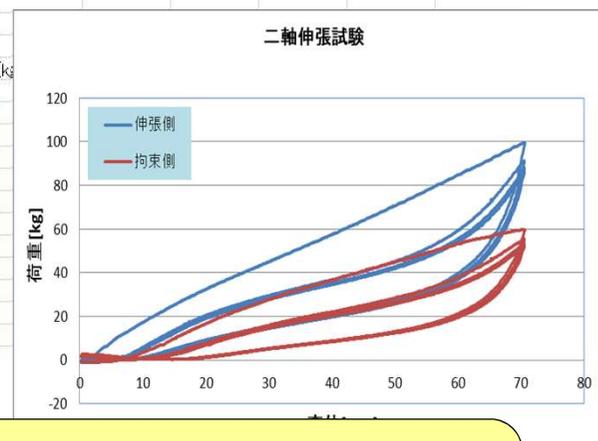
### 1) 二軸試験機からの測定したcsvデータをEXCEL表示

	A	B	C	D	E	F
1	タイトル:					
2	メモ:					
3	機種名:	NR-2000	サンプリング	100 [ms]		
4	トリガ条件:トリガ日付	E2017/09/11 09:58:39	000ms	000us		
5	垂直カーソル情報:	なし				
6	演算波形Ch01:	使用しない				
7	演算波形Ch02:	使用しない				
8	演算波形Ch03:	使用しない				
9	演算波形Ch04:	使用しない				
10		Analog1 [mV]	Analog2 [kg]	Analog3 [kgf]		
11		±2.5V	±10V	±10V		
12	スケール設定	250.0000[kg]	100.0000[kg]	100.0000[kgf]	-100.0000[kgf]	
13	スムージング設定:					
14	58.39.0	0.3401	0.12	0.06		
15	58.39.1	0.3401	0.12	0.08		
16	58.39.2	0.37	0.13	0.09		
17	58.39.3	0.3401	0.13	0.05		
18	58.39.4	0.37	0.15	0.08		
19	58.39.5	0.3401	0.13	0.08		
20	58.39.6	0.37	0.12	0.08		
21	58.39.7	0.4	0.13	0.08		
22	58.39.8	0.37	0.13	0.06		
23	58.39.9	0.3401	0.13	0.06		
24	58.40.0	0.3401	0.12	0.08		

### 2) ⑪二軸引張-測定サンプル調整用[事前送付ファイル].xlsxを開き、測定データのA~D列をコピー、張り付ける。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	タイトル:										
2	メモ:										
3	機種名:	NR-2000									
4	トリガ条件:トリガ日付	E2018/									
5	垂直カーソル情報:	なし									
6	演算波形Ch01:	使用しない									
7	演算波形Ch02:	使用しない									
8	演算波形Ch03:	使用しない									
9	演算波形Ch04:	使用しない									
10		Analog1 [mV]	Analog2 [kg]	Analog3 [kgf]							
11		±2.5V	±10V	±10V							
12	スケール設定	250.0000[kg]	100.0000[kg]	100.0000[kgf]	-100.0000[kgf]						
13	スムージング設定:										
14	22.13.0	0.3	0.04	-0.72	1						
15	22.13.1	0.3	0.04	-0.7	2						
16	22.13.2	0.3401	0.04	-0.72	3						
17	22.13.3	0.37	0.06	-0.72	4						
18	22.13.4	0.37	0.05	-0.73	5						
19	22.13.5	0.37	0.04	-0.73	6						
20	22.13.6	0.37	0.05	-0.72	7						
21	22.13.7	0.3401	0.05	-0.73	8						
22	22.13.8	0.37	0.04	-0.76	9						
23	22.13.9	0.37	0.04	-0.75	10						
24	22.14.0	0.3401	0.05	-0.76	1						
25	22.14.1	0.3401	0.04	-0.75	2						

A若しくはA1セルへペースト  
(or CTR+v)



1~3回往復データ  
グラフと共に作成される。

### 3) マクロ CTR+m 実行      もしくは手作業で

(データ間引き)E列でデータをソートする。

“カラムA14~Eの最後の行まで選択”

データ ⇒ 並べ替え ⇒ E列で並べ替える

①二軸引張-測定サンプル調整用[事前送付ファイル].xlsm

	A	B	C	D	E
1	タイトル:				
2	メモ:				
3	機種名:	NR-2000		サンプリング	100 [ms]
4	トリガ条件:	トリガ 日付	E2018/12/26 09:22:13	000ms	000us
5	垂直カーソル情報:	なし			
6	演算波形Ch01:	使用しない			
7	演算波形Ch02:	使用しない			
8	演算波形Ch03:	使用しない			
9	演算波形Ch04:	使用しない			
10		Analog1 [mV]	Analog2 [kg]	Analog3 [kgf]	
11		±2.5V	±10V	±10V	
12	スケール設定	250.0000[r]	100.000[kg]	100.000[kgf]	-100.000[kgf]
13	スムージング設定:				
14	22.13.0	0.3	0.04	-0.72	1
15	22.14.0	0.3401	0.05	-0.76	1
16	22.15.0	0.3	0.04	-0.77	1
17	22.16.0	0.3	0.04	-0.77	1
18	22.17.0	0.3	0.04	-0.77	1
19	22.18.0	0.3401	0.05	-0.73	1
20	22.19.0	0.2701	0.04	-0.75	1
21	22.20.0	1.09	0.47	-0.98	1
22	22.21.0	2.1099	1.81	-1.07	1
23	22.22.0	3.13	4.05	-0.95	1
24	22.23.0	4.0899	5.96	-0.9	1

E列が“1”で A-D列が空になった行から削除

ここから下の行を削除

4)

マクロ CTR+I

実行するか、下記の作業を実施

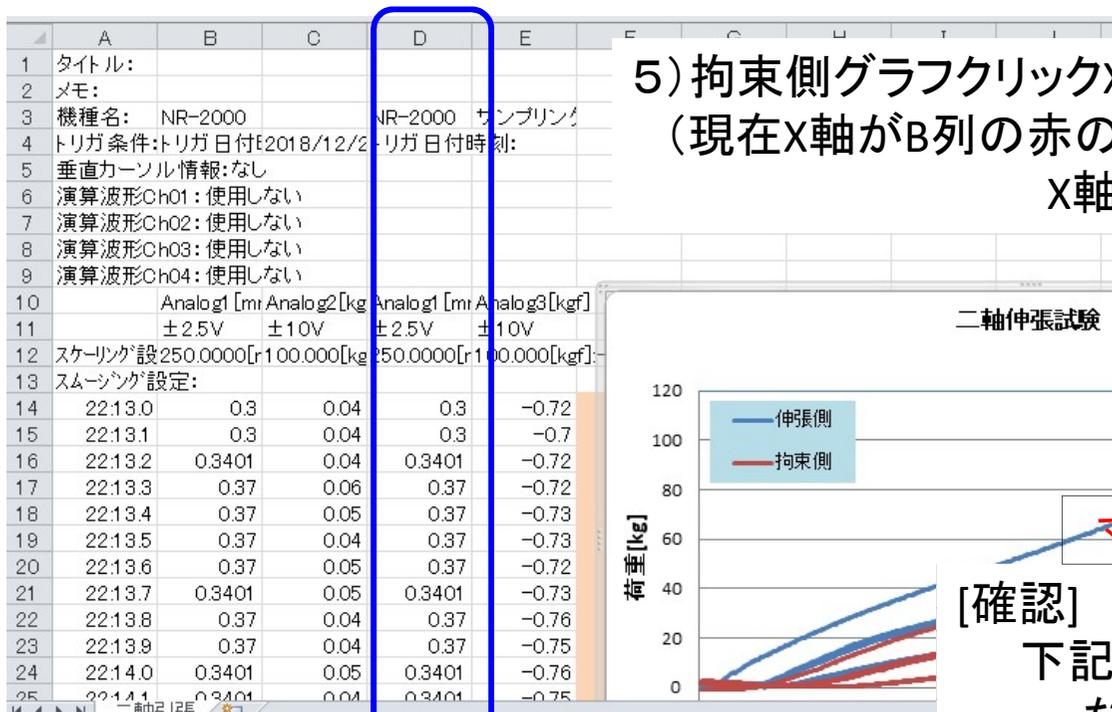
グラフを独立させる(赤グラフのX軸変更)

拘束側荷重のX軸(X変位)を独立させる。

Bをクリック ⇒ コピー(CTR+c) ⇒ Dをクリック ⇒ C列とD列の間にコピーした列を挿入

誤記訂正  
(C⇒D)

5) 拘束側グラフクリックX軸をD列にする。  
(現在X軸がB列の赤のグラフを、  
X軸をD列に変更する)

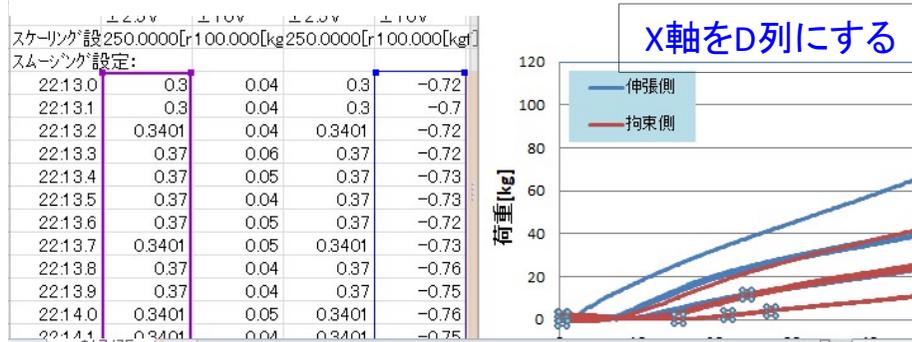


マクロが実行されない場合がある

[確認] 拘束側グラフをクリック(下記赤い線)  
下記のように、X軸が B列に  
なっていたらドラッグしてD列に

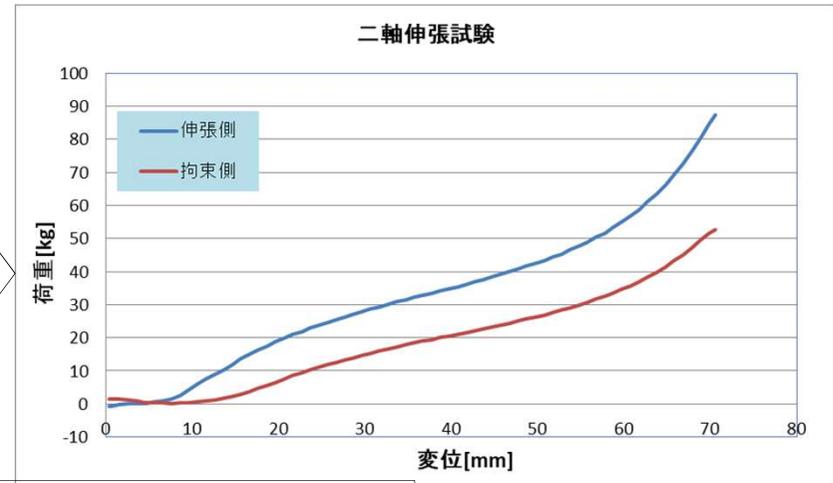
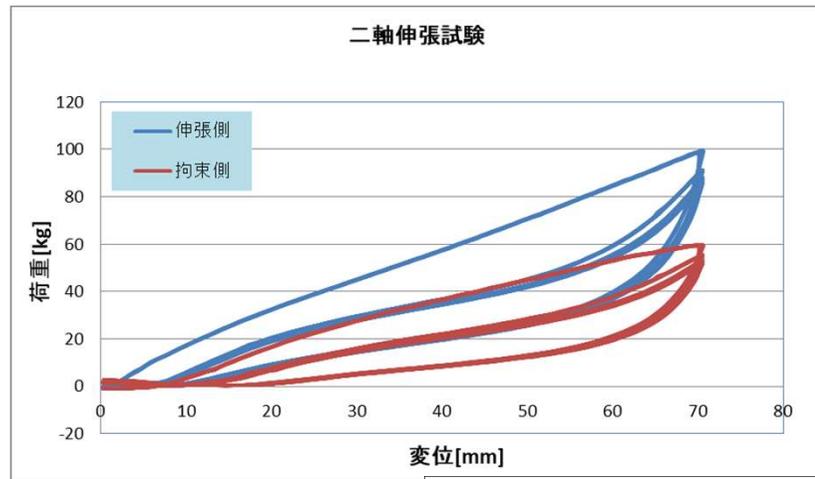
X軸をD列にする

B列をここへコピー、挿入



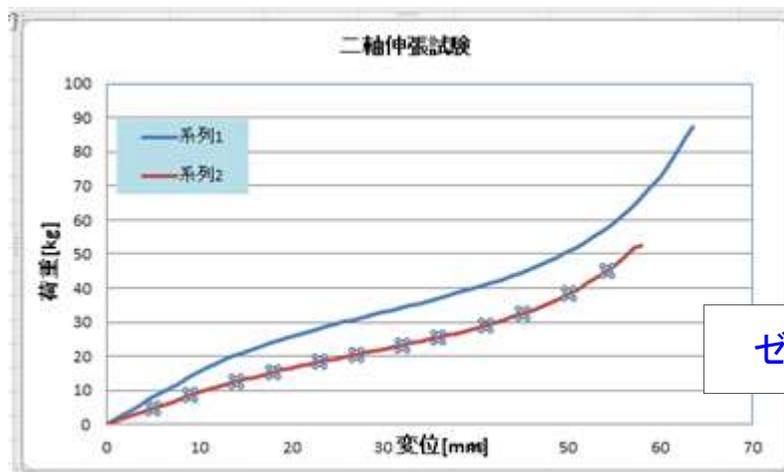
5) 目的とする 1回目 若しくは3回目の往きのデータのみを残す  
ヤング率と同じ1回目か3回目のデータを選択。

データ処理イメージ

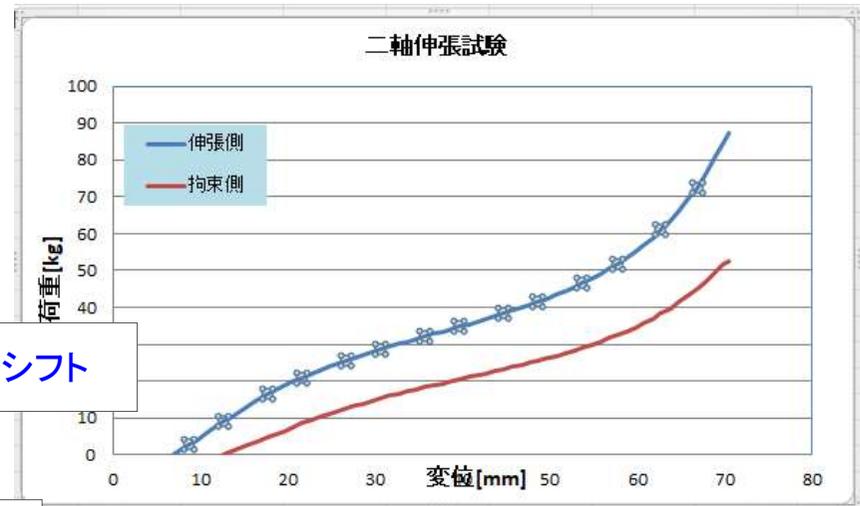


必要なデータのみ残す

荷重ゼロ荷重補正



ゼロ点シフト



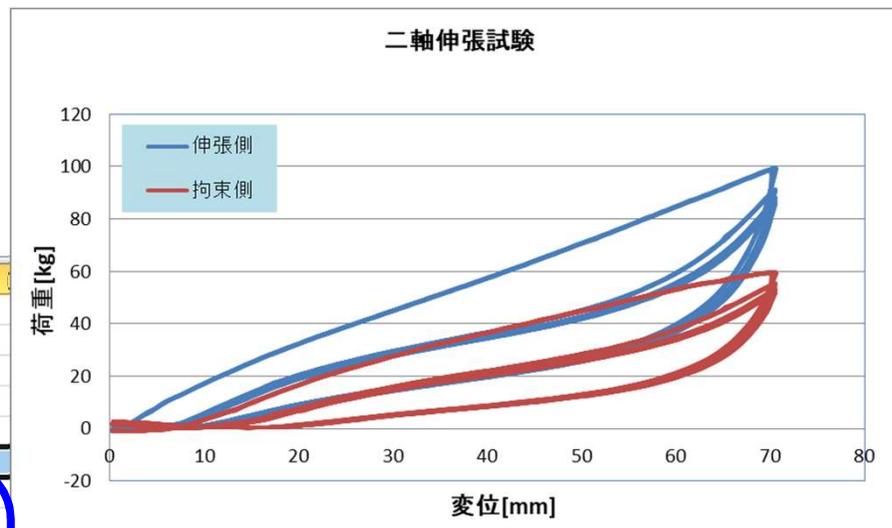
最後にX変位に対するX及びY荷重(1対2)データにする

## 実作業続き

### 5) 1回目or3回目の往きのデータのみ残す

- a. (測定時の最高変位から)  
3回目の戻りデータを削除する  
(後ろ等の1/6の行を削除)

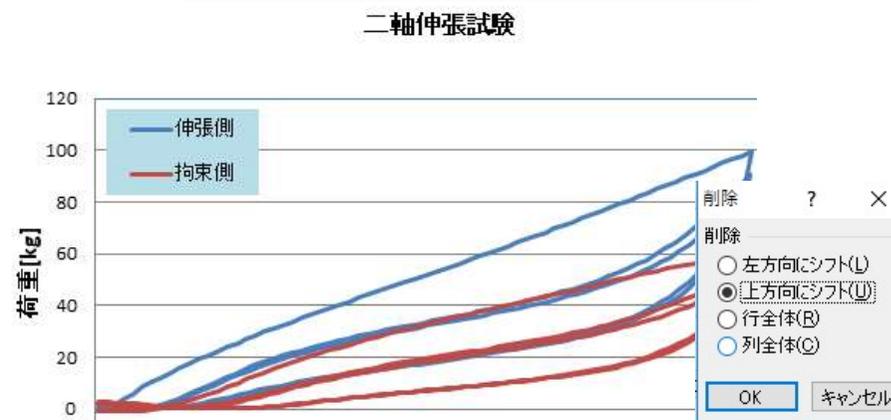
	A	B	C	D	E	F	
579	31.38.0	66.5701	69.51	66.5701	43.19		1
580	31.39.0	67.56	73.33	67.56	45.47		1
581	31.40.0	68.52	77.16	68.52	47.55		1
582	31.41.0	69.57	81.35	69.57	49.66		1
583	31.42.0	70.5299	86.15	70.5299	52.14		1
584	31.43.0	68.71	79.52	68.71	44.81		1
585	31.44.0	68.6501	66.96	68.6501	39.48		1
586	31.45.0	67.66	60.41	67.66	35.02		1
587	31.46.0	66.61	55.37	66.61	31.59		1
588	31.47.0	65.58	51.01	65.58	28.67		1
589	31.48.0	64.6299	47.45	64.6299	26.38		1
590	31.49.0	63.6101	44.58	63.6101	24.51		1
591	31.50.0	62.62	41.96	62.62	22.78		1
592	31.51.0	61.59	39.76	61.59	21.39		1



### c. 2、3回目若しくは1、2回目の往復データを消去

2	メモ:						
3	機種名:	NR-2000	NR-2000	サンプリング	100 [ms]		
4	トリガ条件:	トリガ日付E2018/12/2	トリガ日付時刻:				
5	垂直カーソル情報:	なし					
6	演算波形Ch01:	使用しない					
7	演算波形Ch02:	使用しない					
8	演算波形Ch03:	使用しない					
9	演算波形Ch04:	使用しない					
10		Analog1 [mV]	Analog2 [kg]	Analog1 [mV]	Analog3 [kgf]		
11		±2.5V	±10V	±2.5V	±10V		
12	スケール設定	250.0000	100.0000	250.0000	100.0000	-100.0000	[kgf]
13	スムージング設定:						
14		22:13.0	0.3	0.04	0.3	-0.72	1
15		22:14.0	0.3401	0.05	0.3401	-0.76	1
16		22:15.0	0.3	0.04	0.3	-0.77	1
17		22:16.0	0.3	0.0			
18		22:17.0	0.3	0.0			
19		22:18.0	0.3401	0.0			
20		22:19.0	0.2701	0.0			

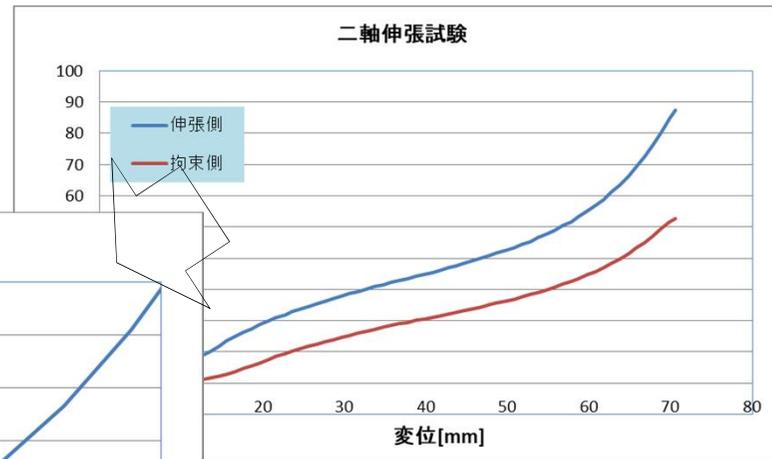
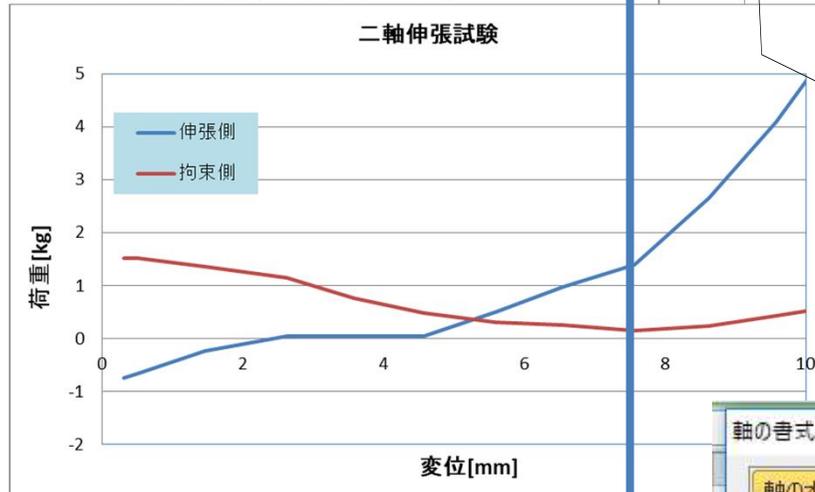
I	J	K	L	M	N
---	---	---	---	---	---



A14~F\*を削除、上へシフトするか14行から\*行を削除する。  
⇒行削除の場合はグラフが縦方向に小さくなるので修正。

## 6) ゼロ(0)荷重を調整する。

- a. グラフをコピーして、  
X軸、Y軸を固定する。



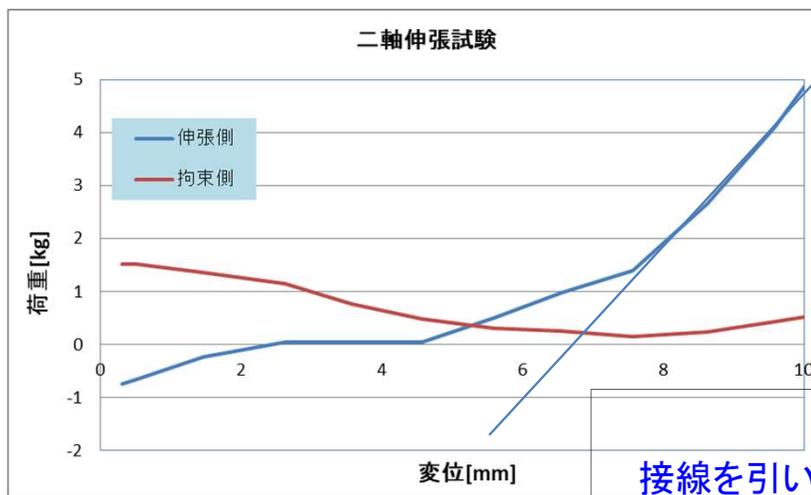
軸の書式設定

軸のオプション

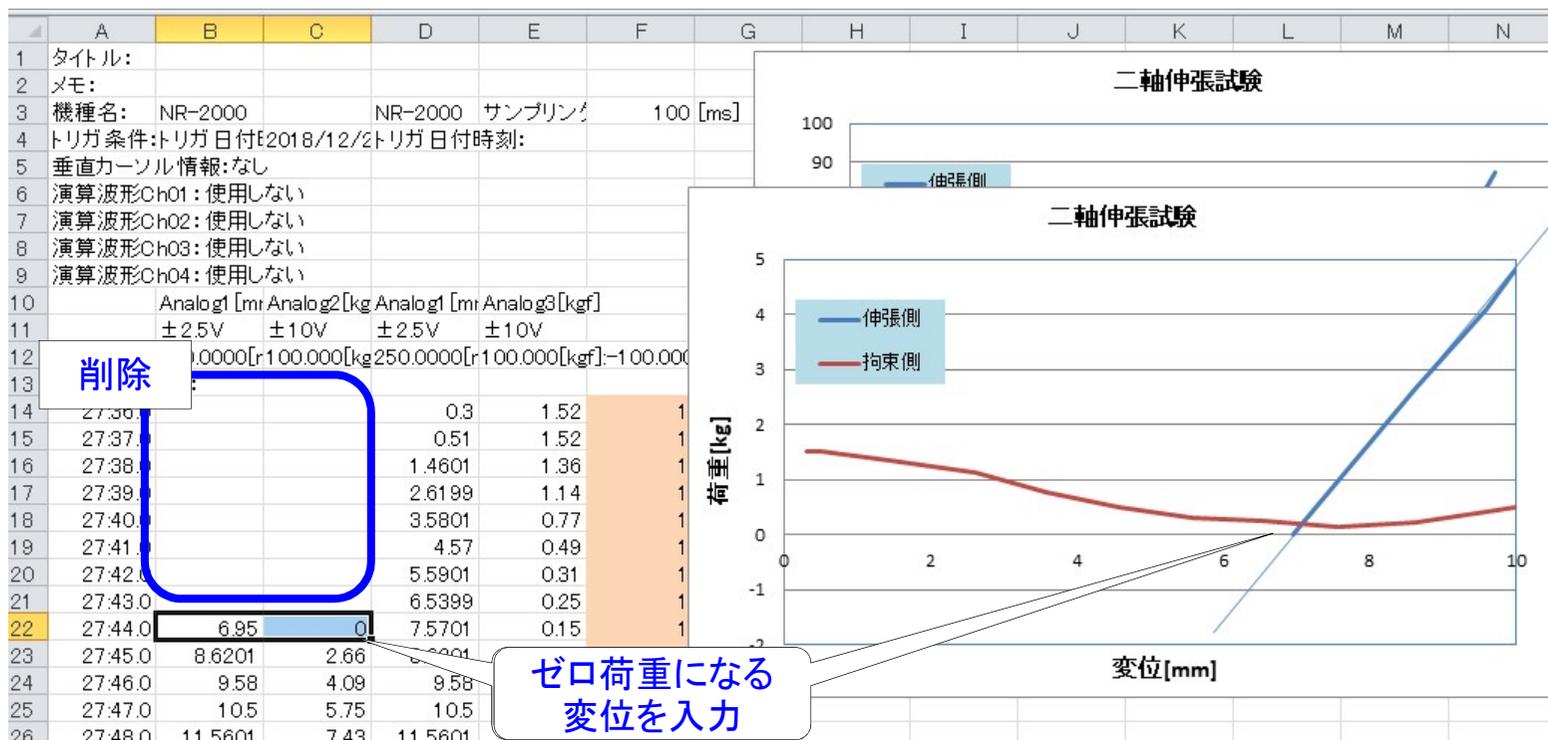
- 表示形式
- 塗りつぶし
- 線の色
- 線のスタイル
- 影
- 光彩とぼかし
- 3-D 書式
- 配置

軸のオプション

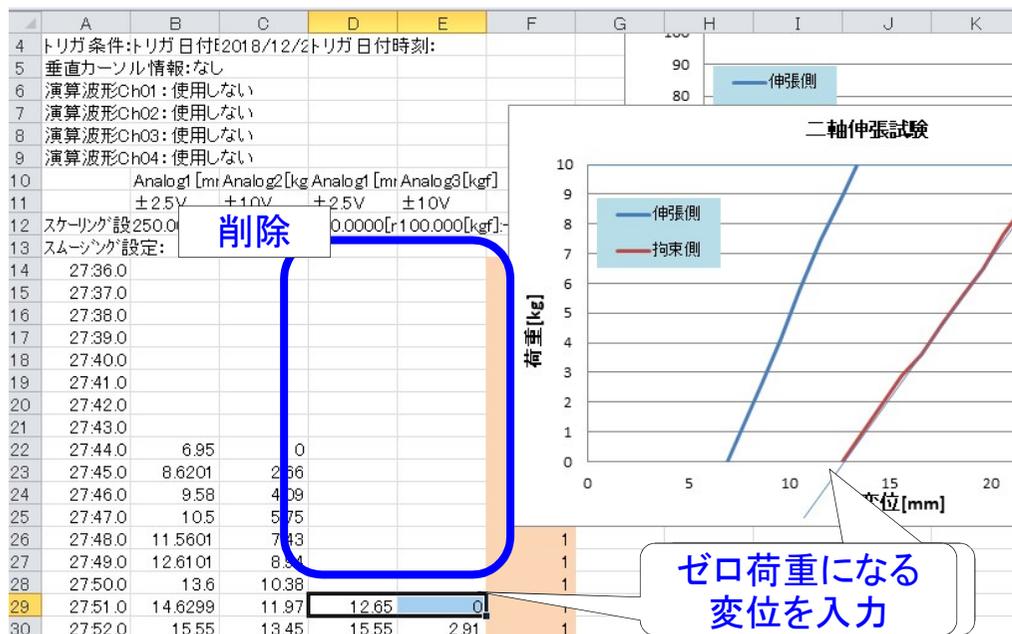
- 最小値:  自動(A)  固定(E) [-2.0]
- 最大値:  自動(U)  固定(D) [5.0]
- 目盛間隔:  自動(I)  固定(X) [1.0]
- 補助目盛間隔:  自動(O)  固定(E) [0.2]
- 軸を反転する(V)
- 対数目盛を表示する(L) 基数(B): [10]
- 表示単位(U): [なし]
- 表示単位のラベルをグラフに表示する(S)
- 目盛の種類(J): [なし]
- 補助目盛の種類(O): [なし]
- 軸ラベル(A): [軸の下/左]
- 横軸との交点:  
 自動(Q)  
 軸の値(E): [0.0]



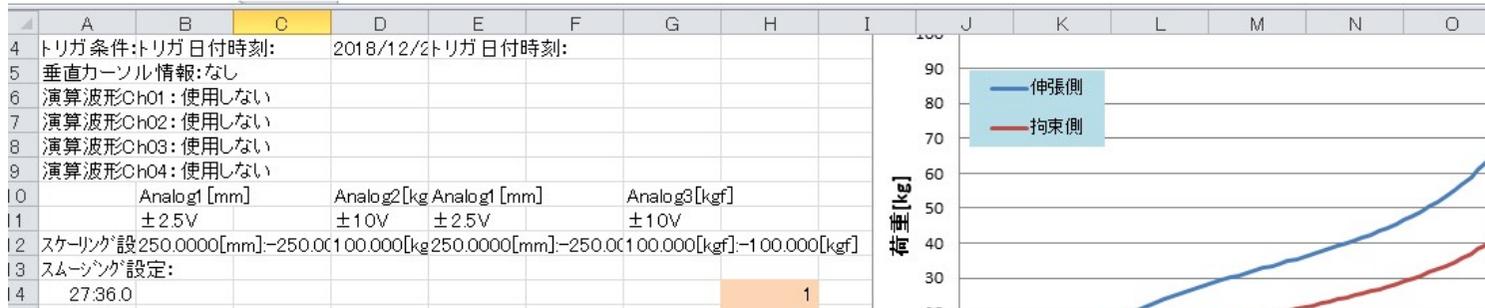
誰を修正するため、  
接線を引いて、ゼロ荷重の変位との交点を求める。



Y軸も同様に、ゼロ荷重変位を  
求める。

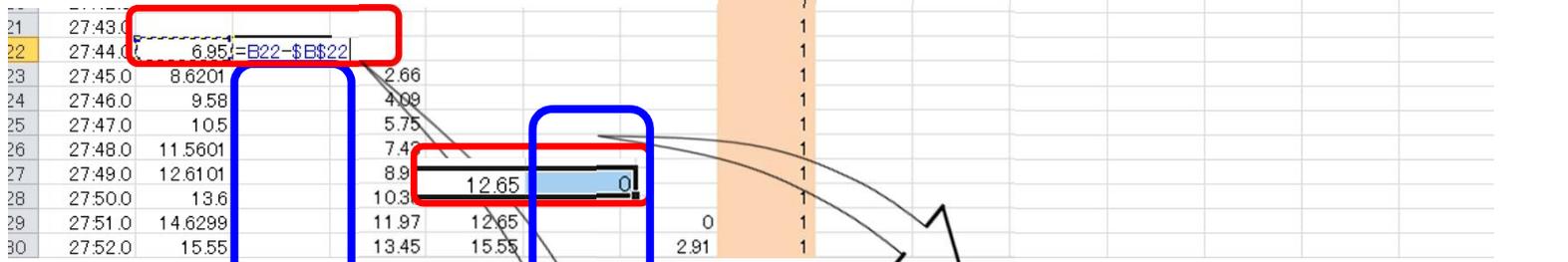


# 7)シフトしてゼロ点を合わせる。(ゼロ変位)



B列とC列の間に1列挿入

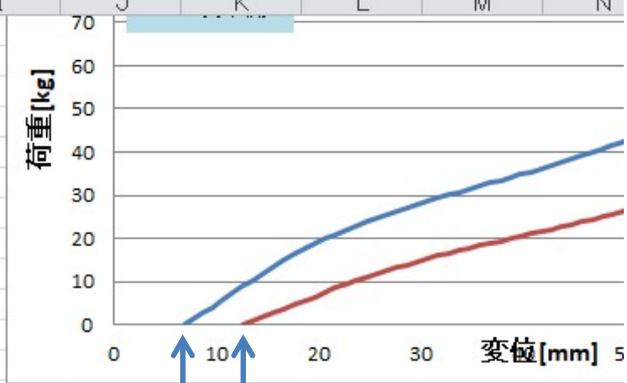
E列とF列に1列挿入



右下をダブルクリックすると下までコピーされる

右下をダブルクリックすると下までコピーされる

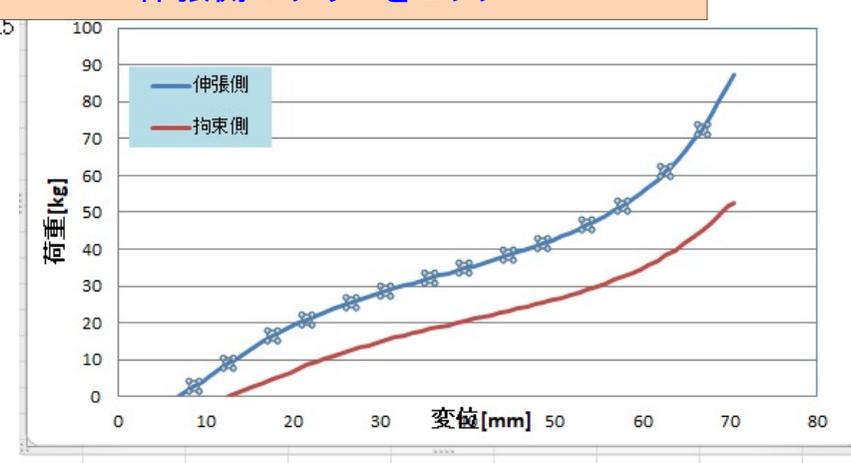
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
8	演算波形Ch03: 使用しない													
9	演算波形Ch04: 使用しない													
10		Analog1 [mm]		Analog2 [kg]		Analog1 [mm]		Analog3 [kgf]						
11		±2.5V		±10V		±2.5V		±10V						
12	スケール設定 250.0000 [mm] : -250.00100.000 [kg] 250.0000 [mm] : -250.00100.000 [kgf] : -100.000 [kgf]													
13	スムージング設定:													
14	27.36.0													
15	27.37.0													
16	27.38.0													
17	27.39.0													
18	27.40.0													
19	27.41.0													
20	27.42.0													
21	27.43.0													
22	27.44.0	6.95	0	0										
23	27.45.0	8.6201	1.6701	2.66										
24	27.46.0	9.58	2.63	4.09										
25	27.47.0	10.5	3.55	5.75										
26	27.48.0	11.5601	4.6101	7.43										
27	27.49.0	12.6101	5.6601	8.94										
28	27.50.0	13.6	6.65	10.38										
29	27.51.0	14.6299	7.6799	11.97	12.65	0	0							
30	27.52.0	15.55	8.6	13.45	15.55	2.9	2.91							
31	27.53.0	16.5701	9.6201	14.85	16.5701	3.9201	3.62							
32	27.54.0	17.63	10.68	16.37	17.63	4.98								
33	27.55.0	18.6199	11.6699	17.55	18.6199	5.9699								
34	27.56.0	19.61	12.66	18.74	19.61	6.96								



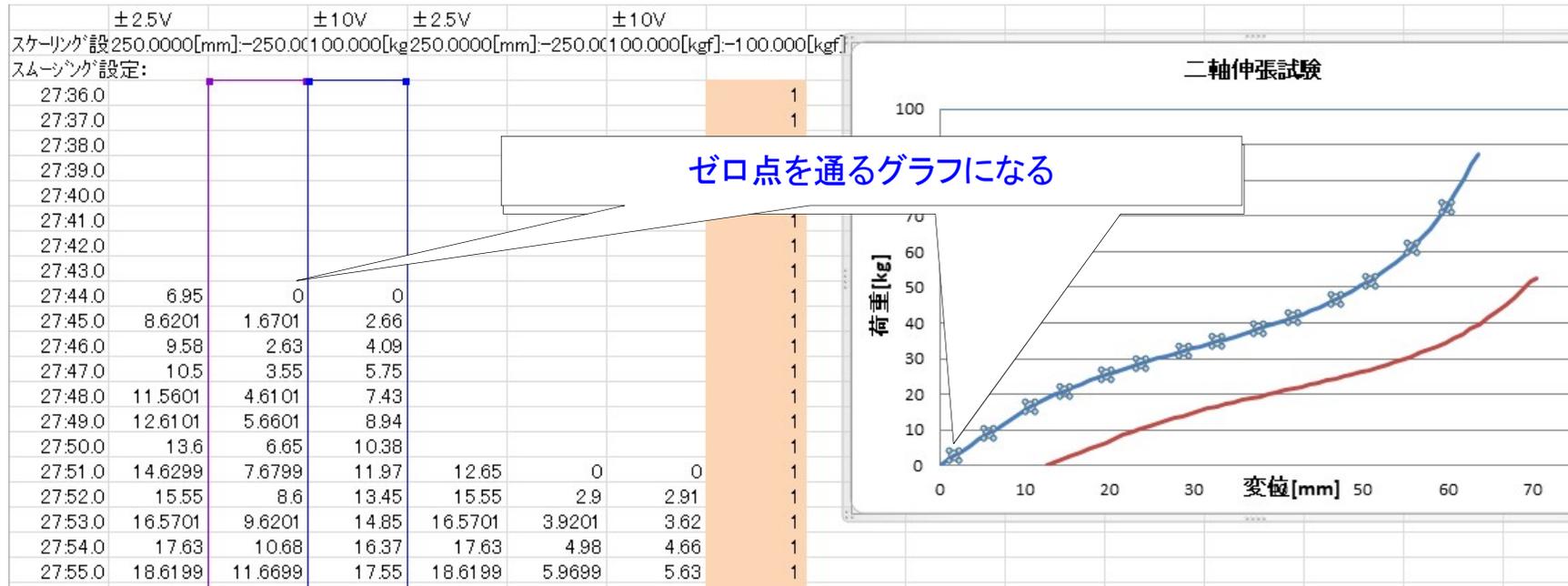
ハイライトした右上X軸をドラッグして、C列へ

	A	B	C	D	E
8	演算波形Ch03: 使用しない				
11		±2.5V		±10V	
12	スケール設定 250.0000 [mm] : -250.00100.000 [kg] 250.0000 [mm]				
13	スムージング設定:				
14	27.36.0				
15	27.37.0				
16	27.38.0				
17	27.39.0				
18	27.40.0				
19	27.41.0				
20	27.42.0				
21	27.43.0				
22	27.44.0	6.95	0	0	
23	27.45.0	8.6201	1.6701	2.66	
24	27.46.0	9.58	2.63	4.09	

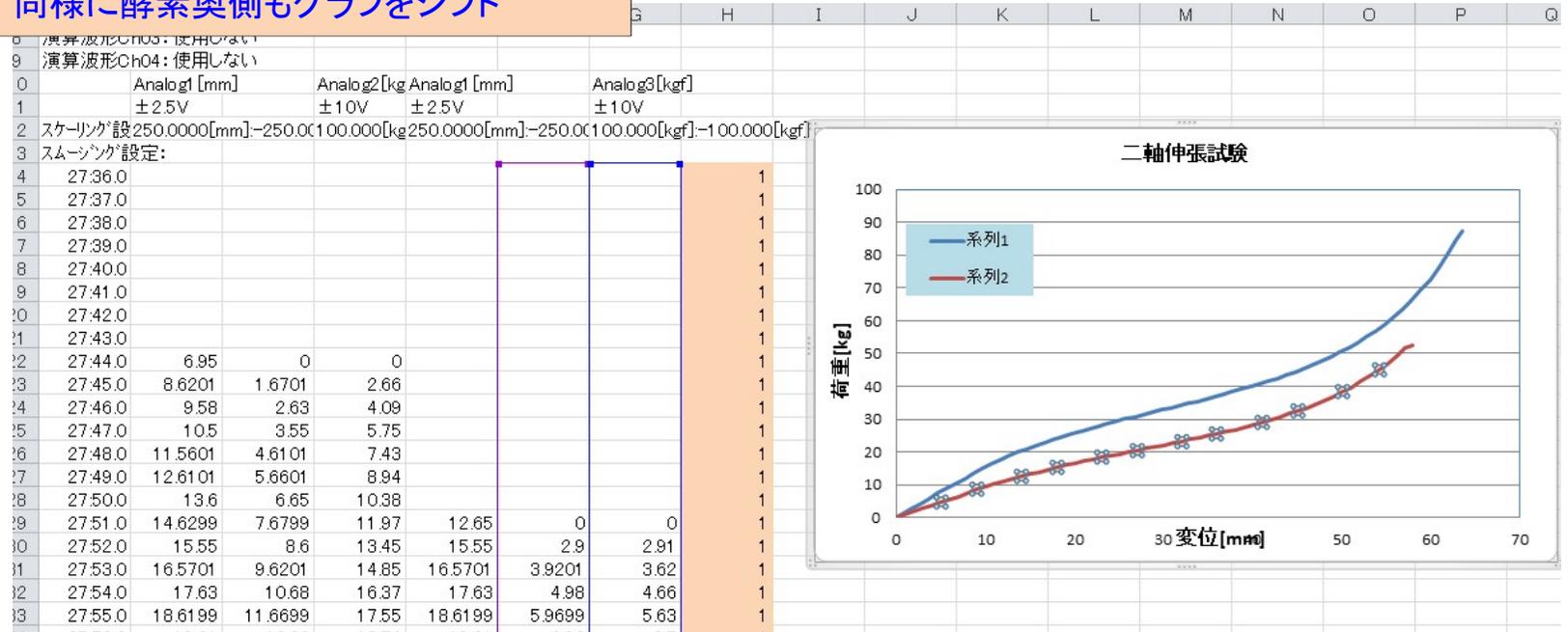
伸張側のグラフをピック



右下をダブルクリックすると下までコピーされる



同様に酵素奥側もグラフをシフト



X荷重とY荷重、共に共通のX変位に対する値が必要  
現状、X変位がへたり補正によりバラバラのため、修正する。

Y荷重の近似曲線を抽出する。



多項式近似

グラフの近似曲線との  
かさなりを確認しながら  
次数を3~5次程度に

切片ゼロ

数式を表示

近似曲線のオプション

近似または回帰の種類

- 指数近似(X)
- 線形近似(Y)
- 対数近似(Q)
- 多項式近似(P) 次数(D): 3
- 累乗近似(W)
- 移動平均(M) 区間(E): 2

近似曲線名

自動(A): 多項式 (系列2)

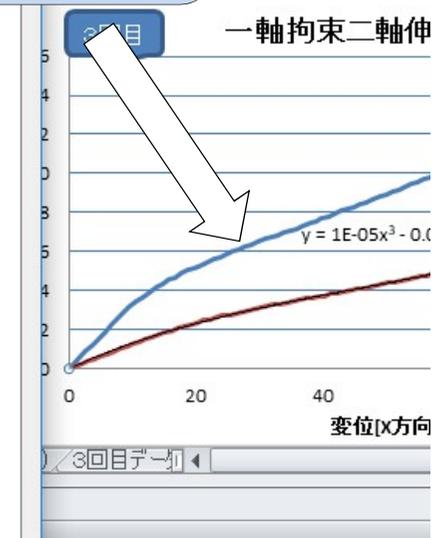
前方補外(E): 0.0 区間

後方補外(E): 0.0 区間

切片(S) = 0.0

グラフに数式を表示する(E)

グラフに R-2 乗値を表示する(B)





式の表示形式を  
指数、ケタを5桁

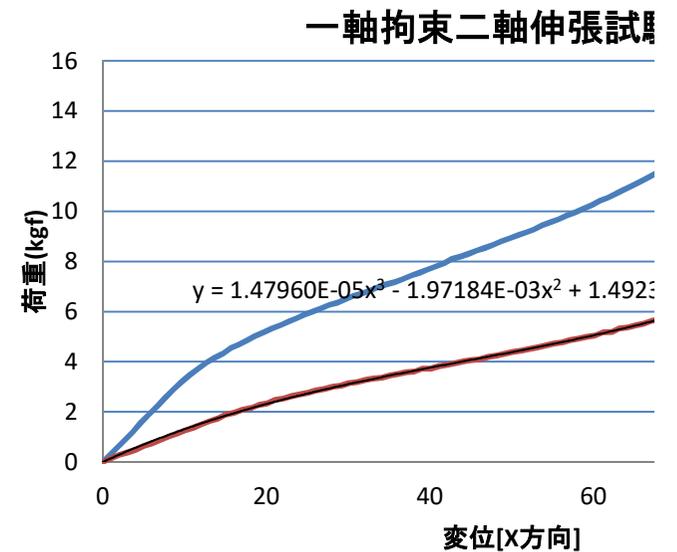
表示形式

分類(C):

- 標準
- 数値
- 通貨
- 会計
- 日付
- 時刻
- パーセンテージ
- 分数
- 指数
- 文字列
- その他
- ユーザー設定

小数点以下の桁数(D): 5

ケタを5桁

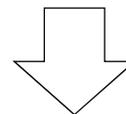


回帰シートへのコピーを簡単にするためにX荷重の右にY荷重が計算されるように

	A	B	C	D	E	F	G
1	タイトル:						
2	メモ:						
3	機種名:	NR-2000			NR-2000		サン
4	トリガ条件:	トリガ日付時刻:	18/10/17	10:39			
5	垂直カーソル情報:	なし					
6							
7							
8							
9	演算波形Ch04:	使用しない					
10		Analog1 [mm]	Analog2 [kgf]		Ar [mm]	Ana	
11		±2.5V	±10V		±	±	
12	スケール設定	250.0000 [mm]	-250.0000 [kgf]	-100.0000 [mm]	-250.0000 [mm]	-250.0000 [mm]	-250.0000 [mm]
13	スムージング設定:						
14		X変位(mm)	X荷重(kgf)		X変位(mm)	Y荷	
15	39:55.0	6.25	0				
16	39:56.0	8.86	2.61	0.85			
17	39:57.0	9.9199	3.6699	1.2			
18	39:58.0	10.8801	4.6301	1.56	9.85	0	
19	39:59.0	11.8999	5.6499	1.89	11.8999	2.0499	
20	40:00.0	12.9601	6.7101	2.23	12.9601	3.1101	
21	40:01.0	13.88	7.63	2.56	13.88	4.03	
22	40:02.0	14.9	8.65	2.89	14.9	5.05	
23	40:03.0	15.8899	9.6399	3.2	15.8899	6.0399	

### 式の編集(例)

$$y = 1.47960E-05x^3 - 1.97184E-03x^2 + 1.49235E-01x$$



式のX値をC列(X変位)~計算するため

$$1.47960E-05 * C15^3 - 1.97184E-03 * C15^2 + 1.49235E-01 * C15$$

例 =  $1.47960E-05x^3 \Rightarrow = 1.47960E-05 * C15^3$

Xを式とするため  
×セル指定(定数は^とする)

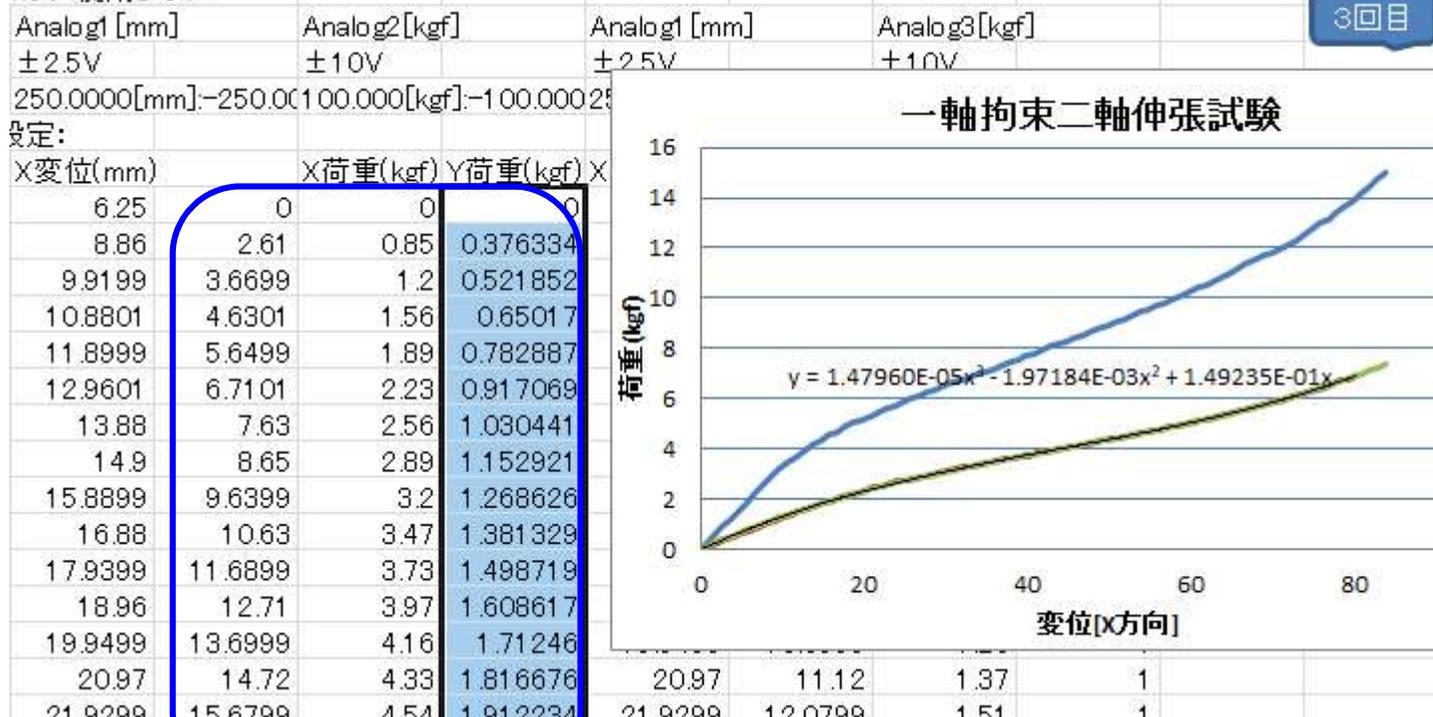
C~Eの3列を  
次のシートへコピー  
(次ページ参照)

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>



1104. 使用例(8)



C~Eの3列を  
次のシートへコピー

X補正変位とX荷重、Y荷重の  
データをコピーして回帰シートへ(値コピーで)数値貼り付け

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

連絡先 [hagi@terakoya2018.com](mailto:hagi@terakoya2018.com)

080-2230-8785

★W ひな形EXCEL(配布) ひずみエネルギー密度係数導出r1.xls を開き、試験条件を必要に応じて記入。

試験装置 富山工業技術センター、生活工学研究所  
 試験方法 2軸引張試験機のつかみ具にゴムシート  
 試験内容 2軸引張試験、1軸固定1軸引張試験  
 引張速度 1.0mm/s  
 予備引張 ①1回目 事前の予備引張等は行わず  
 ②1回目、2回目と同じ伸張量で3回目  
 試験結果 引張試験結果シートに記載  
 距離[mm]はクロス間ヘッド距離の増加分を示す。  
 荷重は引張荷重[kgf]  
 その他 装置引張限界は200mm。

このシートの色に  
 入力すると他は自動計算される

サンプル厚さ 1.2 [mm]  
 ヤング率 1.102235 N/mm2

入力 コピー

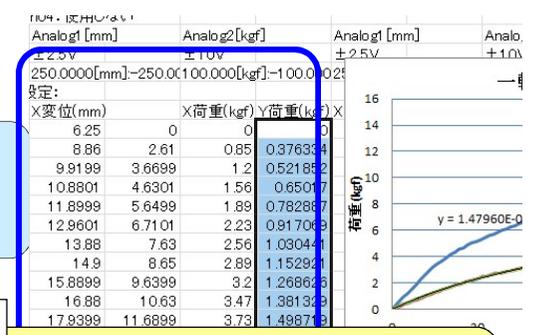
[測定結果]

試料No.	No1	試験片	厚さ[mm]	変位	荷重 [kgf]	荷重Y [kgf]	変位X	[伸長比-応力換算]	$\lambda$	$\sigma_x$ [N/mm2]	$\sigma_y$ [N/mm2]
1			1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2				1.0000	1.0000	0.5000	1.0000	1.0100			
3				2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0200			
4				3.0000	3.0000	1.5000	3.0000	1.0300			
5				4.0000	4.0000	2.0000	4.0000	1.0400			
6				5.0000	5.0000	2.5000	5.0000	1.0500	0.6533	1.0000	0.3267
7				6.0000	6.0000	3.0000	6.0000	1.0600	0.7840	1.0000	0.3920
8				7.0000	7.0000	3.5000	7.0000	1.0700	0.9147	1.0000	0.4573
9				8.0000	8.0000	4.0000	8.0000	1.0800	1.0454	1.0000	0.5227
10				9.0000	9.0000	4.5000	9.0000	1.0900	1.1760	1.0000	0.5880
11				10.0000	10.0000	5.0000	10.0000	1.1000	1.3067	1.0000	0.6533
12				11.0000	11.0000	5.5000	11.0000	1.1100	1.4373	1.0000	0.7187
13				12.0000	12.0000	6.0000	12.0000	1.1200	1.5680	1.0000	0.7840
14				13.0000	13.0000	6.5000	13.0000	1.1300	1.6987	1.0000	0.8493
15				14.0000	14.0000	7.0000	14.0000	1.1400	1.8293	1.0000	0.9147
16				15.0000	15.0000	7.5000	15.0000	1.1500	1.9600	1.0000	0.9800
17				16.0000	16.0000	8.0000	16.0000	1.1600	2.0907	1.0000	1.0454
18				17.0000	17.0000	8.5000	17.0000	1.1700	2.2213	1.0000	1.1107
19				18.0000	18.0000	9.0000	18.0000	1.1800	2.3520	1.0000	1.1760
20				19.0000	19.0000	9.5000	19.0000	1.1900	2.4827	1.0000	1.2413
21				20.0000	20.0000	10.0000	20.0000	1.2000	2.6133	1.0000	1.3067

1) 応力計算を行うため  
 シート厚みを入力する

X補正変位とX荷重、Y荷重の  
 データをコピーして回帰シートへ数値貼り付け

2) 試験結果をコピーして  
 値のみ張り付ける。



# 補足：データの整理

200行用のシートのため、  
それ以下に調整

★W ひな形EXCEL(最新) ひずみエネルギー-密度係数導出 [互換モード]

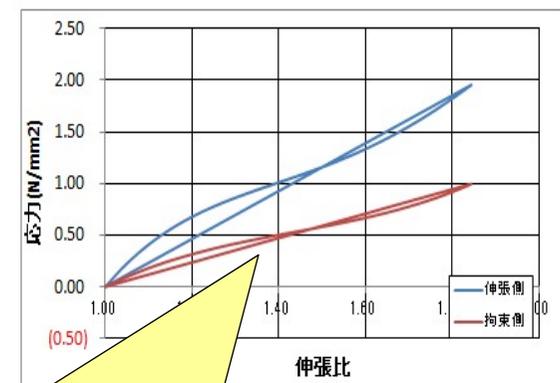
サンプル長さ 3.50 N/mm<sup>2</sup> ヤング率 3.50 N/mm<sup>2</sup>

[測定結果]				[伸長比-応力換算]					
試験片	厚さ[mm]	変位	荷重 [kgf]	荷重Y [kgf]	変位X	$\lambda_1$	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\lambda_2$	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
2	1.2	3.6000	1.2662	0.5420	3.6000	1.0360	0.1655	1.0000	0.0708
3	1.2	4.5501	1.5740	0.6759	4.5501	1.0455	0.2057	1.0000	0.0883
4	1.2	5.5400	1.8818	0.8116	5.5400	1.0554	0.2459	1.0000	0.1061
5	1.2	6.6301	2.2061	0.9566	6.6301	1.0663	0.2883	1.0000	0.1250
6	1.2	7.5900	2.4794	1.0805	7.5900	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
7	1.2	8.5401	2.7392	1.1999	8.5401	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
8	1.2	9.5700	3.0091	1.3255	9.5700	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
9	1.2	10.5600	3.2576	1.4428	10.5600	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
10	1.2	11.6500	3.5193	1.5681	11.6500	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
11	1.2	12.6001	3.7378	1.6740	12.6001	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
12	1.2	13.6199	3.9628	1.7846	13.6199	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
13	1.2	14.6100	4.1722	1.8889	14.6100	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
14	1.2	15.6699	4.3870	1.9972	15.6699	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
15	1.2	16.5601	4.5603	2.0857	16.5601	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412
16	1.2	17.6500	4.7641	2.1911	17.6500	1.0759	0.3240	1.0000	0.1412

それ以下のとき計算できない部分が  
下記のようなデータになるので、  
未計算の行を削除する。(150行前後から)

1軸引張1軸固定(×軸引張、Y軸固定)

No1				
$\lambda_1$	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\lambda_2$	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	
1	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000
2	1.03600	0.16545	1.00000	0.07082
3	1.04550	0.20567	1.00000	0.08832
4	1.05540	0.24589	1.00000	0.10605
5	1.06630	0.28626	1.00000	0.12500
6	1.07590	0.32398	1.00000	0.14119
7	1.08540	0.35792	1.00000	0.15678
8	1.09570	0.39319	1.00000	0.17320
9	1.10560	0.42566	1.00000	0.18852
10	1.11650	0.45986	1.00000	0.20489
11	1.12600	0.48841	1.00000	0.21874
12	1.13620	0.51780	1.00000	0.23319
13	1.14610	0.54516	1.00000	0.24681
14	1.15610	0.57156	1.00000	0.26097
15	1.16610	0.59796	1.00000	0.27254
16	1.17610	0.62436	1.00000	0.28620
17	1.18610	0.65076	1.00000	0.29986
18	1.19610	0.67716	1.00000	0.31352
19	1.20610	0.70356	1.00000	0.32718
20	1.21610	0.72996	1.00000	0.34084
21	1.22610	0.75636	1.00000	0.35450
22	1.23610	0.78276	1.00000	0.36816
23	1.24610	0.80916	1.00000	0.38182
24	1.25610	0.83556	1.00000	0.39548
25	1.26610	0.86196	1.00000	0.40914
26	1.27610	0.88836	1.00000	0.42280
27	1.28610	0.91476	1.00000	0.43646
28	1.29610	0.94116	1.00000	0.45012
29	1.30610	0.96756	1.00000	0.46378
30	1.31610	0.99396	1.00000	0.47744
31	1.32610	1.02036	1.00000	0.49110
32	1.33610	1.04676	1.00000	0.50476
33	1.34610	1.07316	1.00000	0.51842
34	1.35610	1.09956	1.00000	0.53208
35	1.36610	1.12596	1.00000	0.54574
36	1.37610	1.15236	1.00000	0.55940
37	1.38610	1.17876	1.00000	0.57306
38	1.39610	1.20516	1.00000	0.58672
39	1.40610	1.23156	1.00000	0.60038
40	1.41610	1.25796	1.00000	0.61404
41	1.42610	1.28436	1.00000	0.62770
42	1.43610	1.31076	1.00000	0.64136
43	1.44610	1.33716	1.00000	0.65502
44	1.45610	1.36356	1.00000	0.66868
45	1.46610	1.38996	1.00000	0.68234
46	1.47610	1.41636	1.00000	0.69600
47	1.48610	1.44276	1.00000	0.70966
48	1.49610	1.46916	1.00000	0.72332
49	1.50610	1.49556	1.00000	0.73698
50	1.51610	1.52196	1.00000	0.75064
51	1.52610	1.54836	1.00000	0.76430
52	1.53610	1.57476	1.00000	0.77796
53	1.54610	1.60116	1.00000	0.79162
54	1.55610	1.62756	1.00000	0.80528
55	1.56610	1.65396	1.00000	0.81894
56	1.57610	1.68036	1.00000	0.83260
57	1.58610	1.70676	1.00000	0.84626
58	1.59610	1.73316	1.00000	0.85992
59	1.60610	1.75956	1.00000	0.87358
60	1.61610	1.78596	1.00000	0.88724
61	1.62610	1.81236	1.00000	0.90090
62	1.63610	1.83876	1.00000	0.91456
63	1.64610	1.86516	1.00000	0.92822
64	1.65610	1.89156	1.00000	0.94188
65	1.66610	1.91796	1.00000	0.95554
66	1.67610	1.94436	1.00000	0.96920
67	1.68610	1.97076	1.00000	0.98286
68	1.69610	1.99716	1.00000	0.99652
69	1.70610	2.02356	1.00000	1.01018
70	1.71610	2.04996	1.00000	1.02384
71	1.72610	2.07636	1.00000	1.03750
72	1.73610	2.10276	1.00000	1.05116
73	1.74610	2.12916	1.00000	1.06482
74	1.75610	2.15556	1.00000	1.07848
75	1.76610	2.18196	1.00000	1.09214
76	1.77610	2.20836	1.00000	1.10580
77	1.78610	2.23476	1.00000	1.11946
78	1.79610	2.26116	1.00000	1.13312
79	1.80610	2.28756	1.00000	1.14678
80	1.81610	2.31396	1.00000	1.16044
81	1.82610	2.34036	1.00000	1.17410
82	1.83610	2.36676	1.00000	1.18776
83	1.84610	2.39316	1.00000	1.20142
84	1.85610	2.41956	1.00000	1.21508
85	1.86610	2.44596	1.00000	1.22874
86	1.87610	2.47236	1.00000	1.24240
87	1.88610	2.49876	1.00000	1.25606
88	1.89610	2.52516	1.00000	1.26972
89	1.90610	2.55156	1.00000	1.28338
90	1.91610	2.57796	1.00000	1.29704
91	1.92610	2.60436	1.00000	1.31070
92	1.93610	2.63076	1.00000	1.32436
93	1.94610	2.65716	1.00000	1.33802
94	1.95610	2.68356	1.00000	1.35168



応力が自動計算される  
変位もひずみに自動換算

戻りのおかしな計算域を削除すると  
次のページのように整います。

次(右)シートへ移動

# 入力(貼り付け)シートの隣

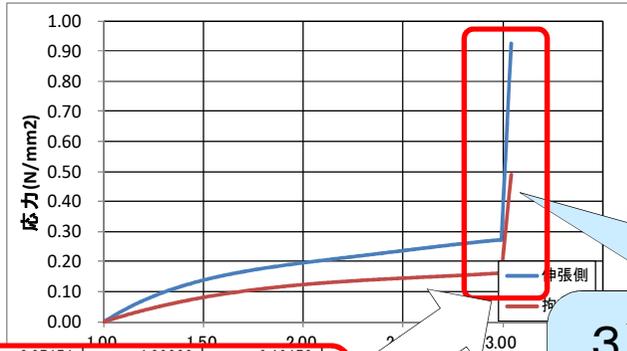
シート “(4)元データ確認(軸引張1軸固定)” 余分なデータを削除

## シート(4)元データ確認(軸引張1軸固定)

1軸引張1軸固定(X軸引張、Y軸固定)

No1				
	$\lambda 1$	$\sigma$ (N/mm2)	$\lambda 2$	$\sigma$ (N/mm2)
1	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000
2	1.05910	0.02364	1.00000	0.01218
3	1.06940	0.02755	1.00000	0.01423
4	1.07890	0.03110	1.00000	0.01609
5	1.08810	0.03447	1.00000	0.01788
6	1.09940	0.03853	1.00000	0.02005
7	1.10930	0.04202	1.00000	0.02193
8	1.11880	0.04531	1.00000	0.02372
9	1.12900	0.04878	1.00000	0.02562
10	1.14000	0.05245	1.00000	0.02764
11	1.14920	0.05546	1.00000	0.02931
12	1.15940	0.05874	1.00000	0.03114
13	1.16960	0.06196	1.00000	0.03296
14	1.17950	0.06502	1.00000	0.03470
15	1.18910	0.06794	1.00000	0.03639
16	1.19960	0.07107	1.00000	0.03803
17	1.20920	0.07387	1.00000	0.03962
18	1.21980	0.07692	1.00000	0.04116
19	1.22930	0.07959	1.00000	0.04271
20	1.23920	0.08233	1.00000	0.04426

198	193	2.97190	0.27154	1.00000	0.16152
199	194	2.98210	0.27212	1.00000	0.16194
200	195	2.99230	0.27268	1.00000	0.16237
201	196	3.00230	0.40334	1.00000	0.22771
202	197	3.01230	0.53401	1.00000	0.29304
203	198	3.02230	0.66468	1.00000	0.35837
204	199	3.03230	0.79534	1.00000	0.42371
205	200	3.04230	0.92601	1.00000	0.48904



3) 測定データ以外のひな形データが残っているため  
測定データでないものを削除する。

順次、ひな形EXCELシートを左から確認する。

入力は、シート:(2)元データ 試験条件のみで自動的に計算される。

シート(6)ひずみエネルギー計算表が、

2軸試験データ処理シート  
有刺シート面 62.5×62.5mm<sup>2</sup>

$$\frac{\partial W(U_1, U_2)}{\partial U_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[ \frac{\lambda_1^2 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \left\{ \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right\} \left\{ \frac{\partial W}{\partial U_1}, \frac{\partial W}{\partial U_2} \right\}$$

$$\frac{\partial W(U_1, U_2)}{\partial U_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left[ \frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$

$$\sigma_2 = 2 \left\{ 1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right\} \left\{ \frac{\partial W}{\partial U_1}, \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial U_2} \right\}$$

$$\sigma_3 = 0$$

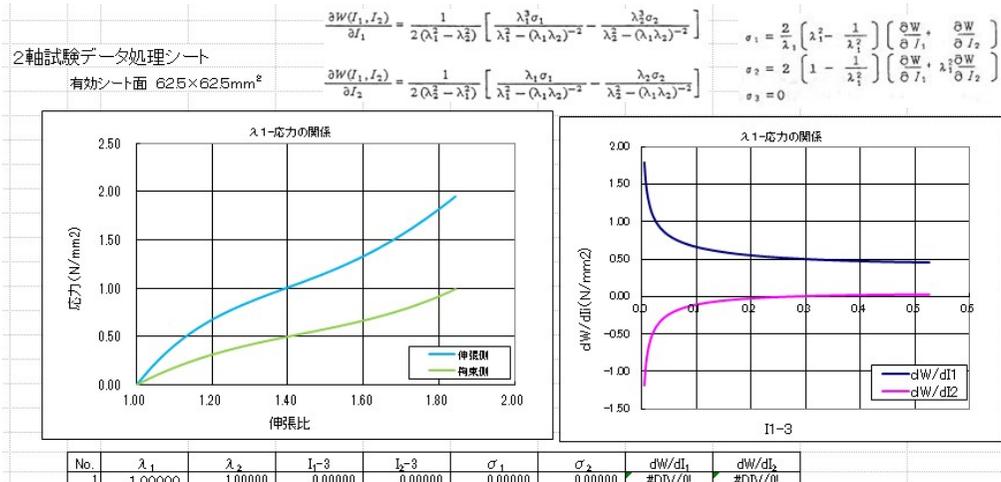
7) エラーの行を削除する

データが修正される

No.	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$1-\beta$	$1-\beta$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	1.06910	1.00000	0.01320	0.01320	0.02384	0.01218
3	1.06940	1.00000	0.01804	0.01804	0.02735	0.01423
4	1.07890	1.00000	0.02311	0.02311	0.03110	0.01609
5	1.08810	1.00000	0.02858	0.02858	0.03447	0.01788
6	1.09940	1.00000	0.03603	0.03603	0.03833	0.02005
7	1.10930	1.00000	0.04319	0.04319	0.04202	0.02183
8	1.11880	1.00000	0.05082	0.05082	0.04531	0.02372
9	1.12900	1.00000	0.05918	0.05918	0.04878	0.02582
10	1.14000	1.00000	0.06907	0.06907	0.05245	0.02784
11	1.14920	1.00000	0.07786	0.07786	0.05546	0.02931
12	1.15940	1.00000	0.08814	0.08814	0.05874	0.03114
13	1.16960	1.00000	0.09898	0.09898	0.06196	0.03296
192	2.96200	1.00000	6.88742	6.88742	0.27097	0.16112
193	2.97190	1.00000	6.94542	6.94542	0.27154	0.16152
194	2.98210	1.00000	7.00536	7.00536	0.27212	0.16194
195	2.99230	1.00000	7.06554	7.06554	0.27268	0.16237
196	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
197	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
198	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
199	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
200	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!

回帰の方法が不明な方は次ページへ

EXCEL アドインで分析をONとする。  
 回帰方法は、EXCELの回帰方法  
 (次ページ記載参照)



2))係数回帰 シート から回帰を行う。

$$dW/dI_1 = C_{10} + C_{11}(I_2-3) + 2C_{20}(I_1-3) + 3C_{30}(I_1-3)^2$$

	A	B	C	D	E	F
10	分散分析表					
11		自由度	変動	分散	割られた分散	有意 F
12	回帰	2	0.031026	0.015513	29.46771	1.09E-06
13	残差	20	0.010529	0.000526		
14	合計	22	0.041554			
15						
16		係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%
17	切片	2.151574	0.030846	69.75169	2.33E-25	2.08723
18	X 値 1	-0.94913	0.153868	-6.16849	5.01E-06	-1.27009
19	X 値 2	1.169312	0.170196	6.870367	1.13E-06	0.814288
20						

エネルギー関数

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

I1-3, I2-3で微分 すると、次のようになる。

$$dW/dI_1 = C_{10} + C_{11}(I_2-3) + 2C_{20}(I_1-3) + 3C_{30}(I_1-3)^2$$

$$dW/dI_2 = C_{01} + C_{11}(I_1-3)$$

求める係数

dW/dI1	I1-3	(I1-3) <sup>2</sup>	求める係数
1	#DIV/0!	0.0000	C <sub>10</sub>
2	1.7899	0.0050	C <sub>11</sub> +2C <sub>20</sub>
3	1.5128	0.0079	3C <sub>30</sub>
4	1.3185	0.0116	
5	1.1675	0.0165	
6	1.0683	0.0214	
7	0.9907	0.0269	
8	0.9229	0.0335	
9	0.8693	0.0404	
10	0.8201	0.0488	
11	0.7837	0.0566	
12	0.7498	0.0656	
13	0.7210	0.0748	

求める係数

dW/dI2	I1-3	求める係数
1	#DIV/0!	C <sub>01</sub>
2	(1.1846)	C <sub>11</sub>
3	(0.9095)	
4	(0.7180)	
5	(0.5706)	
6	(0.4748)	
7	(0.4008)	
8	(0.3369)	
9	(0.2873)	
10	(0.2424)	
11	(0.2098)	
12	(0.1801)	
13	(0.1553)	

$$dW/dI_2 = C_{01} + C_{11}(I_1-3)$$

	A	B	C	D	E	F
1	概要					
2	回帰統計					
3	重相関 R	0.859053				
4	重決定 R2	0.737972				
5	補正 R2	0.727491				
6	標準誤差	0.08892				
7	観測数	27				
8	分散分析表					
9		自由度	変動	分散	割られた分散	有意 F
10	回帰	1	0.556717	0.556717	70.40968	9.74E-09
11	残差	25	0.197671	0.007907		
12	合計	26	0.754388			
13						
14		係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%
15	切片	-0.92322	0.03709	-24.8916	3.67E-19	-0.99961
16	X 値 1	0.724731	0.08637	8.391048	9.74E-09	0.54685
17						

POINT: I1-3=0.1以上での回帰とする

# 回帰手順

シート“(7)係数回帰”にて  
データ ⇒ データ分析

Microsoft Excel

データ

データ分析

データ分析

分析ツール(A)

- 基本統計量
- 指数平滑
- F 検定: 2 標本を使った分散の検定
- フーリエ解析
- ヒストグラム
- 移動平均
- 乱数発生
- 順位と百分位数
- 回帰分析
- サンプレツ

回帰分析

	dW/dI1	I1-3	(I1-3) <sup>2</sup>	求める係数	dW/dI2	I1-3
1	#DIV/0!	0.0000	0.0000	C <sub>10</sub>	#DIV/0!	0.0000
2	1.6537	0.0004	0.0000	C <sub>11</sub> +2C <sub>20</sub>	0.0041	0.0004
3	1.6740	0.0016	0.0000	3C <sub>30</sub>	0.0082	0.0016
4	1.6942	0.0035	0.0000		0.0122	0.0035
5	1.7143	0.0062	0.0000		0.0163	0.0062
6	1.7344	0.0095	0.0001		0.0204	0.0095
7	1.7543	0.0136	0.0002		0.0244	0.0136
8	1.7742	0.0183	0.0003		0.0285	0.0183
9	1.7939	0.0237	0.0006		0.0325	0.0237
10	1.8136	0.0298	0.0009		0.0365	0.0298
11	1.8331	0.0364	0.0013		0.0406	0.0364
12	1.8526	0.0437	0.0019		0.0446	0.0437
13	1.8720	0.0516	0.0027		0.0485	0.0516
14	1.8913	0.0600	0.0036		0.0525	0.0600
15	1.9105	0.0691	0.0048		0.0564	0.0691

# I1での微分

$$dW/dI_1 = C_{10} + C_{11}(I_1-3) + 2C_{20}(I_1-3)^2 + 3C_{30}(I_1-3)^3$$

C10、C11+2C20、3C30を求める

求める係数				求める係数	
dW/dI1	I1-3	(I1-3) <sup>2</sup>	C10	dW/dI2	I1-3
#DIV/0!	0.0000	0.0000	C11+2C20	#DIV/0!	0.0000
1.6537	0.0004	0.0000	→ 3C30	0.0041	0.0004
1.6740	0.0016	0.0000		0.0082	0.0016
				0.035	0.0035
				0.062	0.0037
				0.095	0.0039
				0.136	0.0041
1.7742	0.0183	0.0003		0.0285	0.0183
1.7939	0.0237	0.0006		0.0325	0.0237
1.8136	0.0298	0.0009		0.0365	0.0298
1.8331	0.0364	0.0013		0.0406	0.0364
1.8526	0.0437	0.0019		0.0446	0.0437
1.8720	0.0516	0.0027		0.0485	0.0516
1.8913	0.0600	0.0036		0.0525	0.0600
1.9105	0.0691	0.0048		0.0564	0.0691
1.9296	0.0786	0.0062		0.0604	0.0786
1.9485	0.0888	0.0079		0.0643	0.0888
1.9674	0.0994	0.0099		0.0681	0.0994
1.9862	0.1106	0.0122		0.0720	0.1106
2.0049	0.1223	0.0149		0.0758	0.1223
2.0235	0.1344	0.0181		0.0797	0.1344
2.0419	0.1471	0.0216		0.0835	0.1471
2.0603	0.1603	0.0257		0.0872	0.1603
2.0786	0.1739	0.0302		0.0910	0.1739
2.0968	0.1880	0.0353		0.0947	0.1880
2.1148	0.2025	0.0410		0.0984	0.2025
2.1328	0.2175	0.0473		0.1020	0.2175
2.1506	0.2329	0.0542		0.1057	0.2329

POINT: I1-3=0.1以上での回帰とする

回帰分析

入力元  
 入力 Y 範囲(Y): \$E\$28:\$E\$71  
 入力 X 範囲(X): \$F\$28:\$F\$71

ラベル(L)       定数に 0 を使用(Z)  
 有意水準(O) 95 %

出力オプション  
 一覧の出力先(S):  
 新規ワークシート(P):  
 新規ブック(W)

残差  
 残差(R)       残差グラフの作成(D)  
 標準化された残差(T)       観測値グラフの作成(I)

正規確率  
 正規確率グラフの作成(N)

元データ 試験条件 (4)元データ確認(軸1張1軸固定) (6)ひずみエネルギー計算表 ○How to dW/dI1回帰 dW/dI2回帰 (7)係数回帰 (3)係数の検算 4)エネ

# I 2での微分

$$dW/dI_2 = C_{01} + C_{11}(I_1 - 3)$$

C01、C11を求める

POINT: I1-3=0.1以上での回帰とする

dW/dI1	I1-3	(I1-3) <sup>2</sup>	dW/dI2	I1-3
#DIV/0!	0.0000	0.0000	#DIV/0!	0.0000
1.6537	0.0004	0.0000	0.0041	0.0004
1.6740	0.0016	0.0000	0.0082	0.0016
			0.035	
			0.062	
			0.095	
			0.136	
1.7742	0.0183	0.0003	0.0285	0.0183
1.7939	0.0237	0.0006	0.0325	0.0237
1.8136	0.0298	0.0009	0.0365	0.0298
1.8331	0.0364	0.0013	0.0406	0.0364
1.8526	0.0437	0.0019	0.0446	0.0437
1.8720	0.0516	0.0027	0.0485	0.0516
1.8913	0.0600	0.0036	0.0525	0.0600
1.9105	0.0691	0.0048	0.0564	0.0691
1.9296	0.0786	0.0062	0.0604	0.0786
1.9485	0.0888	0.0079	0.0643	0.0888
1.9674	0.0994	0.0099	0.0681	0.0994
1.9862	0.1106	0.0122	0.072	0.1106
2.0049	0.1223	0.0149	0.0758	0.1223
2.0235	0.1344	0.0181	0.0797	0.1344
2.0419	0.1471	0.0216	0.0835	0.1471
2.0603	0.1603	0.0257	0.0872	0.1603
2.0786	0.1739	0.0302	0.0910	0.1739
2.0968	0.1880	0.0353	0.0947	0.1880
2.1148	0.2025	0.0410	0.0984	0.2025
2.1328	0.2175	0.0473	0.1020	0.2175
2.1506	0.2329	0.0542	0.1057	0.2329

回帰分析

入力元  
 入力 Y 範囲(Y): \$E\$28:\$E\$71  
 入力 X 範囲(X): \$F\$28:\$F\$71  
 ラベル(L)  定数に 0 を使用(Z)  
 有意水準(O) 95 %

出力オプション  
 一覧の出力先(S):  
 新規ワークシート(P):  
 新規ブック(W)

残差  
 残差(R)  残差グラフの作成(D)  
 標準化された残差(T)  観測値グラフの作成(I)

正規確率  
 正規確率グラフの作成(N)

$$dW/dI_1 = C_{10} + C_{11}(I_1 - 3) + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2$$

	A	B	C	D	E	F
10	分散分析表					
11		自由度	変動	分散	割られた分散	有意 F
12	回帰	2	0.031026	0.015513	29.46771	1.09E-06
13	残差	20	0.010529	0.000526		
14	合計	22	0.041554			
15						
16		係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%
17	切片	2.151574	0.20846	69.75169	2.33E-25	2.08723
18	X 値 1	-0.94913	0.58868	6.16849	5.01E-06	1.27003
19	X 値 2	1.169312	0.70196	6.676367	1.15E-06	0.614268
20						

### 3) 係数検証 シートへ移動

を回帰した係数から参照

	C10	C01	C11	C20	C30
5.2827E-01	5.5064E-02	1.5588E+00	-7.7942E-01	0.0000E+00	

単位: N/mm<sup>2</sup>

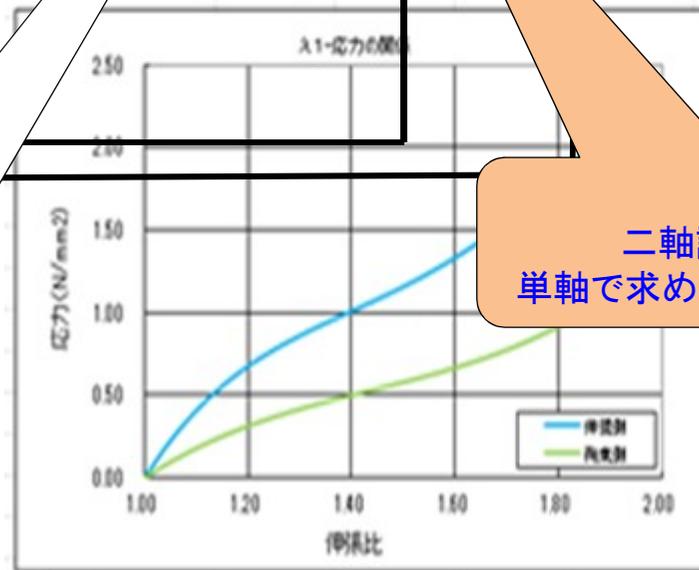
$$dW/dI_2 = C_{01} + C_{11}(I_1 - 3)$$

	A	B	C	D
1	概要			
2				
3	回帰統計			
4	重相関 R	0.859053		
5	重決定 R2	0.737972		
6	補正 R2	0.727491		
7	標準誤差	0.08892		
8	観測数	27		
9				
10	分散分析表			
11		自由度	変動	分散
12	回帰	1	0.556717	0.556717
13	残差	25	0.197671	0.007907
14	合計	26	0.754388	
15				
16		係数	標準誤差	t
17	切片	-0.92322	0.45709	-2.45916
18	X 値 1	0.724731	0.08637	8.391048
19				

それぞれの回帰係数を参照

	C10	C01	C11	C20	C30
係数	2.1509E+00	(参照)			
真ヤング率	3.5				
算出ヤング率(下置)	1.0273E+00	0(C10+C01)			
入力	4.560E-01	1.5600E-01	7.2473E-01	-3.6237E-01	0.0000E+00
			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



最終結果

# ひずみエネルギー勾配確認 シート でおかしくないか確認

★W ひな形EXCEL(最新) ひずみエネルギー-密度係数導出 [互換モード]

1																					
2	エネルギー関数																				
3	$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)$ $+C_{20}(I_1-3)^2+C_{30}(I_1-3)^3$																				
4	上記の式において、エネルギーが正しいか確認する。																				
5	$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$ $I_2=\lambda_1^{-2}+\lambda_2^{-2}+\lambda_3^{-2}$																				
6	各係数を入力																				
7		$C_{10}$	0.2456000																		
8		$C_{01}$	0.0256000																		
9		$C_{11}$	0.7247315																		
10		$C_{20}$	-0.3623657																		
11		$C_{30}$	0.0000000																		
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					

$\lambda_1$	0.6	1.27	1.29	0.78	0.54	0.54	0.70	0.94	1.20	1.41	1.52	1.48	1.24	0.73
	0.8	1.29	0.28	0.07	0.06	0.14	0.32	0.62	1.06	1.68	2.53	3.64	5.06	6.86
	1.0	0.78	0.07	0.00	0.04	0.21	0.59	1.29	2.44	4.19	6.67	10.06	14.52	20.25
	1.2	0.54	0.06	0.04	0.17	0.57	1.40	2.90	5.28	8.80	13.75	20.42	29.15	40.20
	1.4	0.54	0.14											
	1.6	0.70	0.32											
	1.8	0.94	0.62											
	2.0	1.20	1.06											
	2.2	1.41	1.68											
	2.4	1.52	2.53											
	2.6	1.48	3.64											
	2.8	1.24	5.06											
	3.0	0.73	6.86											
$\lambda_2$	0.6	0.8												

ひずみエネルギー

ひずみエネルギー MPa

$\lambda_1$  伸張比

$\lambda_2$  伸張比

問題なければこれで完了