

お問い合わせリンク

# 公共試験場を利用して ゴムの解析用ひずみエネルギーを構築しませんか。

- 候補日をいただければ調整します。1社4名様くらいまで -

1. 富山県でご希望の日程で、6時間程度で修得できます。  
操作は簡単で、ひな型を使って回帰も簡単です。

※ひな型販売もしています。

2. 公共試験場ですので、安価に、（修得すれば）いつでも  
ご利用いただけます。

**アフターフォローも万全です、問い合わせに回答します。**

The screenshot shows the homepage of the Toyama Prefecture Industrial Technology Research and Development Center. At the top, there is a Google search bar and navigation links for 'HOME', '技術支援 (Program)', 'センター概要 (About)', 'お知らせ (News)', '主要設備 (Facility)', '刊行物 (Publication)', '研究開発 (Development)', and '産業財産権 (Industrial property rights)'. Below the navigation bar, there are breadcrumb links: 'ホーム > 概要 > 組織・研究職員 > 生活工学研究所'. The main content area features the title '生活工学研究所' and a photograph of a modern building. To the left of the photo, there is a text block describing the center's focus on research and development for products related to daily life, such as clothing, housing, and leisure. At the bottom of the page, contact information is provided: 〒939-1503 富山県南砺市岩武新35-1 TEL:0763-22-2141 FAX:0763-22-4604.

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

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

080-2230-8785

富山県産業技術研究開発センター (pref.toyama.jp)

# - プログラム (案) -

## 1. ゴムの測定からデータのまとめ方、注意点（最重要）と概要 10:00～10:20

### 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

サンプルの選定、測定方法で本当の剛性が求められないことがあります。

速度依存性を気にする方もいますが、そこはほとんど影響ありません。明確に説明します。

※お問い合わせいただければ資料で説明します。

※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。

### 1-4. 試験時にやってはいけない注意点のみ説明します。

## 2. 単軸試験実習及び二軸試験実習

10:25～14:50

昼食休憩 (12:00～13:00)

## 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。

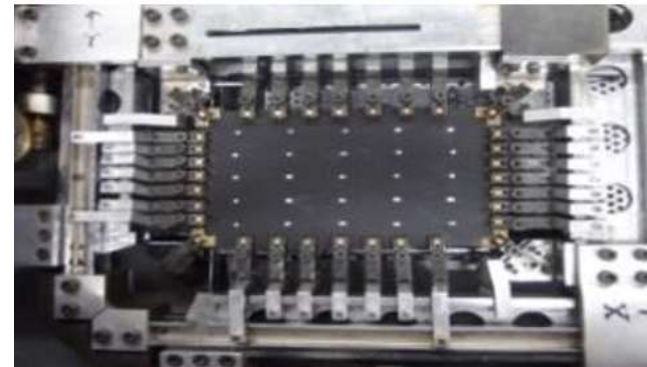
その際に、二軸試験機の制約から正確なヤング率が取れていないので、補正を行います。

## 現地の二軸試験機



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

※適用の構成則は、元のデータが同じならば  
Ogden、Mooney、どれを選んでも同じ精度です。



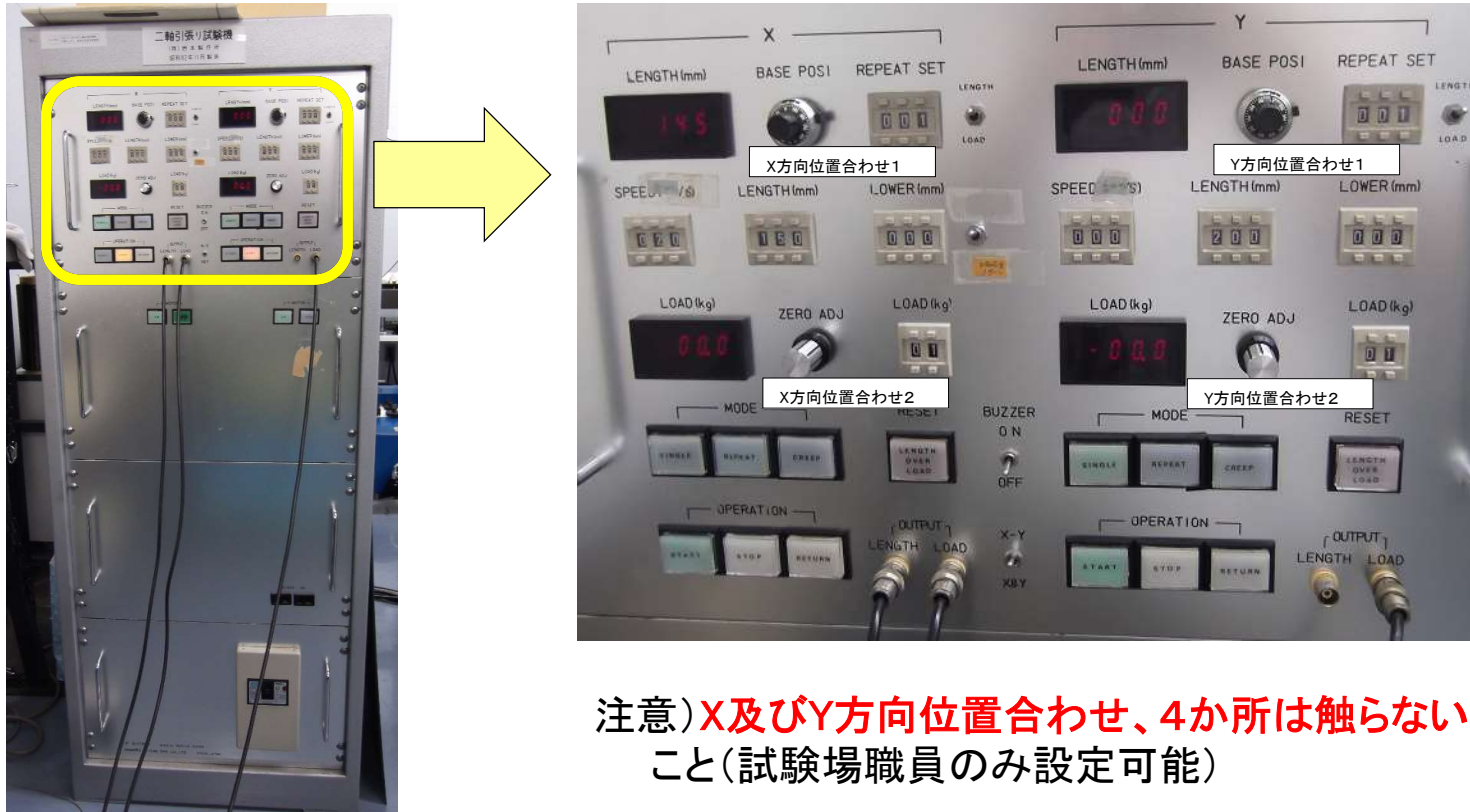
サンプル取り付け部

従来の試験機は、横置き型・大型 非常に高価 旧型、富山工業試験場、昭和生まれですがまだまだ現役です。

操作手順:一例

## 測定手順 STEP2:試験条件設定

順番に操作できる  
手順書完備



従来の試験機は、横置き型・大型 非常に高価 旧型、富山工業試験場、昭和生まれですがまだまだ現役です。

## 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

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

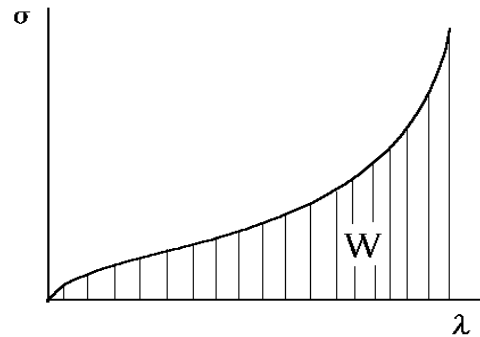
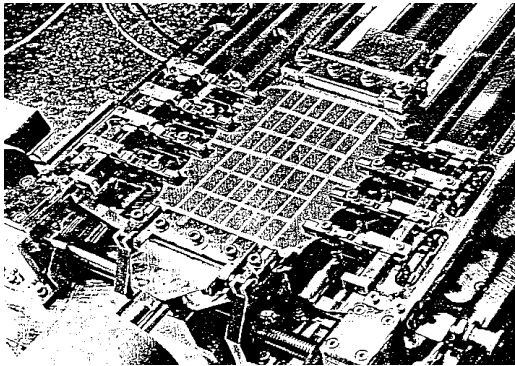
### 7) Arruda-Boyce

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

# ひずみエネルギー密度関数

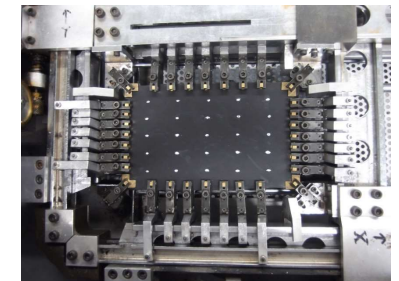
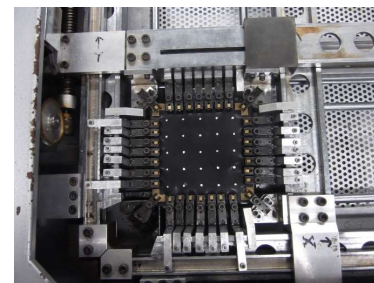
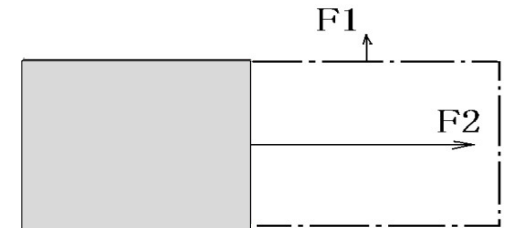
基本式  $W = W(I_1, I_2, I_3)$

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



## 一軸拘二軸伸張試験

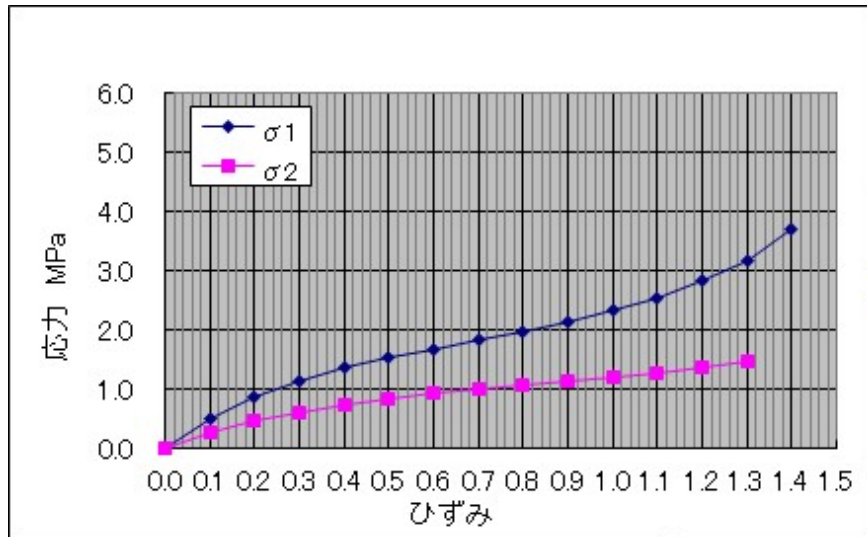
基本的にこの変形形態が解析の  
予測精度アップに有効です。  
※理由について説明します。





# ひずみエネルギー密度関数の回帰

測定した荷重vs変位  
⇒ 応力vs ひずみ換算



※共に有効断面がポイントで、  
どちらも同じ結果

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

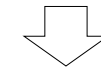
$$\sigma_2 = \frac{2}{\lambda_2} \left( \lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

$$\sigma_3 = 0$$



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

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



重回帰から係数を求める。

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

Excelのひな型で簡単に回帰できます。

1) 試験情報入力

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を固定し、引張る  
 試験内容 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)  
 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、組み付け後、即測定  
 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。  
 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。

2) このシートの色に入力すると他は自動計算される

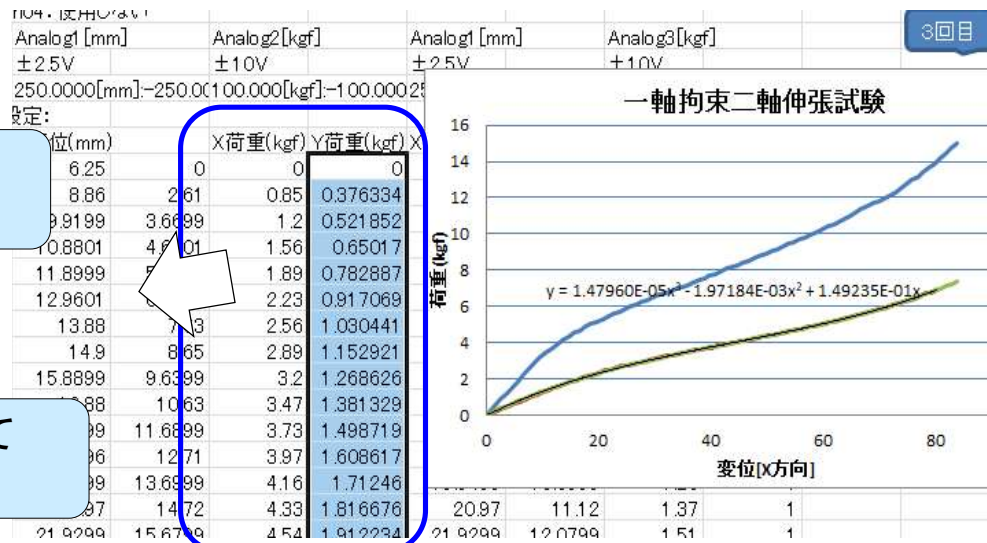
X補正変位とX荷重、Y荷重のデータをコピーして回帰シートへ数値貼り付け

サンプル厚さ 1.2mm ヤング率 1.102235 N/mm<sup>2</sup>

試験片	厚さ[mm]	変位	荷重 [kgf]	荷重 [kgf]	変位X	λ1	σx [N/mm <sup>2</sup> ]	λ1	σy [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	1.0000	1.0000	0.5000	1.0000	1.0000	0.1307	1.0000	0.0653
3	1.2	2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.2613	1.0000	0.1307
4	1.2	3.0000	3.0000	1.5000	3.0000	1.0000	0.3919	1.0000	0.1960
5	1.2	4.0000	4.0000	2.0000	4.0000	1.0000	0.5227	1.0000	0.2613
6	1.2	5.0000	5.0000	2.5000	5.0000	1.0000	0.6533	1.0000	0.3267
7	1.2	6.0000	6.0000	3.0000	6.0000	1.0000	0.7840	1.0000	0.3919
8	1.2	7.0000	7.0000	3.5000	7.0000	1.0000	0.9147	1.0000	0.4572
9	1.2	8.0000	8.0000	4.0000	8.0000	1.0800	1.0453	1.0000	0.5227
10	1.2	9.0000	9.0000	4.5000	9.0000	1.0900	1.1760	1.0000	0.5880
11	1.2	10.0000	10.0000	5.0000	10.0000	1.1000	1.3067	1.0000	0.6533
12	1.2	11.0000	11.0000	5.5000	11.0000	1.1100	1.4373	1.0000	0.7187
13	1.2	12.0000	12.0000	6.0000	12.0000	1.1200	1.5680	1.0000	0.7840
14	1.2	13.0000	13.0000	6.5000	13.0000	1.1300	1.6987	1.0000	0.8493
15	1.2	14.0000	14.0000	7.0000	14.0000	1.1400	1.8293	1.0000	0.9147
16	1.2	15.0000	15.0000	7.5000	15.0000	1.1500	1.9600	1.0000	0.9800
17	1.2	16.0000	16.0000	8.0000	16.0000	1.1600	2.0907	1.0000	1.0453
18	1.2	17.0000	17.0000	8.5000	17.0000	1.1700	2.2213	1.0000	1.1107
19	1.2	18.0000	18.0000	9.0000	18.0000	1.1800	2.3520	1.0000	1.1760
20	1.2	19.0000	19.0000	9.5000	19.0000	1.1900	2.4827	1.0000	1.2413
21	1.2	20.0000	20.0000	10.0000	20.0000	1.2000	2.6133	1.0000	1.3067

3) 応力計算を行うためシート厚みを入力する

4) 試験結果をコピーして値のみ張り付ける。



ひな型を使うことで理論通りに順番に回帰分析できます。



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	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
2		エネルギー関数																				
3		$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)$																				
4		$+C_{20}(I_1-3)^2+C_{30}(I_1-3)^3$																				
5		上記の式において、エネルギーが正しいか確認する。																				
6		$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$																				
7		$I_2=\lambda_1^{-2}+\lambda_2^{-2}+\lambda_3^{-2}$																				
8		各係数を入力																				
9		$C_{10}$	0.2456000																			
10		$C_{01}$	0.0256000																			
11		$C_{11}$	0.7247315																			
12		$C_{20}$	-0.3623657																			
13		$C_{30}$	0.0000000																			
14							$\lambda_1$	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	
15								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	
16								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	
17								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	40.90	
18								1.4	0.54	0.14												
19								1.6	0.70	0.32												
20								1.8	0.94	0.62												
21								2.0	1.20	1.06												
22								2.2	1.41	1.68												
23								2.4	1.52	2.53												
24								2.6	1.48	3.64												
25								2.8	1.24	5.06												
26								3.0	0.73	6.86												
27								$\lambda_2$	0.6	0.8												

ひずみエネルギー

ひずみエネルギー MPa

λ1 伸張比

λ2 伸張比

問題なければこれで完了

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

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

080-2230-8785

# ゴムのエネルギー密度関数の研究

1960年ころ、現JSR様

川端先生

Mooneyさん

河合先生

坂口先生

JSR社員 藪田氏

このころ二軸試験機が出来てきた。  
(ほぼ完成型)



二軸試験機

ゴムのエネルギー関数  
 $W=W(\lambda_1, \lambda_2)$

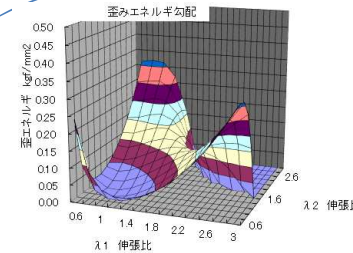
京都大学  
川端先生

滋賀県立大  
山下先生

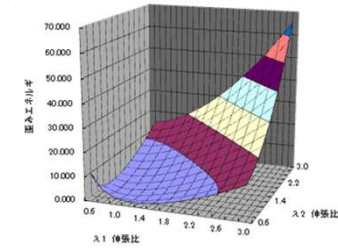
同志社大学  
坂口先生

1991年～  
萩本参加

藪田顧問  
紹介でスタート



陥りやすいミス  
間違ったエネルギー関数



正しいエネルギー分布

奈良  
女子大学

琉球大学

山梨大学

九州

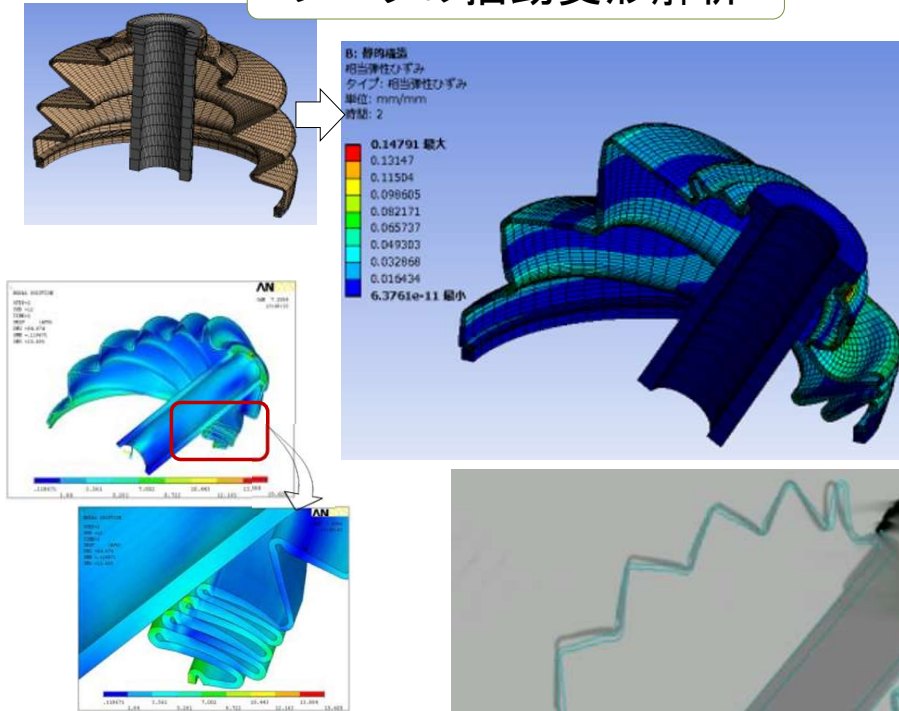
メカニカルデザインさん  
も受託試験

# 適用例

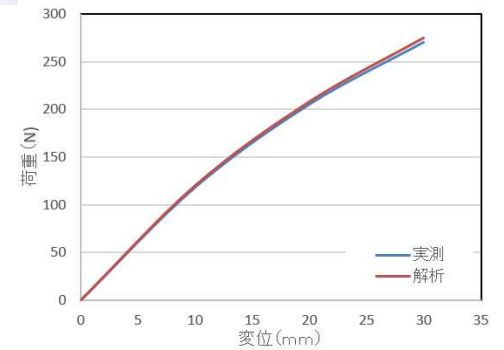
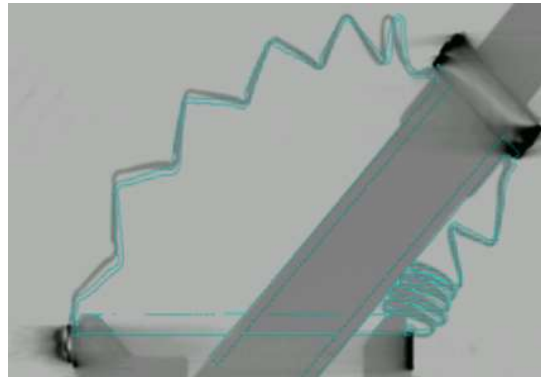
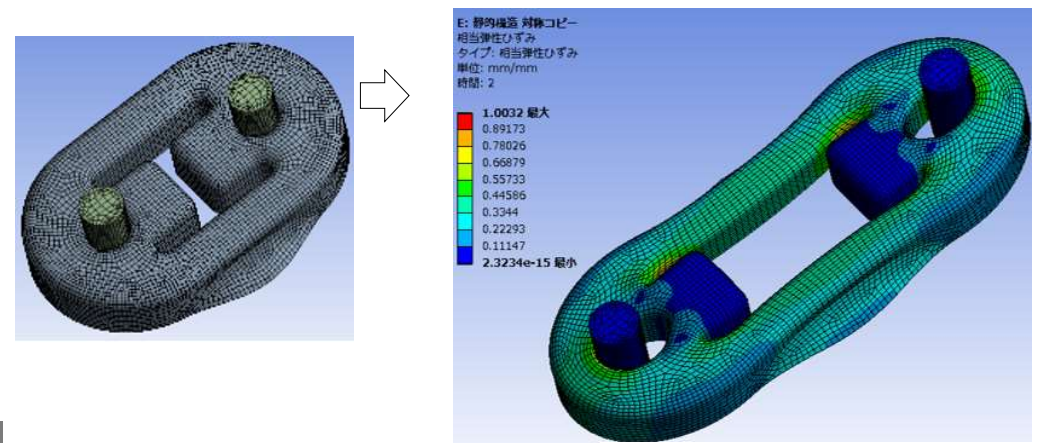
## ひずみエネルギー密度関数定義

解析例 - 定義及び解析の注意点を守れば簡単に精度がアップする

### ブーツの揺動変形解析



### マフラーマウントの変形解析



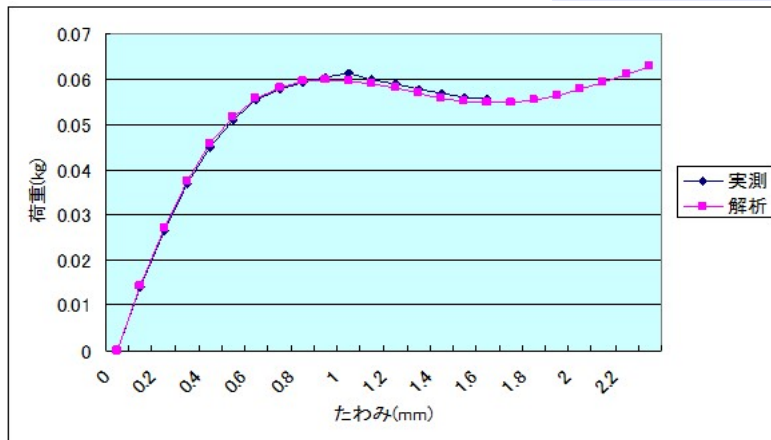
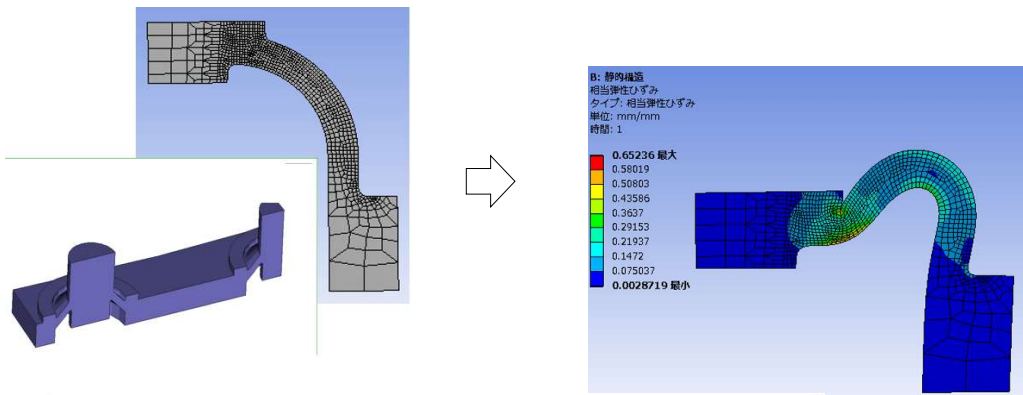
灰色: X線写真  
水色: 解析結果

実測と解析予測がよく一致 (良好)

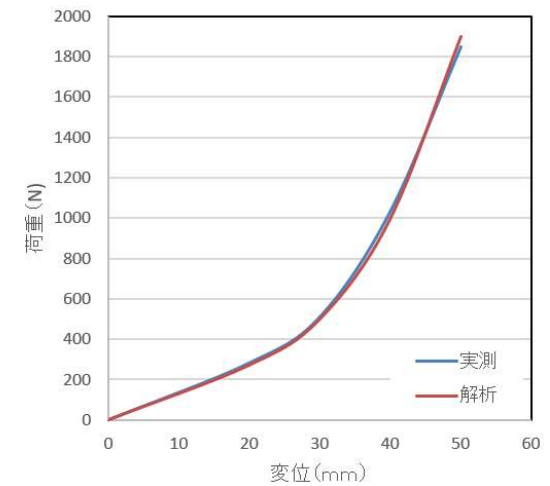
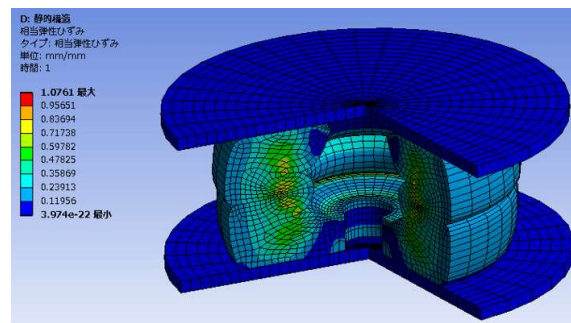
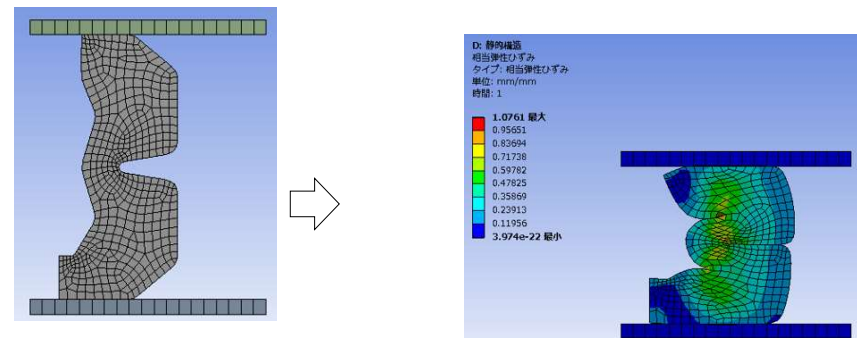
# 適用例

## 解析例 定義及び解析の注意点を守れば簡単に精度がアップする

### ラバーコンタクト変形解析



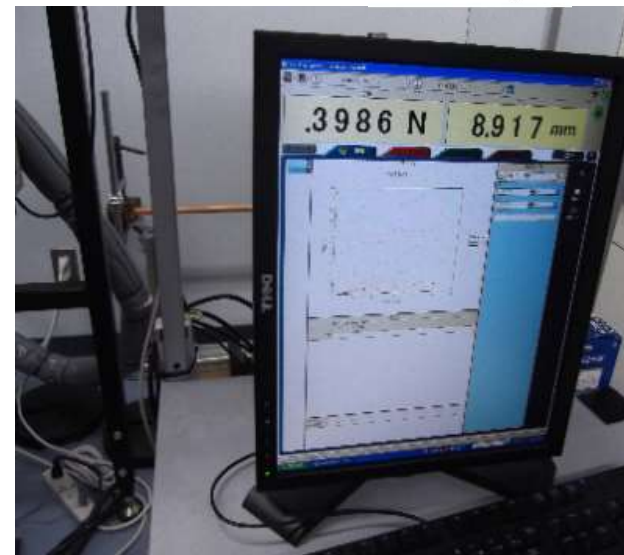
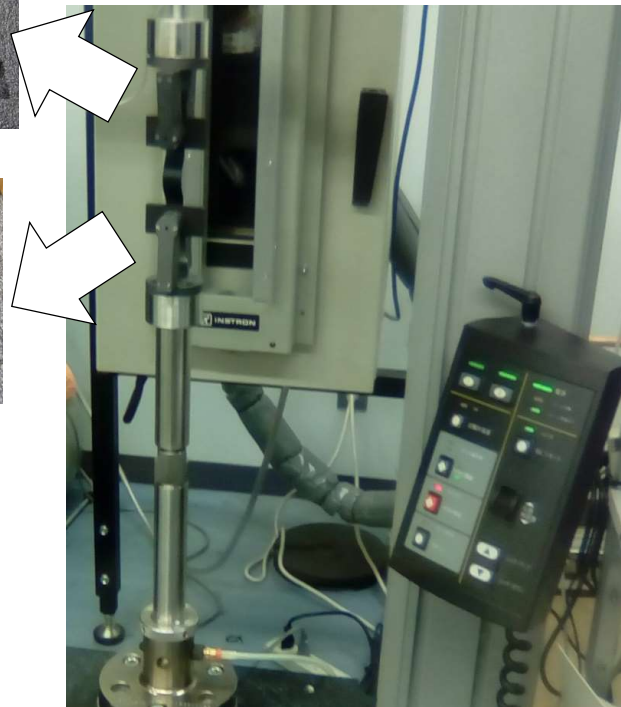
### ラバースプリングの変形解析



実測と解析予測が良く一致 (良好)

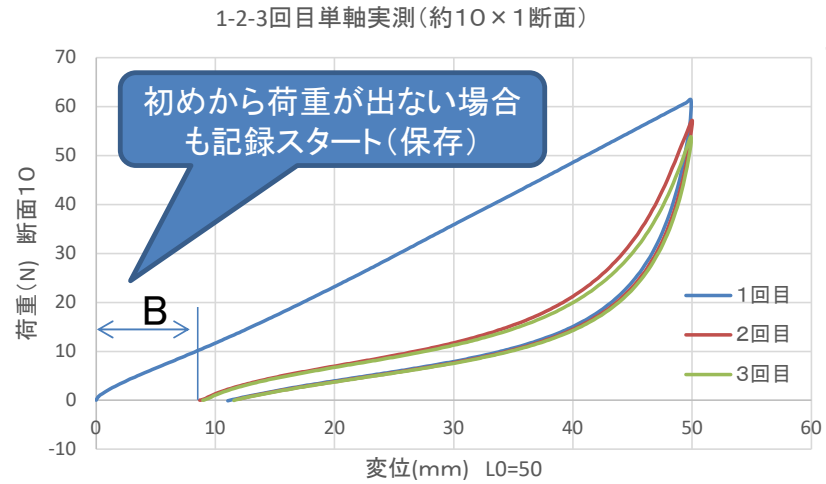
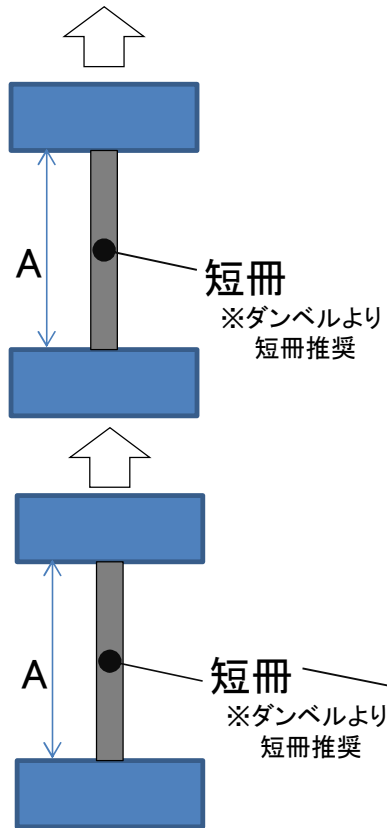


# 単軸試験

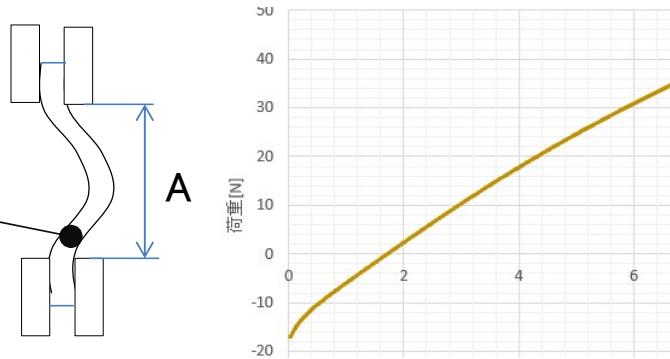


100mm/minへ設定

# 単軸試験手順書:重要ポイント



記録  
・A  
・幅  
・厚さ  
1/10mm単位



二軸でのへたり補正が難しいので単軸での補正を行います。



## お問い合わせ先

### 寺子屋

<https://terakoya2018.com/>

TEL : 080-2230-8785

MAIL : hagi@terakoya2018.com

### 日本テクノフォート株式会社

<https://monocollab.jp/>

TEL : 03-5050-2665

MAIL : inf@monocollab.jp