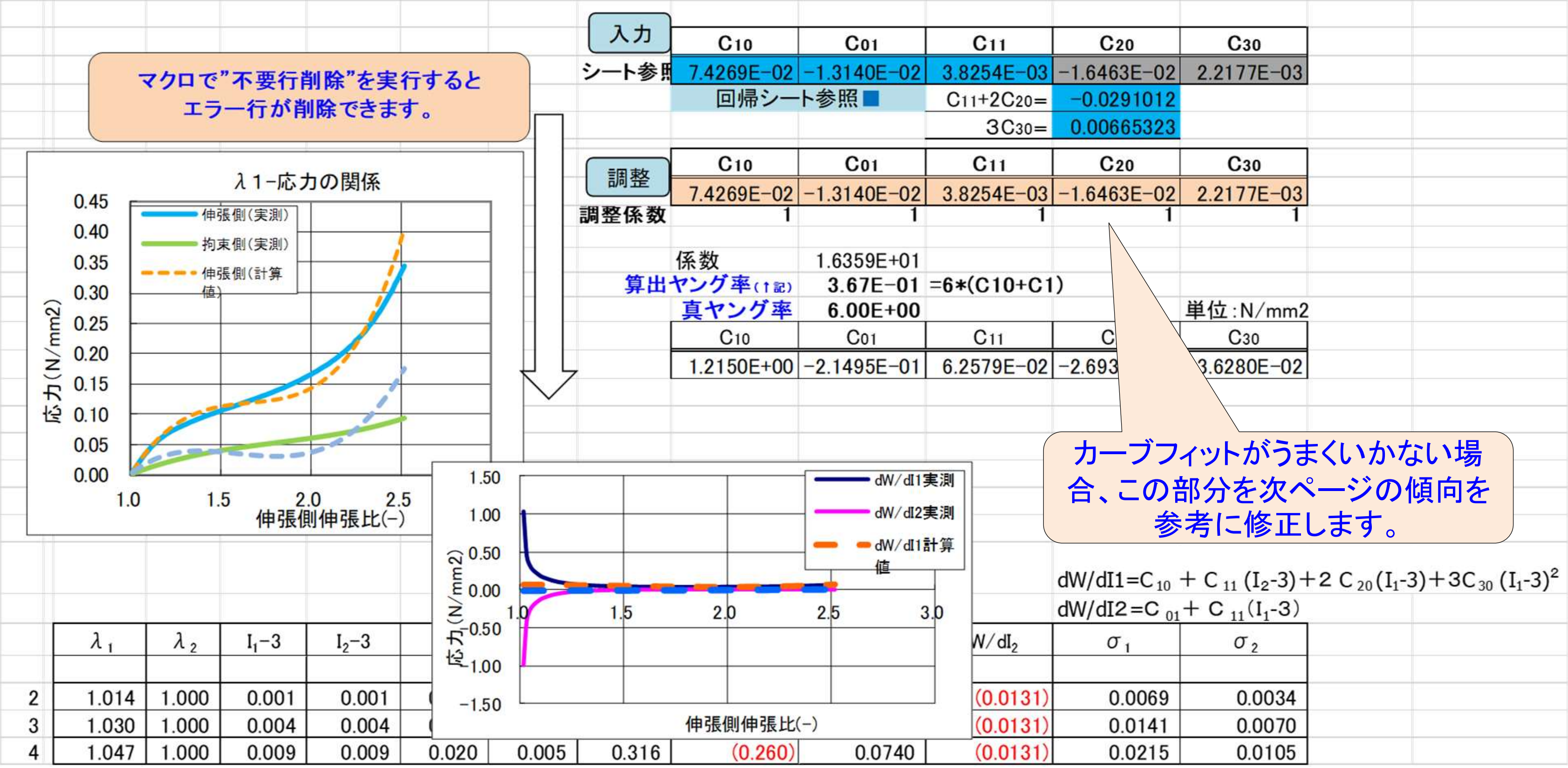
ひずみエネルギー密度関数回帰シートの販売



ひな型を用意して、実習から回帰まで修得していただきます。

ゴムのひずみエネルギー密度関数について

定義方法

基本式

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

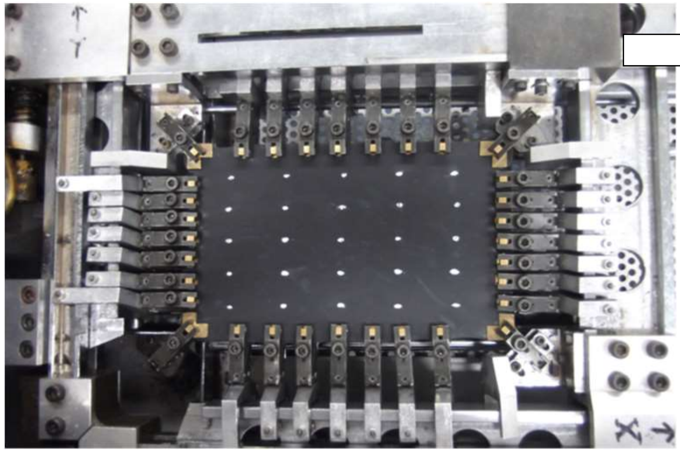
伸張比$\lambda = 1 + \varepsilon$　として表現

テンソルとして、

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

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

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



富山県　工業試験場（南砺市）提供

ひずみエネルギー密度関数定義

ひずみエネルギー密度関数　様々な表現式

1）Neo-Hookeanモデル

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

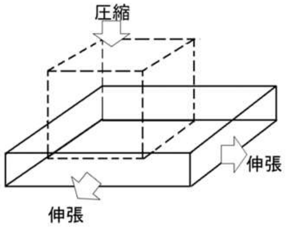
2）Mooney−Rivlin

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

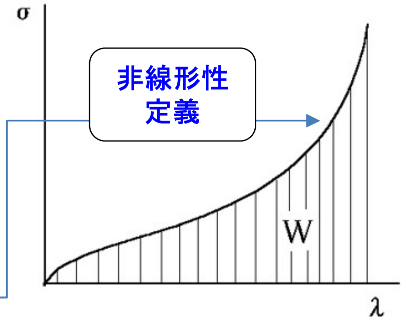
$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$　［対角線効果］

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

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



※I3=1は非圧縮性
最近、紛らわしい論文（圧縮性を示す誤り）



一般的に高次の定義は精度があがります。

3）Mooney高次式

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

4）Ｏｇｄｅｎ

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

一般的にこれら定義で
解析予測精度が良いと言われる。

5）Arruda-Boyce

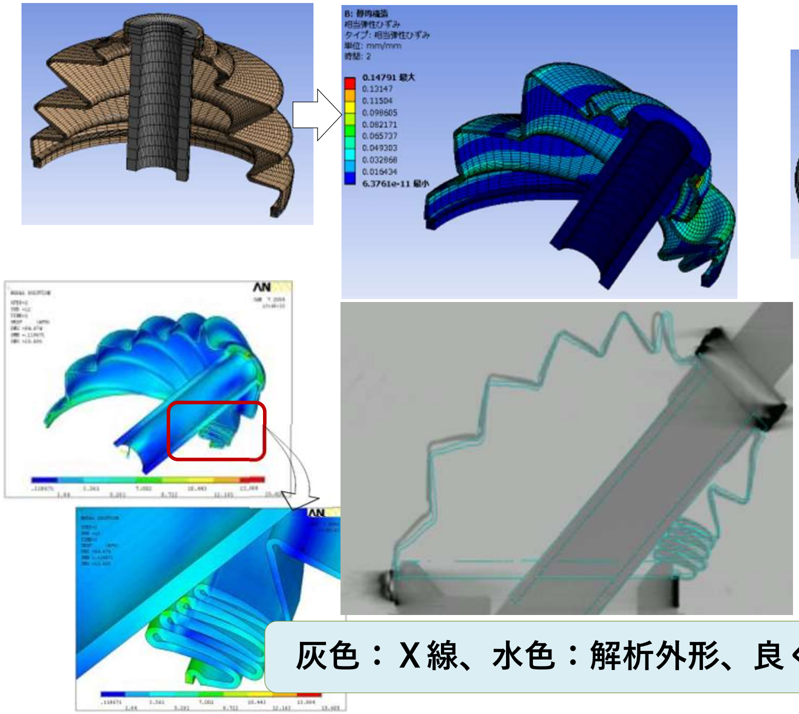
$$W=nk\theta\left[\frac{1}{2}(I_1-3)+\frac{1}{20N}\left(I_1^2-9\right)+\frac{11}{1050N^2}\left(I_1^3-27\right)+\frac{19}{7000N^3}\left(I_1^4-81\right)+\frac{519}{673750N^4}\left(I_1^5-243\right)\right]$$

ひずみエネルギー密度関数による正確な定義が必要です。

ゴムのひずみエネルギー密度関数について

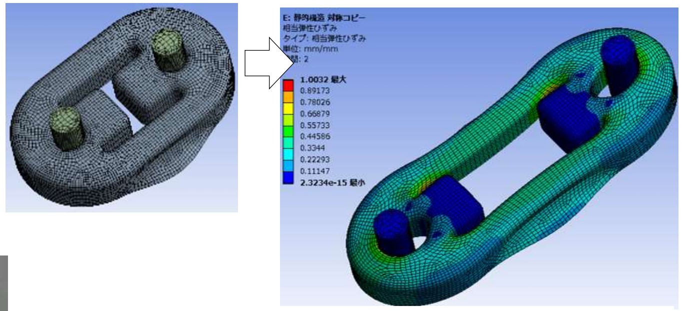
①解析から正確なひずみを求める／解析精度が基本

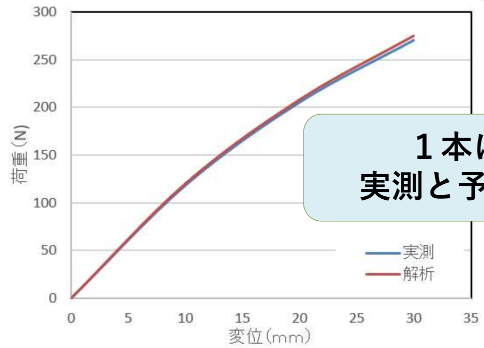
ブーツの揺動変形解析



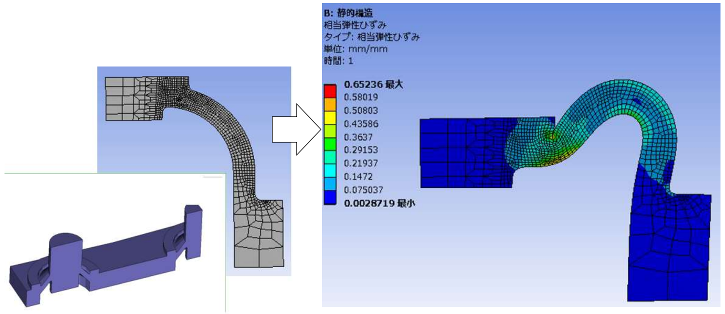
灰色：X線、水色：解析外形、良く一致

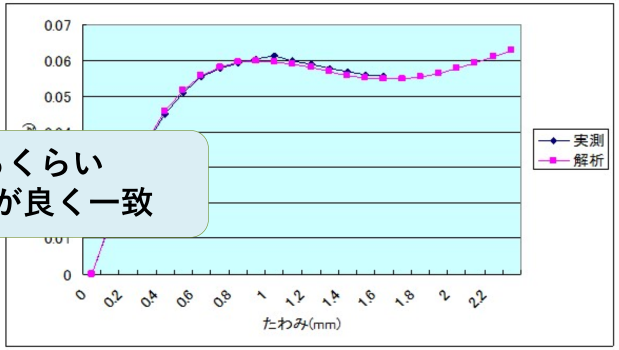
マフラーマウントの変形解析





ラバーコンタクト クリック特性





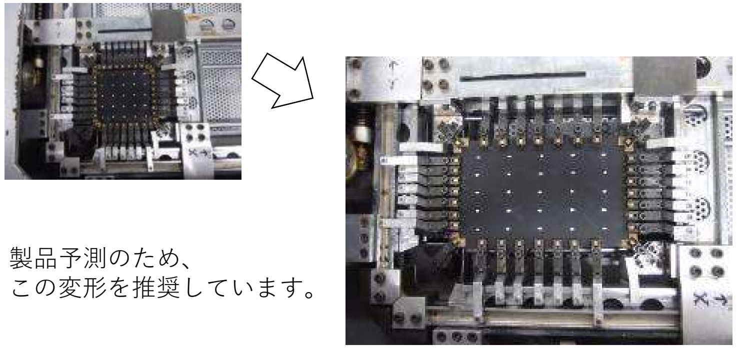
１本に見えるくらい
実測と予測解析が良く一致

変形状態や特性が良く一致することが、各部の応力・ひずみを求める基本になります。

二軸伸張試験から回帰概要

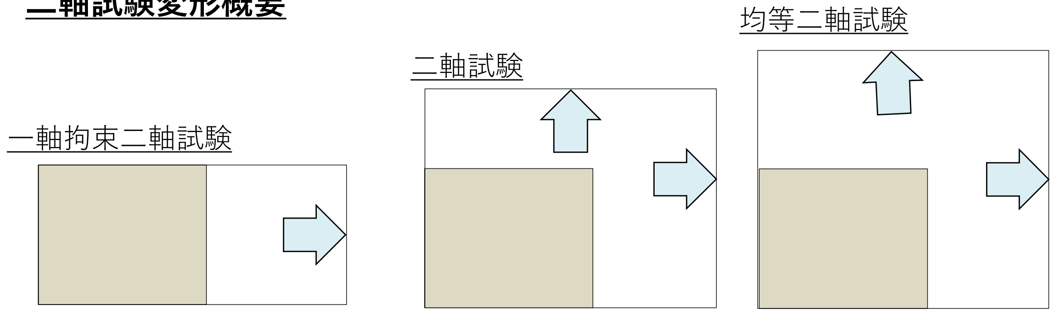
二軸伸張試験概要

一軸拘束二軸伸張試験

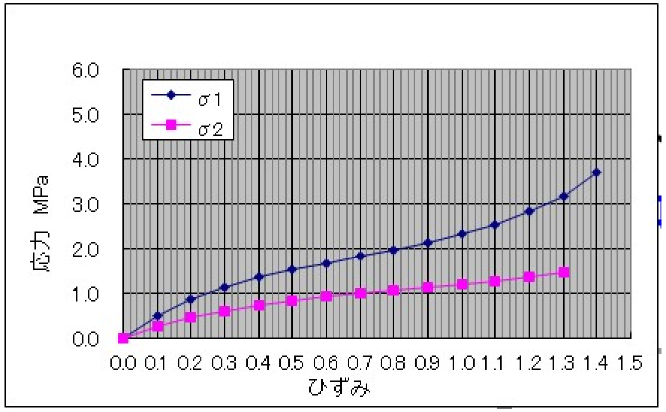


注）製品予測のため、
この変形を推奨しています。

二軸試験変形概要



測定した荷重vs変位
⇒　応力vs　ひずみ換算



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

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

$$\sigma_3 = 0$$

よく聞かれる話ですが、単軸、一軸拘束二軸伸張（純せん断）、均等二軸のすべてのデータを使うと精度が上がります。
嘘ではありませんが、かなり課題が大きいです。

二軸伸張試験から回帰概要

Mooney高次モデルの定義

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

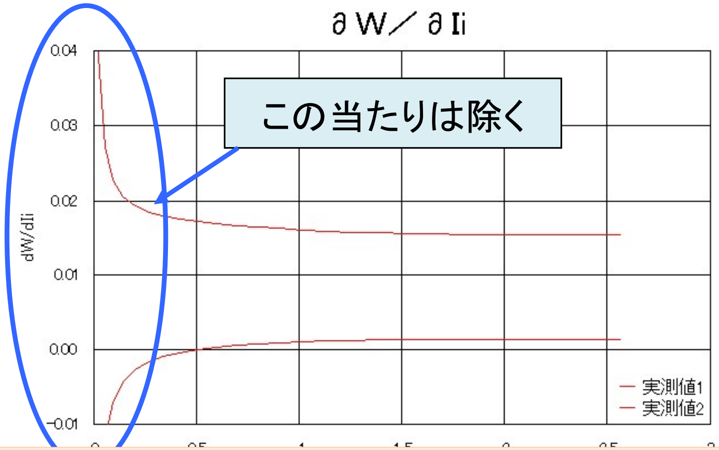
右辺はこの式と等価

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

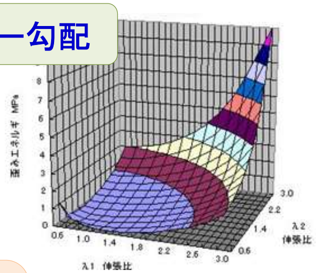
$$\frac{\partial W(I_1,I_2)}{\partial I_2}=\frac{1}{2(\lambda_2^2-\lambda_1^2)}\left[\frac{\lambda_1\sigma_1}{\lambda_1^2-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}-\frac{\lambda_2\sigma_2}{\lambda_2^2-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}\right] \Rightarrow =C_{01}+C_{11}(I_1-3)$$

EXCELアドオンで回帰分析実施

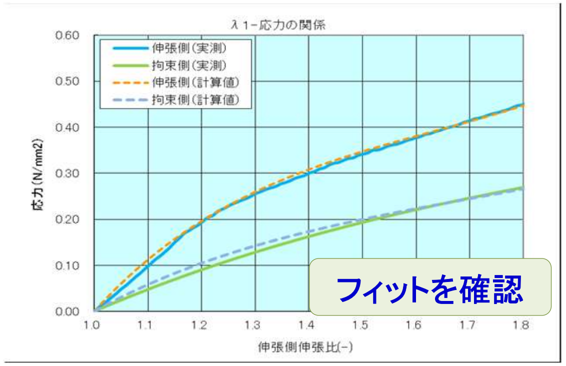
エネルギー計算表(シート)の値									係数からの計算値			
No.	λ_1	λ_2	I_1-3	I_2-3	σ_1	σ_2	dW/dI_1	dW/dI_2	dW/dI_1	dW/dI_2	σ_1	σ_2
1	1.00	1.00	0.00	0.00	0	0.00000	#DIV/0!	#DIV/0!	0.1301	0.0319	0.000	0.000
2	1.02	1.00	0.00	0.00	0.016	0.008	0.159	(0.031)	0.1301	0.0319	0.020	0.010
3	1.02	1.00	0.00	0.00	0.021	0.011	(0.058)	0.178	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	1.00	0.03	0.03	0.083	0.041	0.139	(0.003)	0.1293	0.0317	0.098	0.051
11	1.10	1.00	0.03	0.03	0.093	0.045	0.154	(0.015)	0.1292	0.0317	0.108	0.056
12	1.10	1.00	0.04	0.04	0.102	0.050	0.160	(0.019)	0.1290	0.0317	0.116	0.060



エネルギー勾配



右上がり確認

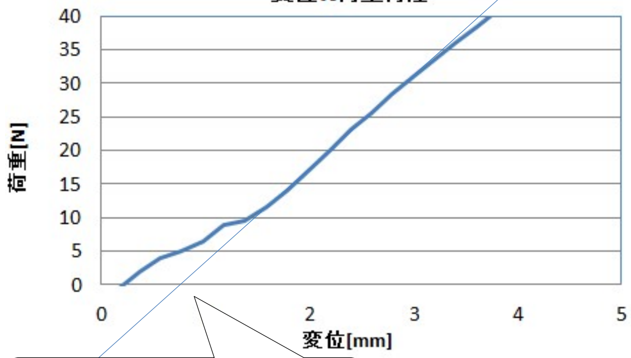


フィットを確認

詳細を短時間で説明するのは難しいですが、概要のみ説明します。
１日コースで二軸試験から回帰まで修得可能です。

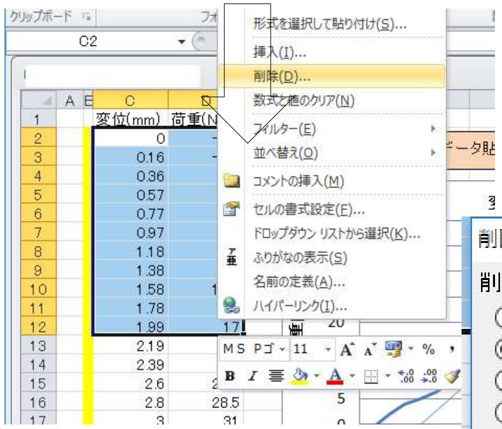
概要

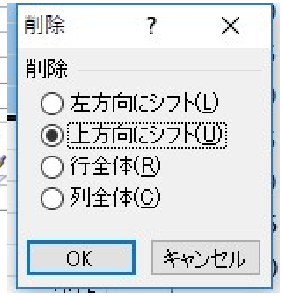
②接戦を引いてゼロ点を特定、データを修正する。



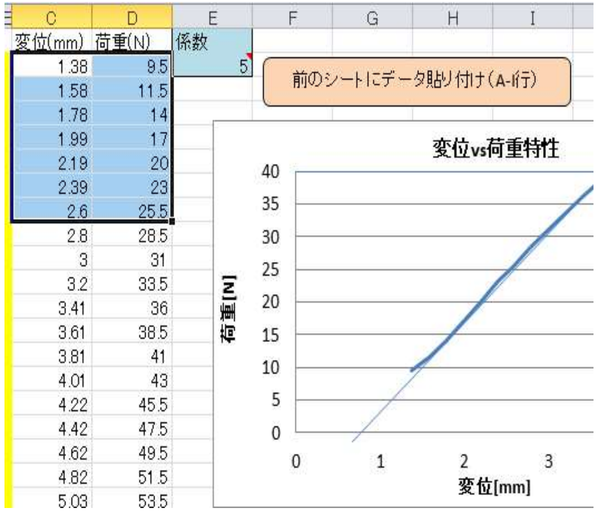
ここがゼロ点になる

不要セルの削除

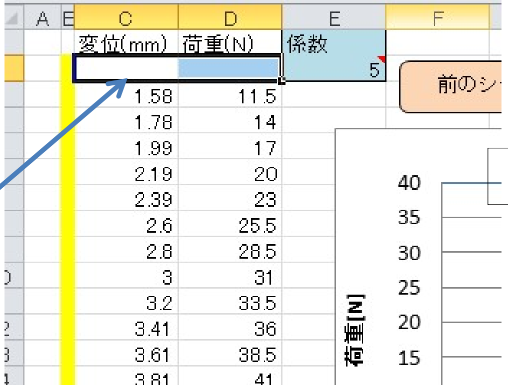




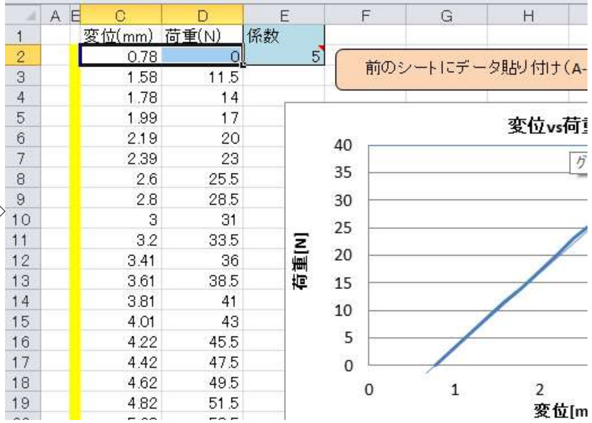
上方にシフト



データが見える所で作業できるように行ったら
上方へシフトなし削除



荷重ゼロとその変位を入力
D列にゼロ入力
荷重ゼロの変位を入れると線が出てきます。



概要

ひずみエネルギー密度関数回帰

（EXCELシート使用して特に二軸データは200行以下にする)

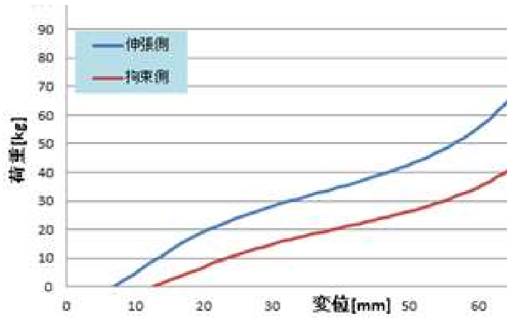
①間引き：処理を楽にするため、データを10分の1に間引く
基本EXCELファイルに測定データをコピー、データ削減する

記録：3回　30秒での往き、戻り繰り返し4000行のデータ（参考）

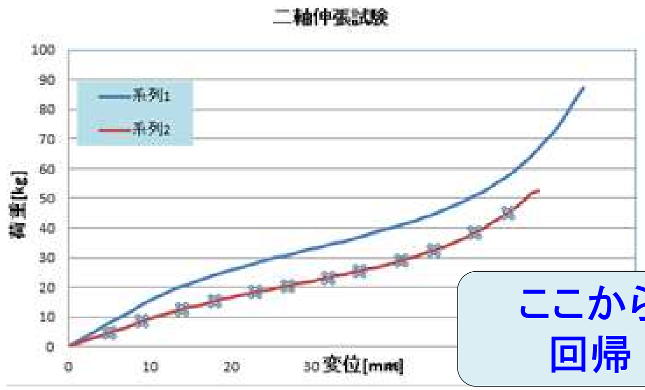
②不要データの削除：1回目データ、若しくは3回目データのみ残す
必要なデータ以外削除する。

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



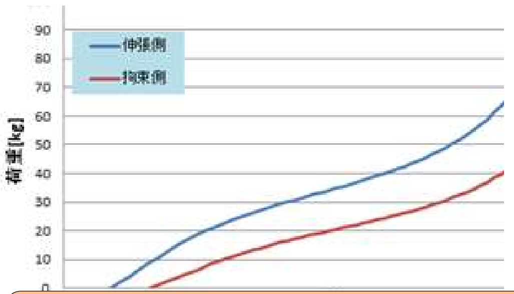
ここから
回帰

概要

二軸データ回帰　手順概要

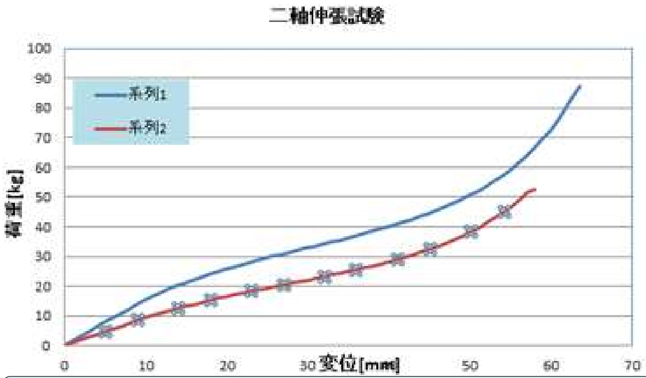
ゼロ点補正

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



ひな形シートに張り付け回帰

シフト



シフトすると変位がずれたまま

X変位に対する
X及び Y荷重を求め、右に代入

サンプル厚さ

入力　コピー

[測定結果]　ヤング率　1.102235　N/mm2

試料No　No1

試験片　厚さ[mm]　1.2　ヘタリ[mm]

[伸長比−応力換算]

	変位	荷重 [kgf]	荷重Y [kgf]	変位X	λ1	σx [N/mm2]	λ1	σy [N/mm2]
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
2	1.0000	1.0000	0.5000	1.0000	1.0100	0.1307	1.0000	0.0653
3	2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0200	0.2613	1.0000	0.1307
4	3.0000	3.0000	1.5000	3.0000	1.0300	0.3920	1.0000	0.1960
5	4.0000	4.0000	2.0000	4.0000	1.0400	0.5227	1.0000	0.2613
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	1.0453	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
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

これが目的です。
では実作業・・・

概要

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[illegible]
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[illegible] ②1回目、2回目と同じ伸張量で3回目[illegible]
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[kg]
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

入力　コピー

サンプル厚さ

[測定結果]　ヤング率　1.102235　N/mm2

[伸長比−応力換算]

試料No.	No1							
試験片	厚さ[mm] 1.2	ﾍﾟｯﾄﾞ[mm]						
	変位	荷重 [kgf]	荷重Y [kgf]	変位X	λ1	σx [N/mm2]	λ1	σy [N/mm2]
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	[illegible]	[illegible]	0.0000
2	1.0000	1.0000	0.5000	1.0000	1.0100	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0200	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	3.0000	3.0000	1.5000	3.0000	1.0300	[illegible]	[illegible]	[illegible]
5	4.0000	4.0000	2.0000	4.0000	1.0400	[illegible]	[illegible]	[illegible]
6	5.0000	5.0000	2.5000	5.0000	1.0500	0.6533	1.0000	0.3267
7	6.0000	6.0000	3.0000	[illegible]	1.0600	0.7840	1.0000	0.3920
8	7.0000	7.0000	3.5000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
9	8.0000	8.0000	4.0000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
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	[illegible]	1.1400	1.8293	1.0000	0.9147
16	15.0000	15.0000	7.5000	[illegible]	[illegible]	1.9600	1.0000	0.9800
17	16.0000	16.0000	8.0000	16.0000	[illegible]	2.0907	1.0000	1.0453
18	17.0000	17.0000	8.5000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
19	18.0000	18.0000	9.0000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
20	19.0000	[illegible]	9.5000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
21	20.0000	20.0000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

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

3）拘束側荷重は
先に近似した式で入力

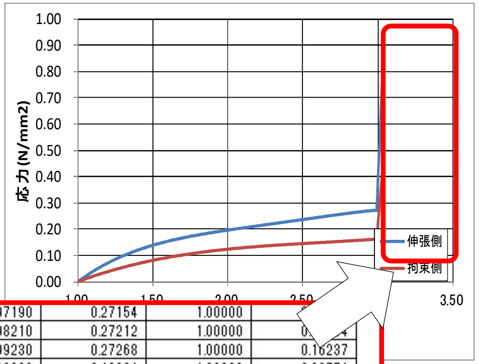
2）伸張側コピーで
値を張り付け

開発　⇒マクロ　⇒　エラー行削除
不要なものが消去可能

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			
	λ1	σ(N/mm2)	λ2	σ(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	[illegible]	[illegible]
16	1.19960	0.07107	[illegible]	[illegible]
17	1.20920	0.07387	[illegible]	[illegible]
18	1.21980	0.07692	[illegible]	[illegible]
19	1.22930	0.07959	[illegible]	[illegible]
20	1.23920	0.08233	[illegible]	[illegible]



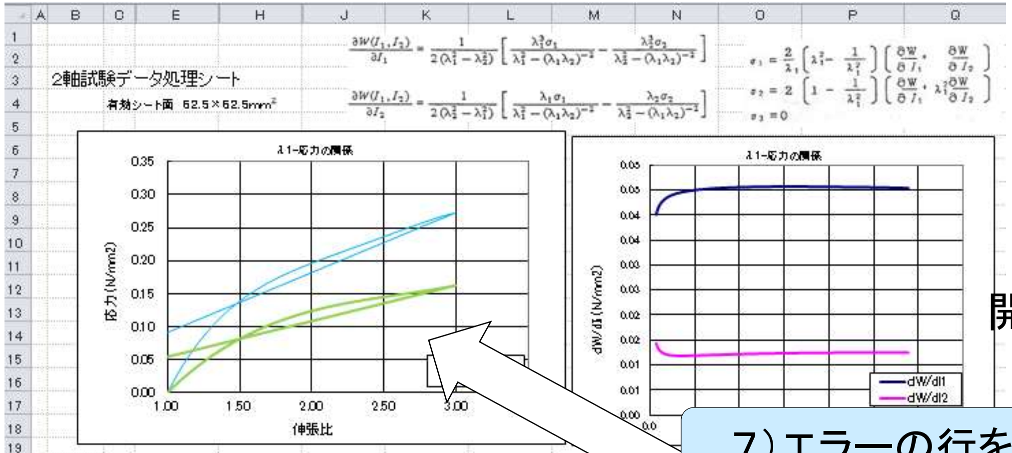
198	193	2.97190	0.27154	1.00000	[illegible]
199	194	2.98210	0.27212	1.00000	[illegible]
200	195	2.99230	0.27268	1.00000	0.16237
201	196	3.00230	0.40334	1.00000	0.22771
202	197	3.01230	0.53401	1.00000	0.29304
203	198	3.02230	0.66468	1.00000	0.35837
204	199	3.03230	0.79534	1.00000	0.42371
205	200	3.04230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

概要

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、

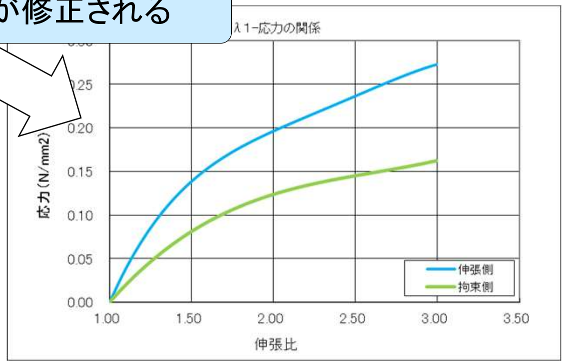


No.	λ_1	λ_2	I_1-3	I_2-3	σ_1	σ_2		
1	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	[illegible]	[illegible]
2	1.05910	1.00000	0.01320	0.01320	0.02364	0.01218	[illegible]	[illegible]
3	1.06940	1.00000	0.01804	0.01804	0.02755	0.01423	0.041	[illegible]
4	1.07890	1.00000	0.02311	0.02311	0.03110	0.01609	0.04228	[illegible]
5	1.08810	1.00000	0.02858	0.02858	0.03447	0.01788	0.04287	[illegible]
6	1.09940	1.00000	0.03603	0.03603	0.03853	0.02005	0.04342	0.01
7	1.10930	1.00000	0.04319	0.04319	0.04202	0.02193	0.04378	0.01
8	1.11880	1.00000	0.05062	0.05062	0.04531	0.02372	0.04407	0.01
9	1.12900	1.00000	0.05918	0.05918	0.04878	0.02562	0.04432	0.01
10	1.14000	1.00000	0.06907	0.06907	0.05245	0.02764	0.04454	0.01
11	1.14920	1.00000	0.07786	0.07786	0.05546	0.02931	0.04470	0.01
12	1.15940	1.00000	0.08814	0.08814	0.05874	0.03114	0.04486	0.01
13	1.16960	1.00000	0.09898	0.09898	0.06196	0.03296	0.04499	0.01

192	2.96200	1.00000	6.88742	6.88742	0.27097	0.16112	0.04061	0.00[illegible]
193	2.97190	1.00000	6.94542	6.94542	0.27154	0.16152	0.04056	0.00[illegible]
194	2.98210	1.00000	7.00536	7.00536	0.27212	0.16194	0.04051	0.00[illegible]0
195	2.99230	1.00000	7.06554	7.06554	0.27268	0.16237	0.04045	0.00[illegible]69
196	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
197	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
198	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
199	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
200	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!

7)エラーの行を削除する

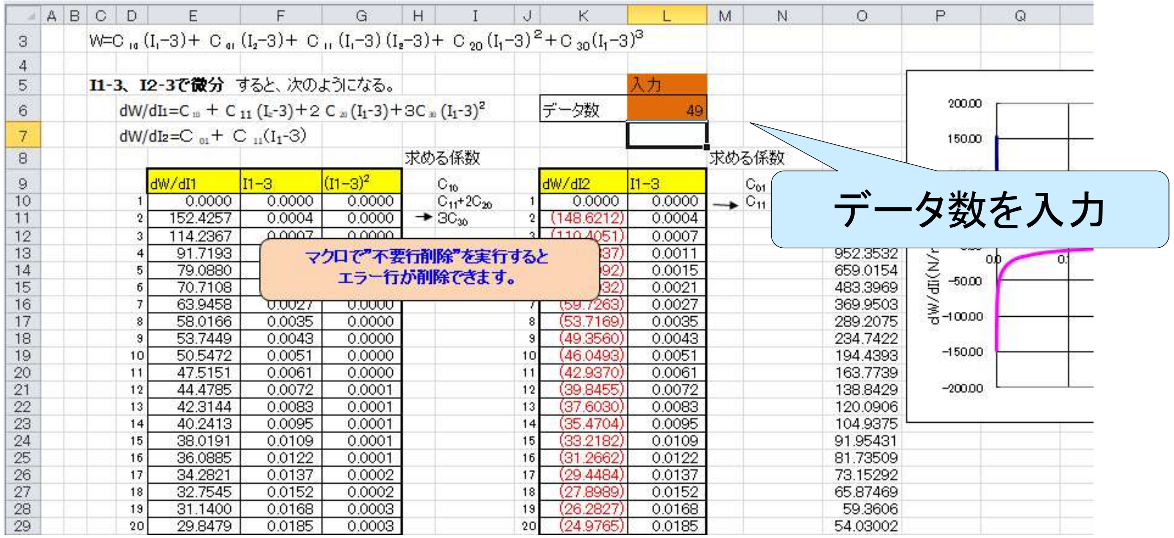
データが修正される



開発　⇒マクロ　⇒　エラー行削除
不要なものが消去可能

概要

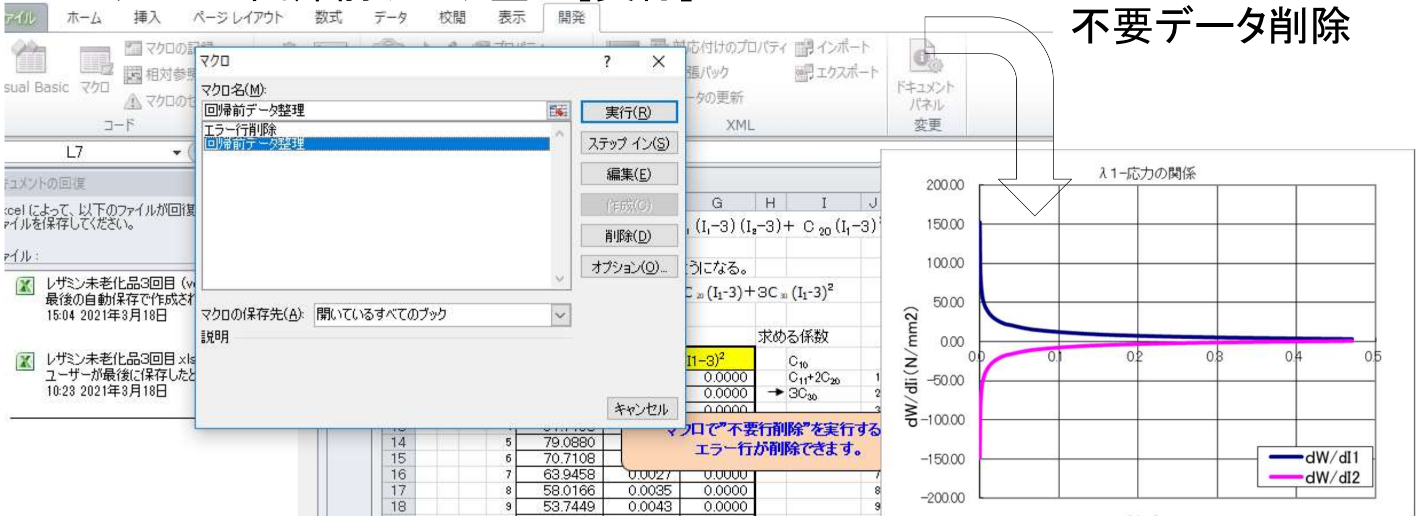
回帰データ



	dW/dI1	I1-3	(I1-3)^2		dW/dI2	I1-3	O
1	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.0000	
2	152.4257	0.0004	0.0000	2	(148.6212)	0.0004	
3	114.2367	0.0007	0.0000	3	(110.4051)	0.0007	
4	91.7193	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.0011	952.3532
5	79.0880	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.0015	659.0154
6	70.7108	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.0021	483.3969
7	63.9458	0.0027	0.0000	7	(59.7263)	0.0027	369.9503
8	58.0166	0.0035	0.0000	8	(53.7169)	0.0035	289.2075
9	53.7449	0.0043	0.0000	9	(49.3560)	0.0043	234.7422
10	50.5472	0.0051	0.0000	10	(46.0493)	0.0051	194.4393
11	47.5151	0.0061	0.0000	11	(42.9370)	0.0061	163.7739
12	44.4785	0.0072	0.0001	12	(39.8455)	0.0072	138.8429
13	42.3144	0.0083	0.0001	13	(37.6030)	0.0083	120.0906
14	40.2413	0.0095	0.0001	14	(35.4704)	0.0095	104.9375
15	38.0191	0.0109	0.0001	15	(33.2182)	0.0109	91.95431
16	36.0885	0.0122	0.0001	16	(31.2662)	0.0122	81.73509
17	34.2821	0.0137	0.0002	17	(29.4484)	0.0137	73.15292
18	32.7545	0.0152	0.0002	18	(27.8989)	0.0152	65.87469
19	31.1400	0.0168	0.0003	19	(26.2827)	0.0168	59.3606
20	29.8479	0.0185	0.0003	20	(24.9765)	0.0185	54.03002

開発 ⇒マクロ ⇒回帰前データ整理[実行]

不要データ削除



概要

2軸試験データ処理シート

有効シート面 625×625mm²

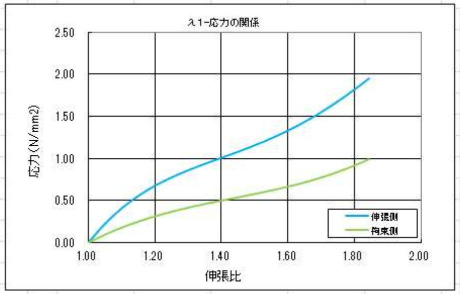
$$\frac{\partial W(I_1,I_2)}{\partial I_1}=\frac{1}{2(\lambda_1^2-\lambda_2^2)}\left[\frac{\lambda_1^3\sigma_1}{\lambda_1^2-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}-\frac{\lambda_2^3\sigma_2}{\lambda_2^2-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}\right]$$

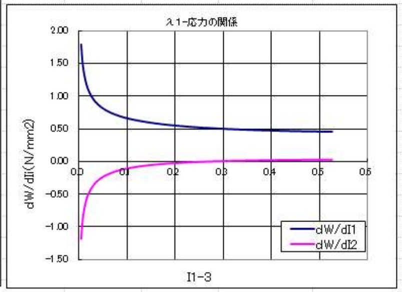
$$\frac{\partial W(I_1,I_2)}{\partial I_2}=\frac{1}{2(\lambda_2^2-\lambda_1^2)}\left[\frac{\lambda_1\sigma_1}{\lambda_1^2-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}-\frac{\lambda_2\sigma_2}{\lambda_2^2-(\lambda_1\lambda_2)^{-2}}\right]$$

$$\sigma_1=\frac{2}{\lambda_1}\left[\lambda_1^2-\frac{1}{\lambda_1^2}\right]\left[\frac{\partial W}{\partial I_1}+\frac{\partial W}{\partial I_2}\right]$$

$$\sigma_2=2\left[1-\frac{1}{\lambda_1^2}\right]\left[\frac{\partial W}{\partial I_1}+\lambda_1^2\frac{\partial W}{\partial I_2}\right]$$

$$\sigma_3=0$$





No.	λ_1	λ_2	I_1-3	I_2-3	σ_1	σ_2	dW/dI_1	dW/dI_2
1	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	#DIV/0!	#DIV/0!

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。

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/dI1=C$_{10}$ + C$_{11}$ (I$_2$-3)+2 C$_{20}$ (I$_1$-3)+3C$_{30}$ (I$_1$-3)^2

dW/dI2=C$_{01}$+ C$_{11}$(I$_1$-3)

求める係数

No.	dW/dI1	I1-3	(I1-3)²
1	#DIV/0!	0.0000	0.0000
2	1.7899	0.0050	0.0000
3	1.5128	0.0079	0.0001
4	1.3185	0.0116	0.0001
5	1.1675	0.0165	0.0003
6	1.0683	0.0214	0.0005
7	0.9907	0.0269	0.0007
[illegible]	0.9229	0.0335	0.0011
[illegible]	0.8693	0.0404	0.0016
10	0.8201	0.0488	0.0024
1[illegible]	0.7837	0.0566	0.0032
1[illegible]	0.7498	0.0656	0.0043
1[illegible]	0.7210	0.0748	0.0056

→ C$_{10}$, C$_{11}$+2C$_{20}$, 3C$_{30}$

求める係数

No.	dW/dI2	I1-3
1	#DIV/0!	0.0000
2	(1.1846)	0.0050
3	(0.9095)	0.0079
4	(0.7180)	0.0116
5	(0.5706)	0.0165
6	(0.4748)	0.0214
7	(0.4008)	0.0269
[illegible]	(0.3369)	0.0335
[illegible]	(0.2873)	0.0404
10	(0.2424)	0.0488
1[illegible]	(0.2098)	0.0566
12	(0.1801)	0.0656
1[illegible]	(0.1553)	0.0748
		0.0854
		0.0947
		0.1066
		0.1172
		0.1290

→ C$_{01}$, C$_{11}$

POINT：　I1−3=0.1以上での回帰とする

(2)元データ　試験条件 ／ (4)元データ確認(軸引張1軸固定) ／ W dI2回帰 ／ (7)係数回帰 ／ 3)係数の検算

dW/dI1=C$_{10}$ + C$_{11}$ (I$_2$-3)+2 C$_{20}$ (I$_1$-3)+3C$_{30}$ (I$_1$-3)^2

分散分析表

	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	2	0.031026	0.015513	29.46771	1.09E-06
残差	20	0.010529	0.000526		
合計	22	0.041554			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上
切片	2.151574	0.030846	69.75169	2.33E-25	2.08723	2
X 値 1	-0.94913	0.153868	-6.16849	5.01E-06	-1.27009	-
X 値 2	1.169312	0.170196	6.870367	1.13E-06	0.814288	1

dW/dI2=C$_{01}$+ C$_{11}$(I$_1$-3)

概要

回帰統計	
重相関 R	0.859053
重決定 R2	0.737972
補正 R2	0.727491
標準誤差	0.08892
観測数	27

分散分析表

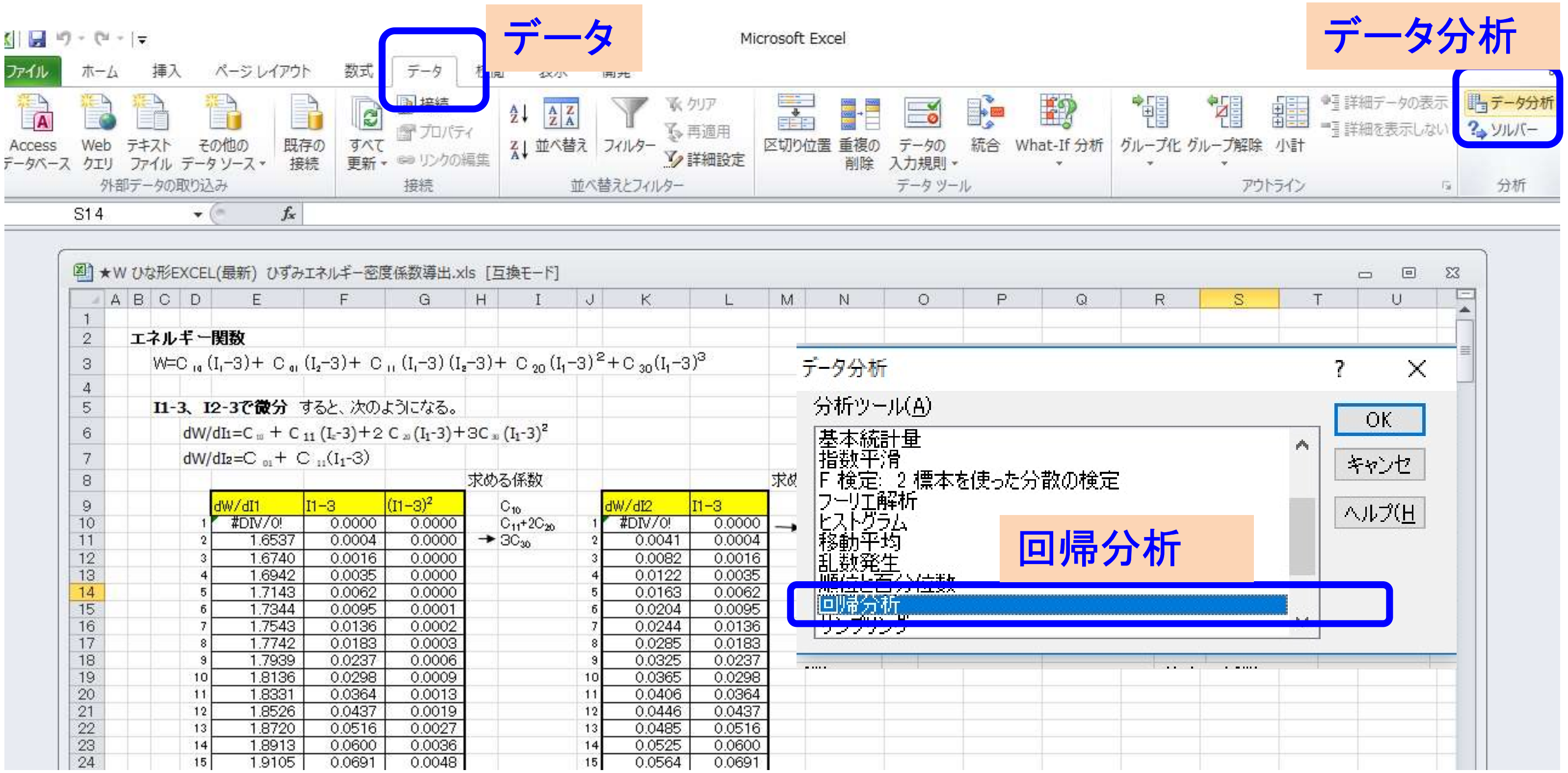
	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	1	0.556717	0.556717	70.40968	9.74E-09
残差	25	0.197671	0.007907		
合計	26	0.754388			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%
切片	-0.92322	0.03709	-24.8916	3.67E-19	-0.99961
X 値 1	0.724731	0.08637	8.391048	9.74E-09	0.54685

概要

回帰手順

シート“(7)係数回帰” にて
データ ⇒ データ分析

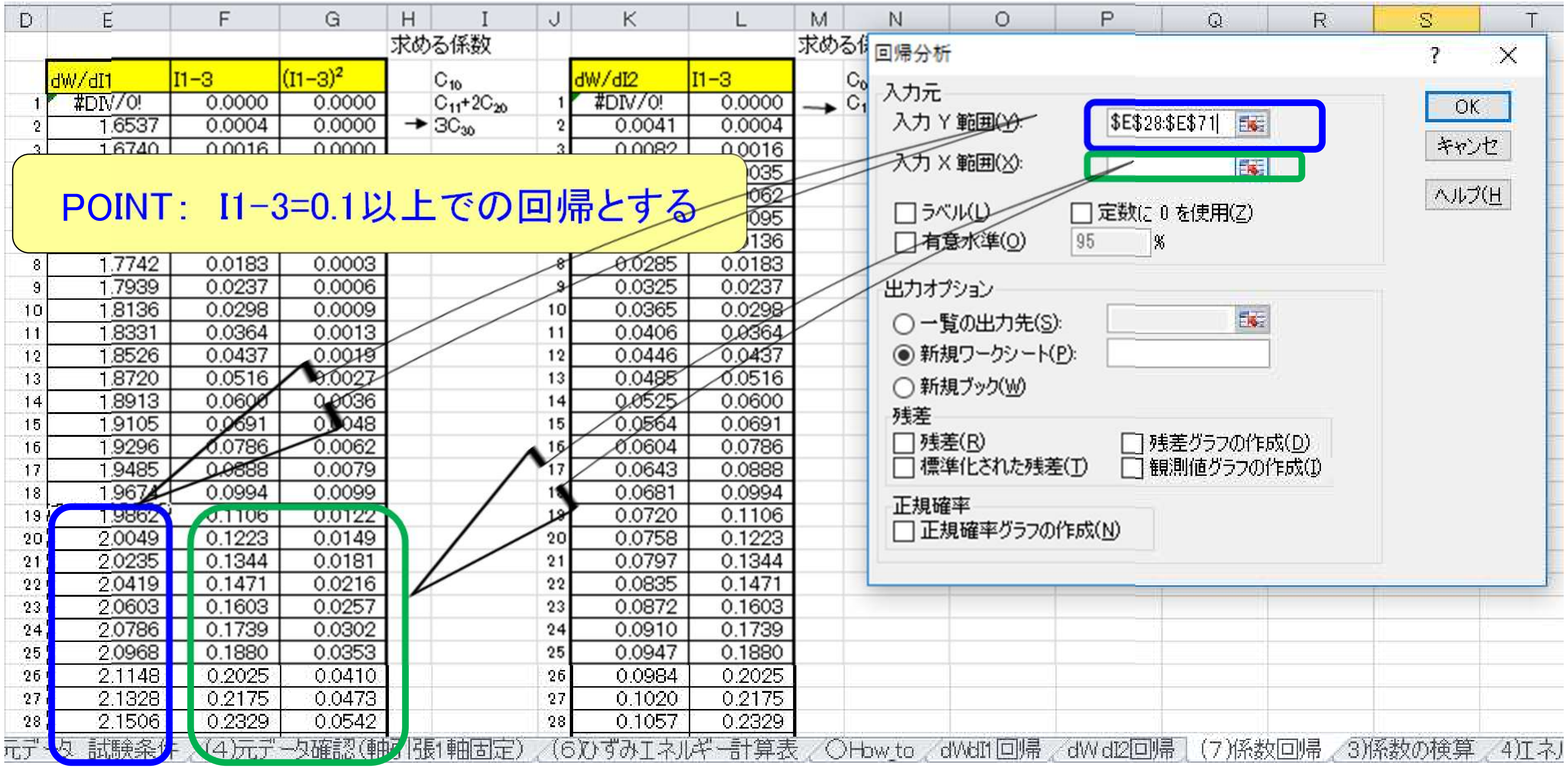


概要

I 1での微分

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

C10、C11+2C20、3C30を求める



	dW/dI1	I1−3	$(I1-3)^2$
1	#DIV/0!	0.0000	0.0000
2	1.6537	0.0004	0.0000
3	1.6740	0.0016	0.0000
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]
5	[illegible]	[illegible]	[illegible]
6	[illegible]	[illegible]	[illegible]
7	[illegible]	[illegible]	[illegible]
8	1.7742	0.0183	0.0003
9	1.7939	0.0237	0.0006
10	1.8136	0.0298	0.0009
11	1.8331	0.0364	0.0013
12	1.8526	0.0437	0.0019
13	1.8720	0.0516	0.0027
14	1.8913	0.0600	0.0036
15	1.9105	0.0691	0.0048
16	1.9296	0.0786	0.0062
17	1.9485	0.0888	0.0079
18	1.9674	0.0994	0.0099
19	1.9862	0.1106	0.0122
20	2.0049	0.1223	0.0149
21	2.0235	0.1344	0.0181
22	2.0419	0.1471	0.0216
23	2.0603	0.1603	0.0257
24	2.0786	0.1739	0.0302
25	2.0968	0.1880	0.0353
26	2.1148	0.2025	0.0410
27	2.1328	0.2175	0.0473
28	2.1506	0.2329	0.0542

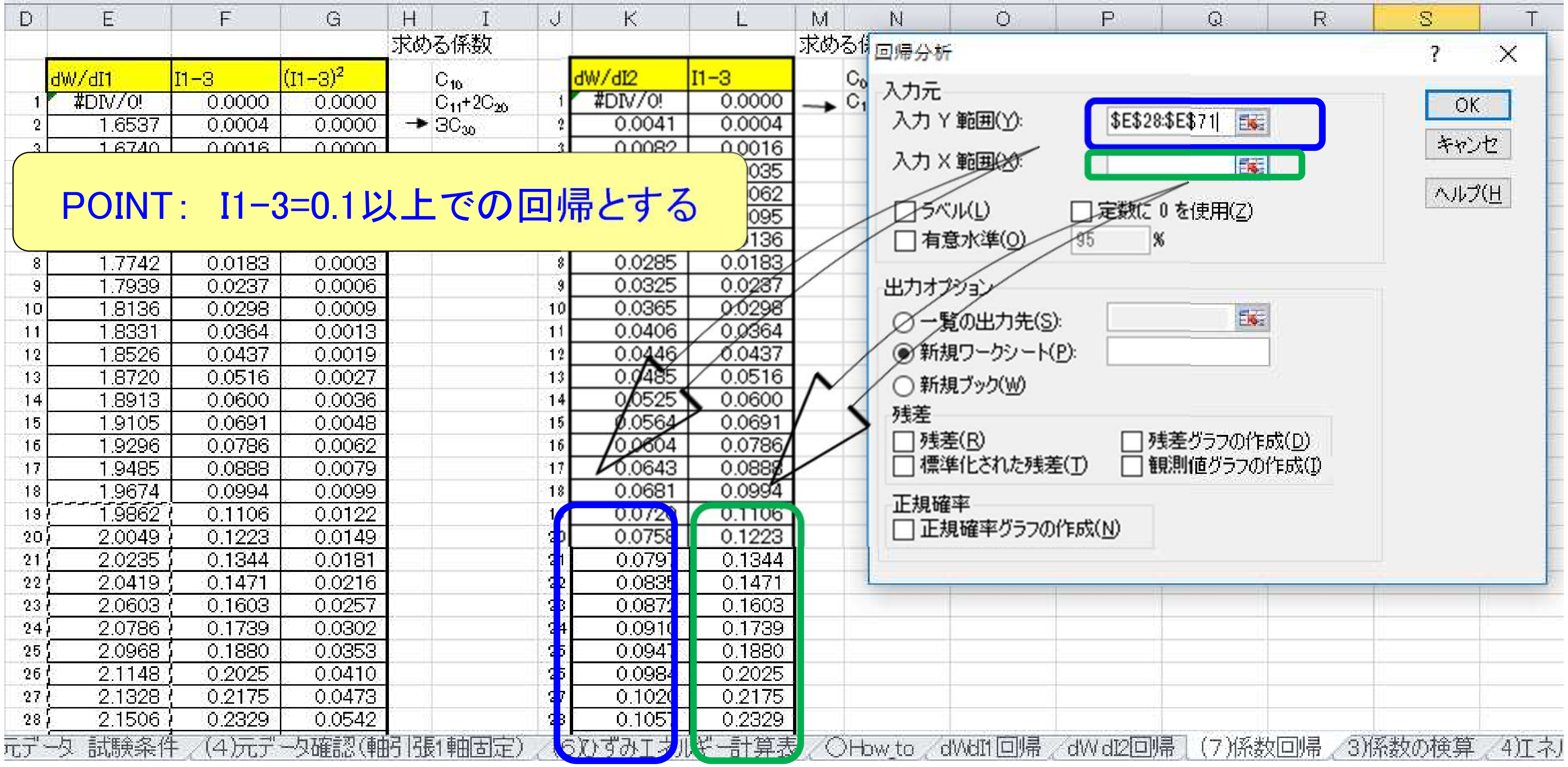
	dW/dI2	I1−3
1	#DIV/0!	0.0000
2	0.0041	0.0004
3	0.0082	0.0016
4	[illegible]	[illegible]
5	[illegible]	[illegible]
6	[illegible]	[illegible]
7	[illegible]	[illegible]
8	0.0285	0.0183
9	0.0325	0.0237
10	0.0365	0.0298
11	0.0406	0.0364
12	0.0446	0.0437
13	0.0485	0.0516
14	0.0525	0.0600
15	0.0564	0.0691
16	0.0604	0.0786
17	0.0643	0.0888
18	0.0681	0.0994
19	0.0720	0.1106
20	0.0758	0.1223
21	0.0797	0.1344
22	0.0835	0.1471
23	0.0872	0.1603
24	0.0910	0.1739
25	0.0947	0.1880
26	0.0984	0.2025
27	0.1020	0.2175
28	0.1057	0.2329

概要

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

概要

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

	A	B	C	D	E	F
10	分散分析表					
11		自由度	変動	分散	測された分散	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	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
18	X 値 1	-0.94913	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
19	X 値 2	1.169312	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
20						

3))係数検証　シートへ移動
を回帰した係数から参照

単位：N/mm2

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

係数　2.1509E+00
（参照）

真ヤング率　3.5

算出ヤング率(下記)　1.6270E+00　6(C10+C01)

C10	C01	C11	C20	C30
[illegible]4560E-01	2.5600E[illegible]	7.2473E-01	-3.6237E-01	0.0000E+00

入力

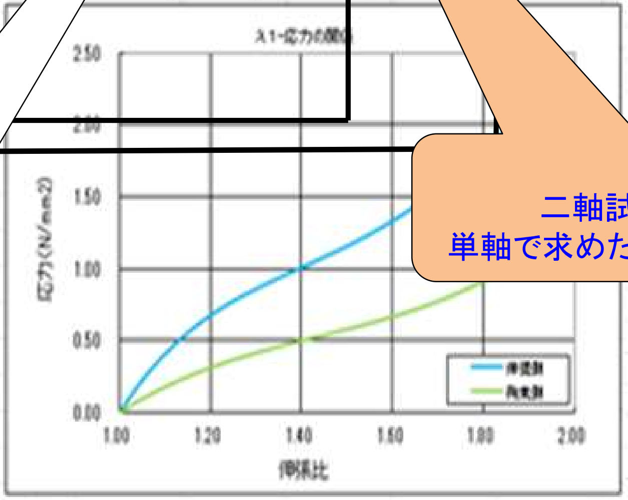
C11+2C20=

3C30=

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

	A	B	C	D	E	F
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	[illegible]	
12	回帰	1	0.556717	0.556717	70.40968	9.74E-09
13	残差	25	0.197671	0.007907		
14	合計	26	0.754388			
15						
16		係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%
17	切片	-0.92322	[illegible]	-24.8916	3.67E-19	-0.99961
18	X 値 1	0.724731	0.08637	8.391048	9.74E-09	0.54685
19						

それぞれの回帰
係数を参照

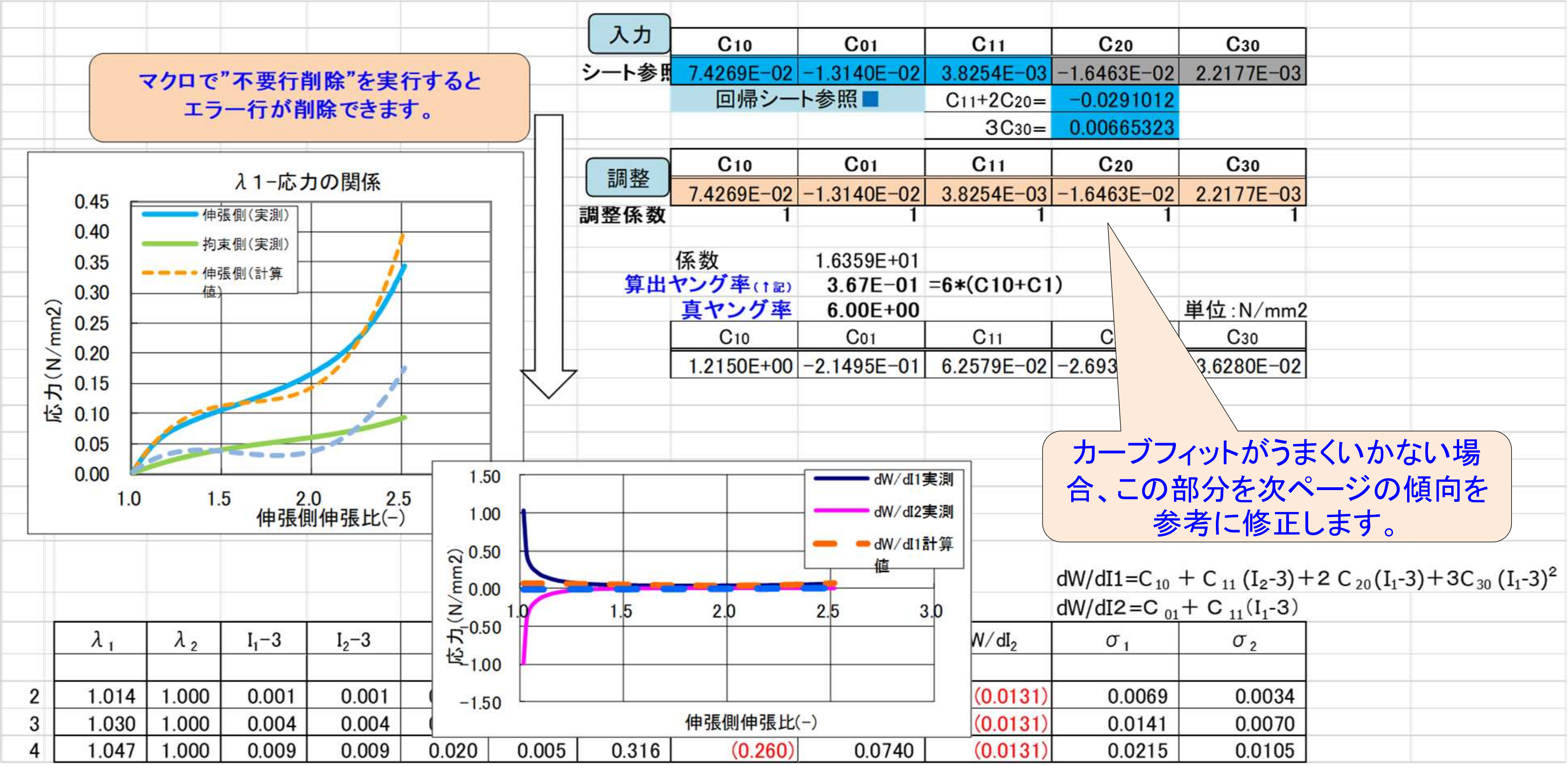


最後に
二軸試験の都合から
単軸で求めた真のヤング率を確認

最終結果

概要

補足説明



ひな型を用意して、実習から回帰まで修得していただきます。

ゴムのエネルギー密度関数の研究マップ

1960年ころ、現JSR様

川端先生

Mooneyさん

河合先生

坂口先生

JSR社員 薮田氏

このころ二軸試験機
が出来てきた。
（ほぼ完成型）

京都大学
川端先生

同志社大学
坂口先生

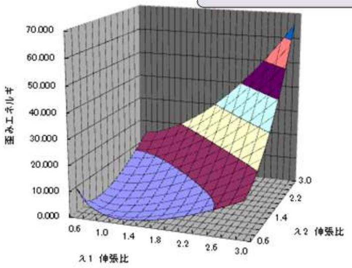
１９９１年～
萩本研究参加

滋賀県立大
山下先生

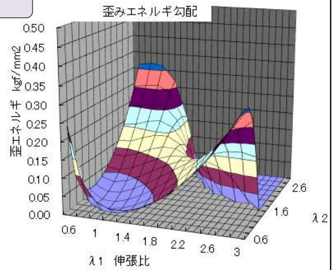
薮田顧問
紹介でスタート

二軸試験機

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



正しいエネルギー分布



陥りやすいミス
間違ったエネルギー関数

奈良
女子大学

※布に特化した研究

筑波大学

九州

山梨大学

新潟

琉球大学

メカニカルデザインさん
も受託試験

[富山県産業技術研究開発センター (pref.toyama.jp)]

公共試験場で1日の講習・実習で、十分回帰まで修得できます。

ひずみエネルギー密度関数の利点

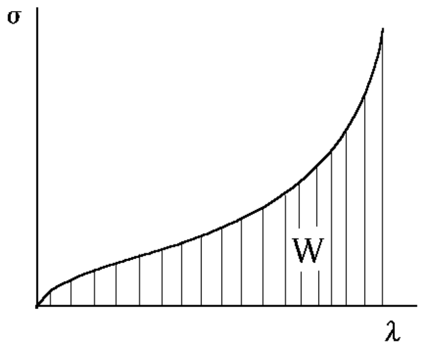
ひずみエネルギー密度関数の表現式

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

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

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

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



１）Neo-Hookeanモデル

$W = C_{10}(I_1 - 3)$ ・・・ 最も単純な材料表現

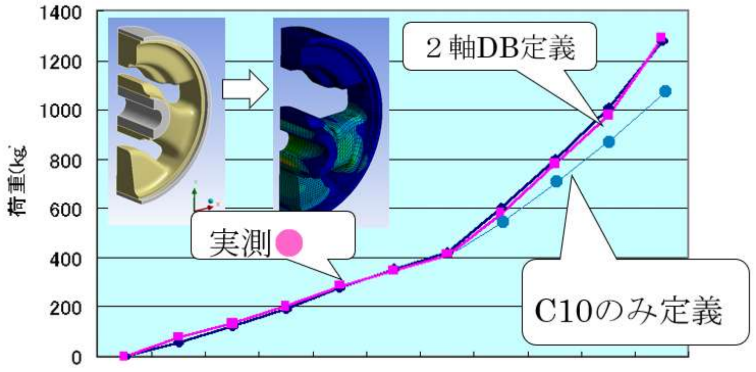
$C_{10} = E/6$ の関係

ヤング率を正確に求めると、1次定義でも

ヤング率=6C10

これだけで、ある程度の精度アップします。

ハの字型マウントの特性予測解析

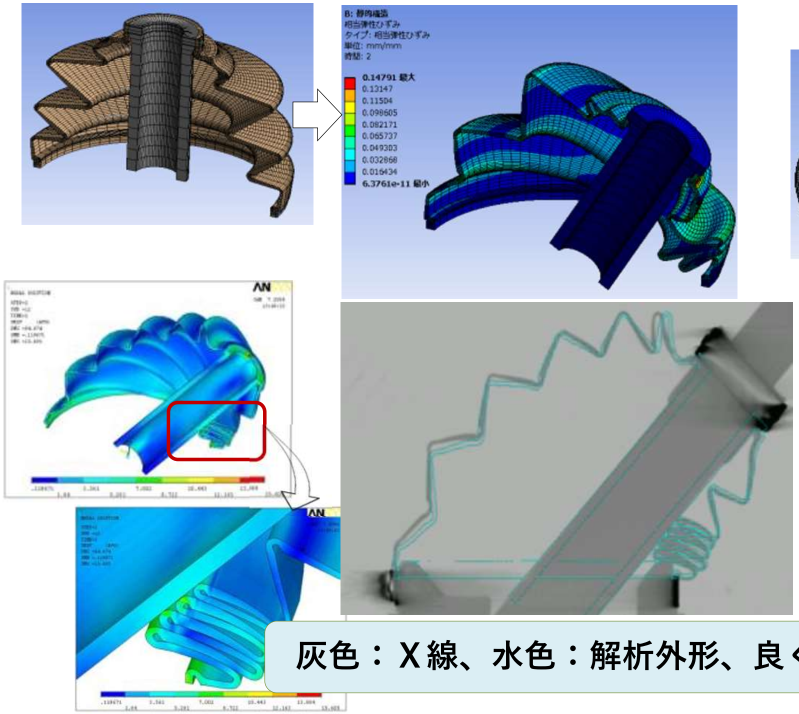


根本的な問題はへたりを無視していることです。
（詳細略、お尋ねください）

ひずみエネルギー密度関数の利点

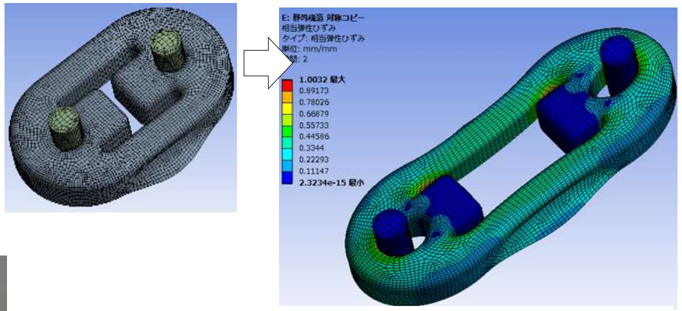
①解析から正確なひずみを求める／解析精度が基本

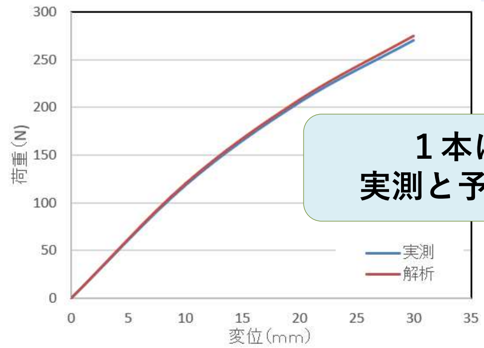
ブーツの揺動変形解析



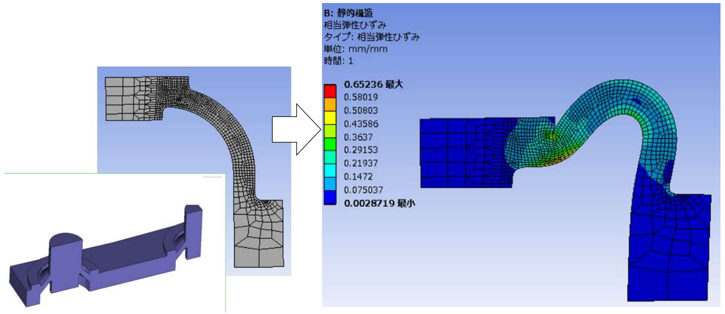
灰色：Ｘ線、水色：解析外形、良く一致

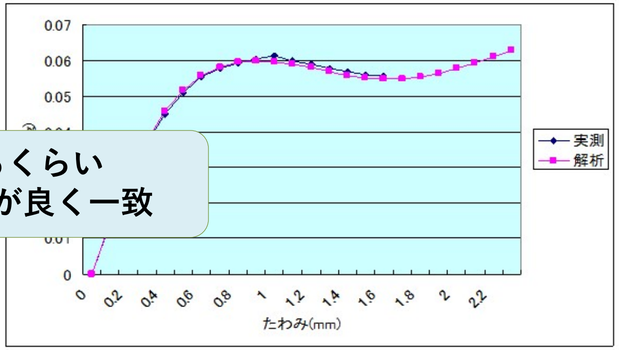
マフラーマウントの変形解析





ラバーコンタクト クリック特性



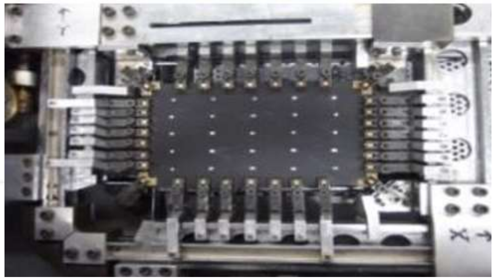


１本に見えるくらい
実測と予測解析が良く一致

ひずみエネルギー密度関数を正確に定義すると、変形状態や特性がより良く一致します。

簡易試験機とエネルギー密度関数提供について

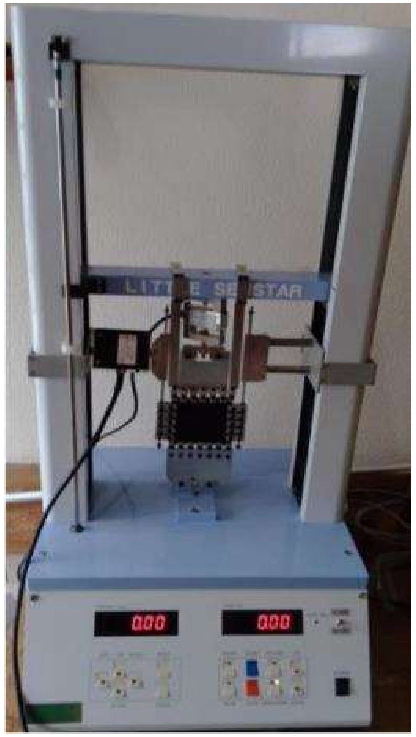
従来の二軸試験機



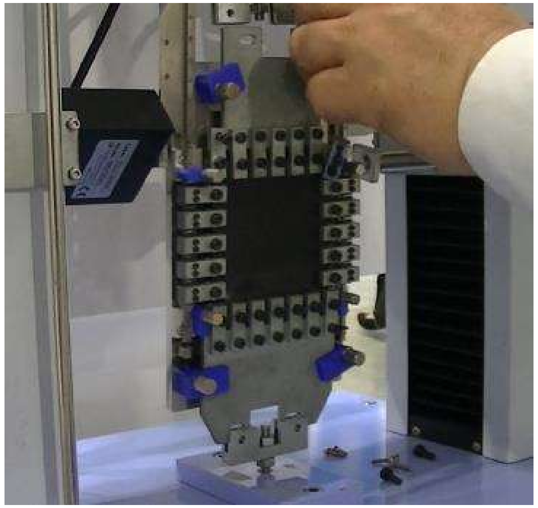
サンプル取り付け部

、横置き型・大型　非常に高価
800～1，000万円　定価ベース

簡易二軸試験機[提案]



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

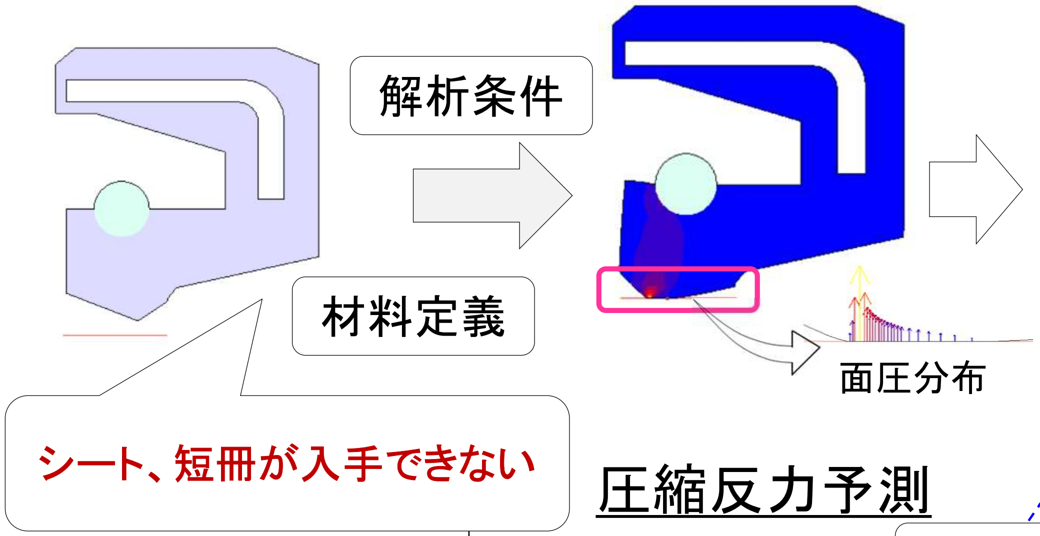


、縦置き型・小型　格安で構築
販売・図面ベースの提供可（有料）

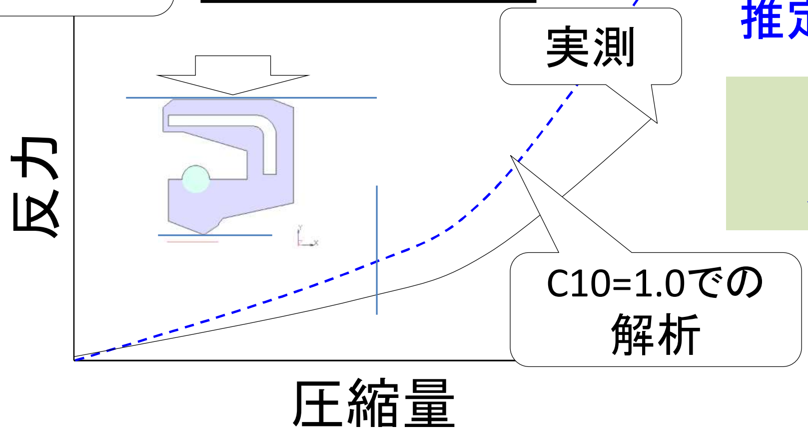
製品から材料定義も可能、お試しデータもご用意

製品測定から

シールの解析



圧縮反力予測



製品試験

＋

解析

＋

材料データベース

推定 ⇩ 構築

解析用パラメータ

サンプルデータの提供

材料名	硬度(Hs)
天然ゴム	35−80
スチレンゴム	35−80
ニトリルゴム	35−80
クロロプレンゴム	48−75
エチレン・プロピレンゴム	50−80
フッ素ゴム	55−80
シリコンゴム	35−60

1）短冊測定からデータ特定
2）手掛かりない場合、お試し
無料サンプルの提供も。

せん断弾性率	C10	C01	C11
9.500	2.8654E-01	3.3348E-02	-4.5506E-03

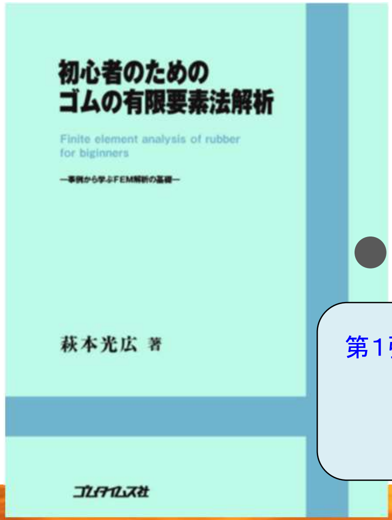
寺子屋/CAE解援隊
連絡先 hagi@terakoya2018.com

ゴム設計開発のお手伝い

PR

構造解析から流体解析までソフトを問わず、**解析のお困りごとをお手伝いします。**

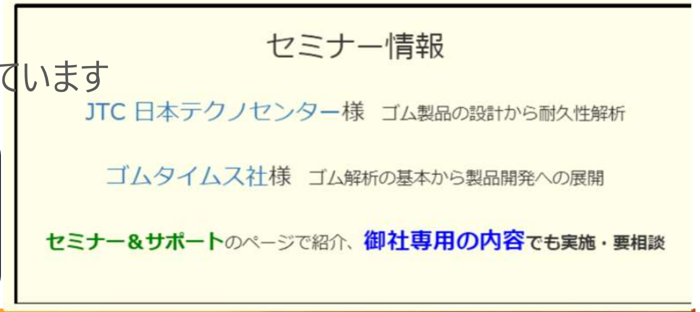
- 解析に使用する材料データの定義方法
- モデル化の方法
- 解析予測精度の向上
- 結果の見方
- 解析の効率化方法



- **メールでの対応はどんなことでも無償対応**です
- **web会議招待いただければお困りごと対応します**

- ノウハウをまとめた書籍を出版しています

第１弾超弾性に加えて、熱、粘弾性、耐久まで
第2弾　7月発売
アマゾンからも



ありがとうございました

解析だけでなく、ゴムのお困りごとなんでもご相談ください。

寺子屋

https://terakoya2018.com/

MAIL：hagi@terakoya2018.com