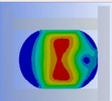


粘弾性解析でできること 当たり前のことですがクリープ含めて同じデータで解析

**[応力緩和]**

シール組み付け



反力

組み付け

粘弾性(緩和)

応力緩和

超弾性(非線形性)

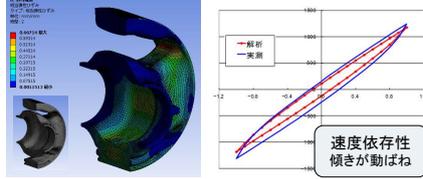
粘弾性定義、組付け後の緩和を表現。

時間

圧縮

**[動特性]**

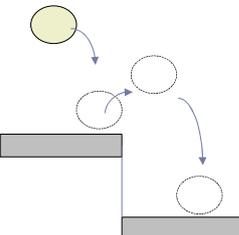
リサージュ波形/動特性予測



速度依存性傾きが動ばね

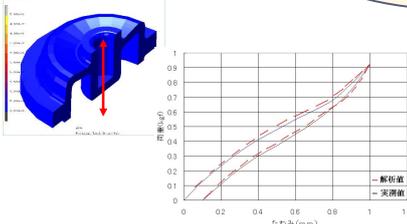
**[衝撃]**

ボールの落下



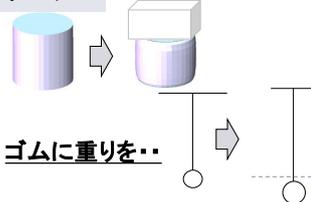
**エネルギーロス**

戻りの特性を予測/ヒステリシスカー



全て同じデータで同等の解析可能

クリープ



ゴムに重りを...

粘弾性解析であれ？ なぜ合わないのと感じたことはないでしょうか。

粘弾性解析は、超弾性+粘弾性緩和係数で定義します。

超弾性定義 + 粘弾性定義

Mooney式

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

Ogden式

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

緩和Proney級数

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

緩和(E <sub>i</sub> )	Viscelmoon/(viscelogd)	時間(τ)
0.05000	1	1.0000e-10
0.35000	8	1.0000e-08
0.30000		1.0000e-07
0.20000		1.0000e-05
0.02000		1.0000e-01
0.03000		1.0000e+01
0.01500		1.0000e+03
0.01200		1.0000e+05

両方のデータが必要ですが、定義にはコツが必要です。残念ながら足し算のみでは使えません。

丁寧に測定してしっかり定義したはずなのに、何故か結果が思わしくないということは？

非線形CAE協会では丁寧に測定した広範囲のデータが公開されています。

## 非線形CAE協会のゴム材(一例)

ANSYS

Mooneyモデル

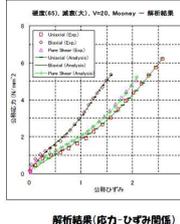
$$W = \sum_{i=1}^N C_{1i} (I_1 - 3)^i + \sum_{j=2}^N C_{2j} (I_2 - 3)^j$$

載荷試験での引張速度

20 mm/s

係数

C10 (C1)	0.40964
C01 (C2)	0.07709
C20 (C3)	0.052401
C11 (C4)	-0.020338
C02 (C5)	0.005442
C30 (C6)	-0.0012824
C21 (C7)	0.0021188
C12 (C8)	-0.0012038
C03 (C9)	9.07E-05
C40 (C10)	



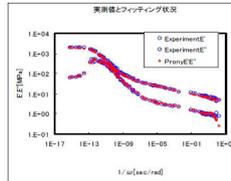
解析結果(応力-ひずみ関係)

ANSYS 10.0

Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio [-]
1.89837E+03	4.99209E-01
5.41224E-02	8.24820E-18
4.80841E-02	8.24820E-18
1.14031E-01	1.59155E-13
2.97350E-01	5.20516E-12
2.52173E-01	5.20516E-12
8.88888E-02	5.20516E-11
2.88483E-02	5.20516E-10
1.38823E-02	5.20516E-09
8.20805E-03	5.20516E-08
2.05870E-03	5.20516E-07
2.71841E-03	1.18210E-06
2.27898E-03	3.18210E-05
1.95876E-03	0.0001831
1.92883E-03	0.00113099
1.44876E-04	0.07887172
8.27827E-04	0.24558238
8.04885E-04	1.89433789
4.44876E-04	18.24558238

Prony級数

$$G(t) = G_0 \left( 1 - \sum_{i=1}^N \frac{G_i}{G_0} \left( 1 - e^{-t/\tau_i} \right) \right), \quad K(t) = \infty$$



実験値とフィッティング結果

[No.19-19] 第32回計算力学講演会(CMD2019) 講演論文集 [2019.9.16-18, (川越)]

082

粘弾性モデルによる工業用ゴムの応力緩和履歴の予測

Prediction for stress relaxation history of industrial rubber with viscoelastic material model

○ 藤川 正樹<sup>1</sup>, 新垣 達郎<sup>2</sup>, 比嘉 勇斗<sup>3</sup>

山口 純一郎<sup>4</sup>, 前田 成人<sup>5</sup>, 小町 玄珠<sup>6</sup>

Masaki FURUKAWA<sup>1</sup>, Tetsuro AKABANE<sup>2</sup>, Yuma HIGASHI<sup>3</sup>

Junichiro YAMABE<sup>4</sup>, Naoto MAEDA<sup>5</sup>, and Masataka KOISHI<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 理研 国 福井大学, <sup>2</sup> 理研 国 福井大学, <sup>3</sup> 理研 国 福井大学

<sup>4</sup> 理研 国 福井大学, <sup>5</sup> 理研 国 福井大学, <sup>6</sup> 理研 国 福井大学

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

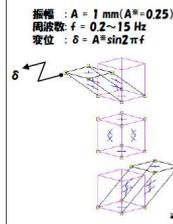
<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

<sup>1</sup> 株式会社 理研, <sup>2</sup> 株式会社 理研, <sup>3</sup> 株式会社 理研

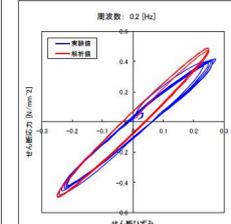
<sup>4</sup> 株式会社 理研, <sup>5</sup> 株式会社 理研, <sup>6</sup> 株式会社 理研

粘弾性データ(Prony級数)

- ANSYS: 相対値
- MARC: 相対値
- ABAQUS: 相対値
- LS-DYNA: 絶対値



解析モデル



周波数(f) = 0.2 Hz

このデータであれば、リサーチ波形の速度依存解析が可能であるが、非常に高コスト。

論文内容) ある一定時間のデータが一致する場合、同一データとみなせる。

琉球大藤川先生の論文を根拠に上記のフィーリングが一致するデータから解析データを推定可能

広範囲での定義には時間温度換算則WLF則が必用です。

## 実際の定義について

一般的な粘弾性スペクトロメータは、0.1 ~ 110Hz程度の測定範囲であり、測定範囲が狭いため、時間温度換算則により、温度を変えて測定、下図のようにシフトして範囲を広げる。

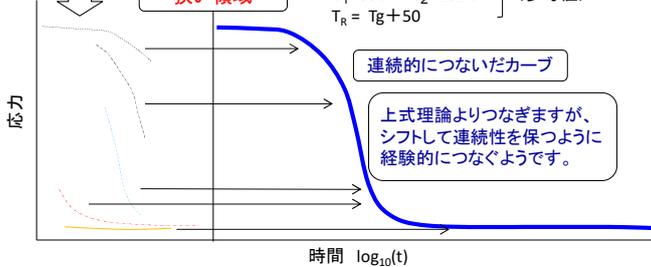
時間温度換算則

WLF(Williams, Landel, Ferry)式

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_R)}{C_2 + (T-T_R)}$$

それぞれの温度での周波数変化でのデータ

狭い領域



連続的につないだカーブ

上式理論よりつながりますが、シフトして連続性を保つように経験的につなぐようです。

二ノ宮の式

$$Er(t) = E'(\omega) - 0.40E''(0.4\omega) + 0.14E''(10\omega)$$

等価式

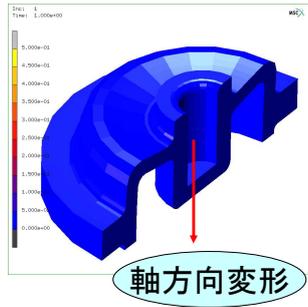
Prony級数

$$E(t) = E_0 - \sum E_i \exp(-t/\tau_i)$$

非線形CAE協会の公表データは、この方法で10<sup>-12</sup> ~ 10<sup>4</sup>秒程度まで適用範囲を大幅に広げている。

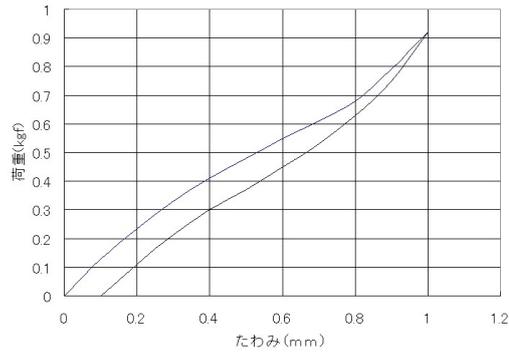
# 粘弾性特性について ヒステリシスの考え方

製品では、

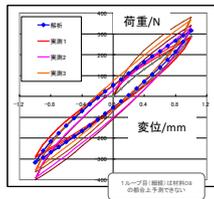
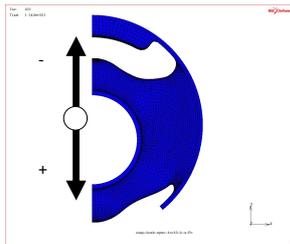


軸方向変形

戻りの特性も表現すると実測値は

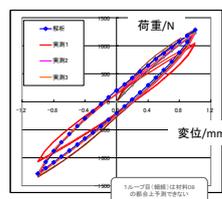
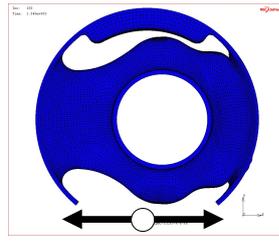


## 粘弾性特性予測データベースの構築



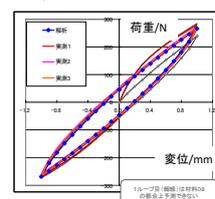
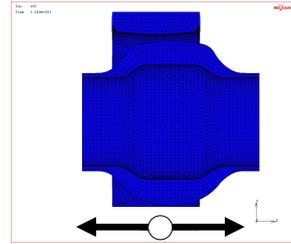
バネ値の誤差

実測: 293N/mm  
解析: 261N/mm 誤差 -12.0%



2周期目0.5~1mm間バネ

実測: 1042N/mm 誤差 -0.3%  
解析: 1039N/mm

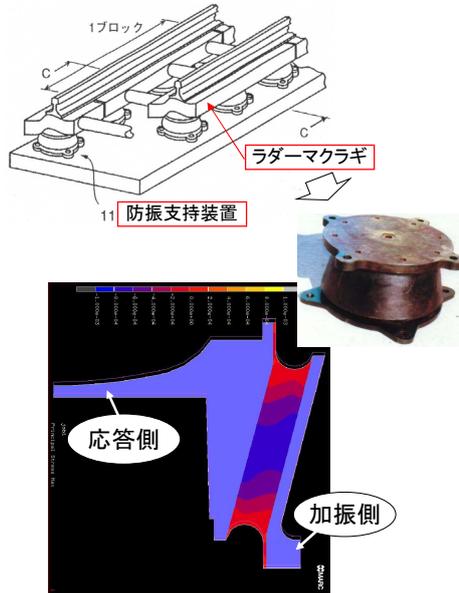


2周期目0.5~1mm間バネ

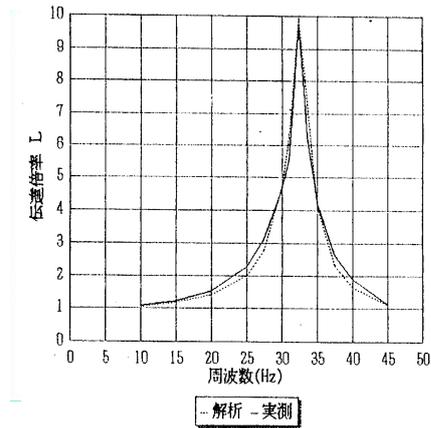
実測: 206N/mm 誤差 2.3%  
解析: 211N/mm

## ゴールの整合・調整

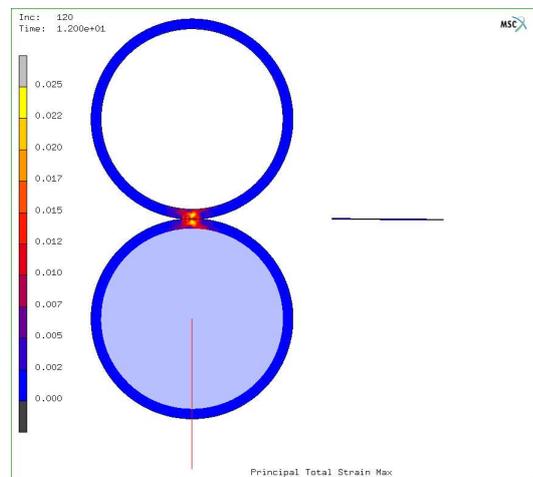
## 例)ラダー型防振ゴムの応答解析



## 加振-応答倍率(振動特性)



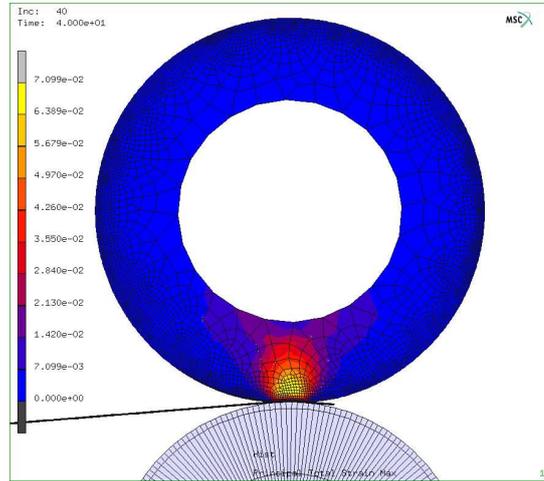
## コピー用紙送りローラーの解析



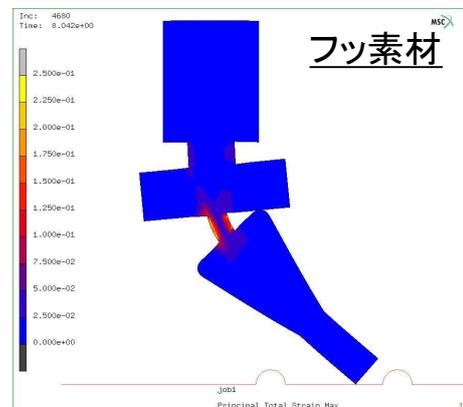
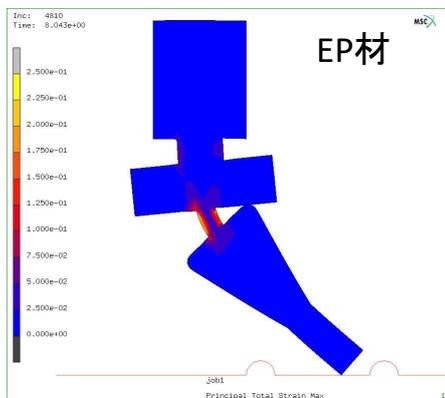
## ゴムローラーへの応用

### 解析モデル概要

#### 変形概要 (ひずみ分布)



## ブレードラバー変形解析 材質による挙動の違い



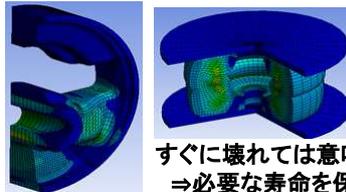
## 解析でできること/サポート可能な内容

ゴムの関連解析について、導入後の実用化でできること

- I 線形解析でも注意が必要
- II ゴム、樹脂の基本解析
- III ゴムの整形に関する解析
- IV 動的、粘弾性
- V ゴムの耐久性検討**  
いかに耐久性を予測するか、実験は最低限で必須
- VI 解析技術
- VII 予測精度と勘違い
- VIII スポンジゴム/発泡材料への展開
- IX 効率化、自動化

## 耐久性とは何か

どのような製品も寿命がある



すぐに壊れては意味がない。  
⇒必要な寿命を保つ必要がある。

金属は応力から寿命予測

※日本ベルパーツ様データなど

ゴムは応力で評価できない

なぜか？

全く同じ変形でも、**ゴム硬度で応力が異なる。**

同変形時

ゴムは40Hs ⇒ 0.4MPa(目安)

60Hs ⇒ 1.0MPa(目安)

75Hs ⇒ 1.8MPa(目安)

※繰り返し変形時、硬度高いと発熱も大きく  
耐久性低下という事実も。

鉄のヤング率は、ほぼ210000MPa

変形が同じなら応力は同じ。

⇒ ゴムは違う。

同じ変形では同じひずみ

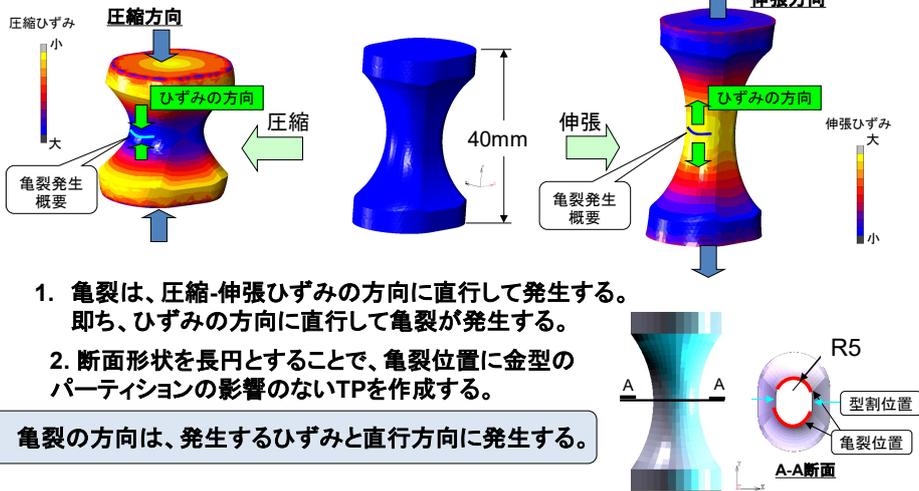
⇒ひずみで判断する。

世界各地で検討されている

**耐久性指標** 最近の事例／疲労で検索するとかなり多くの国での研究・・・

実際に、豊田合成殿の疲労寿命予測用TP作成、耐久試験を実施。

**圧縮-伸張の繰り返し変位による耐久試験**



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

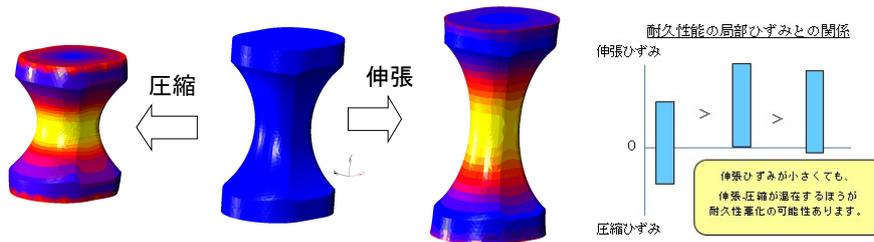
亀裂の方向は、発生するひずみと直行方向に発生する。

**耐久性指標の検討**

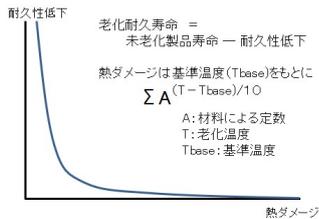
豊田合成殿の文献を再現した結果

1980年代の文献ですが、現在、世界中で研究が進んでいます。

疲労寿命を予測するための、ひずみε-耐久回数Nを実験できるTPを作成



**熱劣化、ダメージ**



耐久性、熱劣化については

相当の時間をかけて研究してきました。

ご相談ください。

耐久性、効率化、自動化、なんでもご相談ください。  
hagi@ysroad.jp



http://kaleidoscope.com/

## 耐久性のε-N線図作成方法

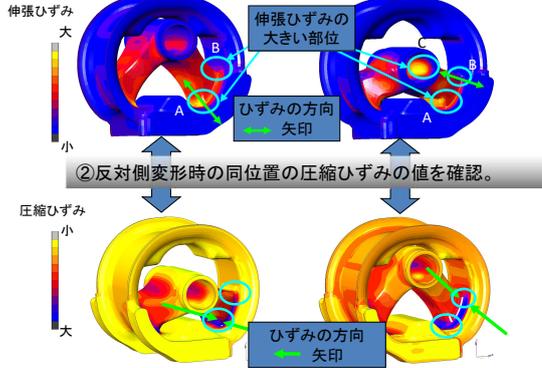
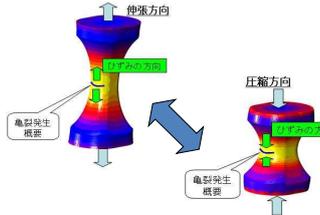
どのように耐久性のε-N線図を構築するか

手順

①解析結果より、ひずみの大きい部位を確認。耐久条件：-□mm ~ +○mmの変形ピーク時の伸張ひずみの大きい部位を選定する。

### A. 亀裂部位が特定できていない場合

疲労寿命評価用TPで見ると明確であるが、亀裂はひずみの方向と直行方向に発生する。  
→この見方より、亀裂発生部位を特定する。



②反対側変形時の同位置の圧縮ひずみの値を確認。

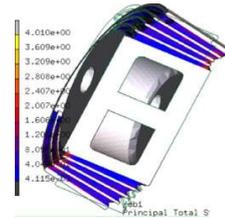
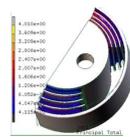
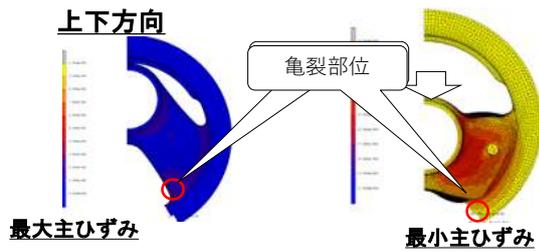
③ひずみの大きさと方向を整理する。

- A部 -□mm変形時の伸張ひずみと+○mm変形時の圧縮ひずみが、亀裂の発生方向と相関がある。→亀裂発生予測部位
- B部 -□mm変形時の圧縮ひずみと+○mm変形時の伸張ひずみが、亀裂の発生方向と相関がある。→亀裂発生予測部位
- C部 伸張ひずみの方向が半径方向のため、亀裂の方向との相関が認められない。→亀裂発生予測部位から除外する。

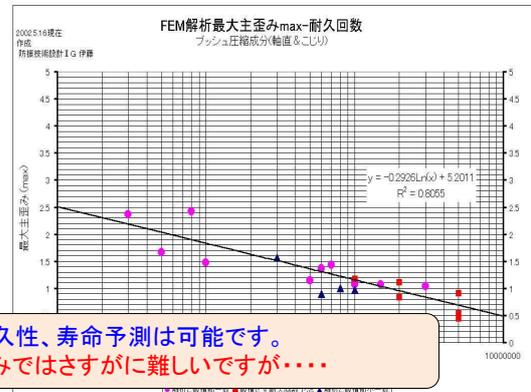
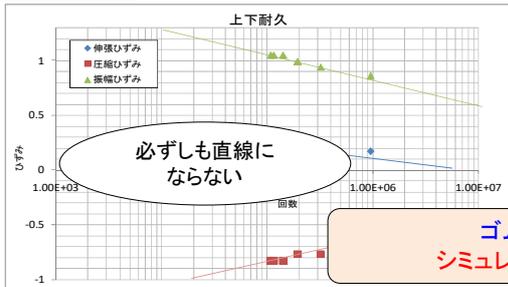
ひずみの方向と大きさから、亀裂の発生しやすい部位を特定して、耐久性のε-N線図から疲労寿命を判断する。

### 耐久予測の実際の例

### 耐久性指標



### 製品ε-N線図



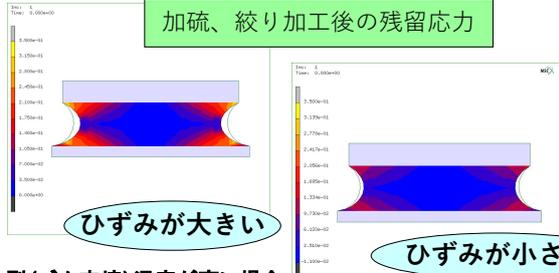
ゴム製品の耐久性、寿命予測は可能です。  
シミュレーションのみではさすがに難しいですが……

ゴム製品

耐久性コントロール

加硫温度による収縮、絞り率の違いで残留ひずみキャンセル

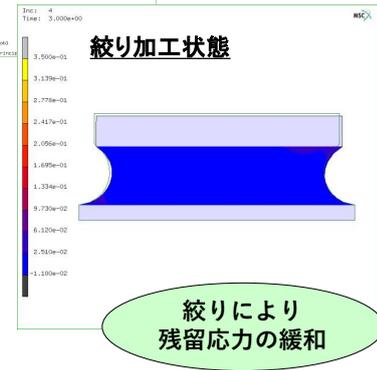
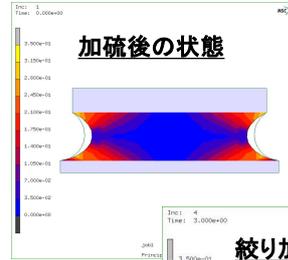
加硫工法の違いにより収縮も異なる。



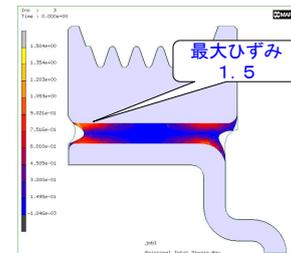
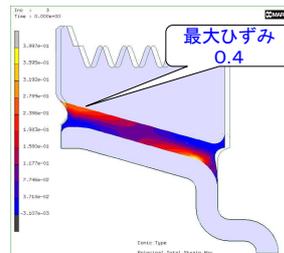
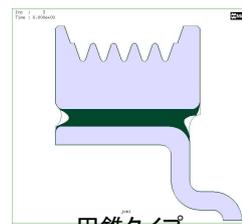
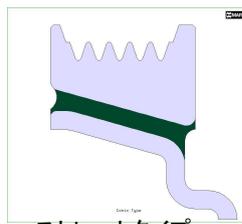
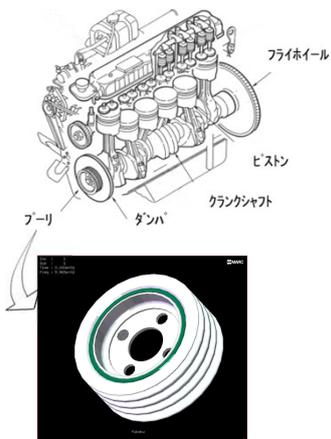
金型(ゴム充填)温度が高い場合。

金型(ゴム充填)温度が低い場合。

加工温度、絞り率でコントロール可能  
耐久性へも大きく影響する



耐久性コントロール



形状、製造工程により残留ひずみが変化する。