

ゴム解析の応用講座
解析精度を高める粘弾性特性と耐久性予測方法

寺子屋/CAE解援隊
<https://terakoya2018.com/>

連絡先 hagi@terakoya2018.com

本日の内容

1. ゴム超弾性:解析ひずみエネルギー関数を中心に超弾性の基本
 - ・ゴムの解析用材料 ひずみエネルギー密度関数について
 - ・解析の基本フロー 製品の成り立ちから解析すると予測精度が一段とアップ
2. 粘弾性解析のデータベース構築法
3. ゴムの耐久性について ~熱老化を考慮するには
4. 解析自動化、効率化のヒントを少し
5. 質疑応答、今後の個別サポート

ゴム超弾性：解析ひずみエネルギー関数を中心に超弾性の基本

定義方法

基本式

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad \text{伸張比 } \lambda = 1 + \varepsilon \quad \text{として表現}$$

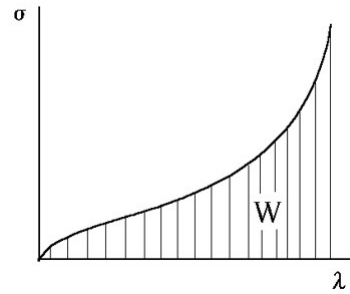
テンソルとして、

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

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

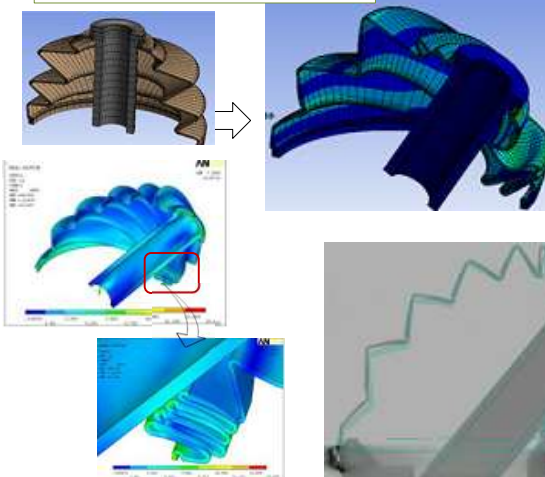
$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad \text{[体積効果]}$$

基本は単軸と同じ、へたり補正

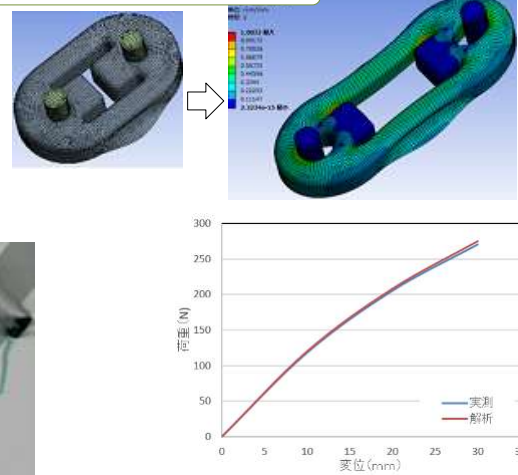


解析例 定義及び解析の注意点を守れば簡単に精度がアップする

ブーツの揺動変形解析



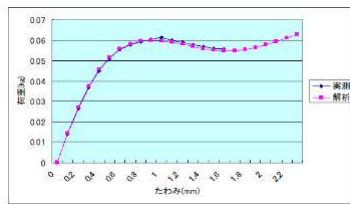
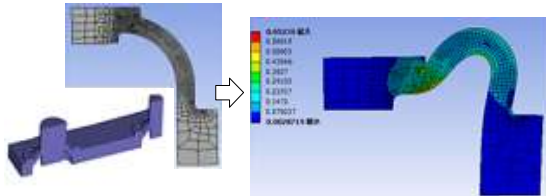
マフラーマウントの変形解析



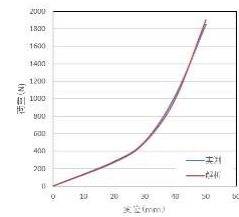
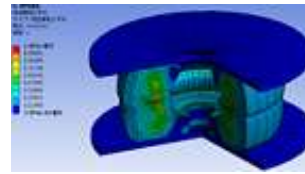
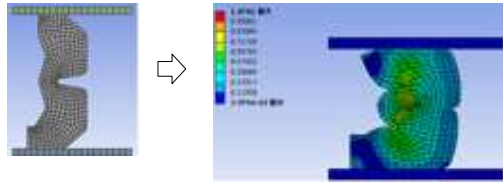
実測と解析予測が良く一致(良好)

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)

新規縦型の簡易二軸試験機 一軸拘束二軸伸張（純せん断）専用



解析精度向上に、この簡易二軸試験機の一軸拘束の領域で十分と考えます。(証明、根拠あり)

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



- ・一軸拘束二軸伸張専用
- ・富山試験場もご紹介(前ページ試験機)
- ・群馬館林近郊でも使用
- ・福山通運便でもお届け/レンタル

自宅の一室で使用
半日開放、方法、回帰方法
ご指導します。

従来型に比べて、安価な製作費でできます。(4分の1程度製作費)
一軸拘束二軸伸張試験専用(変形状態3ページ)です。
製品の解析には、最も適した変形状態から解析データを構築します。

先人の知恵により四隅の荷重は除くこと、周知の事

従来の二軸試験による伸張

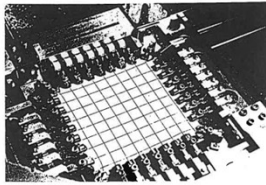
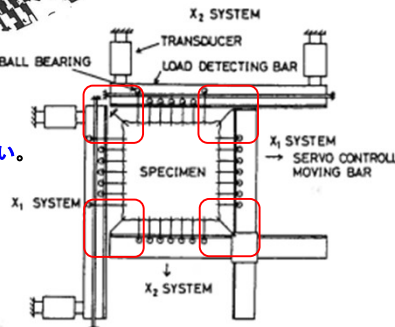


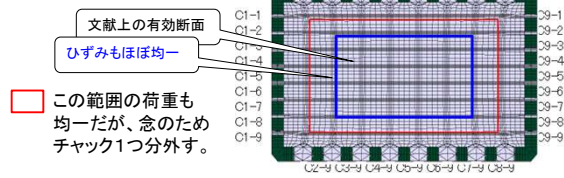
Fig. 13. View of the apparatus in Fig. 1A

二軸試験機原理



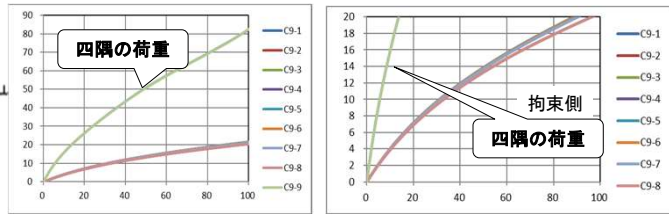
この部位(4か所)
試験機の工夫により
四隅の荷重を採らない。

シート伸張とチャック位置



文献上の有効断面
ひずみもほぼ均一
この範囲の荷重も
均一だが、念のため
チャック1つ分外す。

それぞれチャック(C1-1~C9-9)までの荷重をグラフ化する。



四隅の荷重は、他のチャック荷重と大きく違う。平均すると・・・

四隅のチャックの荷重はほかのチャック部よりはスカに大きいため、一緒に平均するとおかしいことに。
京都大・川端先生の文献でもこの範囲を採荷しない工夫がされている。

提言

1) 簡易試験機と従来の試験機は同等の機能で、簡易試験機は安価に構築可能。

2) 四隅の荷重は採らない。(基本)

3) 有効断面を考慮して回帰を実施。

寺子屋にてサービス提供

- ・技術資料
 - ・試験機情報
 - ・材料構築サポート
- (シートをご用意できない方、製品から定義可能です。)

寺子屋

<https://terakoya2018.com/>
TEL : 080-2230-8785
MAIL : hagi@terakoya2018.com



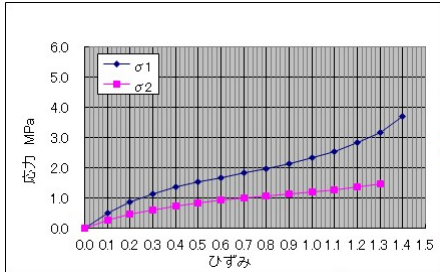
簡易二軸試験機

購入
レンタル
可

簡易二軸試験フロー マニュアルより

荷重、変位から変換

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

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

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

$$\sigma_3 = 0$$

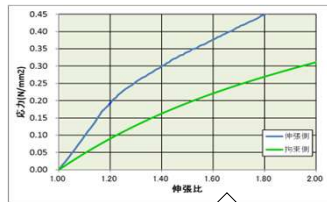


$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$

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

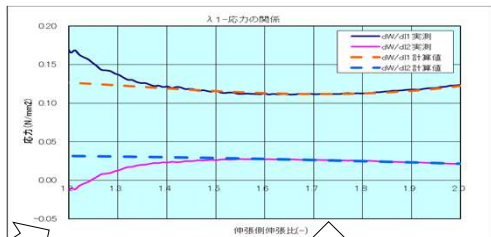
実際の回帰

実測値



回帰

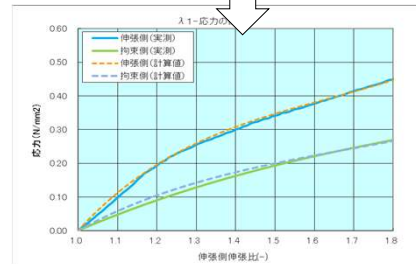
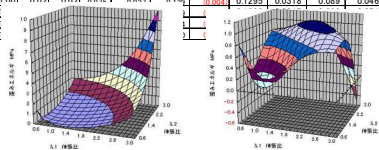
簡易試験機でも全く同じ結果



検証

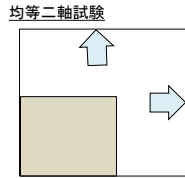
EXCEL計算

No.	λ ₁	λ ₂	ε ₁₋₃	ε ₂₋₃	σ ₁	σ ₂	dW/dε ₁	dW/dε ₂	dW/dε ₃	dW/dε ₁	dW/dε ₂	dW/dε ₃	係数からの計算値
1	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00000	0.00000	0.1301	0.0319	0.0000	0.1301	0.0319	0.0000	0.0000
2	1.02	1.00	0.00	0.00	0.016	0.008	0.139	0.0311	0.1301	0.1300	0.0319	0.0288	0.016
3	1.02	1.00	0.00	0.00	0.021	0.011	0.058	0.138	0.1300	0.0319	0.028	0.014	0.014
4	1.03	1.00	0.00	0.00	0.030	0.018	0.034	0.060	0.1300	0.0318	0.040	0.020	0.020
5	1.04	1.00	0.01	0.01	0.038	0.020	0.067	0.068	0.1298	0.0318	0.050	0.024	0.024
6	1.05	1.00	0.01	0.01	0.047	0.024	0.111	0.078	0.1288	0.0318	0.059	0.030	0.030
7	1.06	1.00	0.01	0.01	0.057	0.029	0.102	0.087	0.1287	0.0318	0.071	0.036	0.036
8	1.07	1.00	0.02	0.02	0.068	0.033	0.123	0.099	0.1286	0.0318	0.080	0.041	0.041
9	1.08	1.00	0.02	0.02	0.079	0.037	0.094	0.1285	0.0318	0.089	0.046	0.046	0.046
10	1.09												
11	1.10												
12	1.10												

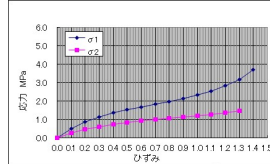
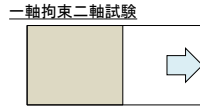


一軸拘束二軸伸張試験では2本の特性データが必須？

均等二軸試験であれば、2方向同じひずみvs反力となり1本の特性



一軸拘束二軸伸張試験では、2方向の反力が異なる。



2方向の特性から

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

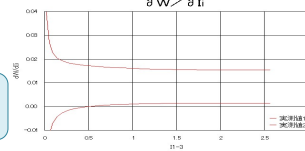
それぞれの微分線図から各係数を回帰で求める。

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

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} + C_{11}(I_1 - 3)$$

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

エネルギーの微分値が得られ



2本の応力ひずみ(伸張比)線図が無いと、すべての係数が特定できない。直接エネルギーWかも求められない。

エネルギー関数導出の落とし穴

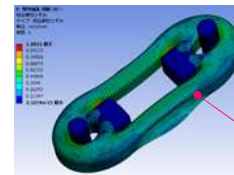
二軸均等伸張データで予測できるのは、風船のような製品



風船は均等二軸

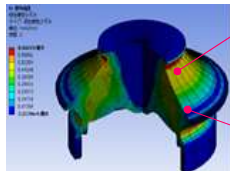
2方向に均等に伸張する製品はゴム製品でも少ない
⇒ 均等二軸伸張の領域データは不要

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

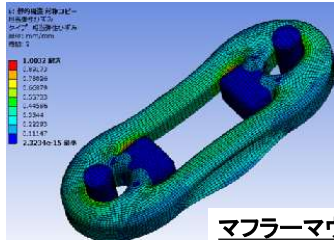


最大-中間-最小
1.0:0.3:-0.7

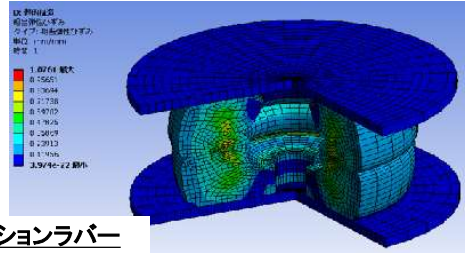
いずれもひずみを確認すればわかるように
均等二軸とよりも純せん断(一軸拘束二軸伸張)、単軸試験が有効です。

変形解析、耐久性検討時の区分

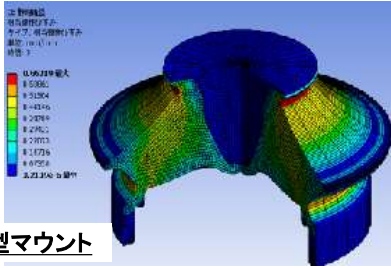
ゴム単製品 (金具なしのゴムのみの製品)



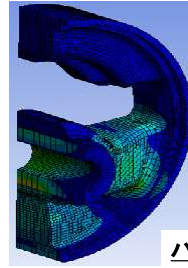
マフラーマウント



クッションラバー



円錐型マウント



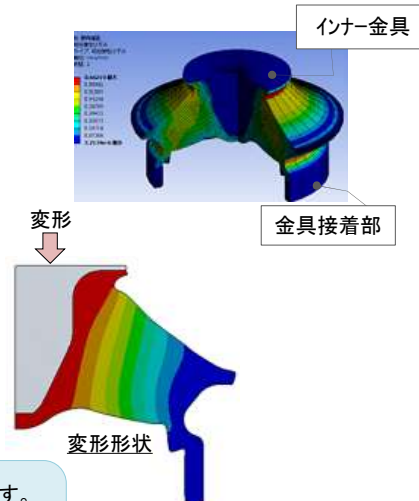
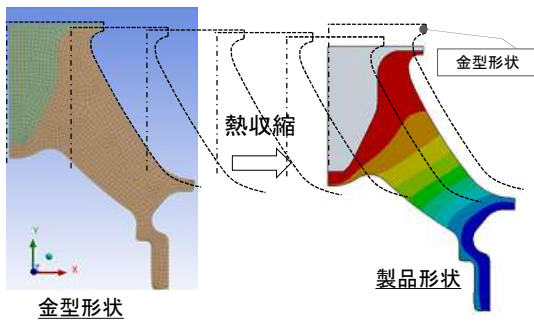
ハの字型マウント

金具接着型製品

ゴム製品の解析法は、大きくゴム単と金具接着型に大別されます。

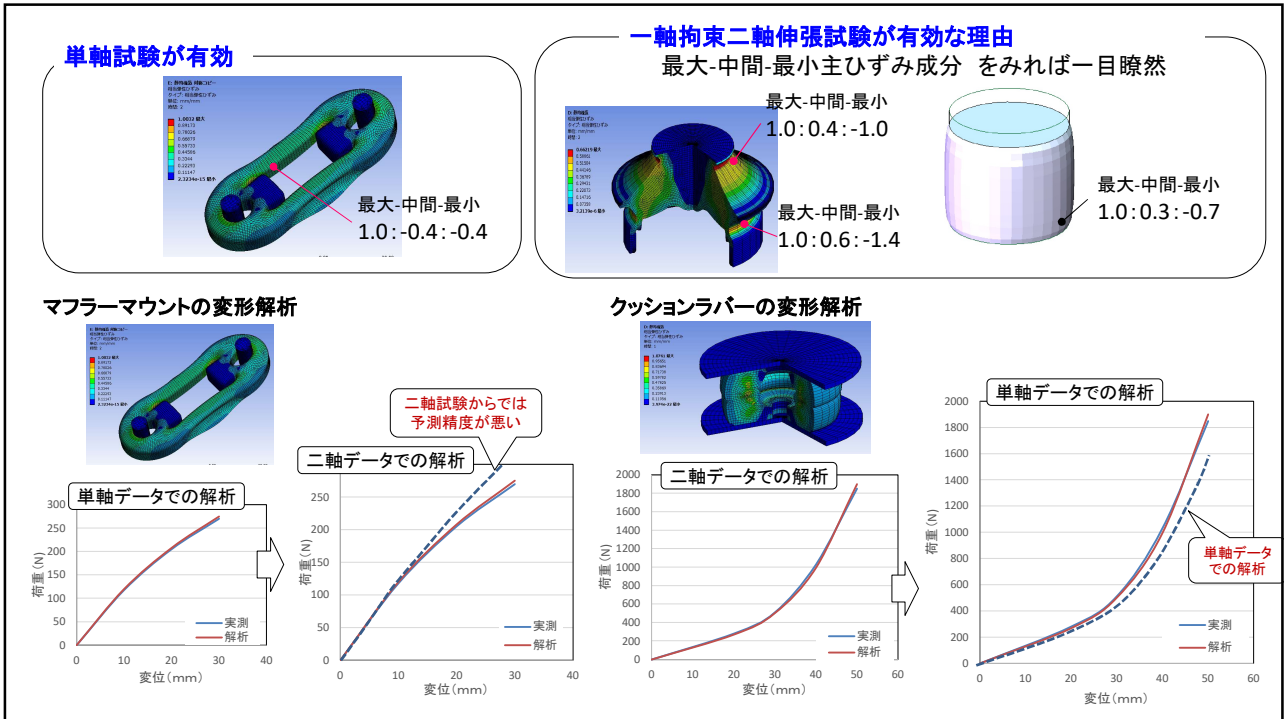
ゴムの FEM 解析 基本フロー

ゴム単製品は、そのまま変形解析を行えばいいですが、
金具接着タイプは、熱収縮解析が必須だと考えます。



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当てはまります。

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。



解析が合わないのは勘違いと知識不足です。

ゴムの解析が難しい、実験値と合わない理由

荷重、反力に影響するものは、主に**要因は・・・**

摩擦

硬度

寸法公差

があります。

摩擦について

摩擦については非常に複雑、誤解もありますので別途、詳しく説明します。(資料は掲載しています)
[YT版-ゴムの解析が難しいと言われる所以220918.pptx](#) or [YouTube](#)

硬度について

60Hsのゴム製品を製造しても**60Hsとは限りません。**
 製造能力の面から一般的に、60±2Hsの製品です。

解析用の材料データを60Hs、製品が62Hsということは良くあります。
 1Hs補正する場合、5%を考慮します。
 つまり、±2Hsとは、-10~+10%の変化、レンジで20%異なります。

反力

変位

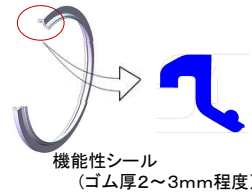
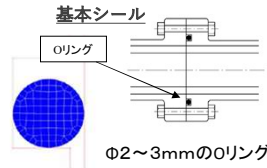
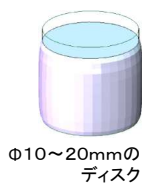
製品の硬度が必ずしも解析用データと一致していない場合もあり、硬度の確認が必要です。

寸法公差

摩擦・硬度以外に大きな影響に **寸法公差** があります。

寸法公差は精度の等級があり **1～3級** があります。

寸法	1級	2級	3級 [単位: mm]
3 mm以下	±0. 2	±0. 3	±0. 4
3～ 6	±0. 2	±0. 4	±0. 5
10～18	±0. 3	±0. 6	±0. 8

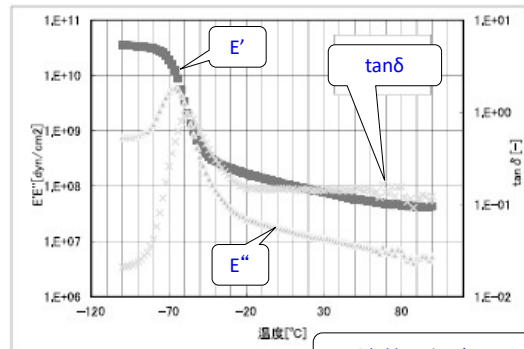


2級公差が一般的です。Oリングφ3mmの製品は、±0.3mm（つまりφ2.7～3.3mm）となり寸法がφ3mmの10%変化する、**結果として荷重、反力がレンジで20%以上変化する。**

製品の硬度が必ずしも解析用データと一致していない場合もあり、硬度の確認が必要です。



E'	E''	E [*]		tanδ	
		dyn/cm ²	Mpa		
0	5570729890	743106811.9	3570.372699	743.088119	2.10E-02
8	3527055108	751083276.4	3527.05511	75.10832764	2.13E-02
6	34897518992	752920917.1	3489.751899	75.29209171	0.2215762
8	34594712071	754937770.5	3459.47387	76.4937705	2.21E-02
5	34111921122	776107312.5	3411.192112	77.61073125	2.28E-02
19	33844222791	807704583.2	3384.422279	80.77045832	2.40E-02
18	33231289185	847751111.8	3323.128916	84.77511118	2.35E-02
9	32753948742	914427373	3275.394874	91.4427373	2.79E-02
6	32317567830	975894528	3231.756783	97.5894528	3.02E-02
9	31780274223	1151192735	3178.027422	115.1192735	3.52E-02
5	31627693098	1301872095	3162.769309	130.1872095	4.20E-02
8	29680742635	1714212482	2968.074264	171.4212482	5.78E-02
6	28909097883	2277739100	2890.909788	227.77391	6.13E-02
6	2583940206	2051183359	2583.940221	205.1183359	0.1100483
2	23034128867	4010170843	2303.412887	401.0170843	0.1749983
9	19378702499	5018465738	1937.87029	501.8465738	0.2590082
8	15896390557	5726548048	1589.639056	572.6548048	0.3600711
-65.85	12390293813	5962023740	1239.029381	596.202374	0.4811854
-64.05	8830354658	5511401049	883.0354658	551.1401049	0.8241426
-62	5434000390	4315745088	543.400039	431.5745088	0.768745
-60	3410186510	3103174246	341.018651	310.3174246	0.8058329
-58	2076932783	2002758297	207.6932783	200.2758297	0.8642865
-56	1543999006	1361884101	154.3999006	136.1884101	0.9192762



周波数の場合もあり

ニノ宮の式

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

となりマスターカーブを描きます

ここから解析に必要な粘弾性データを定義、解析に使用します。

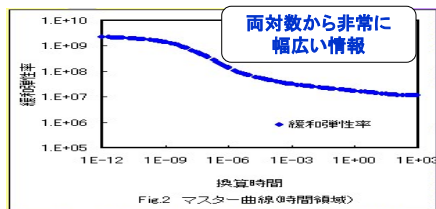
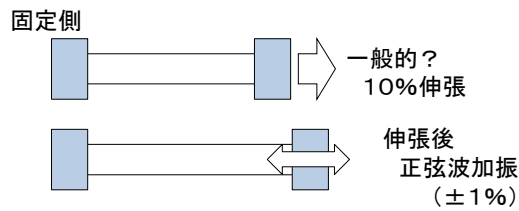
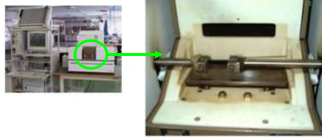


Fig.2 マスター 曲線 (時間領域)

測定からマスターカーブを作成するポイント

粘弾性スペクトロメータ



実際には、10%±1%、10%±2%
20%±1% など、測定値が異なる。
(非線形性による)

三ノ宮の式

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

[解釈] (大学での指導時の失敗から)

$$E'(\omega) \cdots \omega=10\text{Hzとする}$$

$$0.4E''(0.4\omega) \cdots 0.4\omega=4\text{Hz}$$

ここで10Hzデータを使用する間違い発生

$$0.14E''(10\omega) \cdots 10\omega=100\text{Hz データ}$$

それぞれ間違いないように加算して
マスターカーブを作成する。

実際の解析定義

実際の解析 下記の2つをセットで定義

超弾性定義 + 粘弾性解析

(MARCの例) 超弾性域

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

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

※参考) Ogden式など、ソフトにより異なる。

$$U \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{e\ell} - 1)^{2i} \\ \mu \Leftrightarrow 2\mu, \alpha \Leftrightarrow \alpha 2 \text{として異なる定義}$$

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

\$	Gi	zi
6.41287E+01	1.06103E-16	
4.58441E+01	3.18310E-15	
9.53423E+01	3.18310E-14	
1.07747E+02	3.18310E-13	
5.61585E+01	3.18310E-12	
1.23412E+09	3.18310E-11	
2.06789E+02	1.59155E-10	
1.23302E+02	1.59155E-09	
1.76626E+01	1.59155E-08	
3.31088E+00	1.59155E-07	
1.36125E+00	1.59155E-06	
4.04600E-01	1.59155E-05	
2.54515E-01	1.59155E-04	
1.14842E-01	1.59155E-03	
2.24781E-02	1.59155E-02	
1.35803E-01	1.59155E-01	

実際に、測定結果から剛性+緩和係数で定義できる。
しかし、定義は完了したが、解析の精度は……？

幅広いデータが必要
WLF則の活用

二ノ宮の式

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

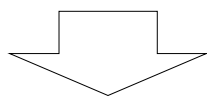
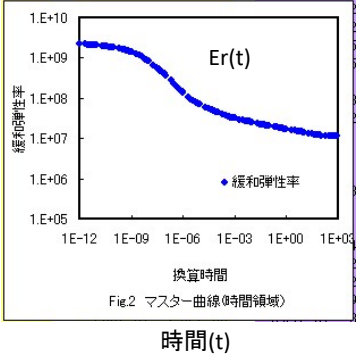
となりマスターカーブを描きます

解釈

$E'(\omega)$ に対して、第2項は $E''(0.4\omega)$ は、
例えば $\omega = 10\text{Hz}$ とすると、 0.40 を乗じて、 4Hz

マスターカーブが $0.4\omega \sim 10\omega$ (25倍の領域のはば広いデータが必要)
しかし、粘弾性スペクトロメータの測定機器の限界がある。

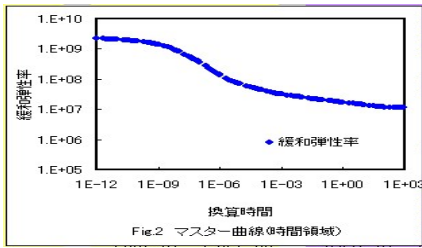
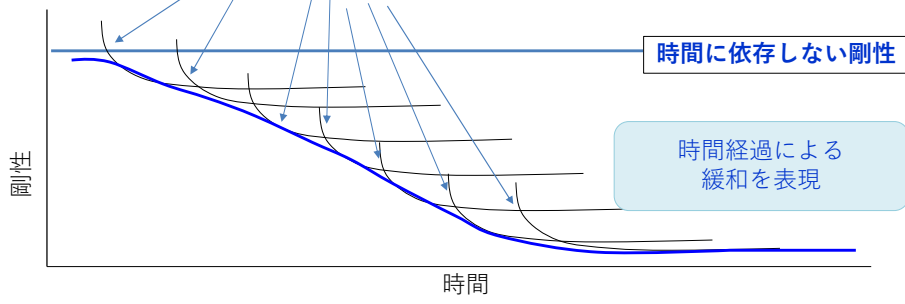
WLF則、時間温度換算則によるシフトで周波数帯の幅を広げることができます。



粘弾性データの定義方法

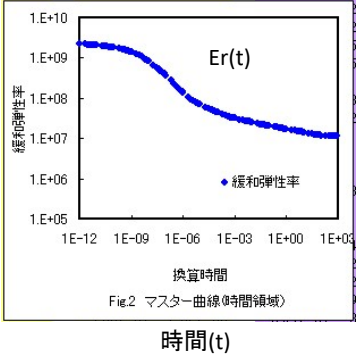
$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \sum_{i=1}^N E_i e^{-t/\tau_i} + \varepsilon(t) E_e$$

それぞれ $E_i \cdot \exp(-t/\tau)$
の式で緩和



幅広いデータが必要
WLF則の活用

二ノ宮の式
 $E_r(t) = E'(\omega) - 0.40E''(0.4\omega) + 0.14E''(10\omega)$
 となりマスターカーブを描きます

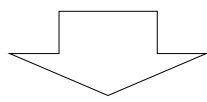


解釈

$E'(\omega)$ に対して、第2項は $E''(0.4\omega)$ は、
 例えば $\omega = 10\text{Hz}$ とすると、 0.4ω を乗じて、 4Hz

マスターカーブが $0.4\omega \sim 10\omega$ (25倍の領域のはば広いデータが必要)
 しかし、粘弾性スペクトロメータの測定機器の限界がある。

WLF則、時間温度換算則によるシフトで周波数帯の幅を広げることができます。



耐久性指標の検討 文献の検証

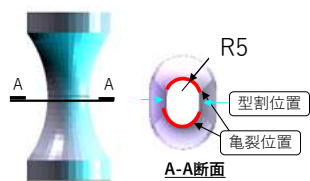
実際に、豊田合成殿の疲労寿命予測用TP作成、耐久試験を実施。

圧縮-伸張の繰り返し変位による耐久試験



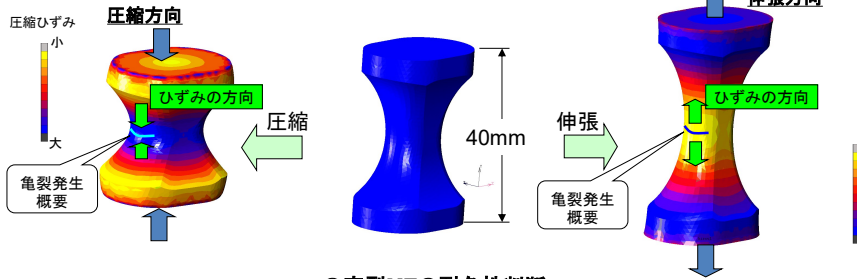
1. 亀裂は、圧縮-伸張ひずみの方向に直行して発生する。
 即ち、ひずみの方向に直行して亀裂が発生する。
2. 断面形状を長円とすることで、亀裂位置に金型のパーティションの影響のないTPを作成する。

亀裂の方向は、発生するひずみと直行方向に発生する。

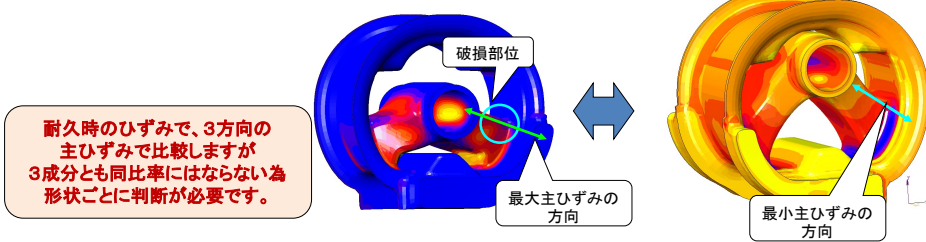


亀裂はひずみに直行方向に発生する

圧縮-伸張の繰り返し変位による耐久試験



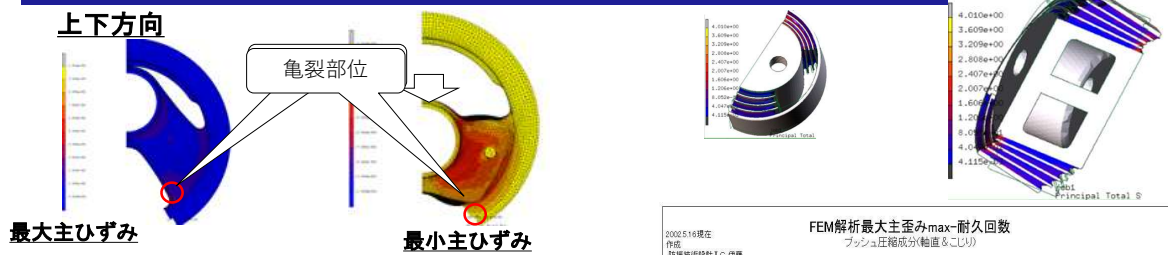
ハの字型MTの耐久性判断



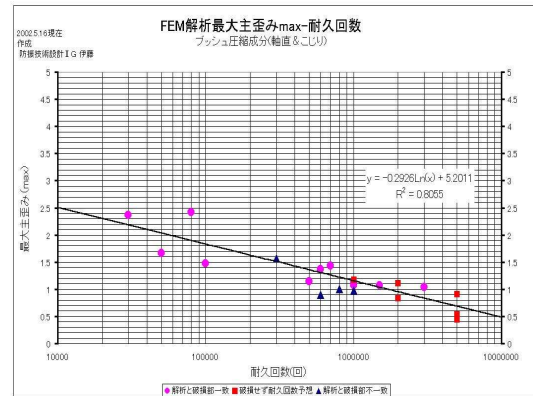
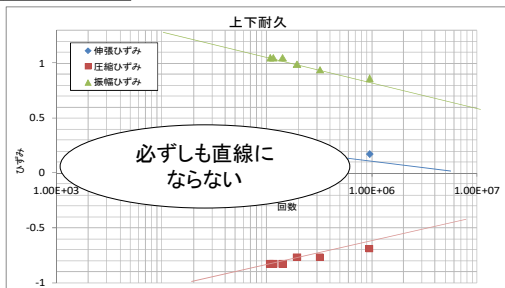
必ずひずみの方向に直行して亀裂が発生する/金属と同様

実際の例

ハの字型MYの耐久試験結果



製品ε-N線図



金属の耐久性・見方確立 ⇒ 材料ごとに許容範囲
最大主応力説。ほか

ゴムはひずみでみるが、どのように見るか
・材料 形状 変形状態ごとに分類 ⇒統一の見方出来ない

金属も正確にはできていない？ 安全率掛けて???
そういう意味では安全率が掛けて同じ程度の予測になる？

一方向のひずみで判断できない。

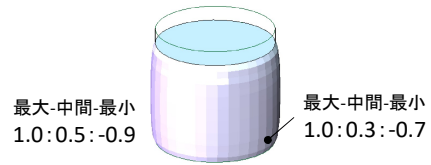
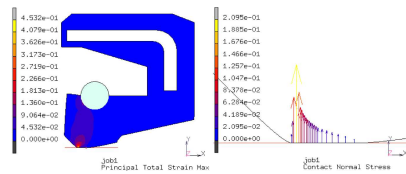
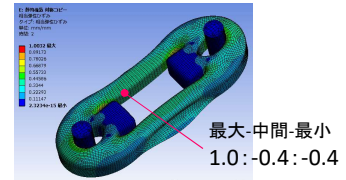
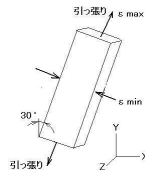
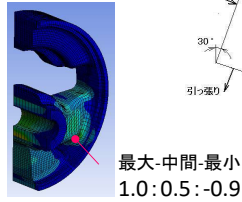
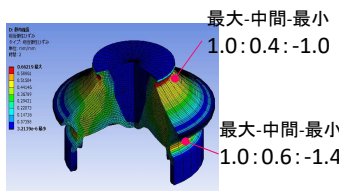
特性予測同様、製品ごとにひずみ成分が異なる。

耐久性予測トライ 製品ひずみ (E_{max}, E_{min}, E_{mid})

$$\epsilon_{TP} = (A (E_{max} - E_{mid})^2 + B (E_{mid} - E_{min})^2 + C (E_{max} - E_{min})^2)^{0.5}$$

として関連付け？

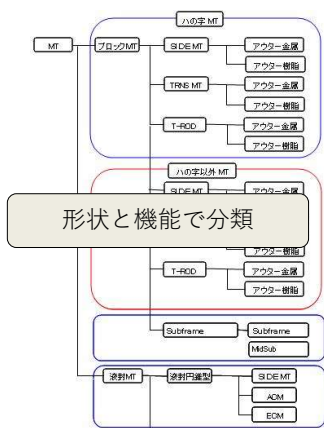
最大-中間-最小主ひずみ成分 は製品ごとにまちまち



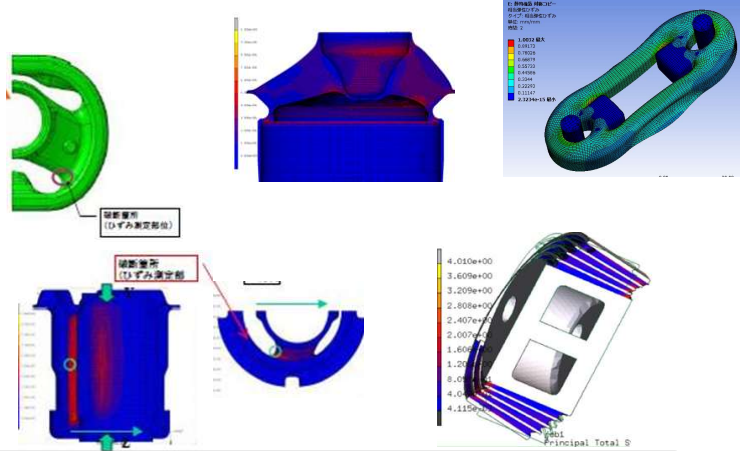
現状 実用的かつ先端耐久予測手法

残念ながらすべての形状に適用できる線図はない・・・と思う。

耐久 ε-N線図構築



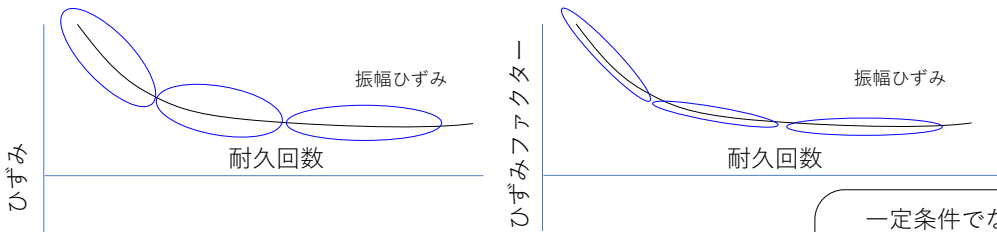
形状と機能で分類



形状ごと、変形状態ごとに分類して構築/幸いスペックの決め方が同じ

実務的な耐久ばらつき補正

1) 耐久性は応力で評価してはいけない



耐久ばらつき
ひずみ ϵ / 破断伸び E_b \Rightarrow ばらつき補正

究極の耐久性は、1回。 \Leftrightarrow 破断伸び E_b に達すると壊れる。
 $\epsilon \Rightarrow E_b$ の場合、 $E_b/E_b = 1$ という考え方。

ひずみ ϵ をひずみファクター $F = \epsilon/E_b$ に置き換えるとばらつきが小さく
ゴム材料の実力により、耐久性のばらつきは少なからず存在する。

一定条件でないサイクル耐久試験

[https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%96%B2%E5%8A%B4_\(%E6%9D%90%E%96%9D\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%96%B2%E5%8A%B4_(%E6%9D%90%E%96%9D))

ワイヤメカニクス 疲労 (材料)

疲労応力 [編集]

材料に負荷する応力が一定ではなく、時間に対して変動することによって引き起こされる破断^[注]。そのような疲労応力が発生させる荷重を疲労荷重 (fatigue loading) または変動荷重^[注]。外荷重が変動しなくても、このような繰り返し応力の疲労応力は発生し得るので注意が必要。材料に温度変化が発生する場合は熱応力による疲労破断が発生する可能性がある。

繰返し応力 [編集]

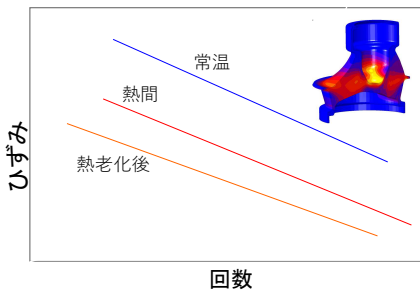
疲労を引き起こす応力の中で、応力振幅、平均応力が一定の周期的な応力を繰返し応力 (repeat force) を引き起こす荷重を繰返し荷重と呼ぶ^[注]。疲労の試験では実際の容易さのため、繰返し応力を与えて材料の疲労特性を試験することが多い。このような繰り返し応力を受ける実際の機械荷重を支えて走行する車輪などがある。以下に繰返し応力の重要因子を示す。

- σ_{max} : 最大応力
- σ_{min} : 最小応力
- $\Delta\sigma$: 応力範囲 ($=\sigma_{max} - \sigma_{min}$)
- σ_a : 応力振幅 ($=\Delta\sigma/2$)
- σ_m : 平均応力 ($=(\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$)
- R : 応力比 ($=\sigma_{min} / \sigma_{max}$)
- N : 繰返し数
- f : 周波数

特に、 $R = -1$ のときを繰返し応力、 $R = 0$ のときを片振り引張応力、 $R = -\infty$ のときを片振り

熱老化・劣化耐久性予測

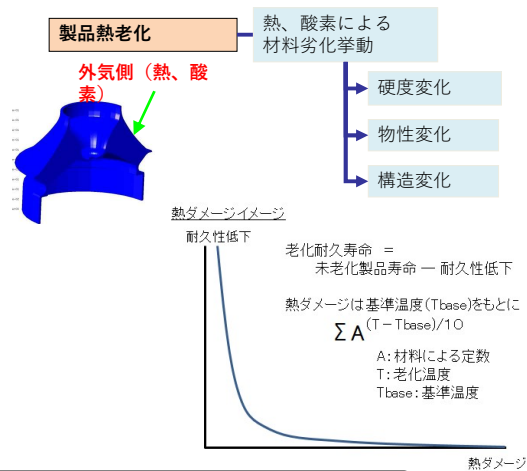
耐久 ϵ -N 線図イメージ



熱老化耐久予測 = (通常の) 耐久予測 + 老化・劣化予測 として・・・

熱劣化-劣化の考え方

<アプローチ>



熱老化なしの状態での ϵ -N 線図に対して、物性変化・耐久ダウン率の補正を行い、耐久回数の予測を行う。

いろいろな落とし穴

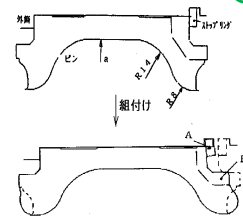
測定の失敗事例

解析、測定の失敗を知る
 ⇒ 正確なひずみ
 (変形が正しくなければひずみも正しくない)

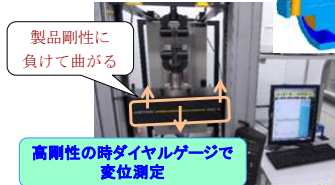
組付け時の金具の変形



Vロッド製品概要



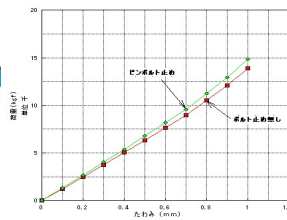
試験機剛性
 ゴムは柔らかいと・・・



製品剛性に負けて曲がる

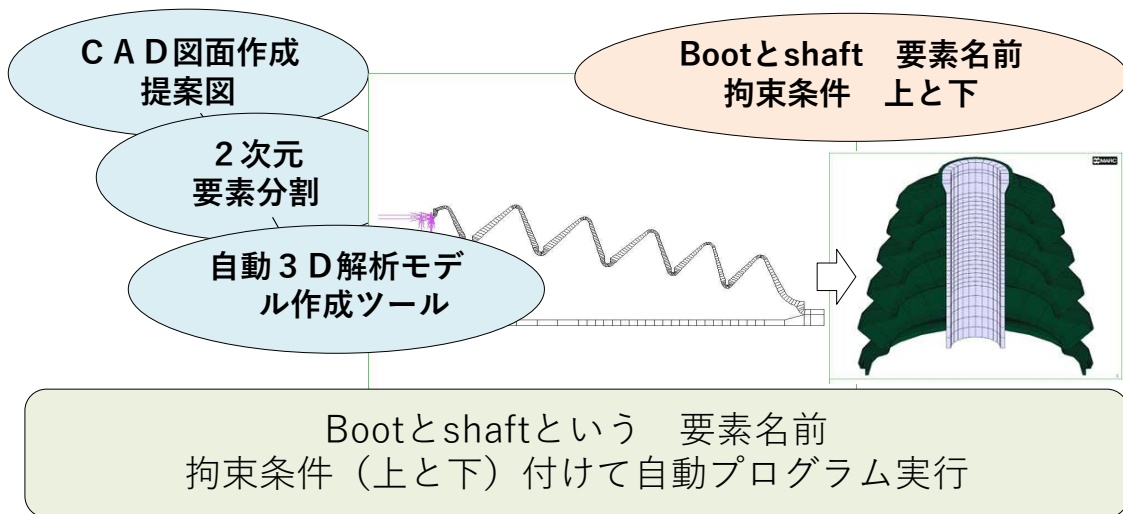
高剛性の時ダイヤルゲージで変位測定

写真提供：富山県生活工学研究所提供



ボルト止め 有り 無し
 ばね(ton/mm) 13.6 12.6
 誤差 7.5%

F E M解析の自動化の流れ



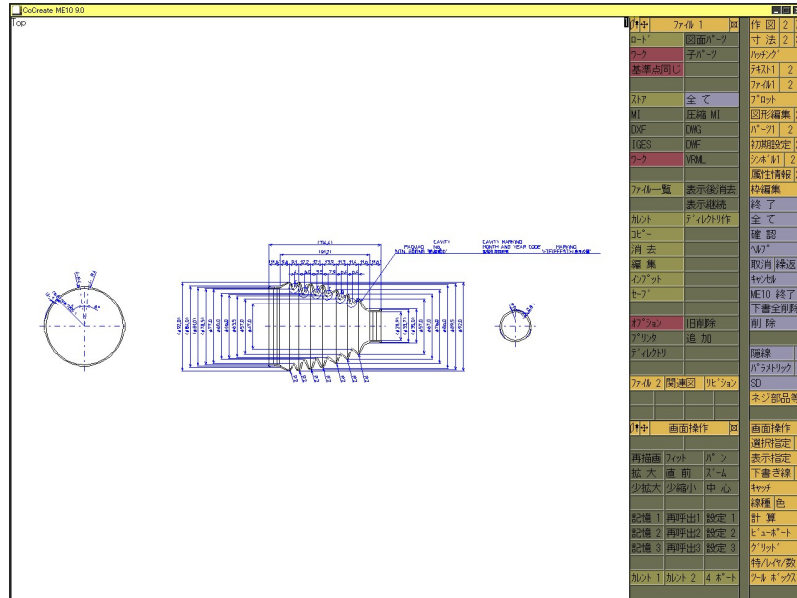
CADの自動化
1分で描画

MACROの実行

解析の効率化

MACRO
実行例)

コマンド



効率化施策 成功させるには

1) CADの自動化

実用面で考えると、

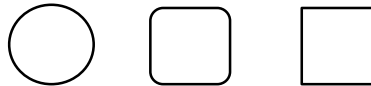
・製品群後毎 ・影響の大きいところから

⇒ 如何にまとめるかがカギとなる。

類似ですよ

半径 = 正方形の1辺の長さ / 2 ⇒ 円

フィレットRの大きさをゼロにすれば ⇒ 正方形



CAD言語の理解から設計検討資料とのリンクで自動化可能。

・費用対効果

適用範囲をどれだけ増やせるか、工数を減らせるか。

自動化手順概要

[設計が検討する寸法関係]

1層	1.5	1.5
2層	1.75	1.75
4層	2.25	2.25
8層	2.75	2.75
1層	1	1
2層	1.5	1.5
4層	1.5	1.5
8層	1.5	1.5

設計者が必ず行う
検討シートを利用します。

[EXCELシートを追加して寸法抽出&算出]

描画自動プロット
直行性の計算など
プログラム作成します。

[CAD言語との合体 マクロ]

	A	B	C	D	E	F	G	H
110	LET	LDI2	(PNT_XY	14.05	0)			
111	LET	LE1	(PNT_XY	-11.91	11.91949)			
112	LET	LE2	(PNT_XY	-12.2622	11.55688)			
113	LET	LE3	(PNT_XY	-11.3445	11.33358)			
114	LET	LE4	(PNT_XY	-14.8787	14.8802)			
115	LET	LE5	(PNT_XY	5.17817	19.3192)			
116	LET	OS	(PNT_XY	120	150)			
117	LET	O4	(PNT_XY	120	-100)			
118	LET	LE31	(PNT_XY	0	20.85)			
119	LET	LE32	(PNT_XY	0	-20.85)			
120	LET	LE33	(PNT_XY	-20.85	0)			
121	LET	LE34	(PNT_XY	20.85	0)			
122	LET	LE35	(PNT_XY	0	16.05)			
123	LET	LE36	(PNT_XY	-13.90184	-8.02131)			
124	LET	LE7	(PNT_XY	13.90184	-8.02131)			
125	ARC	WHITE	SOLID	THREE_PTS	LA1	LA3	LA2	
126	ARC	WHITE	SOLID	THREE_PTS	LA3	LA1	LA4	
127	ARC	WHITE	SOLID	THREE_PTS	LA3	LA1	LA4	

次のシートで
CAD言語と座標情報合体

CADの描画コマンド
LINE ARC CIRCLEなど
座標を引き取ります。

これらをマクロコマンドとして実施。

その他の
効率化

リバースエンジニアリング：等速ジョイントブーツ

解析結果から3D-CAD作成の自動化

FEM解析結果のメッシュ

自動スプライン

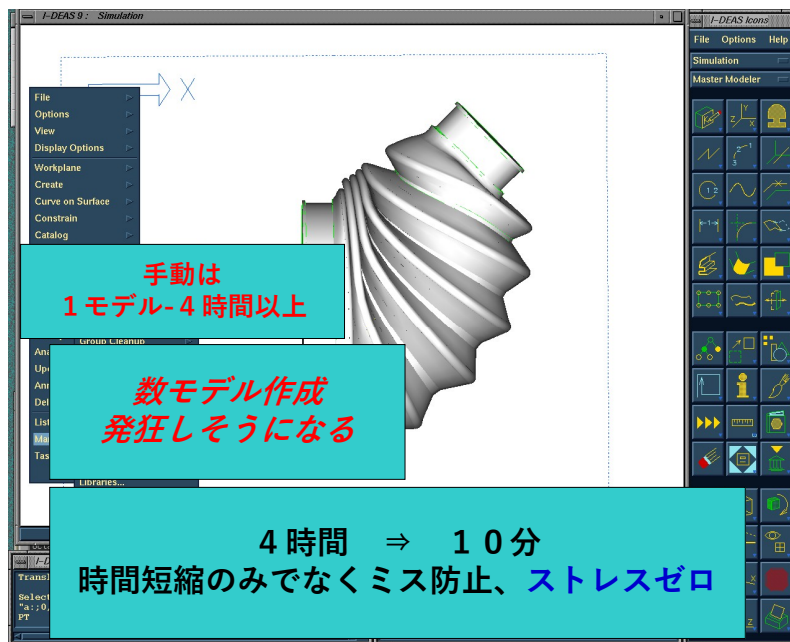
表面にサーフェスを貼り
10MB程度のモデル

手動は
1モデル-4時間以上

数モデル作成
発狂しそうになる

4時間 ⇒ 10分
時間短縮のみでなくミス防止、
ストレスゼロ

結果処理→3D-CADの自動化



181

自動化の効果

自動化は工数削減だけではない

①工数削減

90%以上の工数削減可能

ブーツのCAD: 自力作成 費用は授業料+親睦会費 (約50万円)
6パターンの見積もり 42,000千円(今の価格不明)

②ミス防止、ストレス軽減

⇒忙しくなると凡ミスも増える

初心者でも同じ品質の作図、解析が可能

③考える時間の捻出

⇒単純作業時間を削減、より深く考える時間の創出

手順書、教育のシステム化から
スキルアップ、裾野知識を広げ開発に役立つ

作成方法
例 弧を描く

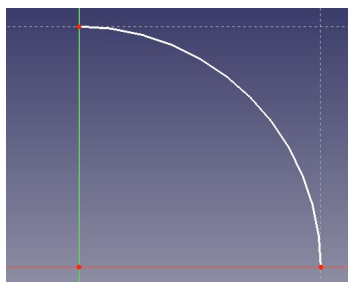
E:\D Dir¥0020技術資料2019(整理要-INDEX作成)¥FreeCADマニュアル¥自動化ツールz¥aa1.FCMacro

```
App.ActiveDocument.Sketch.addGeometry(Part.ArcOfCircle(Part.Circle(App.Vector(0,0,1),
0,0,1),10.02213),(0.000000,1.570796),False)
# Macro/End: C:\User\¥kaiken¥Desktop¥aa.FCMacro
```

半径 始点角 終点角

円弧の作成

中心座標

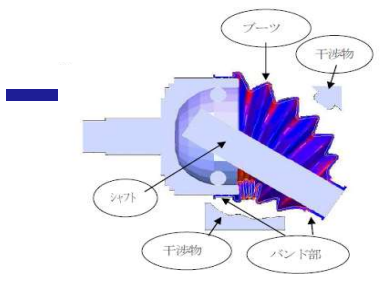
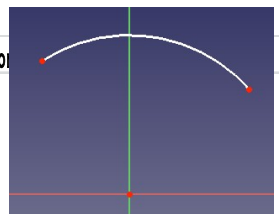


中心座標 (mm)	始点角 (deg)	終点角 (deg)
x	0	45
y	0	120
z	0	半径(mm) 15

```
App.ActiveDocument.Sketch.addGeometry(Part.ArcOfCircle(Part.Circle(App.Vector(
0,0,1),0,0,0),App.Vector(0,0,1),15),0.785,2.093),False)
```

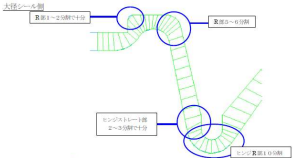
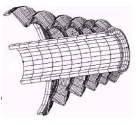
```
App.ActiveDocument.Sketch.addGeometry(Part.ArcOfCircle(Part.Circle(App.Vector(
```

&

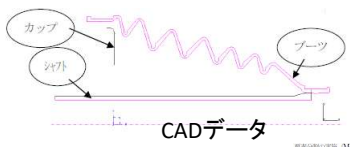


このような干渉チェックも簡単に開発者が実施できます。

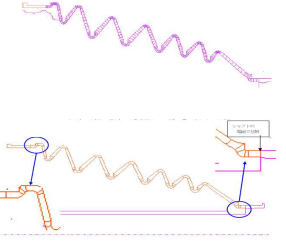
F 境界条件の指定
④の(A)の2-0条件部(カット面)に指定
プログラム終了後、この条件が設定できる位置にモデルが置かれる。
BOUNDARY CONDITION
-MECHANICAL
-FIXED DISPLACEMENT
-NODE -ADD
-Enter node_list = 1/2面目の
NODEを全て選択する。
(参照ファイル: ep902.nam4 参照)



効率化、自動化支援



要素分割の指定 (Meshing)
元の図面を行った面、要素の形状を定義し、適切な分割を実施する。
Meshing Task -> Define (ここ、分割の位置 (面)を分割する面を指定)
面を1/2面で行う場合は、ALLではなく指定の面番号以上の面を選択して指定する。
-> Elements -> 面を選択
0/2面で行う場合は、ALLではなく指定の面番号以上の面を選択して指定する。
-> Done
要素分割の指定、次のようになる。詳細は図面を参照する。



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に対応します
- 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
第2弾 間もなく発売/粘弾性・熱・耐久性加えて

寺子屋/CAE解援隊

連絡先 haji@terakoya2018.com