

# 金属の寿命を踏まえたゴムの耐久性を考える

2022.9.5. 寺子屋

寺子屋/CAE解援隊

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

## 金属の寿命を踏まえたゴムの耐久性を考える

- 金属の疲労強度について
- ゴムの耐久性の基本
  - ①解析から正確なひずみを求める / 解析精度が基本
  - ②応力判断について
- ゴム製品の実用的判断
- ゴムの解析で間違えやすいこと
  - ①真のひずみが出ているか
  - ②局部のひずみについて
  - ③合っていると考えて

# 金属の疲労強度について

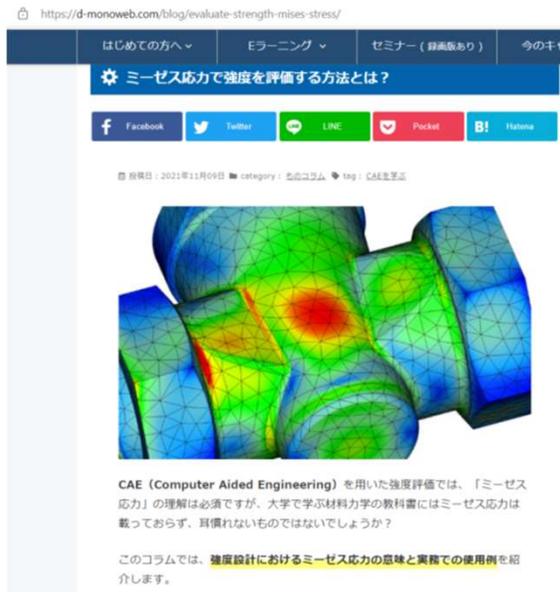
金属の疲労寿命は種類により、

## ①ミゼス応力説

## ②せん断応力説

## ③最大主応力説

など、それぞれ相応の指標がある。



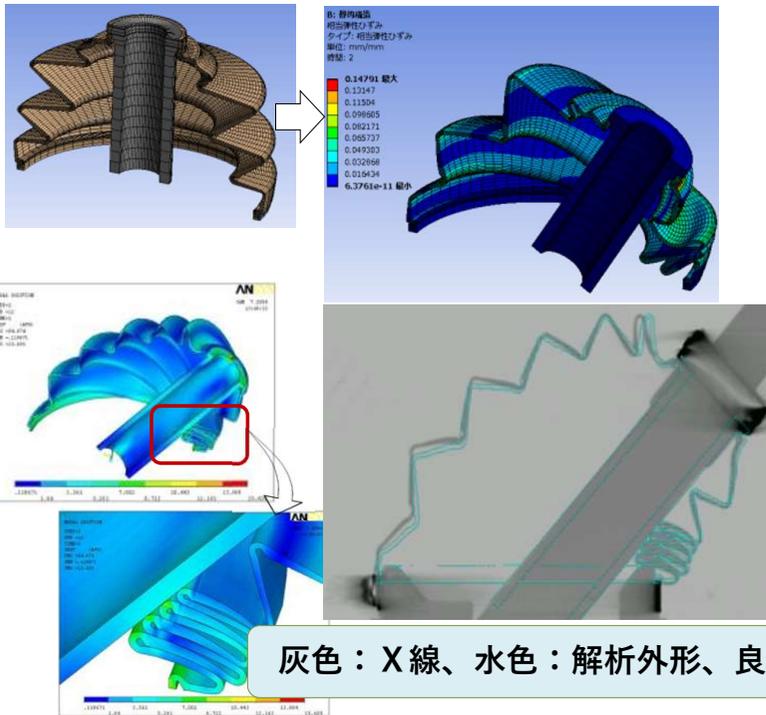
疲労解析に挑戦、強度設計における繰り返し荷重を評価する ...

また、判断指標もモール円応力、スミス線図、グッドマン線図での評価など単純に最大主応力としての伸張応力での評価のみではない。

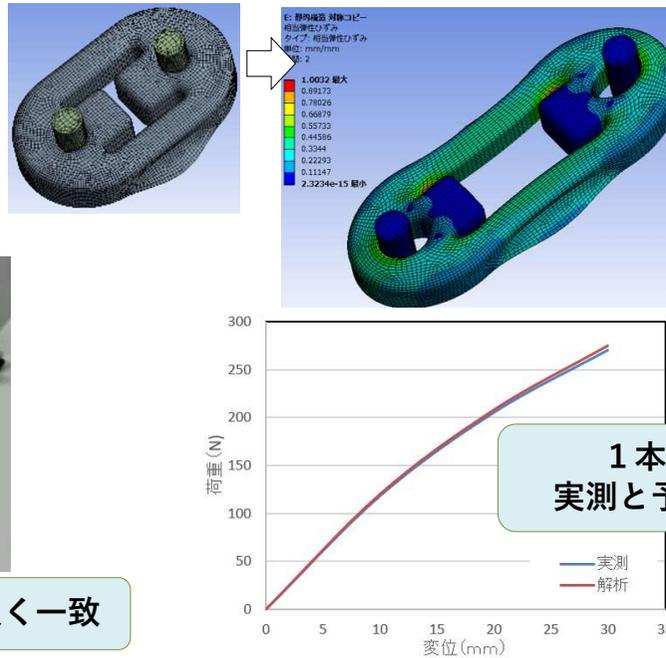
# ゴムの耐久性の基本

## ①解析から正確なひずみを求める / 解析精度が基本

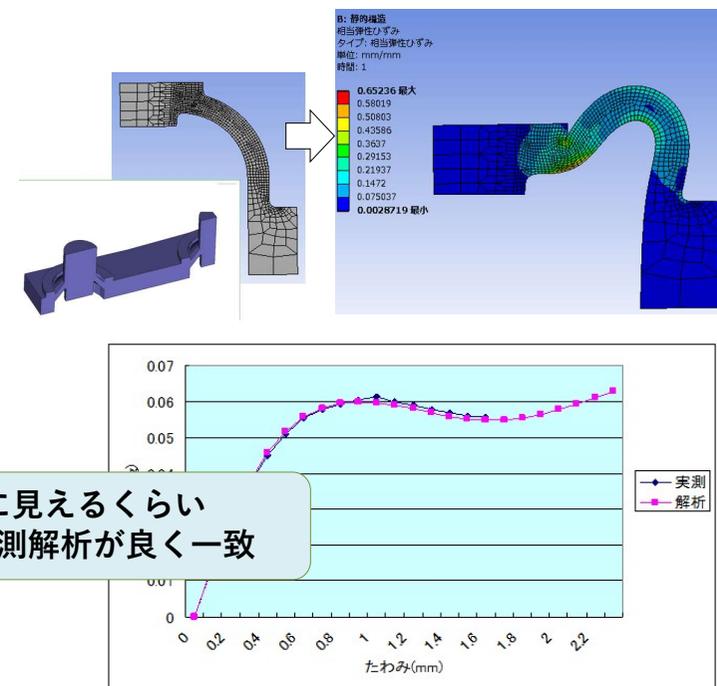
### ブーツの揺動変形解析



### 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



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。

# ひずみエネルギー密度関数定義が重要

## 定義方法

基本式

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

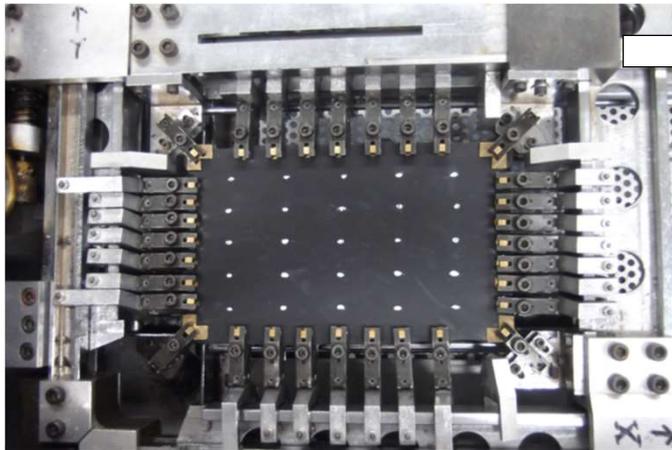
伸張比  $\lambda = 1 + \varepsilon$  として表現

テンソルとして、

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

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

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



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

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

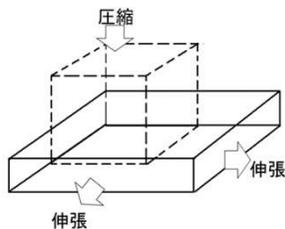
## 2) Mooney-Rivlin

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

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

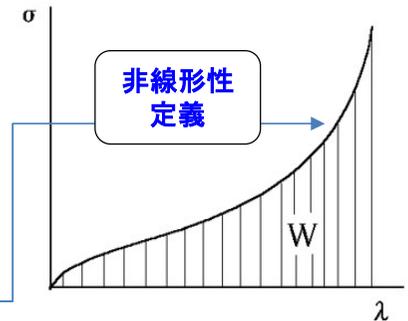
$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad \text{[面積効果]}$$

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



※ $I_3=1$ は非圧縮性

最近、紛らわしい論文(圧縮性を示す誤り)



一般的に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

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

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

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

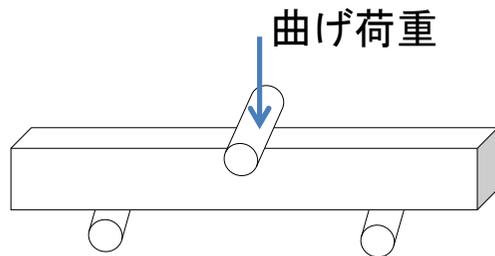
ひずみエネルギー密度関数による正確な定義が必要です。

# ゴムの耐久性の基本

## ②応力判断について

ゴムは応力で評価してはいけない 耐久性に限らず、ゴムはひずみで判断する必要がある。

材質が決まれば  
1.9~2.1MPaとして正確に定義される。  
Web検索でも。  
実際には、応力測定はひずみを測定。



曲げ試験によるヤング率特定

伸張用JISダンベル

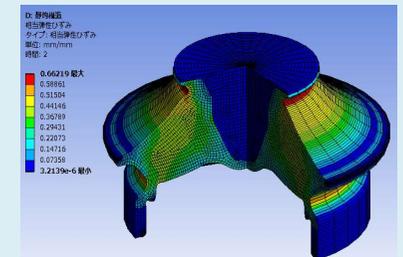
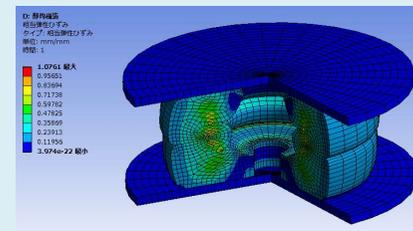
ゴムのヤング率は

40Hs ⇒ 1.2MPa(目安)

60Hs ⇒ 3.0MPa(目安)

75Hs ⇒ 5.4MPa(目安)

同じ変形でも応力が異なる。  
変形が同じ場合、ほぼ耐久性は同じ。  
厳密には……



変形解析

ゴムは剛性、ヤング率が異なるので耐久性が同等な同じ変形でも応力が異なる。

# ゴム製品の実用的判断

## ゴムの耐久性（文献）

・ 県立大学山下先生 2軸試験による疲労寿命の研究

・ 豊田合成殿の論文

日本ゴム協会誌(第66巻, 第4号, 1993) 防振ゴム材料の耐久性評価

### 内容の一部紹介 / 豊田合成殿

#### I. 目的

エンジンの振動・騒音低減のため使用される自動車用防振ゴムの、低バネ 定数、高耐久寿命化が要求されている。よって特性及び耐久性を把握することが急務である。  
そこで短時間にゴム材の耐久寿命を精度良く評価する方法を提案する。

#### II. 方法

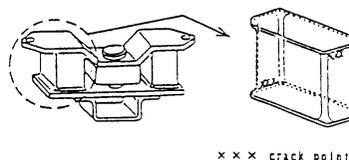
##### 1. ゴム部品の耐久疲労性

製品台上ベンチ試験(図1) 繰り返し定荷重振動  
(分担荷重 1、2、3 ± 1 W で加振周波数 3 Hz)

→ 亀裂の発生部分はFEM結果と一致(図3)

→ 疲労寿命と最大引張りひずみは反比例の関係(図2)

⇒ FEM解析による最大引張りひずみを変数とする



### テストピース形状設計

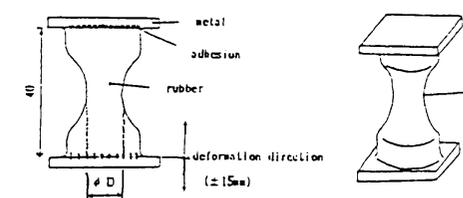
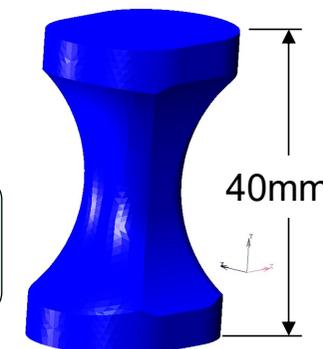


図4 TP形状



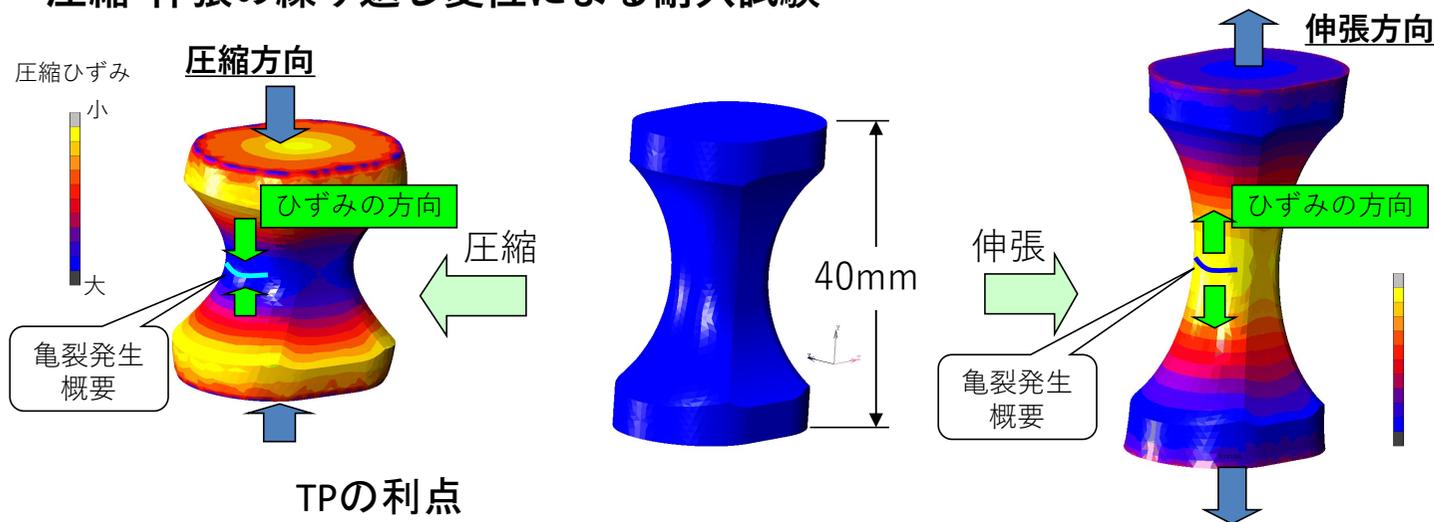
Web検索すると、日本のみでなく何か国もこの形状で検討

詳細な状況は不明ですが、世界中で優れた形状と認めています。

# ゴム製品の実用的判断

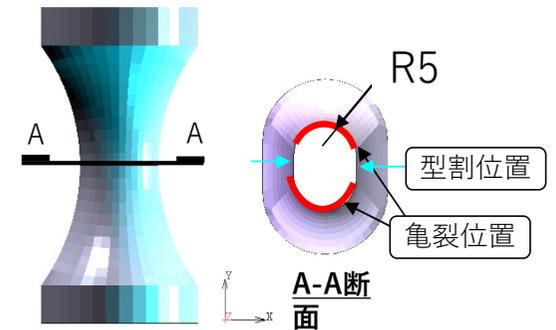
亀裂の方向は、発生するひずみと直行方向に発生する。

## 圧縮-伸張の繰り返し変位による耐久試験



### TPの利点

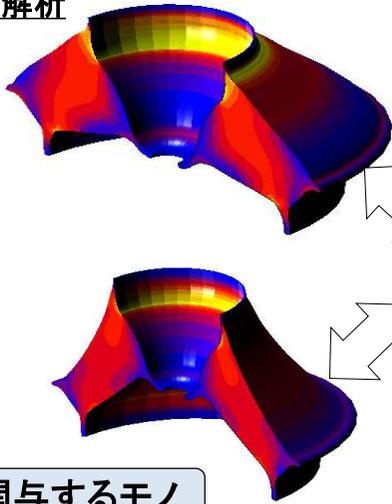
1. 亀裂は、圧縮-伸張ひずみの方向に直行して発生する。  
即ち、ひずみの方向に直行して亀裂が発生する。
2. 断面形状を長円とすることで、亀裂位置に金型のパーティションの影響のないTPを作成する。



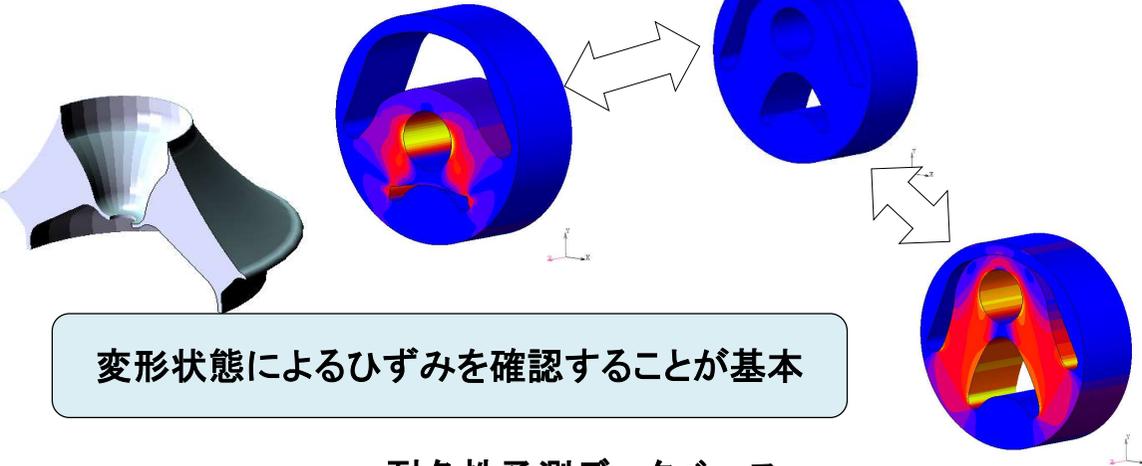
亀裂がかならず同じ位置に安定して発生する利点を利用して、研究が進む。

# ゴム製品の実用的判断

円錐型マウントの解析

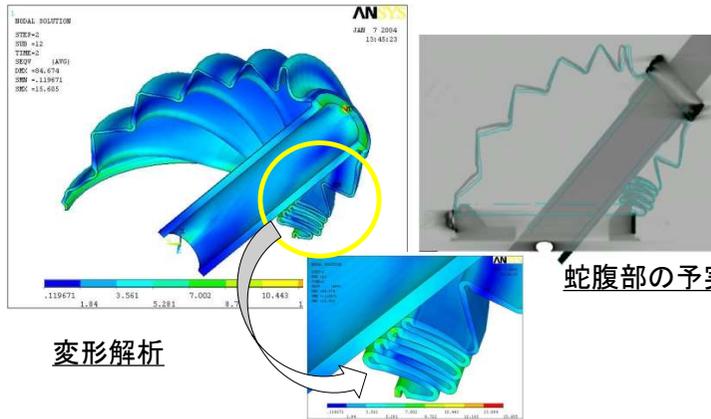


ハの字型マウントの解析



変形状態によるひずみを確認することが基本

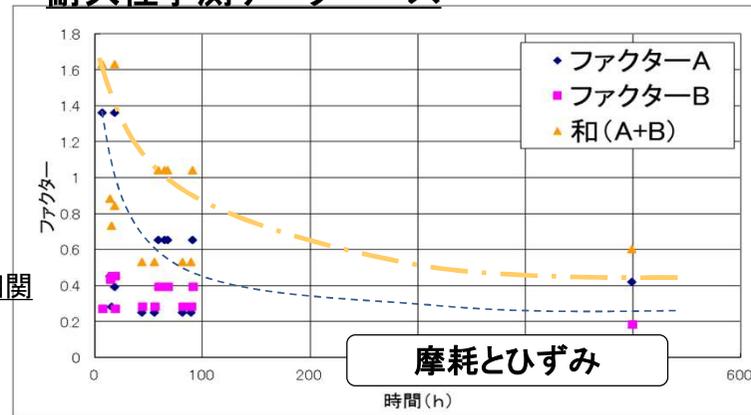
接触摩耗が関与するモノ



蛇腹部の予実相関

変形解析

耐久性予測データベース



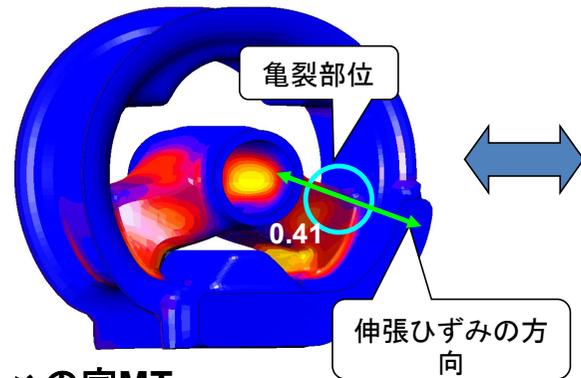
摩耗とひずみ

時間 (h)

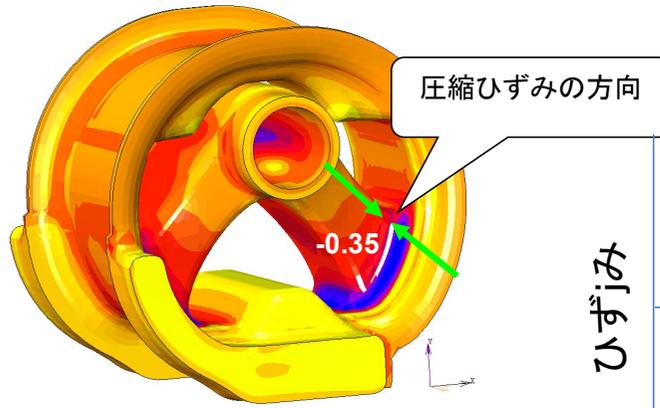
ひずみや時には面圧（摩擦）を考慮して  $\epsilon$ -N線図線図を作成する。（金属のS-Nセンスに相当）

# 耐久性指標 $\epsilon$ -N線図作成方法

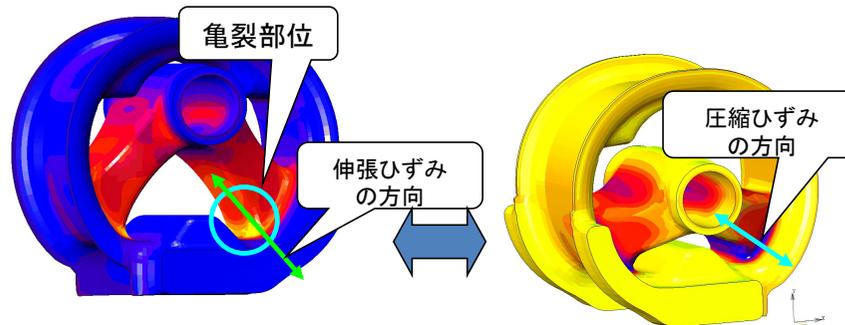
ハの字MTで見ると、



ハの字MT



伸張変形の影響であれば、亀裂部位は



ひずみ

振幅ひずみ

耐久回数 伸張ひずみ

圧縮ひずみ

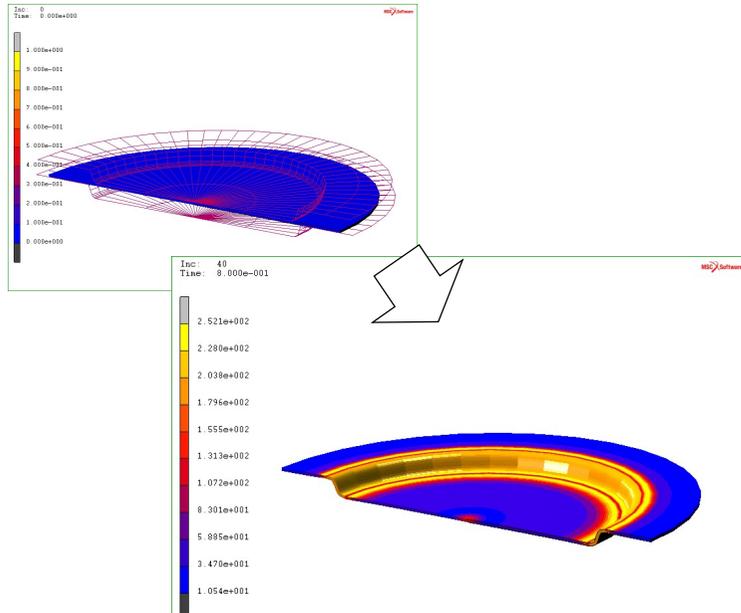
伸張変形時	
伸張ひずみ	0.41
圧縮変形時	
圧縮ひずみ	-0.35
差、即ち振幅ひずみ	-0.76 である。

亀裂に対して、必ずその方向と直行する伸張ひずみが発生する。  
この見方でひずみのもっとも大きい位置から亀裂発生。

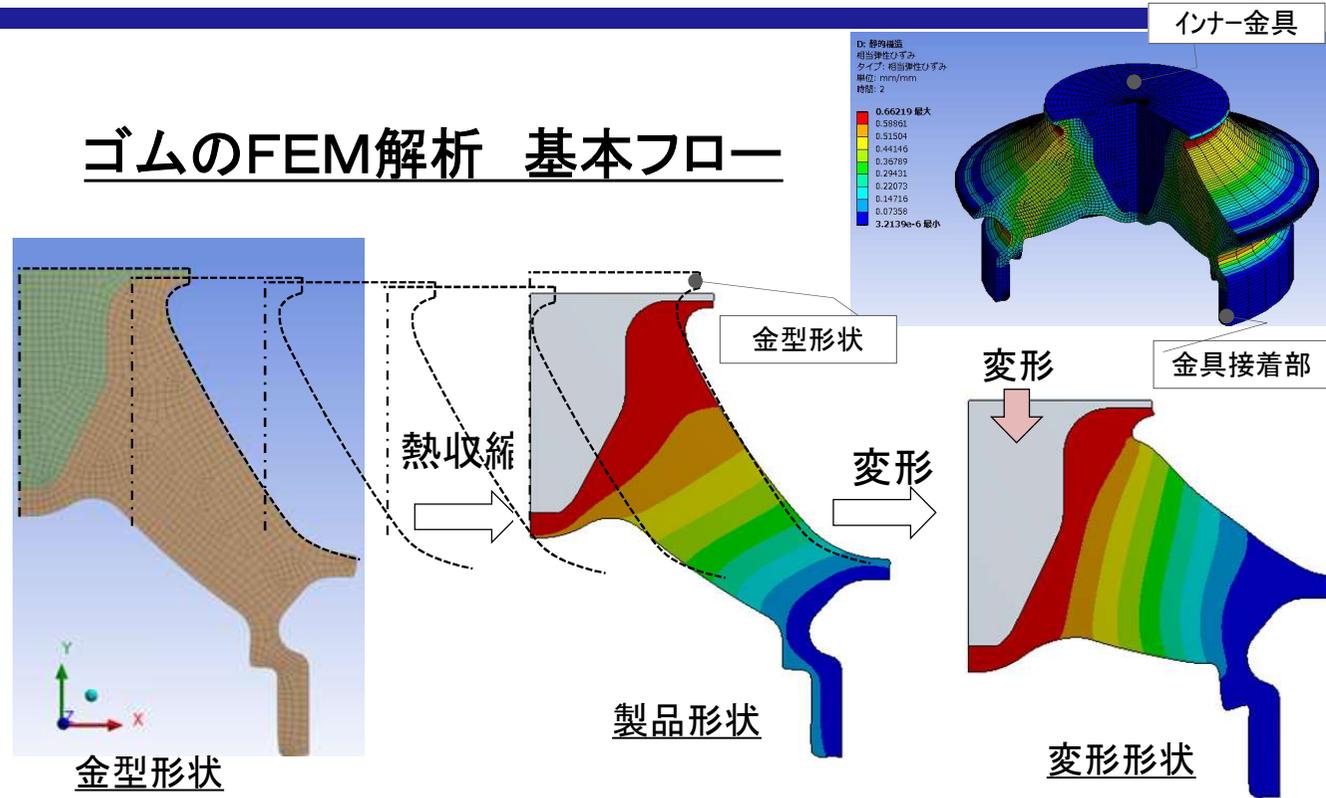
# ゴムの解析で間違いやすいこと

## ① 真のひずみが出ているか

### 板の塑性解析



### ゴムのFEM解析 基本フロー



製品の加工工程を考慮することは、ゴム製品のみではなくすべての製品にあてはまります。

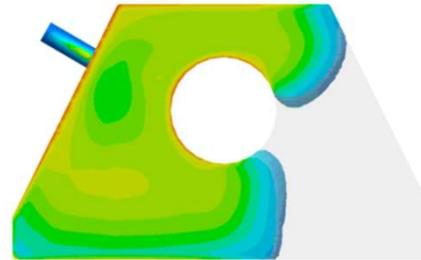
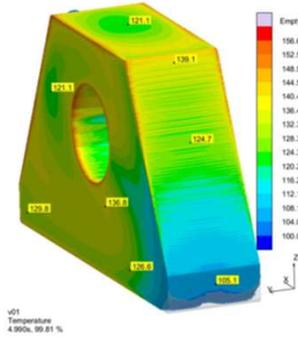
**金型形状 ⇒ (熱履歴)熱収縮 ⇒ 変形解析 の手順**を守ること、  
解析による**予測精度を格段に向上**させることができます。 \*

# ゴムの解析で間違いやすいこと

## ①真のひずみが出ているか

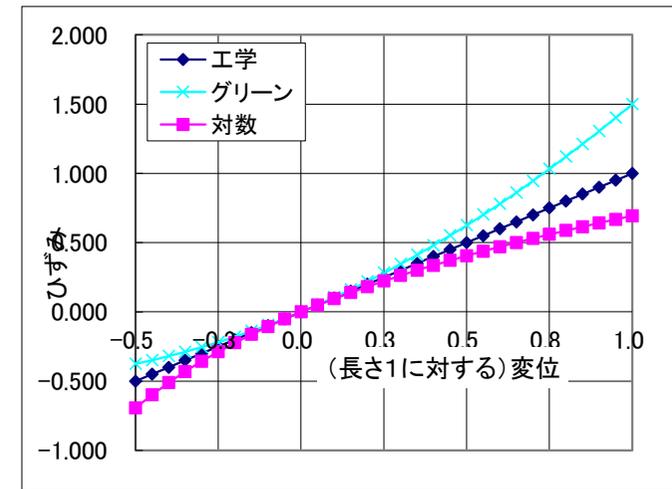
非線形CAE協会様で検討  
台形ゴム

BUSHの充填: 流動解析



シグマソフト/平泉洋行様 提供

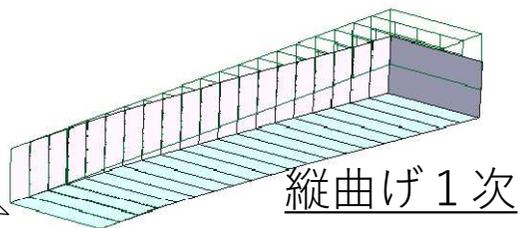
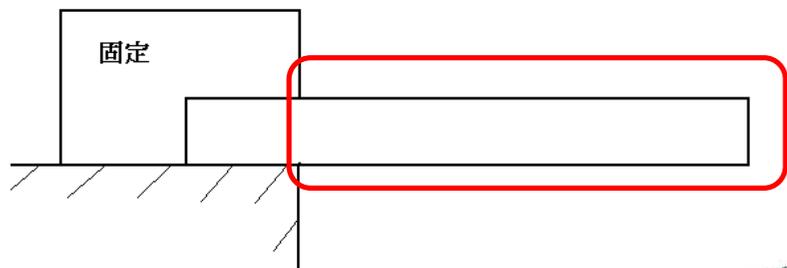
ソフトにより、工学ひずみ出力でない  
対数ひずみやグリーンひずみ  
※バイジョンで変化に注意



金型形状 ⇒ (熱履歴) 熱収縮 ⇒ 変形解析 の手順を **充填解析から正確に求める**  
解析ソフトによっては、**工学ひずみの出力でないことも。**

# ゴムの解析で間違いやすいこと

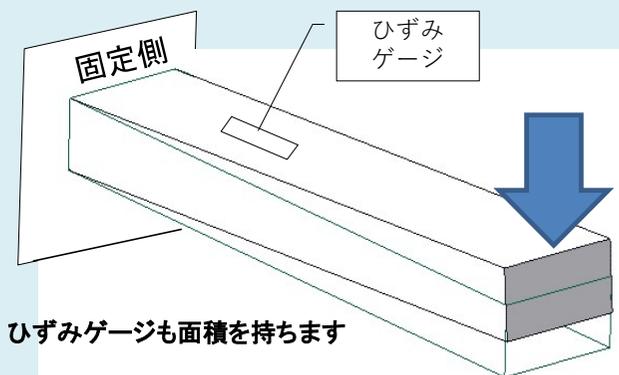
## ②局部のひずみについて



固定部は  
気をつけないと  
間違った値

また、残念ながら  
デフォルトでは正解は得られない事も。

## 応力・変形解析も・・・



ひずみゲージも面積を持ちます

測定結果との比較は、位置やメッシュのサイズのアンマッチで合致しないと勘違い。

解析モデルとゲージ位置、面積  
マッチしていますか？

## 線形解析の落とし穴

### 変位・固定条件の間違い

梁の変形解析、最も簡単な解析です。

- 1) 変形条件を下方方向に変位条件で与えていませんか？
- 2) 固定側、完全固定( $X=Y=Z=0$ )としていませんか？

それは本当に正しい条件ですか？

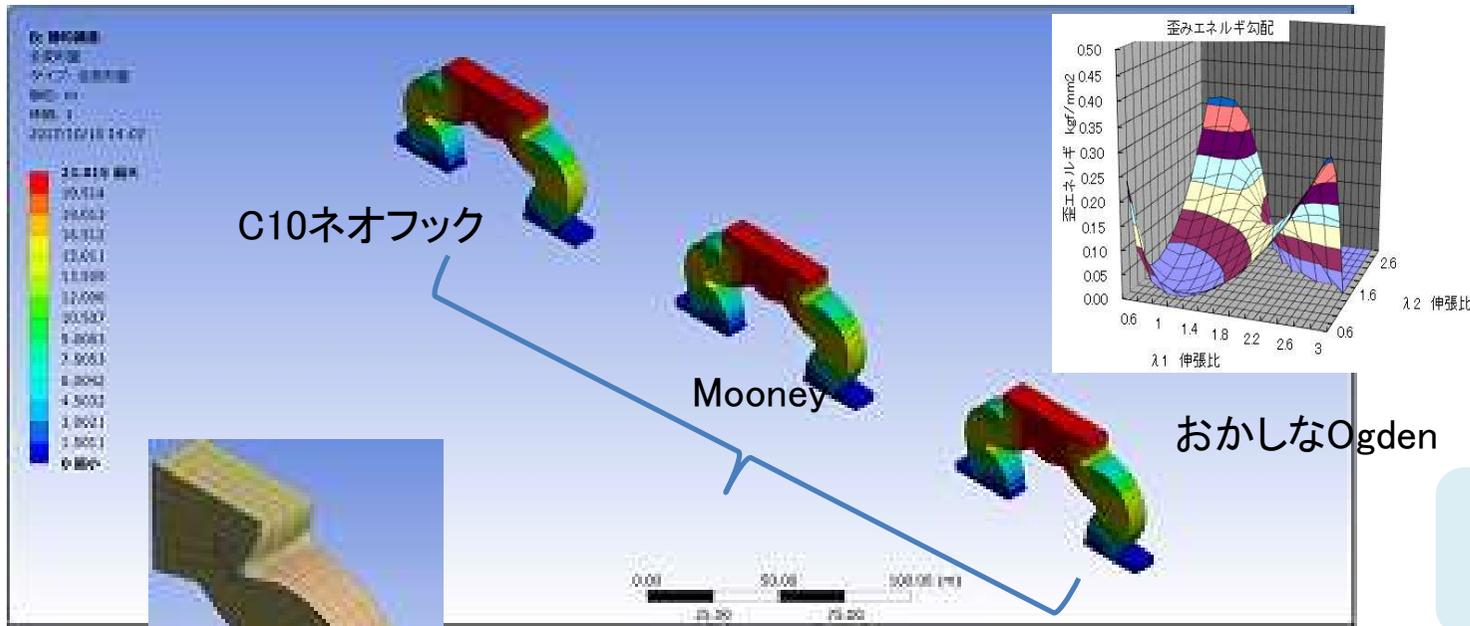
- 1) 変位を $Y=0.1\text{ mm}$ とした場合、**本当に直線状に並ぶと思いますか？**  
 $0.001\text{ mm}$ の変位の差でも、**反力は大きく異なるので**  
**そのように変形させることは至難の業です。**

一定の変位にはならないものを  
変位拘束で解析すると大きな誤差が出ます。

- 2) 固定条件：**金属を完全固定する治具が存在すると考えますか？**

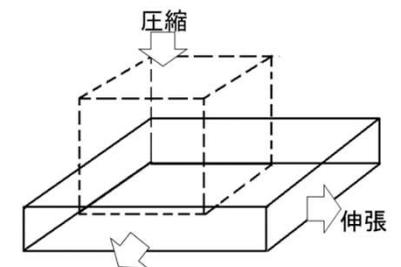
モデルやソフトの癖も存在します。

# 非圧縮性ゆえの変形図が同じになる（防舷材）

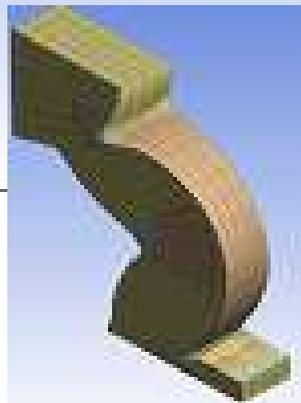


$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$$

[体積効果]



体積一定なので逃げ場が決まる  
⇒ 変形形状が一致。



形状比較

どんないい加減な材料でも  
ある程度固定する条件（上下面固定）では  
変形形状が一致しても材料が合っているという過ち。

正しく材料定義できていなくとも形状が一致するのがゴムです。

ありがとうございました

## 寺子屋 サポート概要

ゴムのお困りごと、単でも相談ください。

### CAE適用

#### 立ち上げお手伝い

・セミナー、育成サポート（座学）

・解析初心者ご指導

・ゴム材料定義

・解析条件の定義方法、見直し/間違え易い定義

・結果の見方、処理

#### 実用化・運用

・大変形解析～応力緩和

・クリープ解析

・動解析

・衝撃、落下解析

・熱・金型設計

・耐久性予測

### 効率化

・CAD自動化

・解析自動化/条件設定、結果処理

・リバースエンジニアリング

変形状態のCAD化、Assy組み込み

### 品質管理

・不良原因解明

・原因の可視化

・工程改善

知識集約情報発信  
標準化はCAEの役割です

# 寺子屋

<https://terakoya2018.com/>

MAIL : hagi@terakoya2018.com