

スライドショーから再生で音声もあります

これを知れば、これさえ守れば **魔法のようにゴムの解析がうまくいく**

**ゴムの解析は簡単です**  
基本を覚え、ゴムを知れば予測精度は格段に上がります。

YouTubeのため、短時間で表現  
詳細はお問合せ下さい

**無料セミナー（50分程度）順次開催予定です。**

2022年9月23日（金）

寺子屋 萩本 光広

寺子屋/CAE解援隊

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

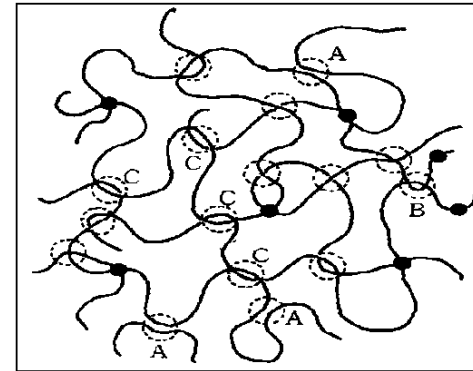


# ゴムの基本から解析方法、材料について



● 架橋点  
A, B, C 分子間力

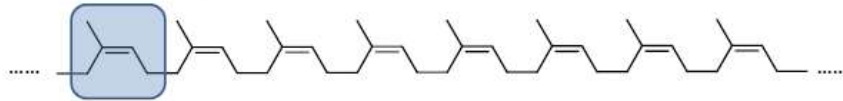
## ゴムの分子鎖構造概念



## ゴムの分子鎖構造概念

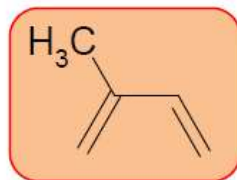
### 天然ゴムの構造

### 高分子構造



Z-配置の二重結合を含むポリマー  
これがらせん状に巻いた構造をとり、  
ばねのように伸び縮みする

下図のような $C_5H_8$ ユニット(イソプレン)  
のポリマーである

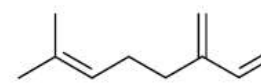


イソプレン  
2-メチル-1,3-ブタジエン



## 香水の原料/学生時代論文

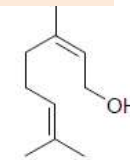
### モノテルペン



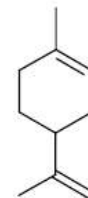
ミルセン(月桂樹、松など)



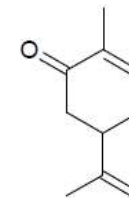
リナロール  
(ラベンダーなど)



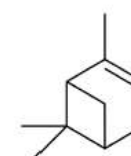
ネロール  
(ダイダイなど)



リモネン  
(柑橘類)



カルボン  
(スペアミント)



α-ピネン  
(松など)



カンファー  
(クスノキ)

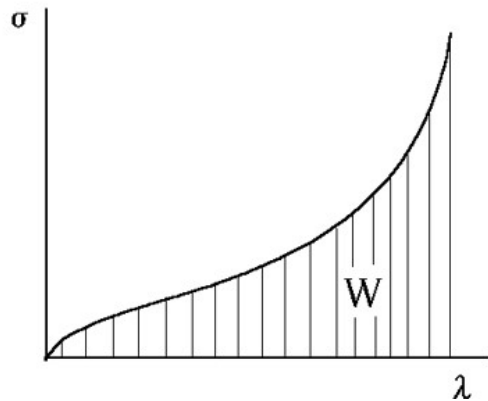
快い香りのものが多い



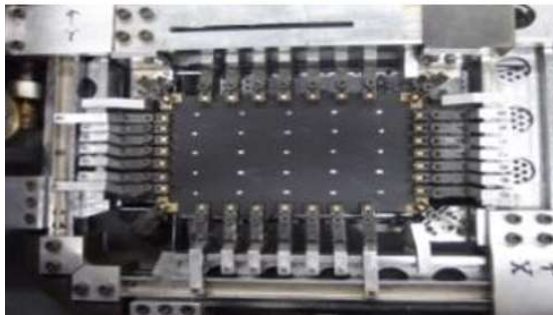
# ひずみエネルギー密度関数定義

基本式

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



基本は単軸と同じ、へたり補正



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

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

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

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

5) Arruda-Boyce

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

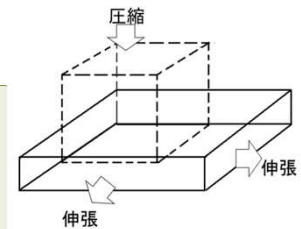
$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad \text{[対角線効果]}$$

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

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

※ $I_3=1$ は非圧縮性

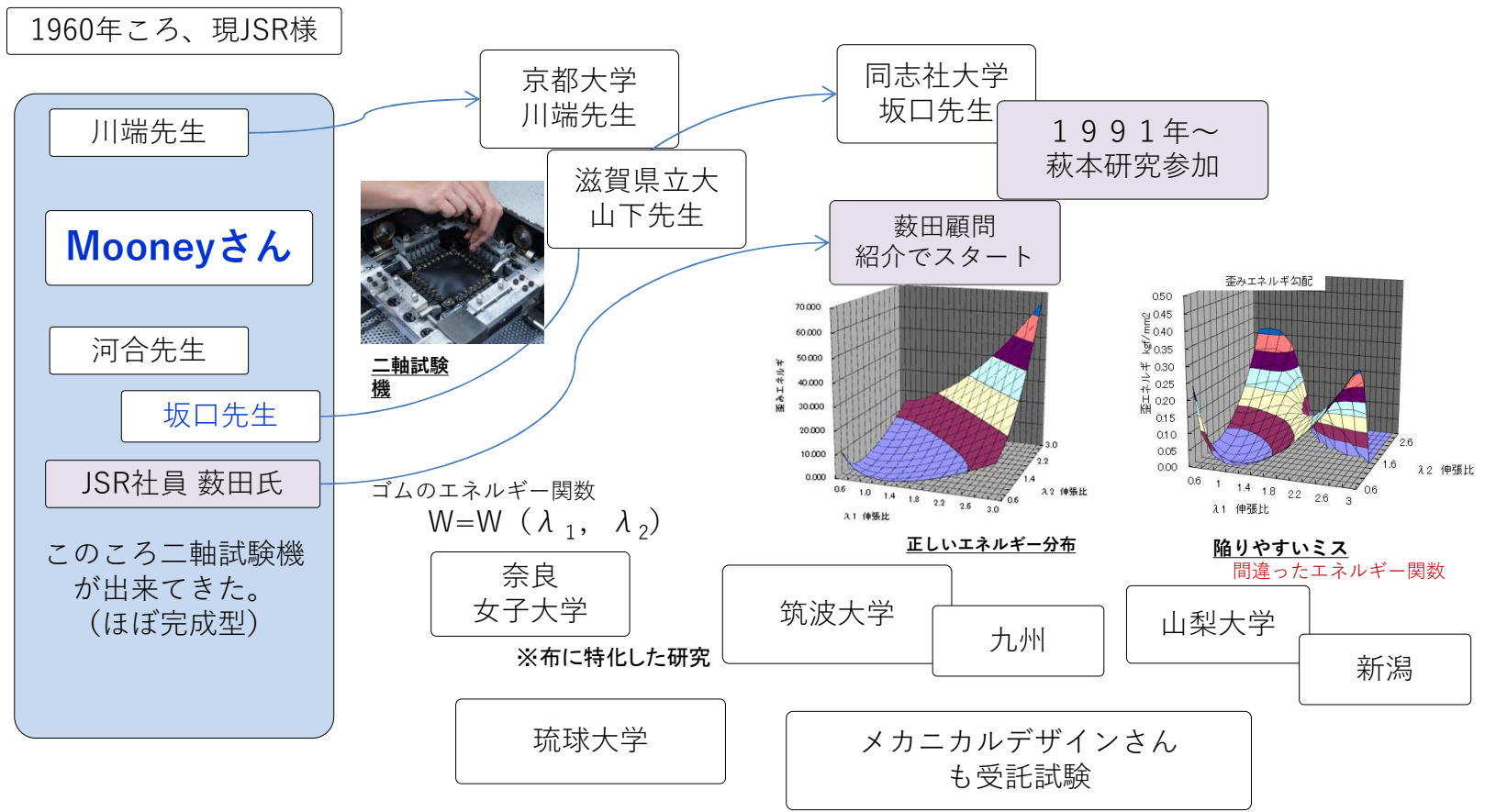
最近、紛らわしい論文(圧縮性を示す誤り)



一般的にこれら定義で解析予測精度が良いと言われる。



# ゴムのエネルギー密度関数の研究マップ



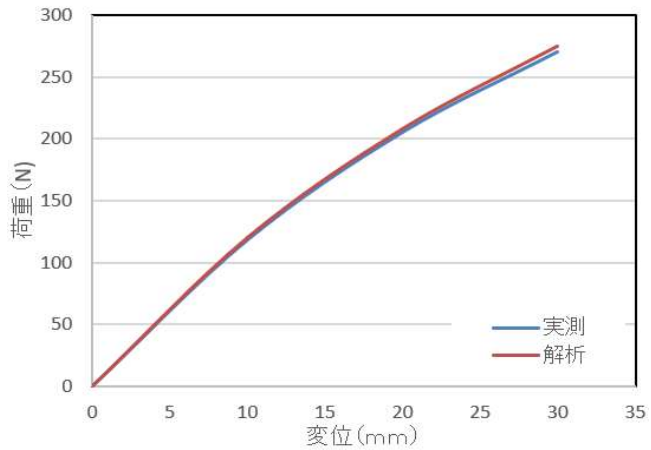
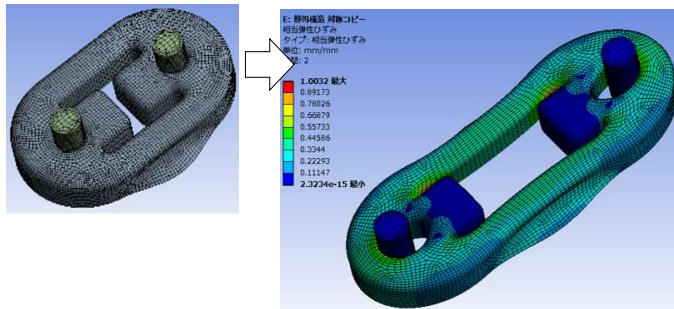
最近、ゴムを研究する方が減少しています。難しいことと成果が上がりにくいので・・・



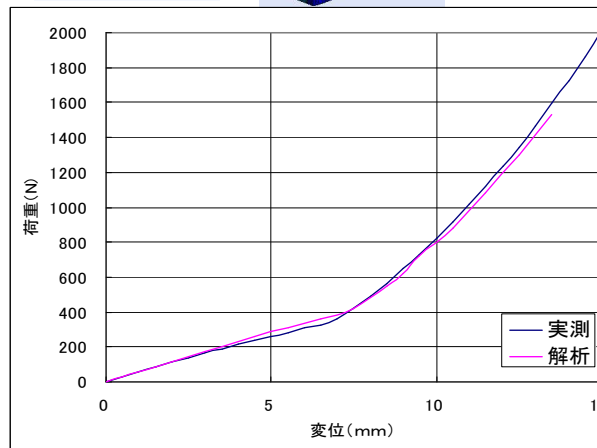
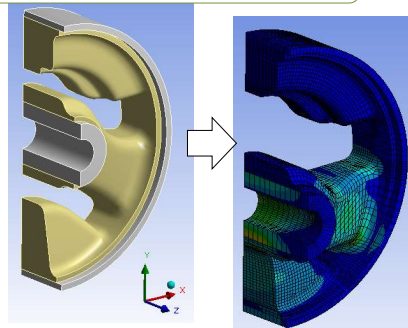
# ひずみエネルギー密度関数定義すると

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

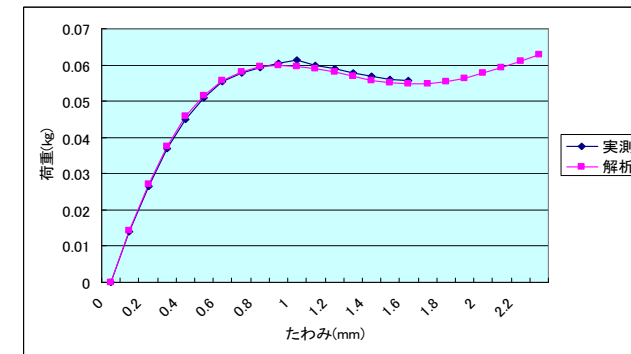
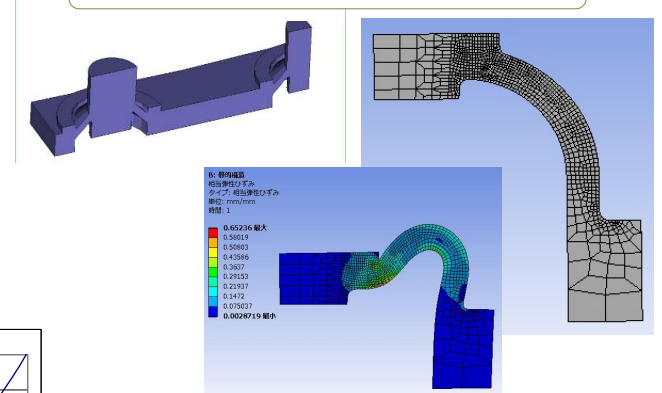
## マフラーマウントの変形解析



## ハの字型マウントの変形解析



## ラバーコンタクトの変形解析



実測と解析予測が重なるくらいに良く一致(良好)

ひずみエネルギー関数を定義すると非常に良好ですが...

# 簡単な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の表現式

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

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

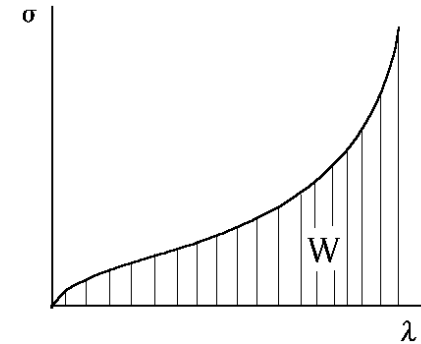
$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad \text{[面積効果]}$$

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

1) Neo-Hookeanモデル

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad \dots \quad \text{最も単純な材料表現}$$

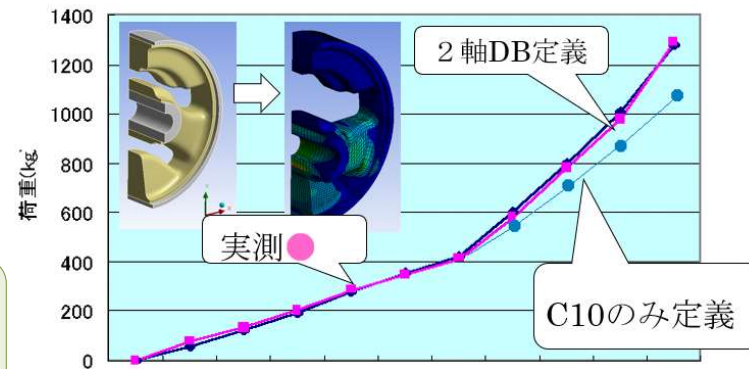
$$C_{10} = E/6 \quad \text{の関係}$$



エネルギー関数定義すると  
非常に精度上がりますが、  
基本のヤング率=6C<sub>10</sub>でも  
ある程度の精度アップします。

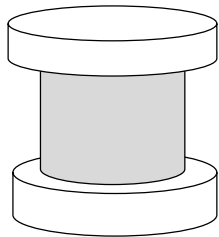
では、なぜ  
ゴムの解析は難しいといわれるのでしょうか。

ハの字型マウントの特性予測解析



## 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。

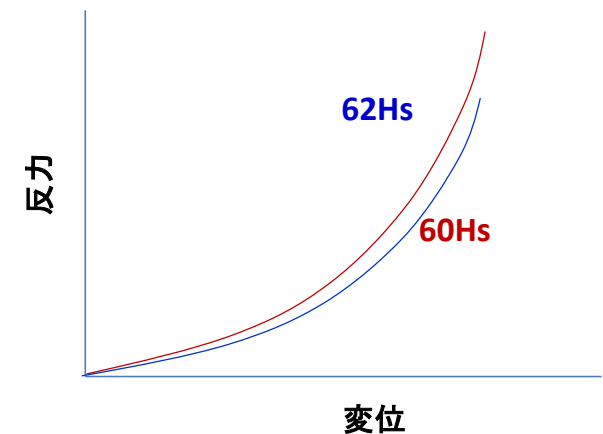
摩擦について

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.pptxorYouTube](#)

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、 $60 \pm 2$ Hs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、 $\pm 2$ Hsとは、 $-10 \sim +10\%$ の変化、レンジで20%異なります。



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。

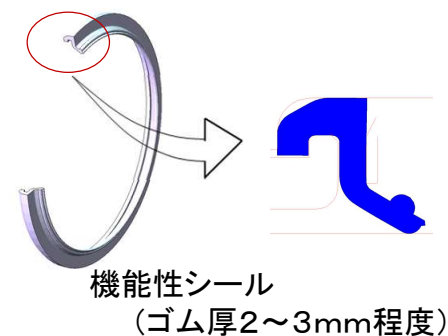
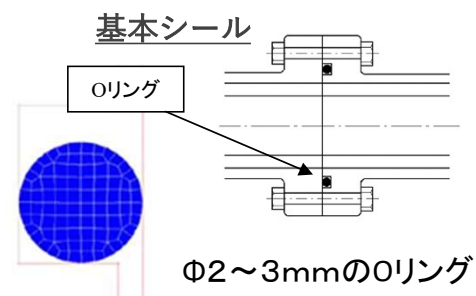
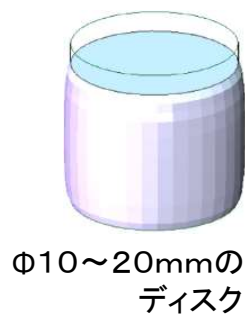


## 寸法公差

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	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.4$
3～6	$\pm 0.2$	$\pm 0.4$	$\pm 0.5$
10～18	$\pm 0.3$	$\pm 0.6$	$\pm 0.8$



2級公差が一般的です。OリングΦ3mmの製品は、 $\pm 0.3$  mm (つまりΦ2.7～3.3 mm) 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。

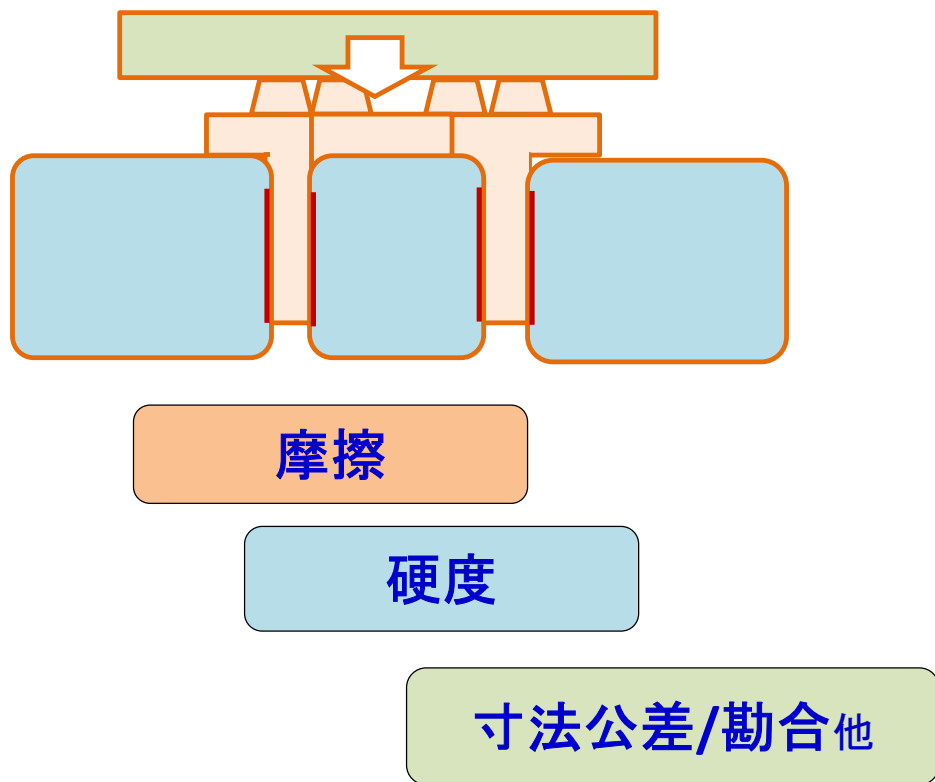
製品の硬度が必ずしも解析用データと一致していない場合もあり、硬度の確認が必要です。



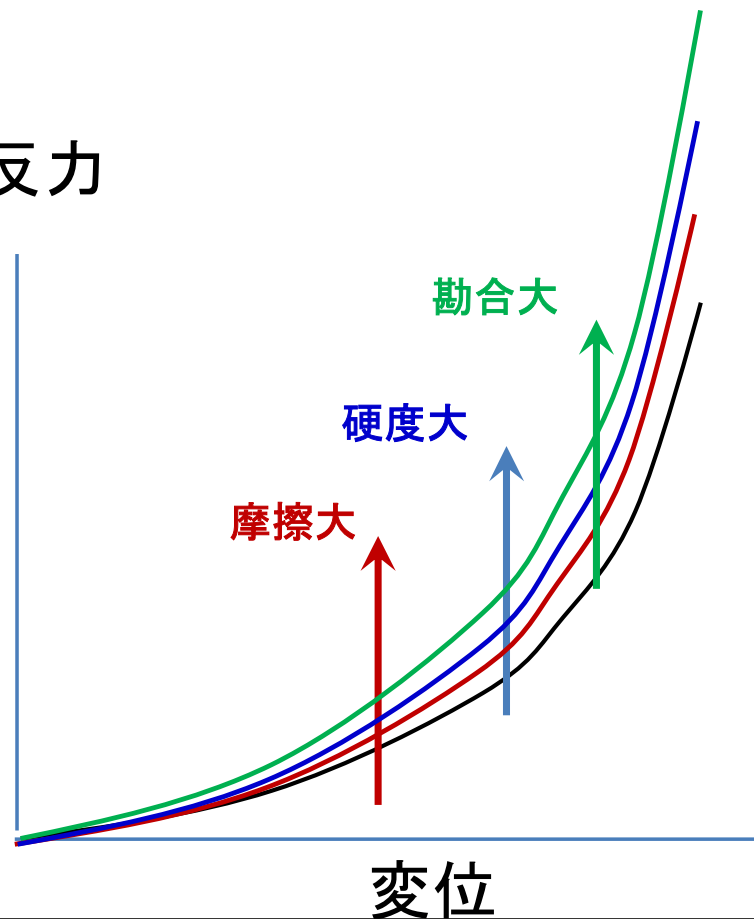


# 複合的要因

## 圧縮時の荷重



反力

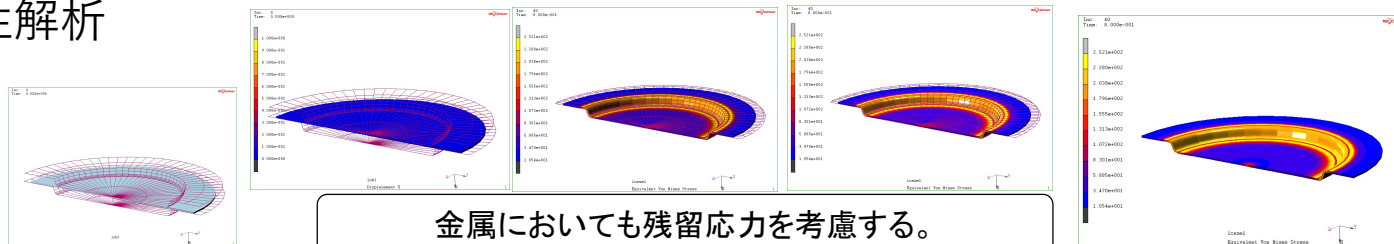


ゴムの様々なばらつきから安定品質の難しさ



金属

### 板の塑性解析



金属においても残留応力を考慮する。

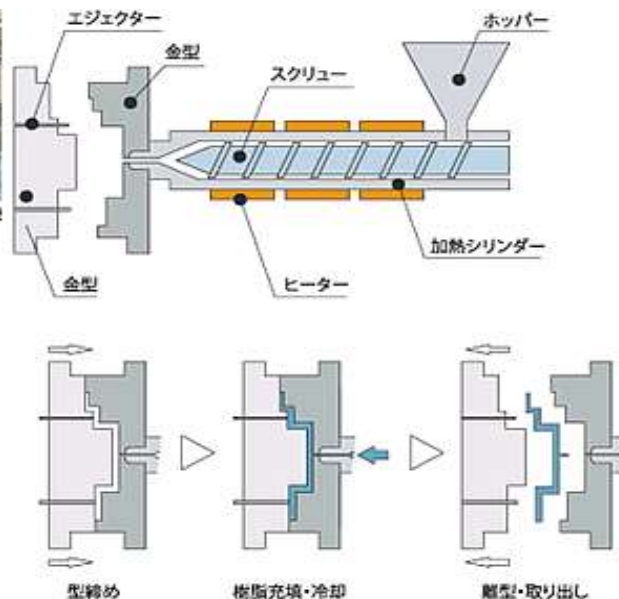
ゴム

### インジェクション成型

[http://www.krk.co.jp/tech/injection\\_molding.html](http://www.krk.co.jp/tech/injection_molding.html)



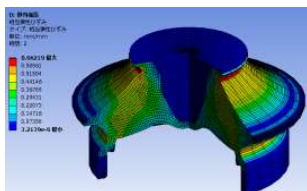
射出成型機



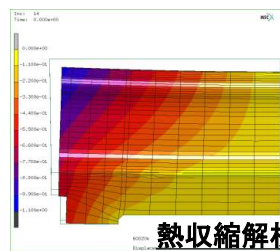
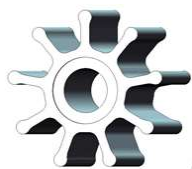
ゴムはこのように熱を加えて成型します。この影響が解析にも...

ゴムも残留応力を考慮する必要がある。

### 円錐型マウント

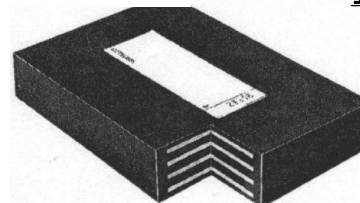


### インペラ

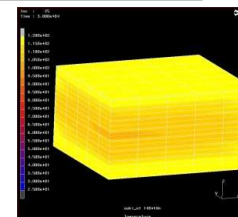


熱収縮解析

### ゴム支承

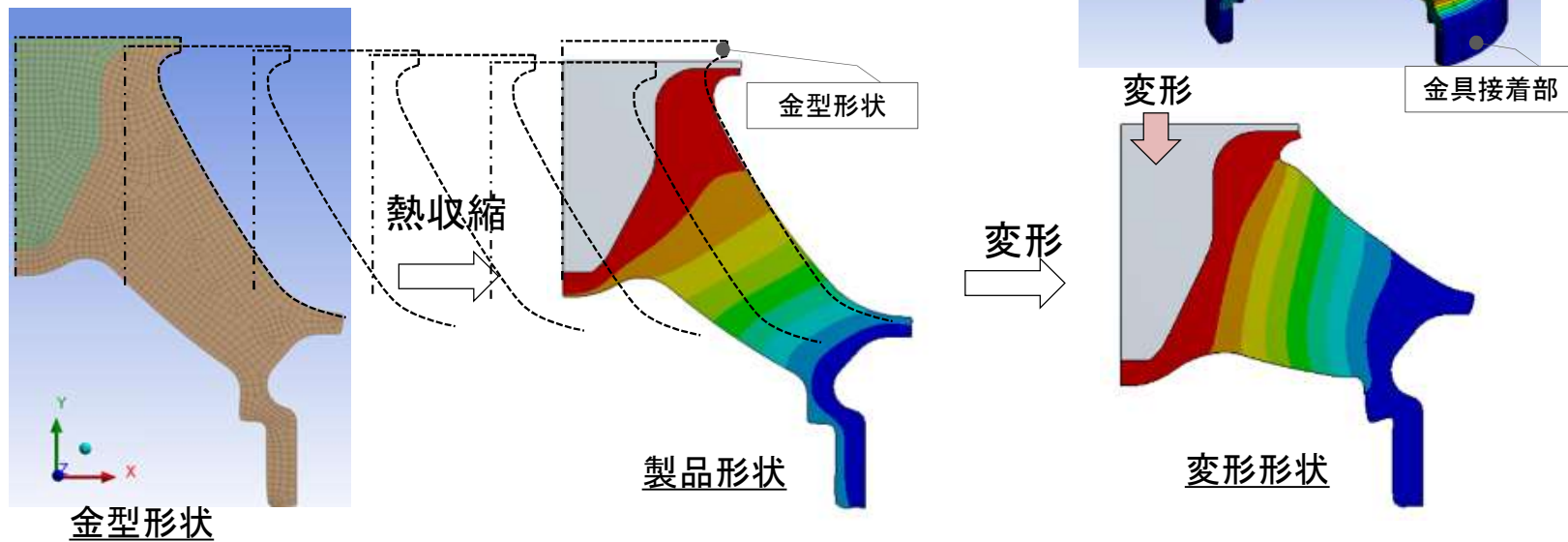


### 金型内の熱伝導解析



# ゴムの F E M 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。

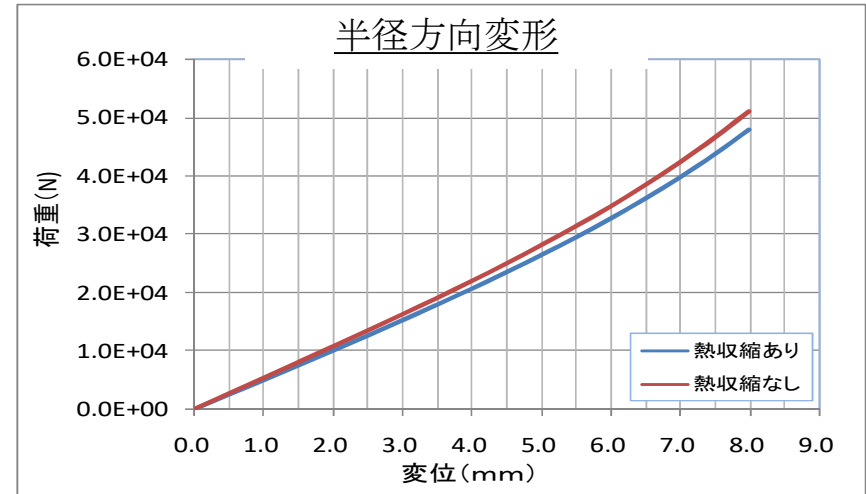
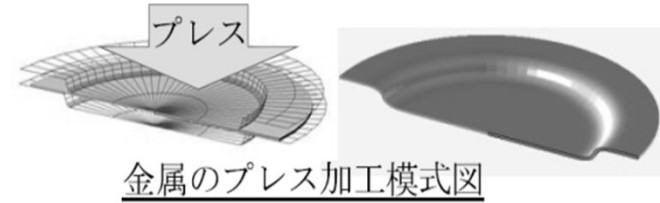


製品の加工工程を考慮することは、ゴム製品のみではなくすべての製品に当てはまります。  
金型形状 ⇒ (熱履歴)熱収縮 ⇒ 変形解析 の手順を守ること、  
解析による予測精度を格段に向上させることができます。

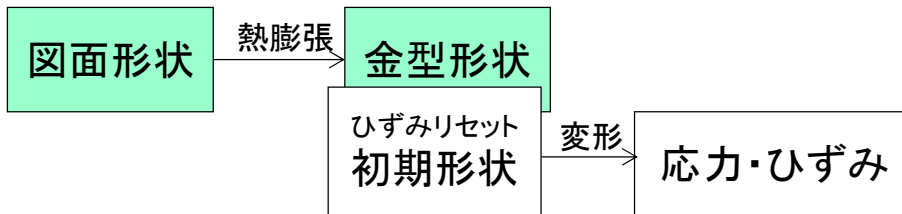


# ゴム製品の解析では、

**BUSH**

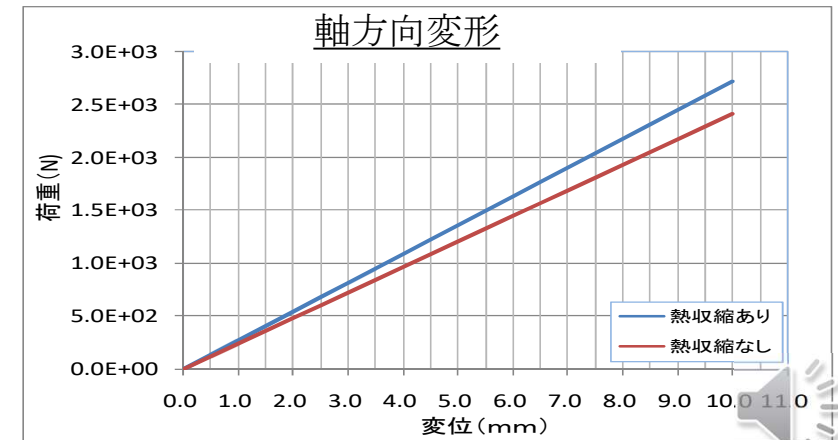


## [具体的手順]



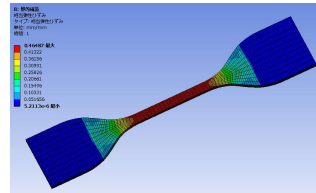
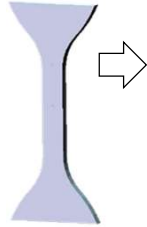
金型形状を初期形状として、熱収縮から変形解析への熱-応力連成解析とすることが基本。

**精度が格段に向上**

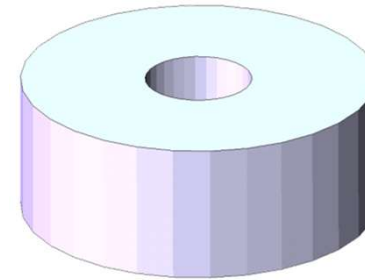
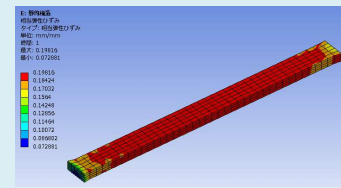
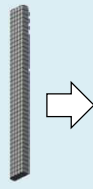


## 更に根本的な原因は、材料定義用サンプル形状

### ダンベル



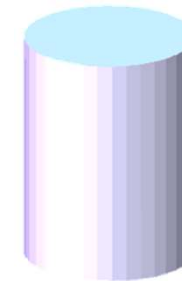
### 短冊



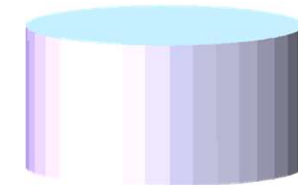
$\Phi 40 \times h 15 \text{ mm}^3$



$\Phi 10 \times h 10 \text{ mm}^3$



$\Phi 18 \times h 26 \text{ mm}^3$



$\Phi 29 \times h 12.7 \text{ mm}^3$

非線形材料なので  
ヤング率をどこで定義するかありますが

正しい材料が定義できるのは、**短冊**、二軸試験などでは **シート形状**です。

他の形状は形状率が邪魔をして、正しい値ではありません。/一般的失敗例



# ゴム材料の基本知識

金属と違いへたりをどう考えるか・・・

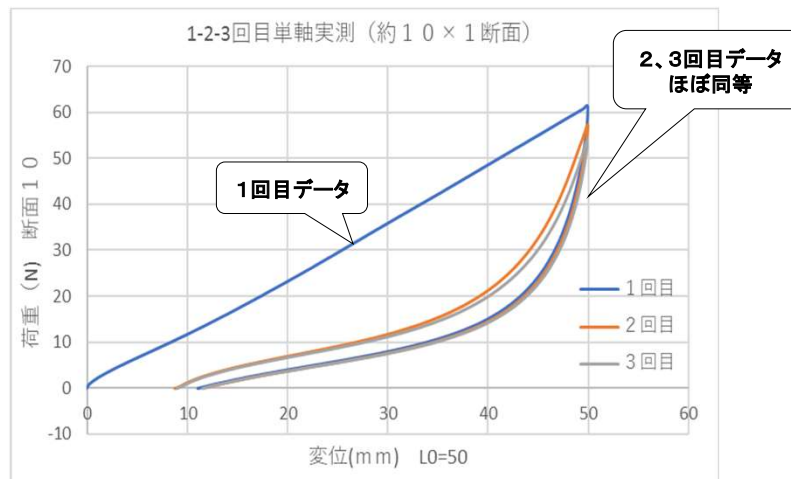
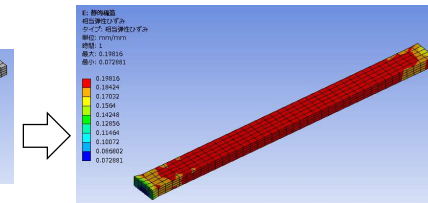
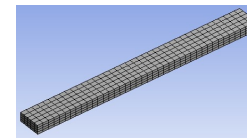
ゴムは、そのままのヤング率で定義しません

ヤング率  $E = 6 \times C10$  の関係から

最も簡単なネオフック関数  $W = C10(I1 - 3)$  で表される。

単軸試験から正確なヤング率を求めること。

短冊試験



1回目と2回目は大きく異なり、  
2回目と3回目は少し異なります。

3回目以降はほぼ重なります。

ゴムの3回の伸張データは、上記のように安定性から“3回目のデータとJISでは規定”しています。  
しかし、それだけでは解析に使うことが難しいです。/JISは解析用に定義されていません。



## 代表の個人的な 実績

### 二軸伸張試験からFEM解析予測精度の向上

1991年から同志社大学坂口一彦教授のもと  
ひずみエネルギー密度関数研究をスタート（社会人4年目）

・ゴム材料定義 ノウハウ含めて2000年MSCソフトウェアで発表  
最優秀事例発表賞を受賞 社内でも評価上がる/社外でも講師

・解析条件の定義方法及び材料定義確立から、2005年会社を移り  
ゴム製品製造の会社、2社で解析予測精度の向上  
自動化による解析工数の80%カットを行い2016年起業

#### [主な事業内容]

線形から非線形解析全般

・ 解析初心者のご指導      ・ セミナー開催、育成サポート      ・ CAD自動化、効率化のお手伝い

・ ゴムの二軸伸張試験からのエネルギー関数定義、動的、熱、疲労寿命まで

全てノウハウからご提供します。社内技術構築にもお役立てください。

寺子屋/CAE解援隊

連絡先 [hagi@terakoya2013.com](mailto:hagi@terakoya2013.com)



# 寺子屋 サポート概要

ノウハウを提供する会社です。自立して頂く・・・  
ゴムのお困りごと、何でも相談ください。

## 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

線形～大変形解析

・クリープ～応力緩和解析

・動解析

・熱・金型設計

・衝撃、落下解析

・疲労寿命/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/CAE解援隊

連絡先 [hagi@terakoya2013.com](mailto:hagi@terakoya2013.com)





1991年から同志社大学で坂口教授のもとで研究スタート、今も勉強中

ゴムの二軸伸張試験、承ります。 -ゴムの専門家として解析適用までサポートします。

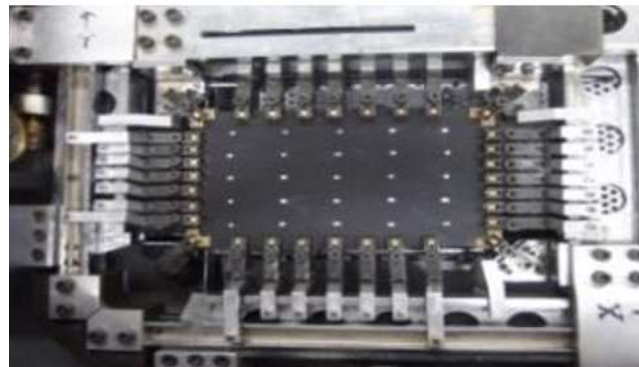
二軸伸張試験実施 ⇒ひずみエネルギー密度関数 (Mooney, Ogden等回帰、係数算出。  
$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3) (I_2 - 3) + C_{20} (I_2 - 3)^2 + C_{30} (I_2 - 3)^3$$

- ・エネルギー関数の真実、注意すべき点
- ・ゴムの解析への適用方法
- ・線形解析での間違いやすい点、その他サポート

Ogden定義も可能です。



現地（富山）の二軸試験機



サンプル取り付け部

簡易試験機



高さ80cm、重さ30kg

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

## 材料定義をご自身で修得

公共試験場を利用して  
ゴムの解析用ひずみエネルギーを構築しませんか。

- 候補日をいただければ調整します。1社4名様くらいまで -

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

※ひな型販売もしています。

2. 公共試験場ですので、安価に、（修得すれば）いつでも  
ご利用いただけます。  
アフターフォローも万全です、問い合わせに回答します。

現在、現役の試験機ですが何分、昭和生まれですので・・・  
使えるうちに覚えましょう。

お問い合わせリンク  
<https://terakoya2018.com/question>

The screenshot shows the homepage of the Toyama Prefecture Industrial Technology Research and Development Center. At the top, there is a Google search bar and navigation links for 'WWWを検索' and 'センター内を検索'. Below this is a main navigation menu with items: HOME, 技術支援 (Program), センター概要 (About), お知らせ (News), 主要設備 (Facility), 刊行物 (Publication), 研究開発 (Development), and 産業財産権 (Industrial property rights). A breadcrumb trail reads 'ホーム > 概要 > 組織・研究職員 > 生活工学研究所'. The main content area is titled '生活工学研究所' and features a large photograph of a modern industrial building. Text to the left of the photo describes the center's focus on research and development for products related to '衣' (clothing), '住' (housing), and '遊' (leisure). At the bottom of the page, contact information is provided: 〒939-1503 富山県南砺市岩武新35-1 TEL:0763-22-2141 FAX:0763-22-4... and the website URL [pref.toyama.jp](http://pref.toyama.jp).

寺子屋/CAE解援隊

URL <https://terakoya2018.com>

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

080-2230-8785

富山県産業技術研究開発センター ([pref.toyama.jp](http://pref.toyama.jp))

## 解析に使用する材料データの定義方法

# 寺子屋 サポート費用の考え方

### 材料定義から予測精度の向上

#### 材料定義

- ・ 富山での修得、自力定義 20万円～  
※自力で定義することにより追加材料費用は試験機使用料のみ。
- ・ 委託定義 2材料程度 35万円～  
粘弾性、スポンジなどは別途追加費用

#### 解析の見直し

- ・ ゴムの解析基本修得
- ・ 条件見直し
- ・ 誤差原因の確認
- ・ 収束性向上

#### 結果の見方

- ・ ゴムの結果の見方
- ・ 誤解の排除、ソフトの癖etc.  
合っているのに合っていないと勘違い

1案件 ～90万円

※お客様が実施分、費用圧縮させていただきます。

※※スポンジゴムの解析をメールのやり取りのみで実用化したお客様も。

### 効率化・実用化

#### 効率化・自動化

適用

動的・固有値

緩和・クリープ

熱・型設計

疲労・老化

材料再定義など

#### リバースエンジニアリング

設計・開発者への展開

結果のみでなくノウハウまで提供 ～200万円

- 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。
- 費用は圧縮できます。

# セミナーのご案内

ホームページに無料・有料セミナー順次更新

ゴムの解析基礎・応用

防振ゴム設計・解析基礎  
応用

シール設計・解析基礎  
応用

ゴムの粘弾性から耐久性

解析・CAD自動化

解析実習  
1日でMARC習得

ひずみエネルギー密度関数  
サンプル無料プレゼント

第2弾ゴムタイムス社様から発売中  
アマゾンからも購入可  
第1弾(超弾性部のみ)プレゼント

問い合わせの方 第1弾(超弾性部のみ)ゴムのFEM解析 まもなく完売  
メール: [hagi@terakoya2018.com](mailto:hagi@terakoya2018.com)

初心者のための  
ゴムの有限要素法解析

萩本光広 著

コロナ社

