

第6期非線形CAE勉強会

# 材料モデルのVV

～ ゴム材料の構成則と破壊基準の構築～

山梨大学 工学部 土木環境工学科

吉田純司

## 本日は話す内容

高減衰ゴムの構成則の構築とその検証

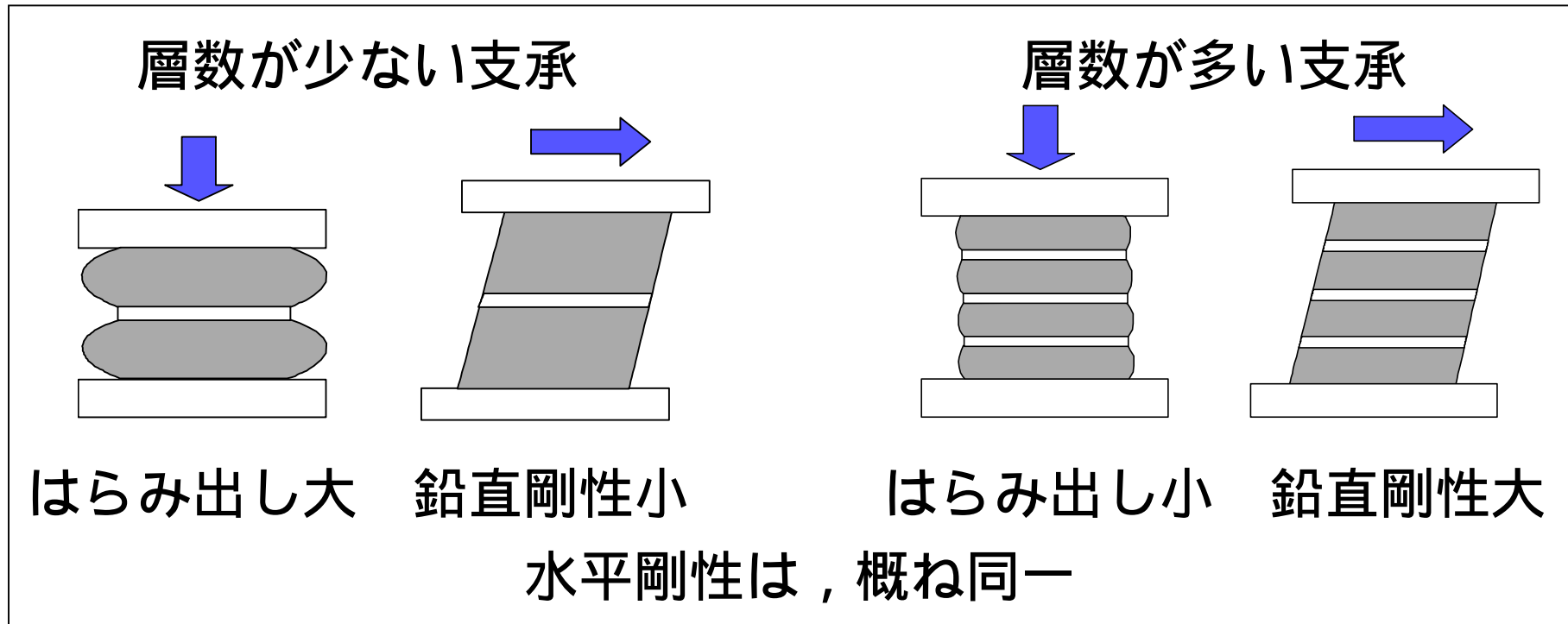
天然ゴムの破断特性とモデル化

# 1. ゴム材料の免震構造への応用

# 積層ゴム支承とは

ゴムが非圧縮に近い性質を積極的に利用

ゴムと鋼板を積層状に剛結 ⇒ ゴム層の体積変形を制限



水平方向 → 柔 } 加速度の低減  
鉛直方向 → 剛 } 構造物の支持

# 土木における免震

- 1995年兵庫県南部地震以後，積層ゴム支承を採用する橋梁が増加

- ゴムの圧縮性を利用して構造物を支持．
- 減衰性能を付与  
変位応答を低減
- **構造物の損傷を局在化**  
過度に長周期化しない．



桁間衝突，ジョイント部の損傷を回避



動力学的効果 + 損傷の戦略的な制御

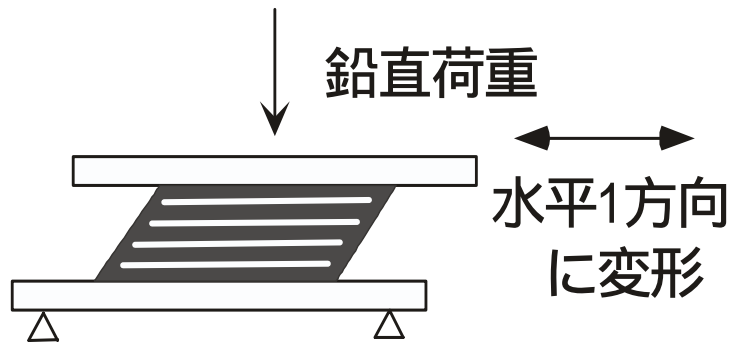
**構造系全体の挙動に大きく影響**

**構造系の応答予測精度**

**積層ゴム支承のモデルの精度**

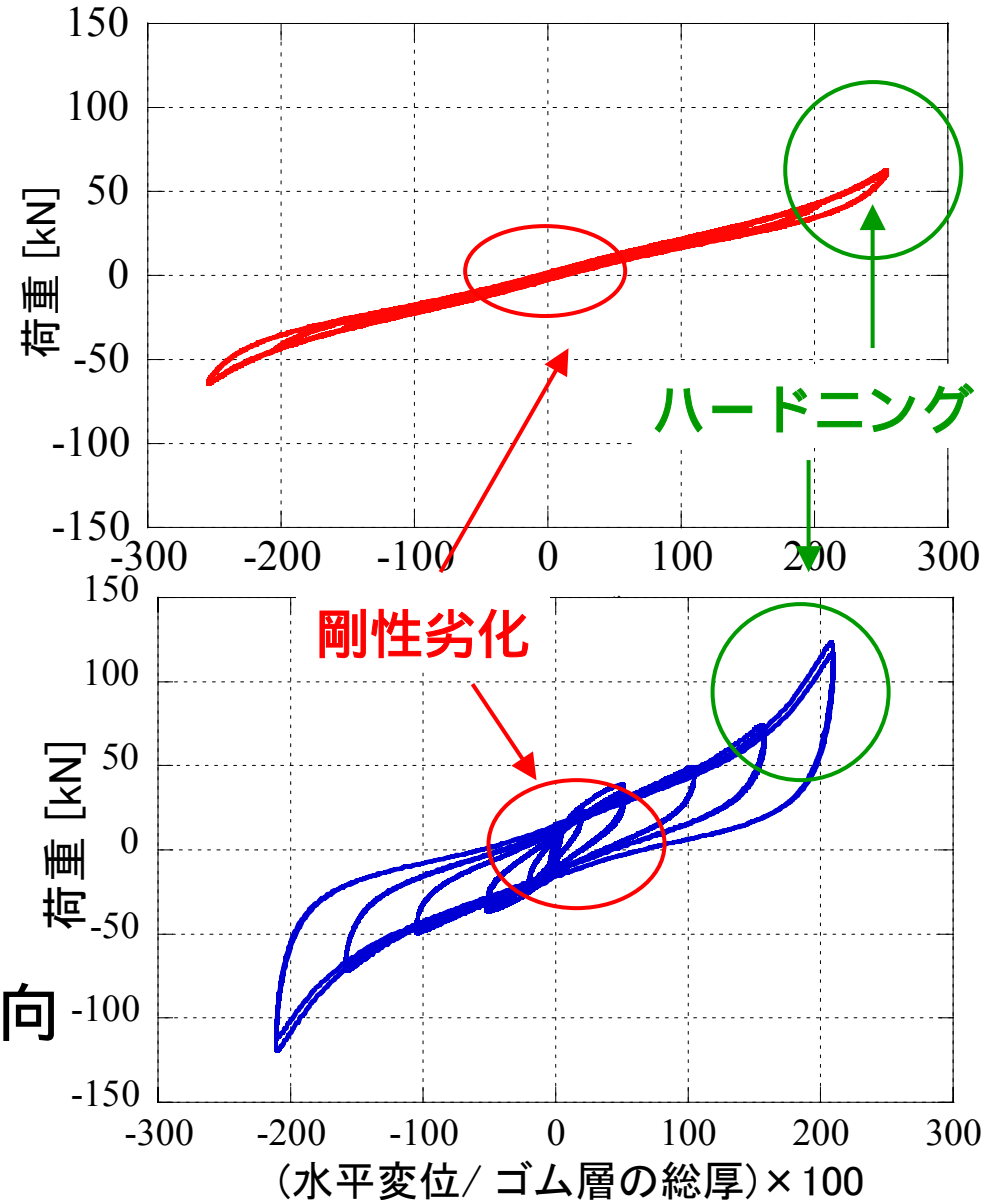
## 2. 高減衰積層ゴム支承の 力学特性の概要

# 高減衰ゴムを用いた支承の復元力特性

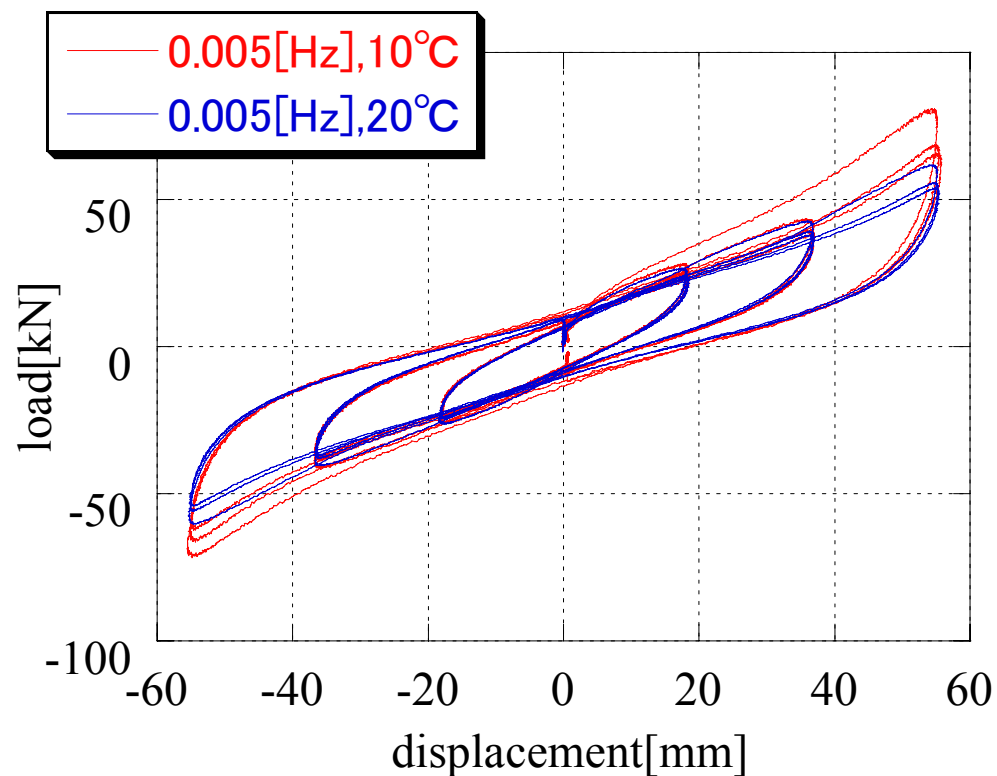


## 力学特性

- 大きな履歴減衰を有している
- 剛性劣化やハードニングが顕著に表れている。
- 全体的な荷重が進展する方向は似通っている。



# 支承の力学特性の温度依存性



ゴムによっては，同一の载荷速度で，試験温度が異なると異なる力学特性を示す．



### 3 . 高減衰ゴムの材料試験

# ゴムの材料試験

高減衰ゴム：  
応力進展に関する部分 + エネルギー吸収の部分

4 種類の高減衰ゴム，2 種類の天然ゴム

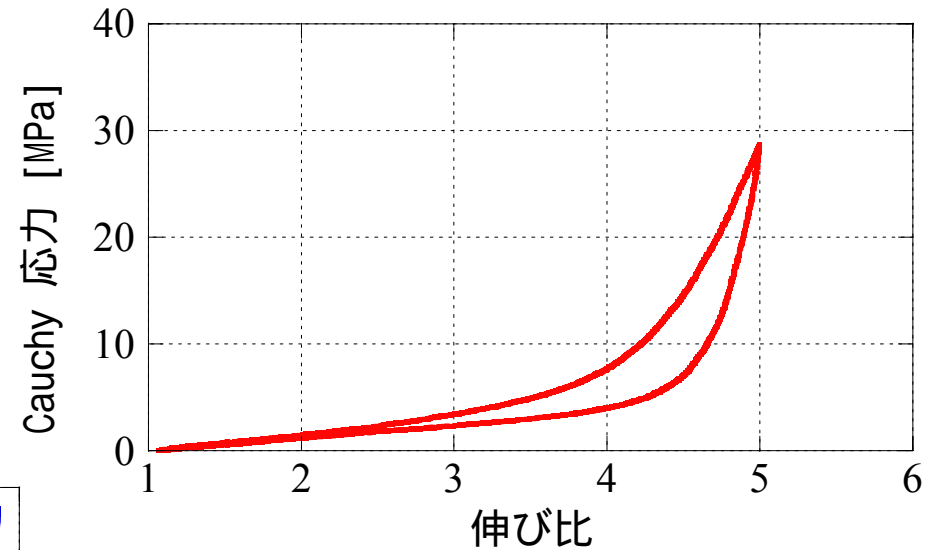
単軸引張り試験	}	応力方向の決定
2軸引張り試験		ハードニング特性の把握
繰り返しせん断試験		エネルギー吸収性能の評価
リラクゼーション試験		粘性の把握

温度の影響を小さくするため，常温（20～24）で実施

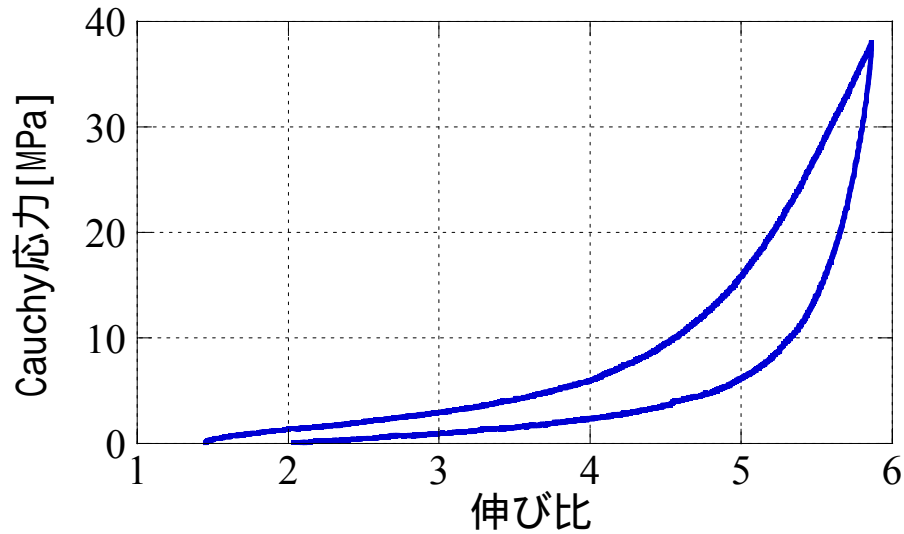
# 単軸引張り試験



天然ゴム

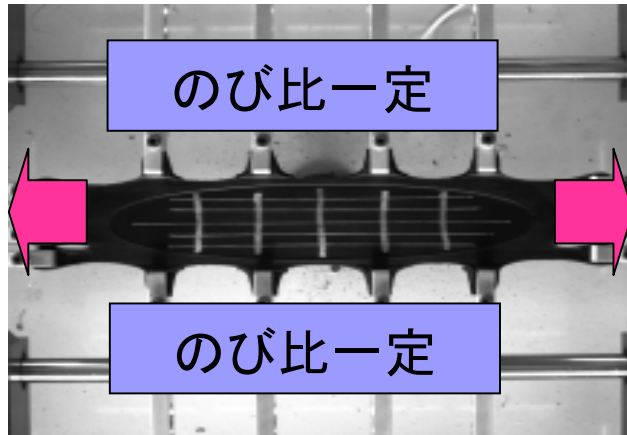


高減衰ゴム

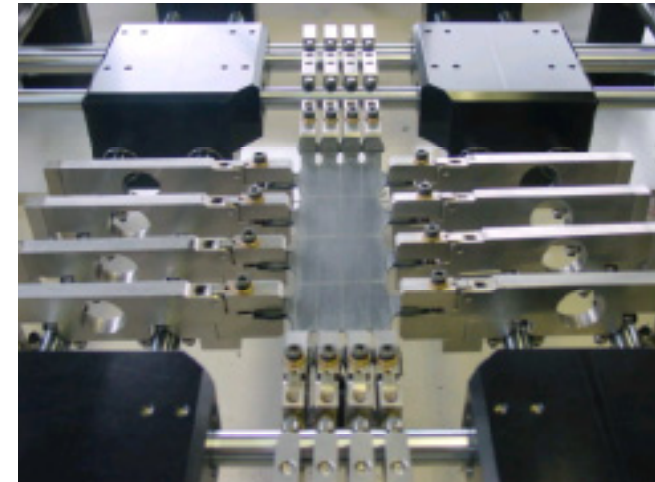
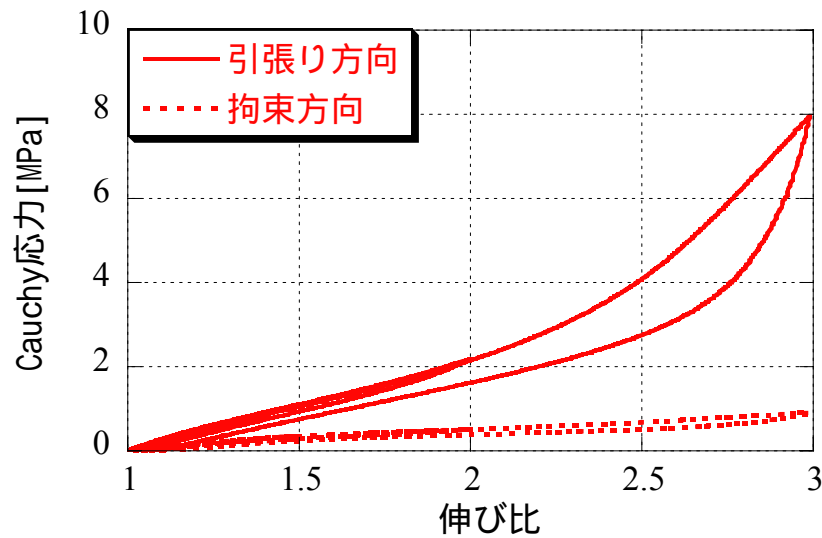


- ・ 応力進展の傾向は同じ
- ・ 残留ひずみやエネルギー吸収性能が異なる

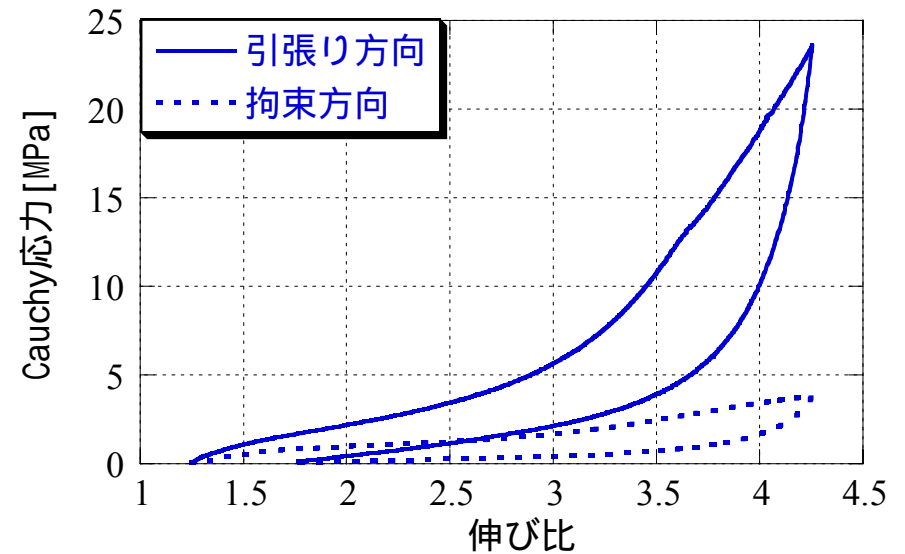
# 一軸固定二軸引張り試験



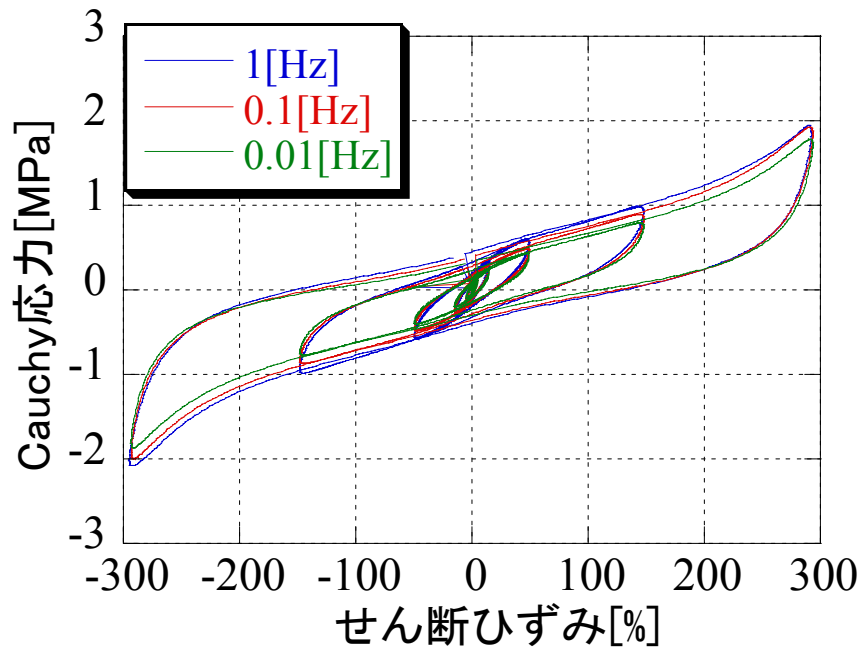
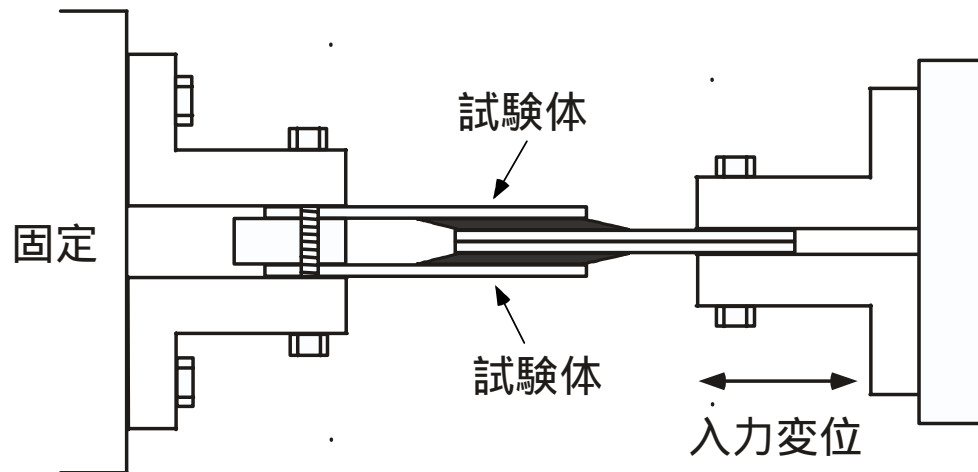
天然ゴム



高減衰ゴム

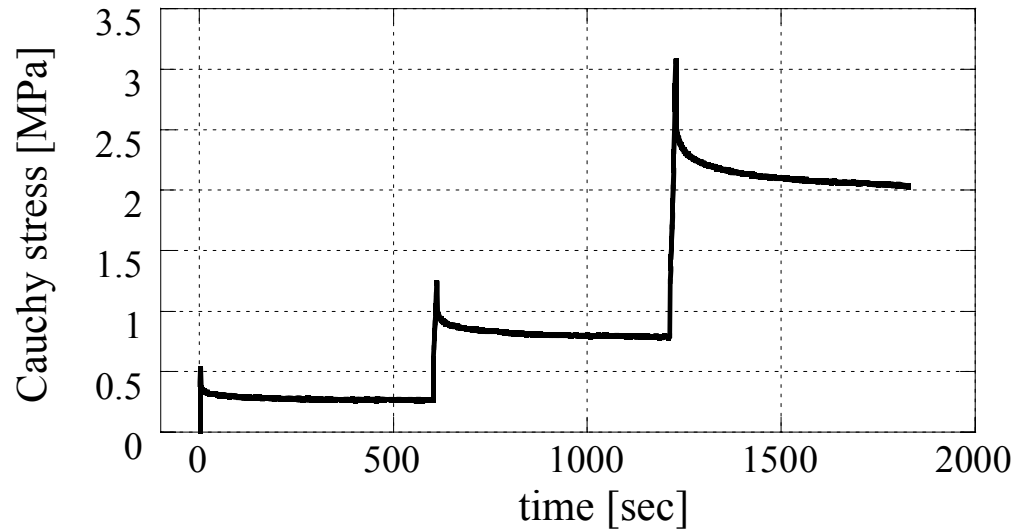
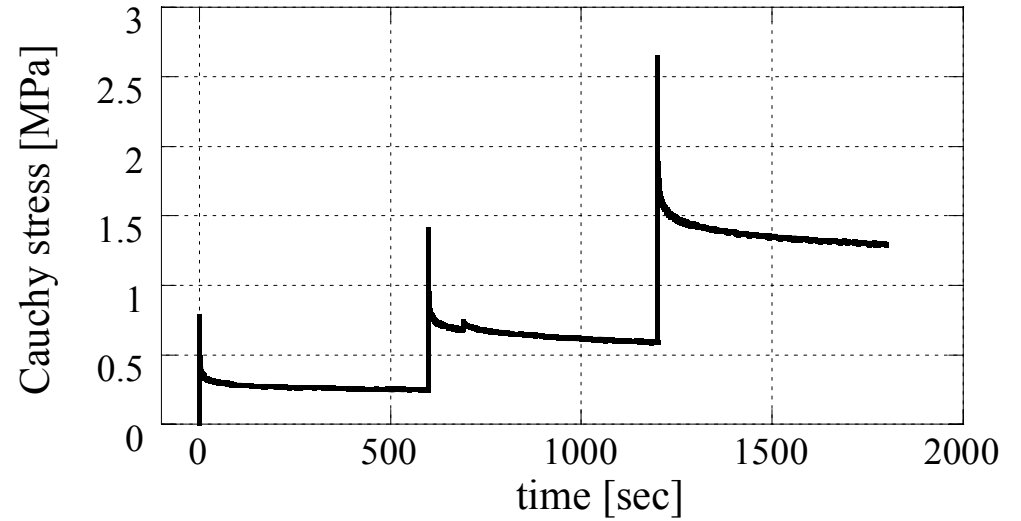
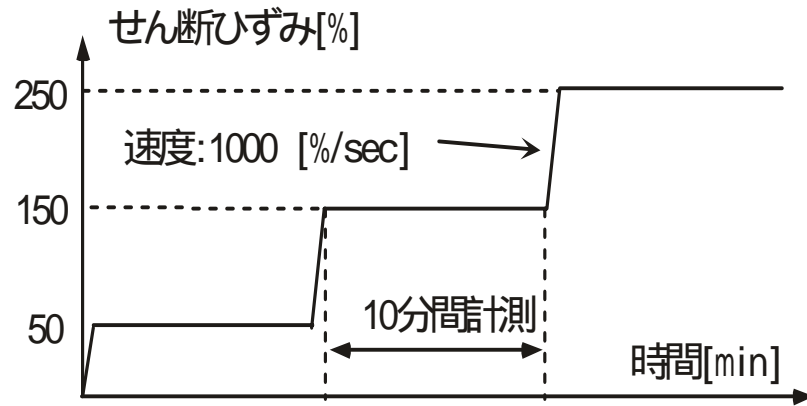


# 繰り返し単純せん断試験(高減衰のみ)



常温において  
0.01~1Hzでは  
速度依存性が少ない

# リラクゼーション試験（高減衰のみ）



どの高減衰ゴムも  
確実に粘性は存在。

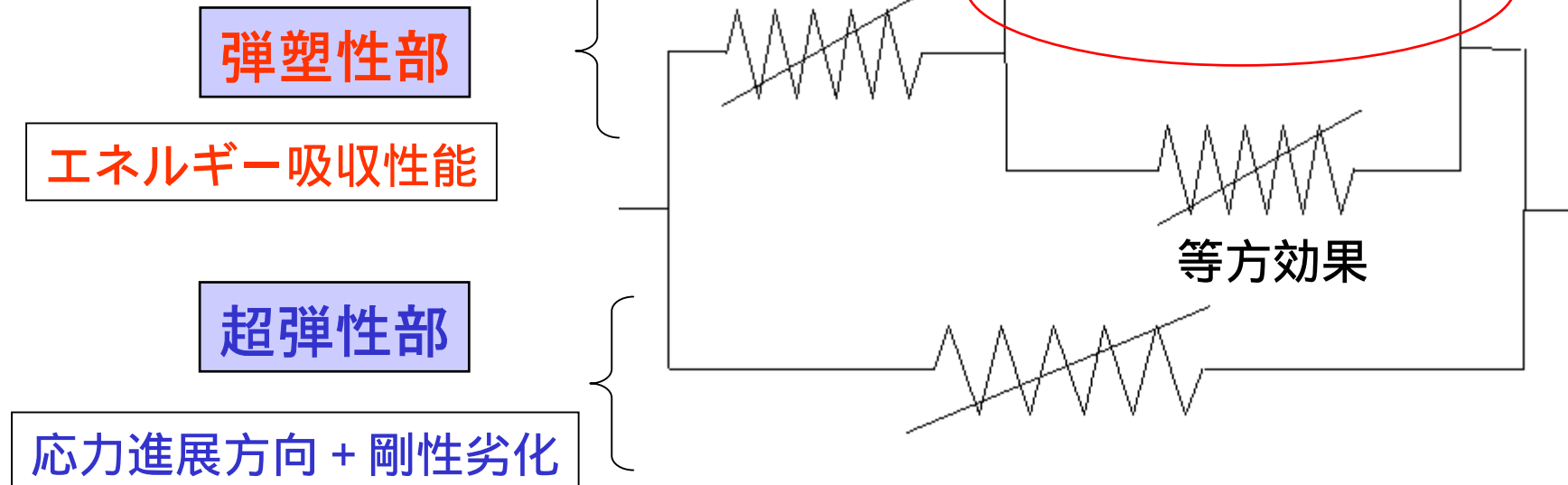
## 4. 高減衰ゴムの構成則

# ゴム材料の構成則

## 仮定

- ・ 初期等方性材料である .
- ・ 材料試験を等温で実施
- ・ 速度依存性が少ない

等温過程である  
粘性を塑性で置換

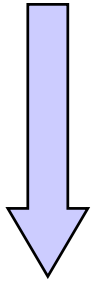


弾塑性体と超弾性体を組み合わせた構成則を提案



# 弾塑性部

## Grasser(1991)のモデル



微小変形を前提とした弾塑性体

- 微分方程式型 弾性, 塑性を自動判定
- 弾性-塑性間の遷移を滑らかに再現

- (1) 大変形に適用するための拡張
- (2) 等方硬化でハードニングを表現

$$\dot{\mathbf{T}}_{(J)} = \mathbf{C} : \{ \mathbf{D} - \mathbf{D}^p \}$$

$$\mathbf{D}^p = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{D}' : \mathbf{D}'} \left( \frac{3 \mathbf{T}' : \mathbf{T}'}{2(T_y)^2} \right)^{\frac{N-1}{2}} \frac{\mathbf{T}'}{T_y}$$

$$T_y = T_y^0 \left[ 1 + \left\{ \frac{I_C - 3}{c} \right\}^b \right]$$

微分方程式で記述  
される完全弾塑性体

等方硬化でハードニングを表現

# 弾塑性部の詳細な式

$$\dot{\mathbf{T}}_{(J)} = \mathbf{C} : \{ \mathbf{D} - \mathbf{D}^p \} \quad \text{:速度型方程式 (Jaumann速度を使用)}$$

$$\mathbf{D}^p = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{D}' : \mathbf{D}'} \left( \frac{\mathbf{T}' : \mathbf{T}'}{2(T_y)^2} \right)^{N-1} \frac{\mathbf{T}'}{T_y} \quad \text{:塑性ひずみ速度}$$

$$T_y = T_y^0 \left[ 1 + \left\{ \frac{I_B - 3}{c} \right\}^b \right] \quad \text{: 等方硬化}$$

$$C_{pqrs} = \frac{1}{J} F_{pi} F_{qj} F_{rk} F_{sl} \bar{C}_{ijkl} + \delta_{pr} T_{sp}^{(H)} + \delta_{qs} T_{pr}^{(H)} - \delta_{rs} T_{pq}^{(H)} \quad \text{:弾性テンソル}$$

$$\bar{C} = \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \mathbf{E} \partial \mathbf{E}}$$

$$\bar{W} = c_4 (\bar{I}_C - 3) + c_5 (\bar{II}_C - 3) + \frac{c_4 c}{m+1} \left( \frac{\bar{I}_C - 3}{c} \right)^{m+1}$$

材料定数:  $c_4, c_5, c, m$  +  $N, T_y^0, b$

## 超弾性部

川端ら(1992)のモデルをベース

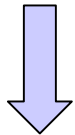
- ・ 物理的意味が明確 .
- ・ 簡便で精度が高い .

$$W_1 = c_1(\bar{I}_C - 3) + c_2(\bar{II}_C - 3)$$

線形に近い弾性挙動

$$W_2 = \frac{c_3 c}{n+1} \left( \frac{\bar{I}_C - 3}{c} \right)^{n+1}$$

ハードニング



ダメージモデルで剛性の劣化を表現

偏差応力分のひずみエネルギー密度関数

$$W = G(\Xi_1) W_1 + H(\Xi_2) W_2$$

$G, H$  : 最大経験ひずみの関数

## 超弾性部の詳細な式

の第1, 第2不変量

$$W = G(\Xi_1) W_1 + H(\Xi_2) W_2 + \frac{\chi}{2} (W^v)^2$$

ひずみエネルギー密度関数

$$W_1 = c_1(\bar{I}_C - 3) + c_2(\bar{II}_C - 3)$$

$$W^v = 2(\sqrt{III_C} - 1)$$

$$W_2 = \frac{c_3 c}{n+1} \left( \frac{\bar{I}_C - 3}{c} \right)^{n+1}$$

$\bar{I}_C, \bar{II}_C$  :  $\mathbf{C}$  の低減不変量

$$G(\Xi) = \beta + (1 - \beta) \left\{ \frac{1 - \exp(-\Xi / \alpha)}{\Xi / \alpha} \right\}$$

$$H(\Xi) = 1 - 1 / [1 + \exp\{-a_H(\Xi_2^m - b_H)\}]$$

ダメージ関数

$$\Xi_i^t = \max_{-\infty < s \leq t} \sqrt{2W_i(s)}$$

$$\mathbf{S} = \frac{\partial W}{\partial \mathbf{E}} = G \frac{\partial W_1}{\partial \mathbf{E}} + H \frac{\partial W_2}{\partial \mathbf{E}} + \chi W^v \frac{\partial W^v}{\partial \mathbf{E}}$$

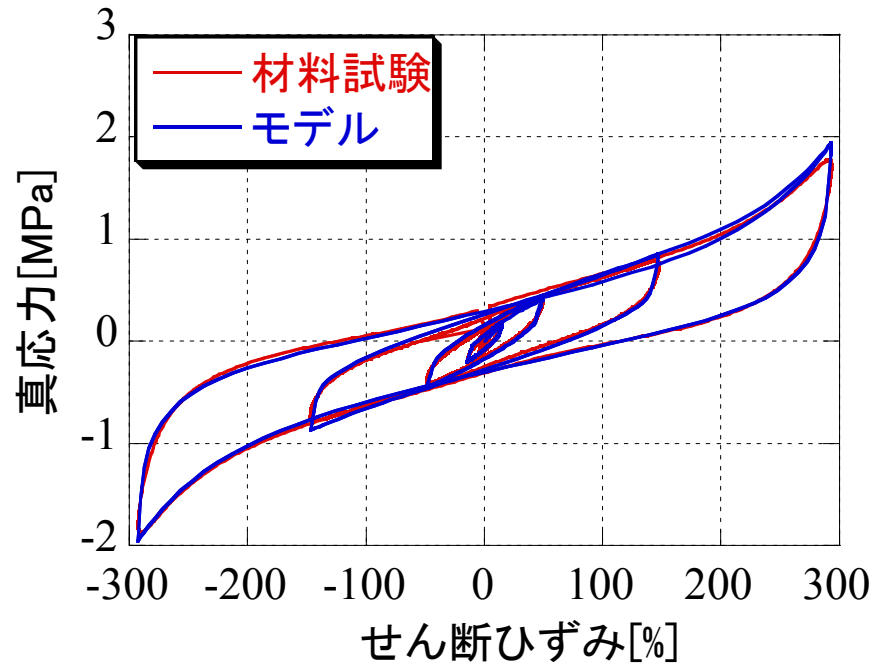
応力ひずみ関係

材料定数  $c_1, c_2, c_3, n, \chi$  +  $\alpha, \beta, a_H, b_H$

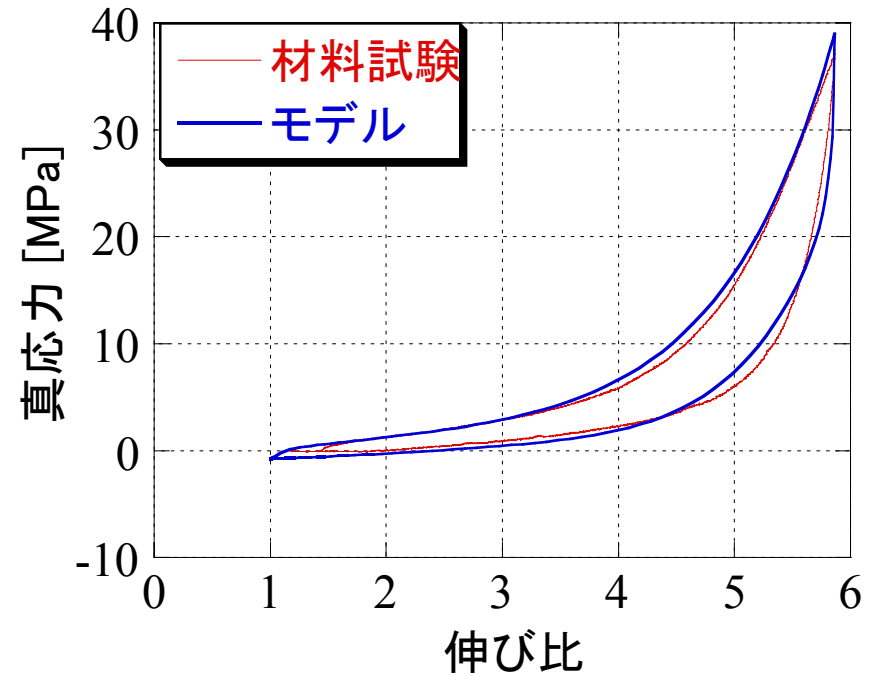
# 構成則の再現性①

高減衰ゴム

繰り返しせん断試験



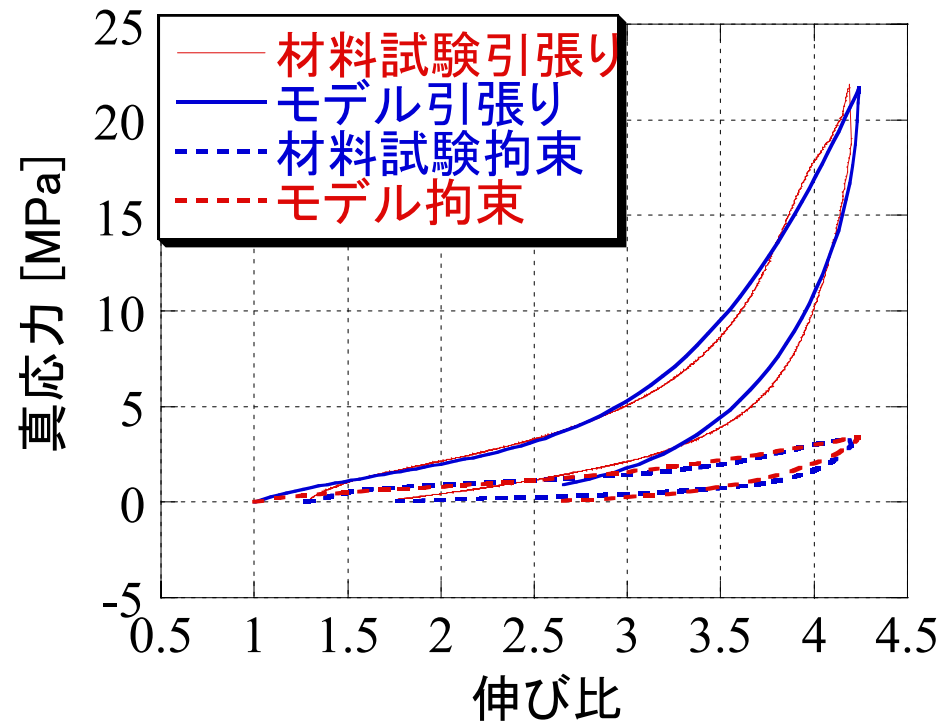
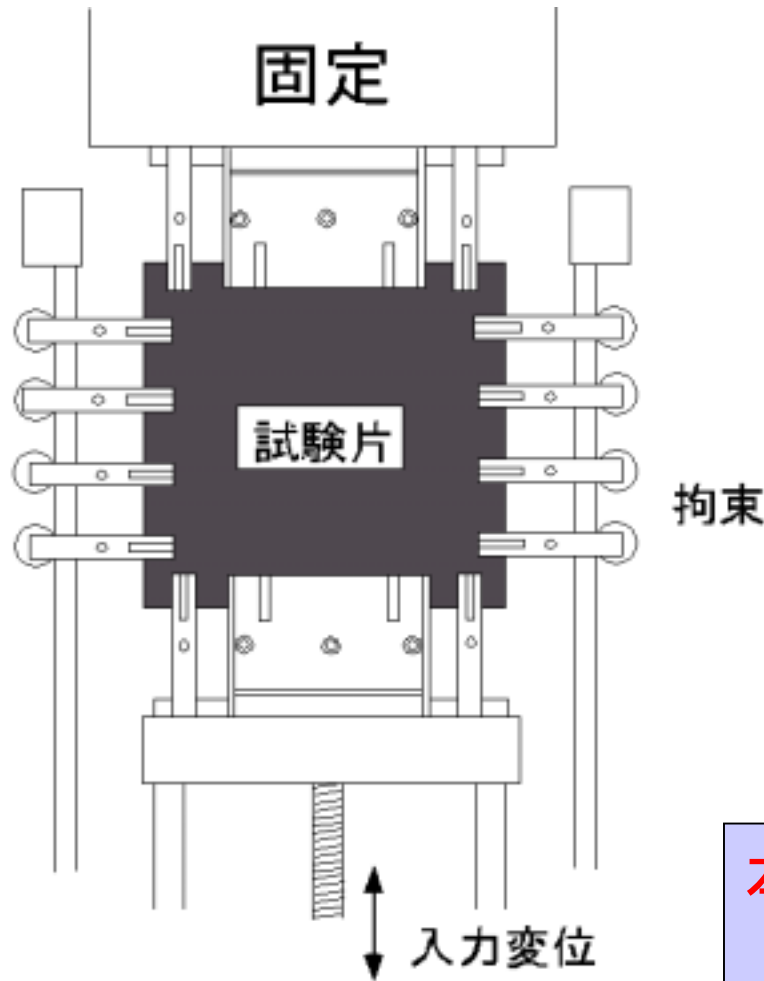
単軸引張り試験



ゴム材料の力学特性を精度よく再現

# モデルの再現性①の続き

## 一軸固定二軸引張り試験

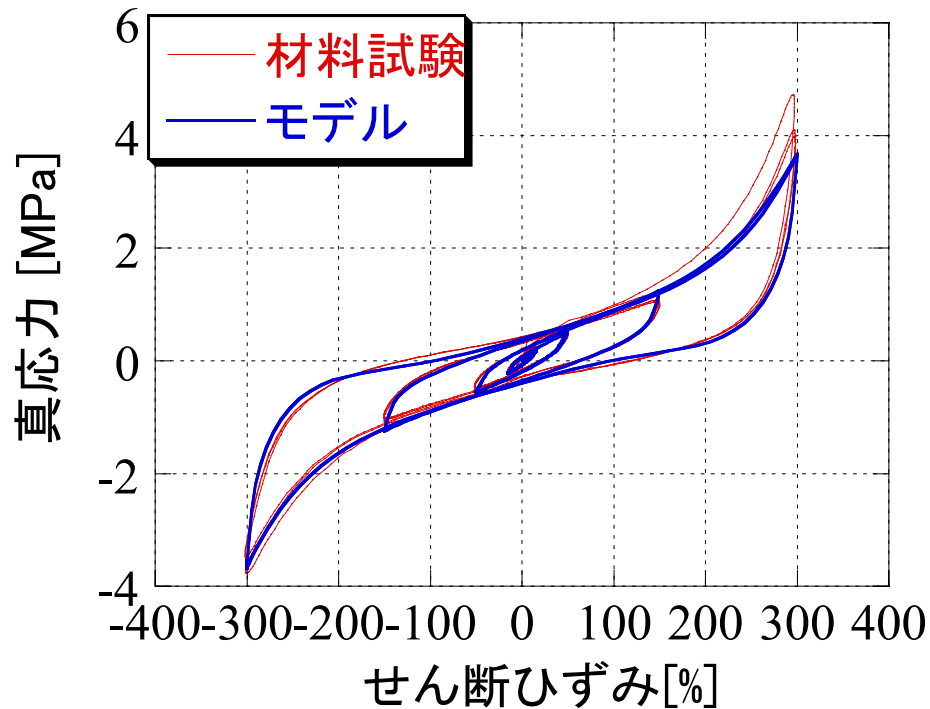


本構成則により材料の力学特性を精度よく再現することができた

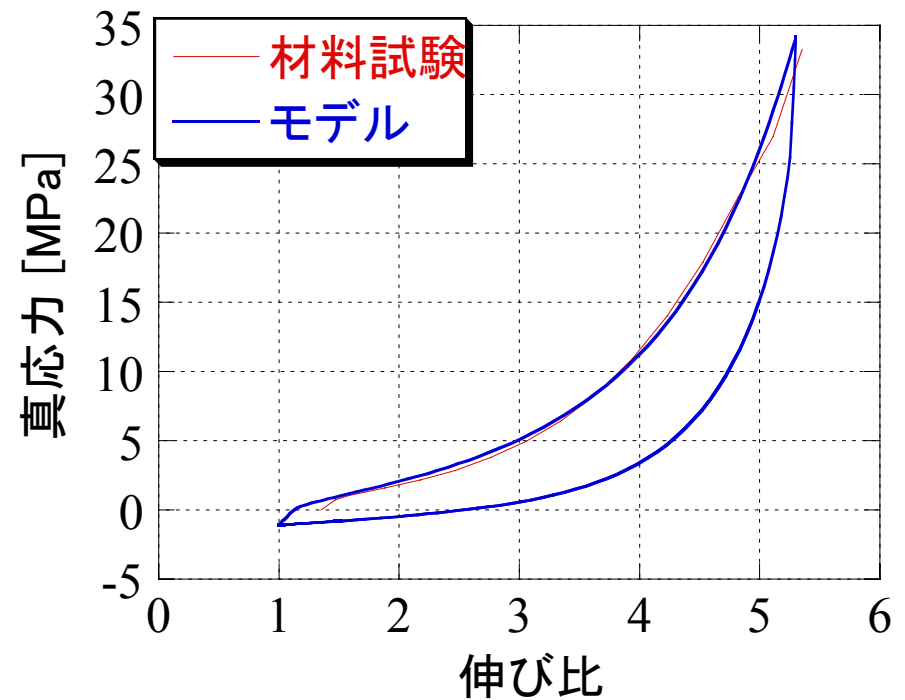
# 構成則の再現性

ハードニング特性が大きい高減衰ゴムの場合

繰り返しせん断試験



単軸引張り試験

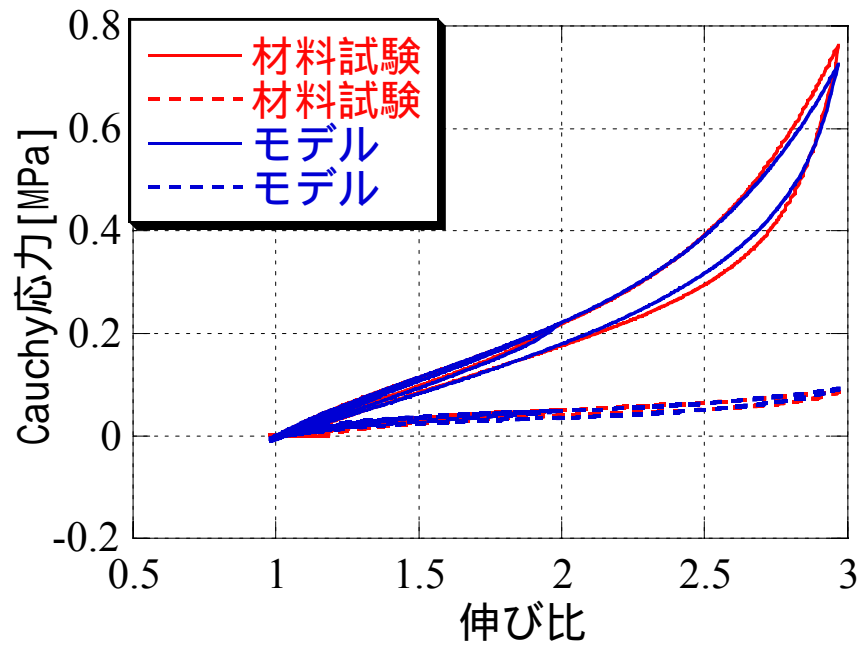


本構成則で力学特性を精緻に再現できた

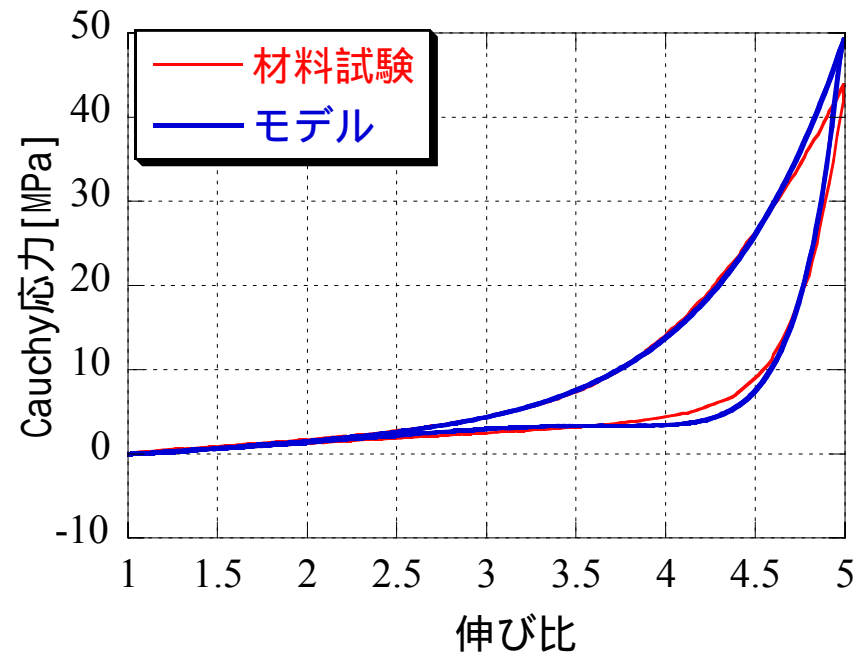
# 構成則の再現性③

天然ゴム

一軸固定二軸引張り試験



単軸引張り試験

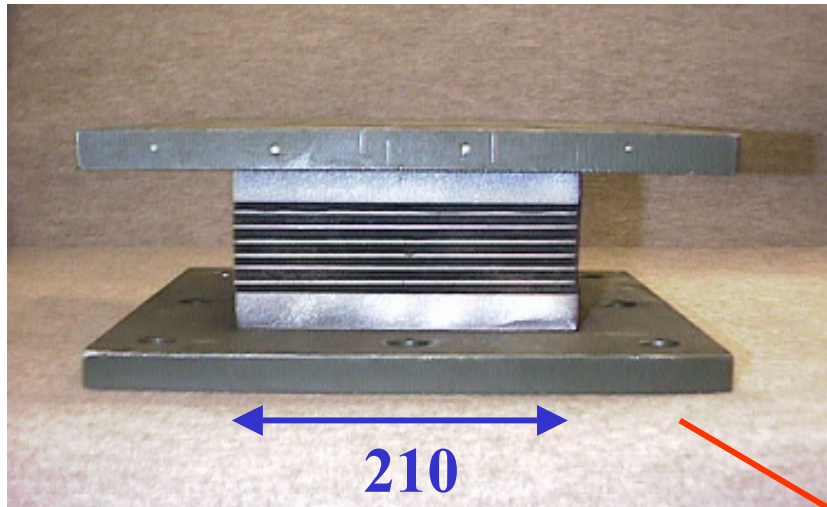


天然ゴムの力学特性を精度よく再現



## 5. 構造部材レベルでの検証

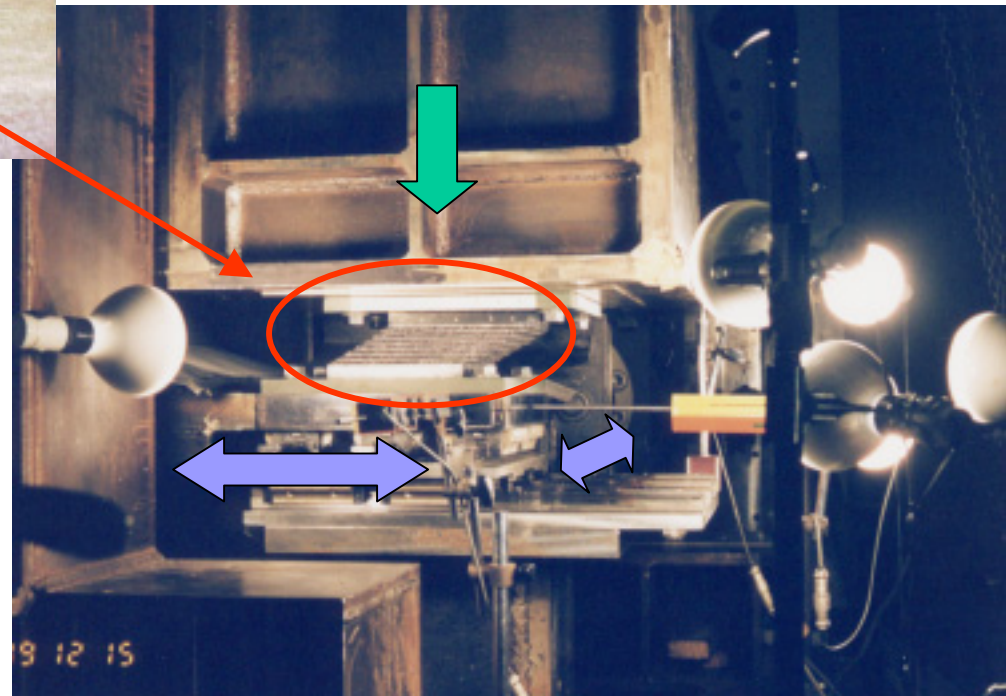
# 積層ゴム支承の3軸载荷実験



ゴム層：5[mm]×7層

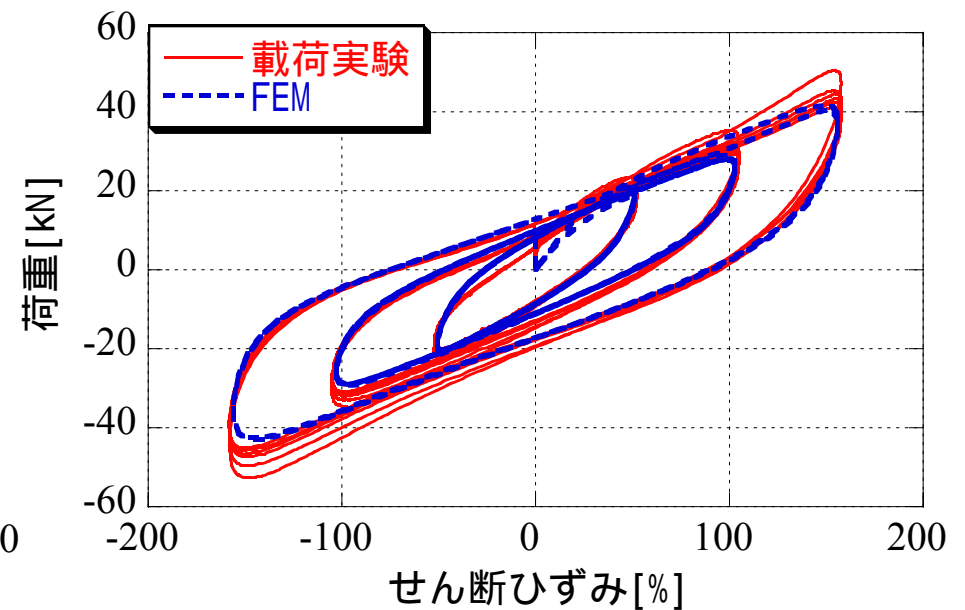
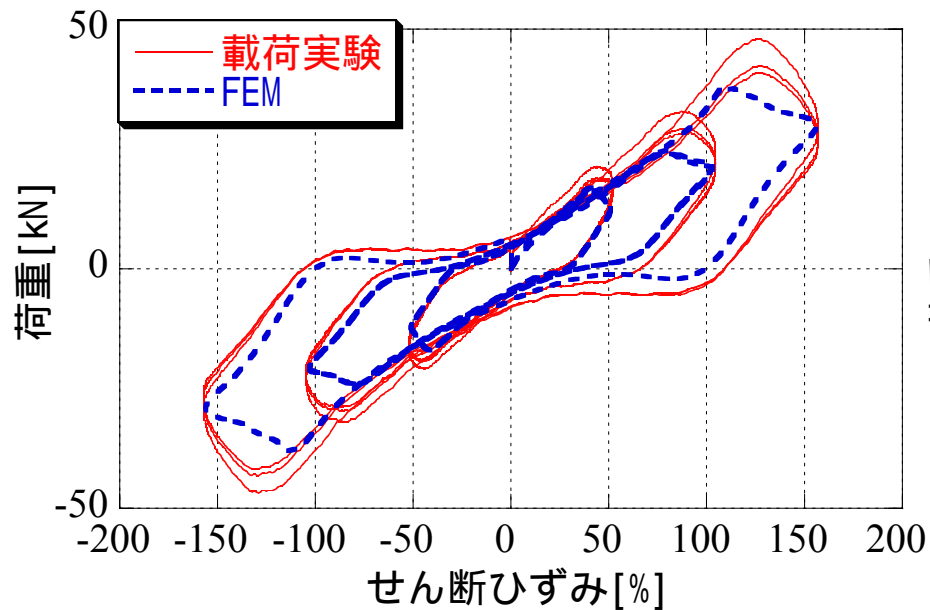
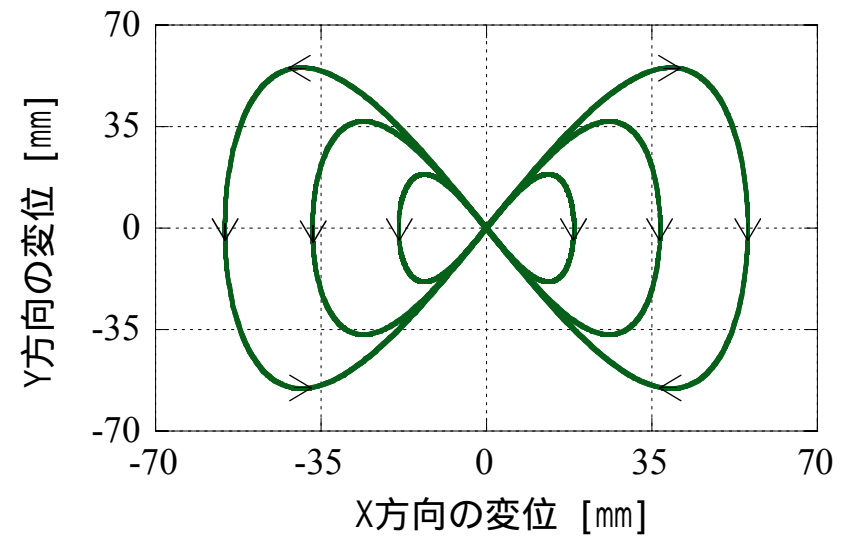
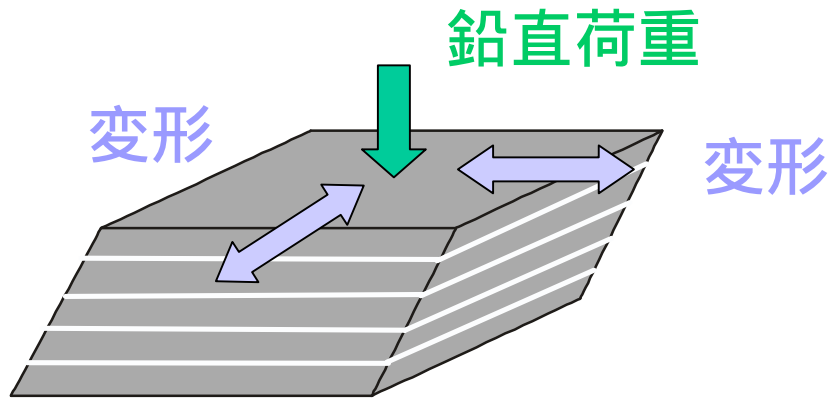
鋼板：2.3[mm]×6枚

実橋に用いられている  
支承の1/3

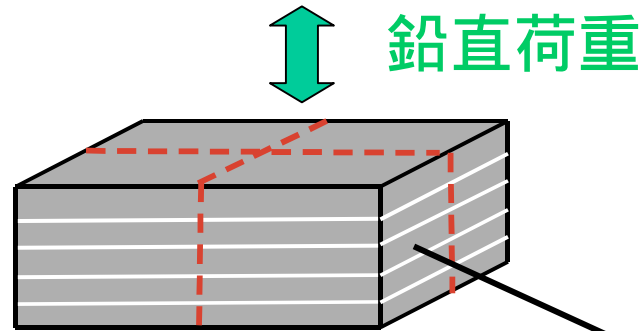


支承に鉛直荷重 + 水平 2 方向の変形を付与

# FEMと水平2方向载荷実験結果との比較



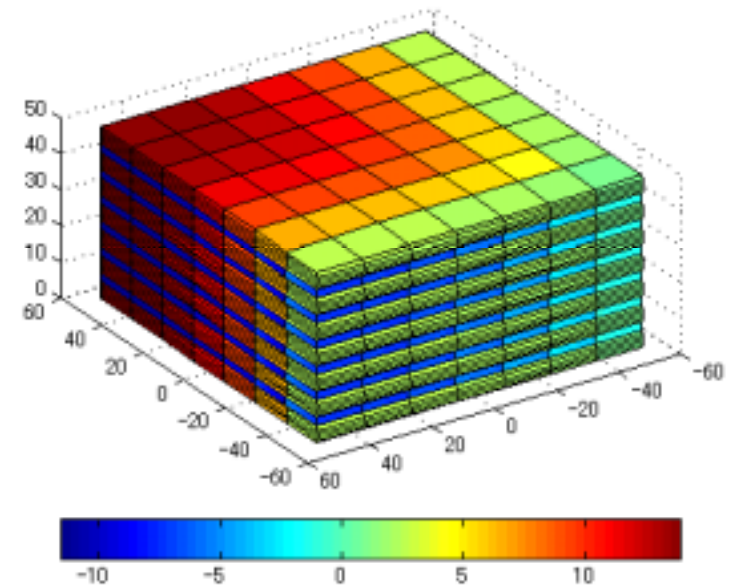
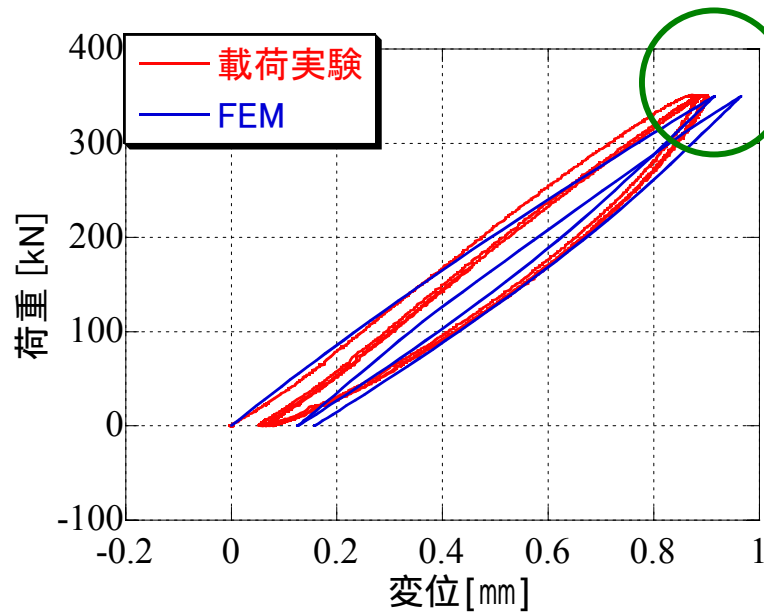
# FEMと鉛直載荷実験結果との比較



鉛直に面圧0 ~ 7.92[MPa]  
を繰り返し載荷

1/4 モデル

鉛直方向の変位-荷重関係



圧力場[MPa]

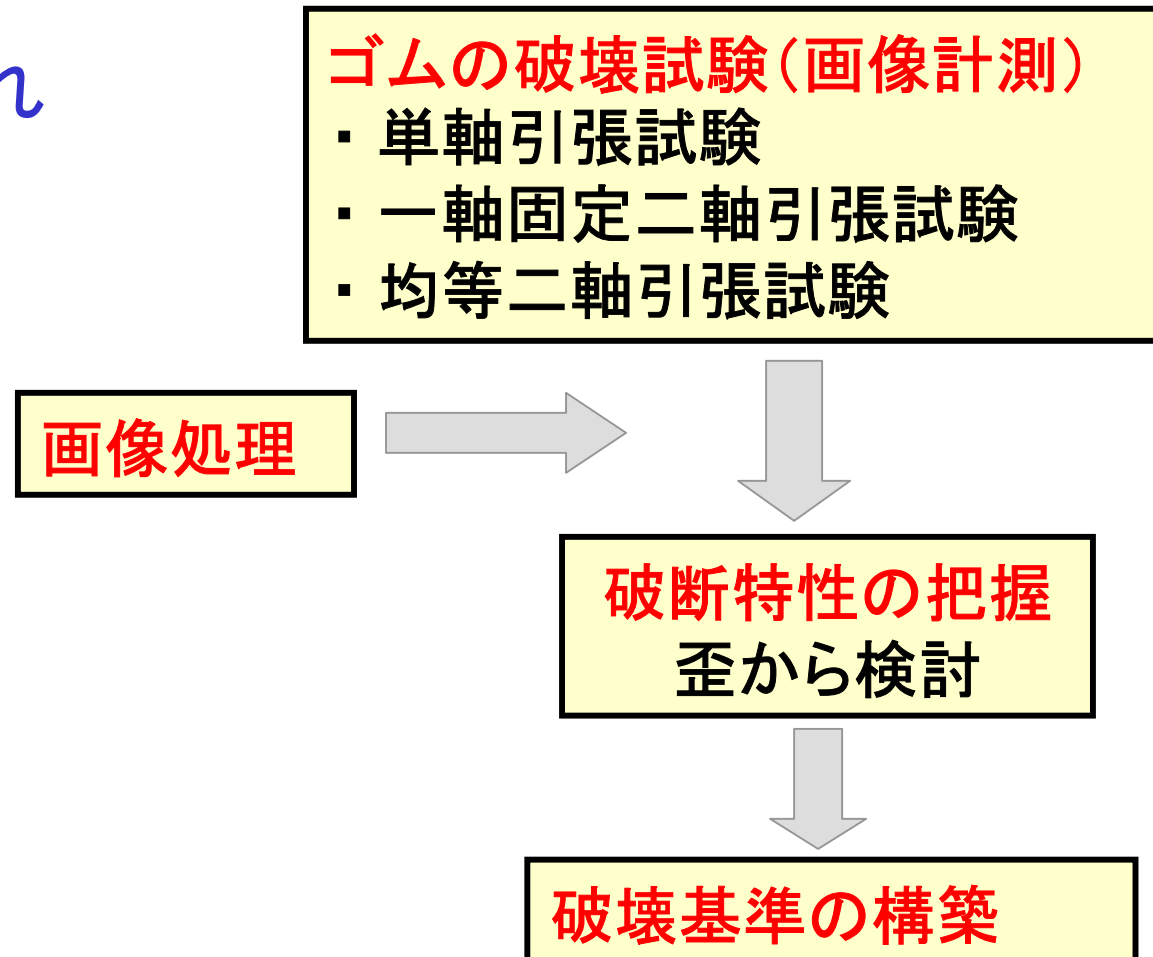
概ね実験結果とよく一致している。

# ～ゴム材料の破断特性の把握とモデル化～

# 研究の目的

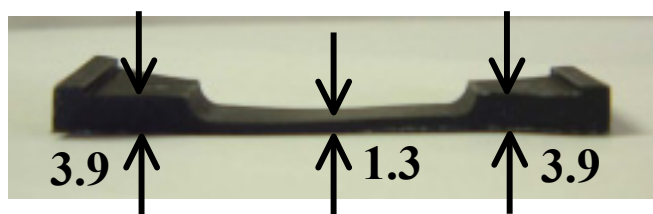
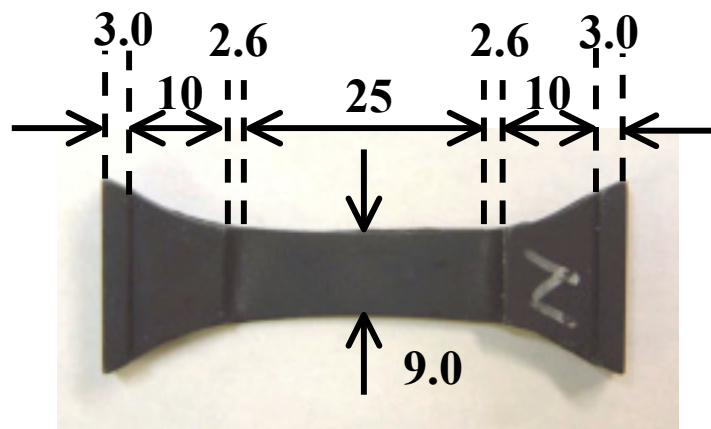
ゴムの材料実験よりゴムの破断特性を把握し、破壊基準を構築する

# 研究の流れ

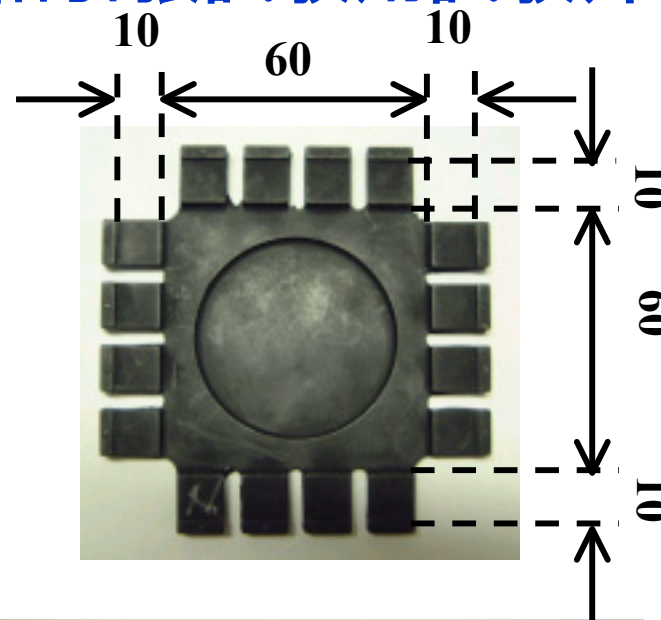


# 試験片形状

## 単軸引張試験用試験片



## 二軸引張試験用試験片



円形部分の厚さ: 0.5

単位 [mm]

天然ゴム

せん断弾性係数  $G = 98 \text{ [N/cm}^2\text{]}$

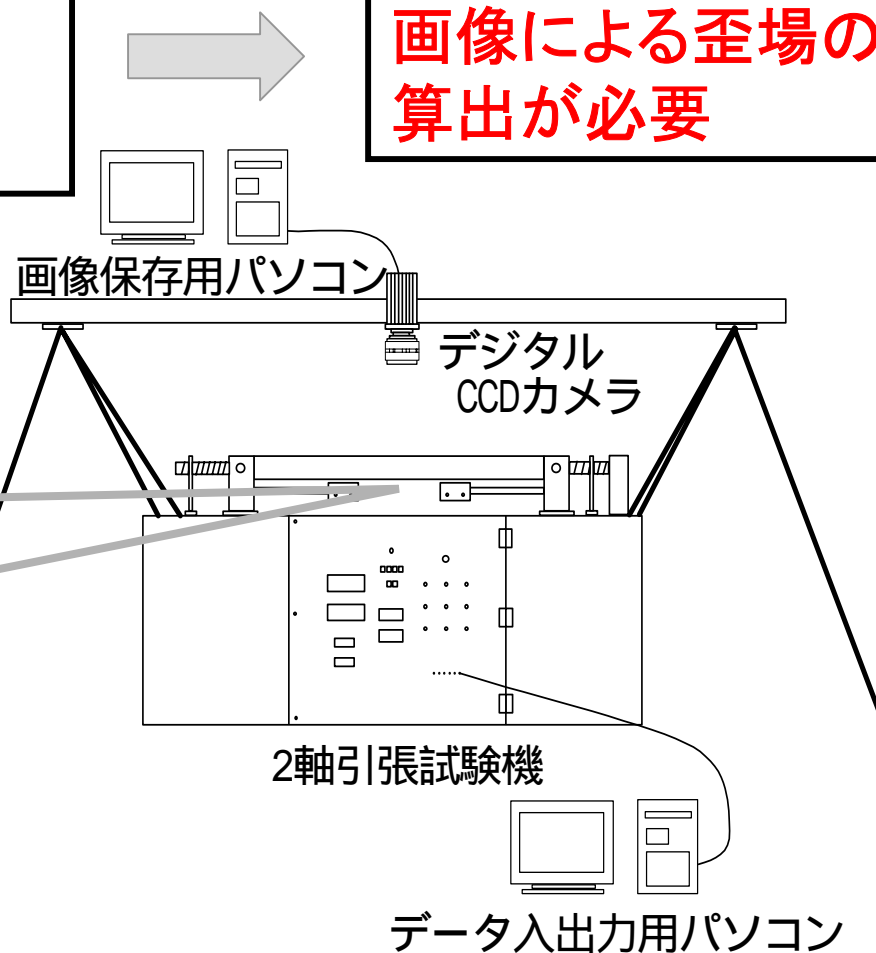
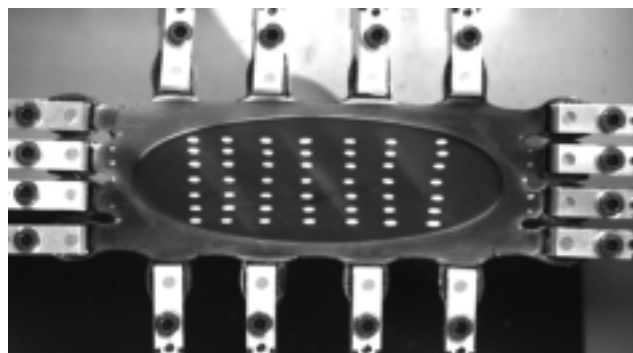
4種類

# 破断実験の概要

変位場が一様ではない

→ チャック間変位からでは  
内部の変形が導出できない

画像による歪場の  
算出が必要



- ・ 引張開始から破壊までを画像で撮影
- ・ 外部で載荷速度を制御
- ・ 変位, 荷重をデータとして取得



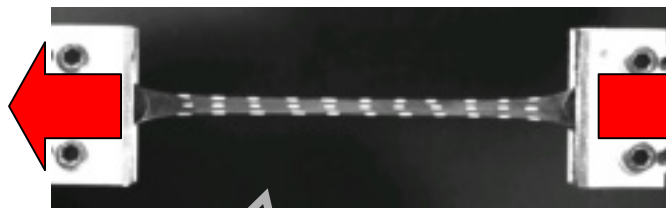
# 実験の条件

温度 : 20°C

試験片个数 : 各試験において3~5個

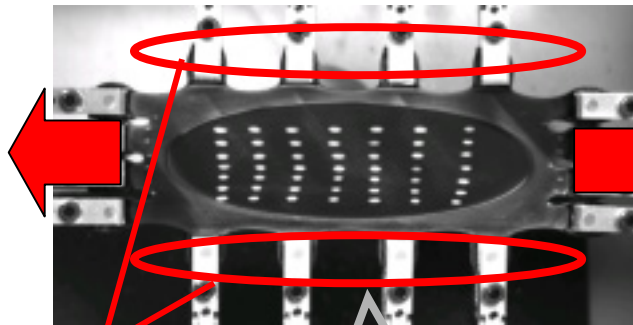
## 材料試験の種類

単軸引張破壊試験



荷速度  
0.2, 2.0, 20.0 [mm/sec]

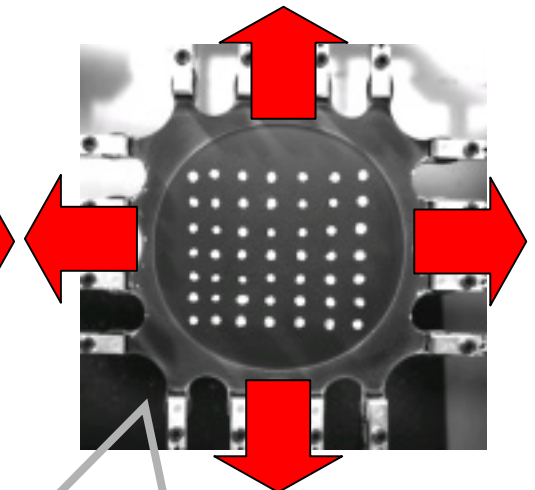
一軸固定二軸引張破壊試験



伸長比一定

荷速度 2.0 [mm/sec]

均等二軸引張破壊試験

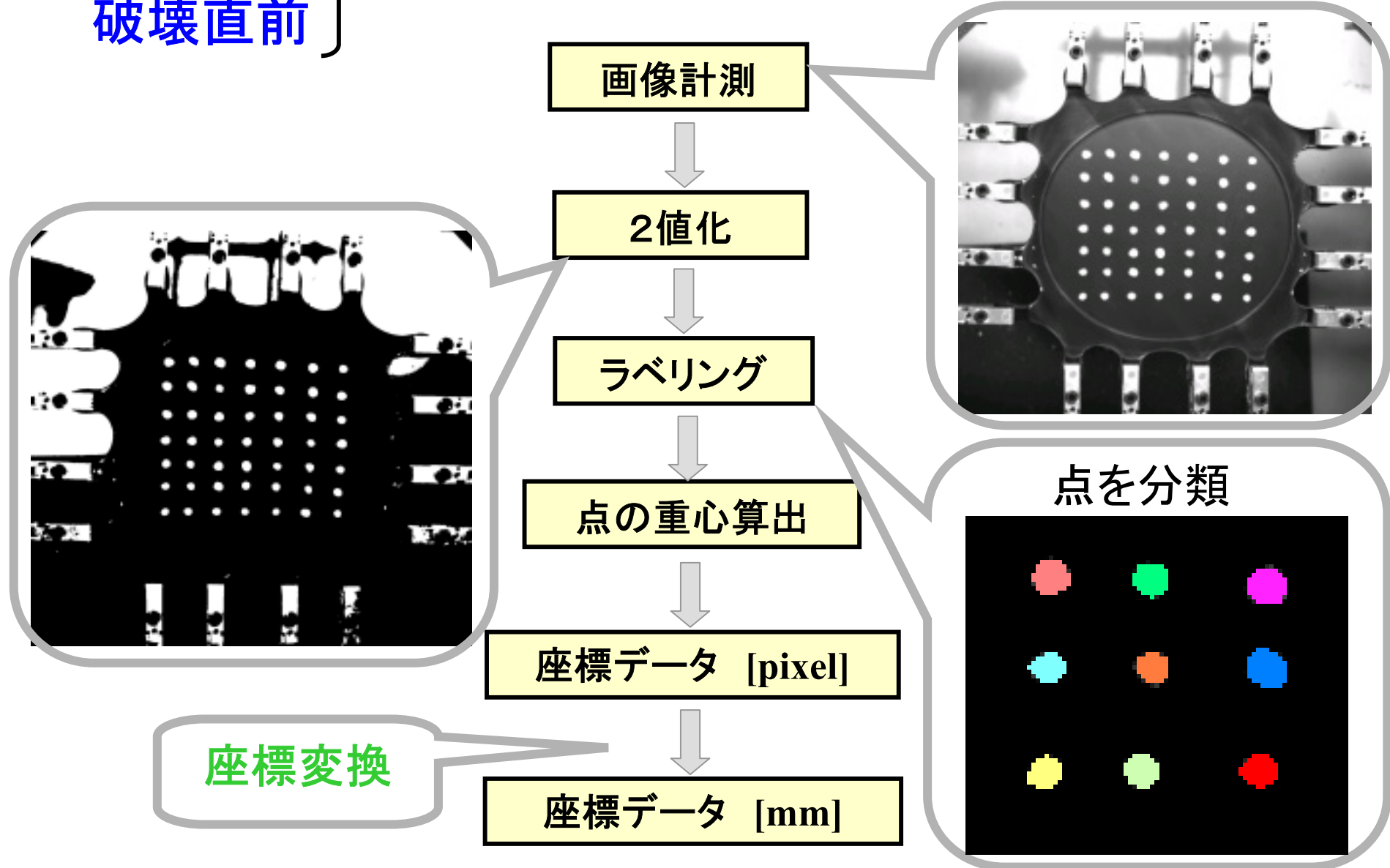


荷速度  
0.2, 2.0, 20.0 [mm/sec]

# 画像処理方法

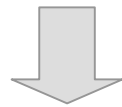
引張前  
破壊直前

白点の位置を座標データとして取得



# 歪場について

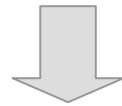
引張前  
破壊直前 } 座標データを比較



すべての点の変位を内挿



4点で作られる領域の  
伸長比を計算



破断部分の伸長比

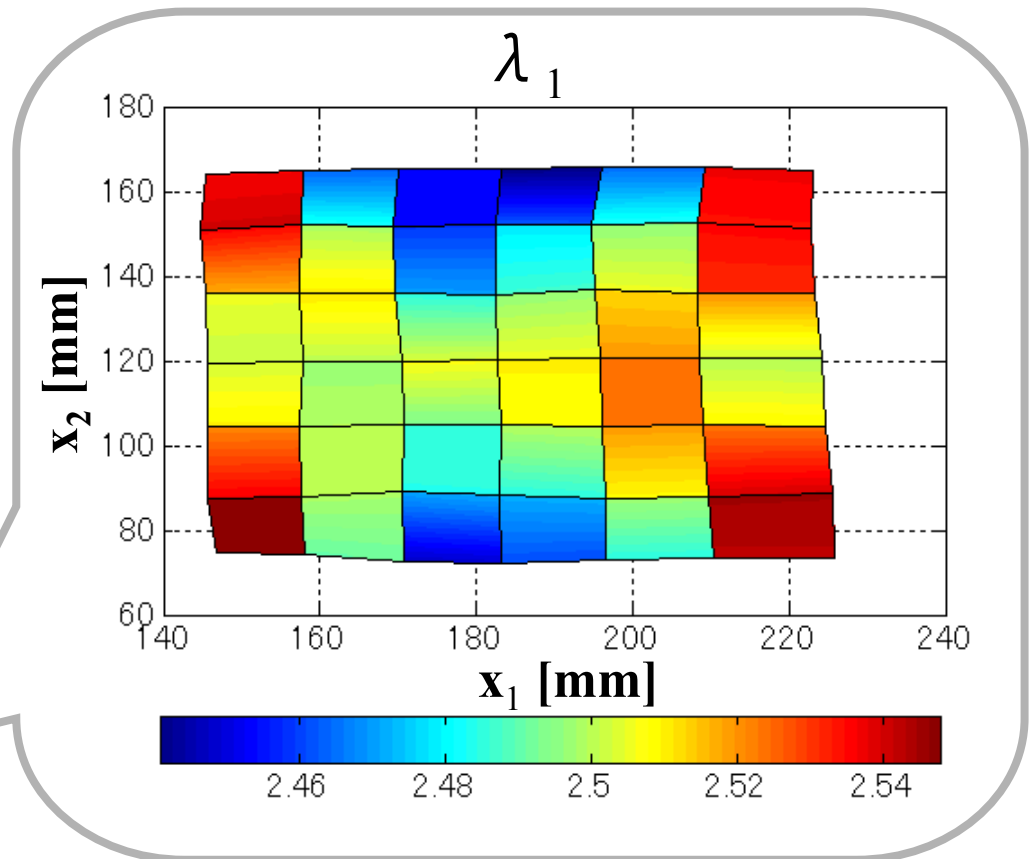
★ 伸長比

$\lambda_1$  → 変形勾配テンソルの $x_1$ 方向の固有値

$\lambda_2$  → 変形勾配テンソルの $x_2$ 方向の固有値

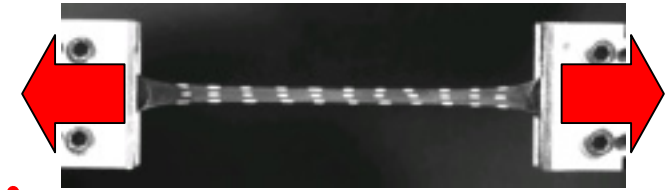
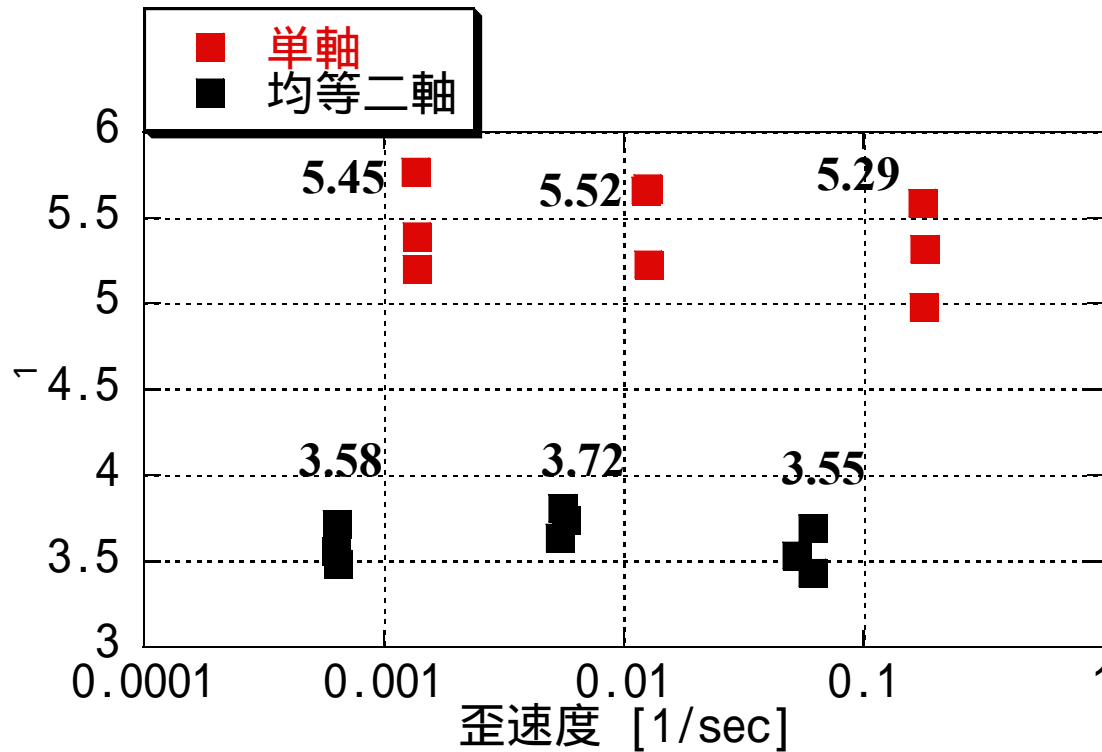
★ 変形勾配テンソル

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \begin{cases} X_j : \text{無変形状態での位置 (} x_1 \text{方向は } j=1, x_2 \text{方向は } j=2 \text{ のとき)} \\ x_i : \text{変形後の位置 (} x_1 \text{方向は } i=1, x_2 \text{方向は } i=2 \text{ のとき)} \end{cases}$$

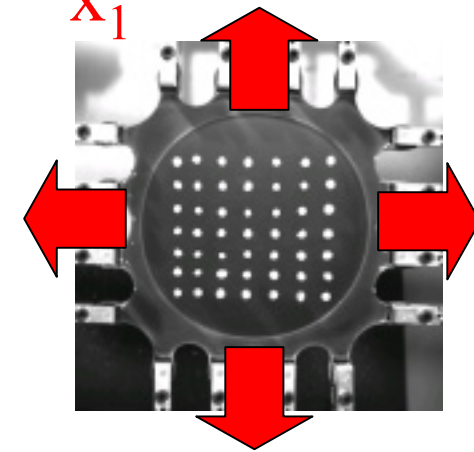


# 歪速度と破断時伸長比の関係

… 単軸引張試験, 均等二軸引張試験



単軸引張破壊試験



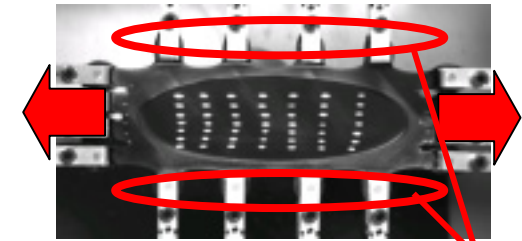
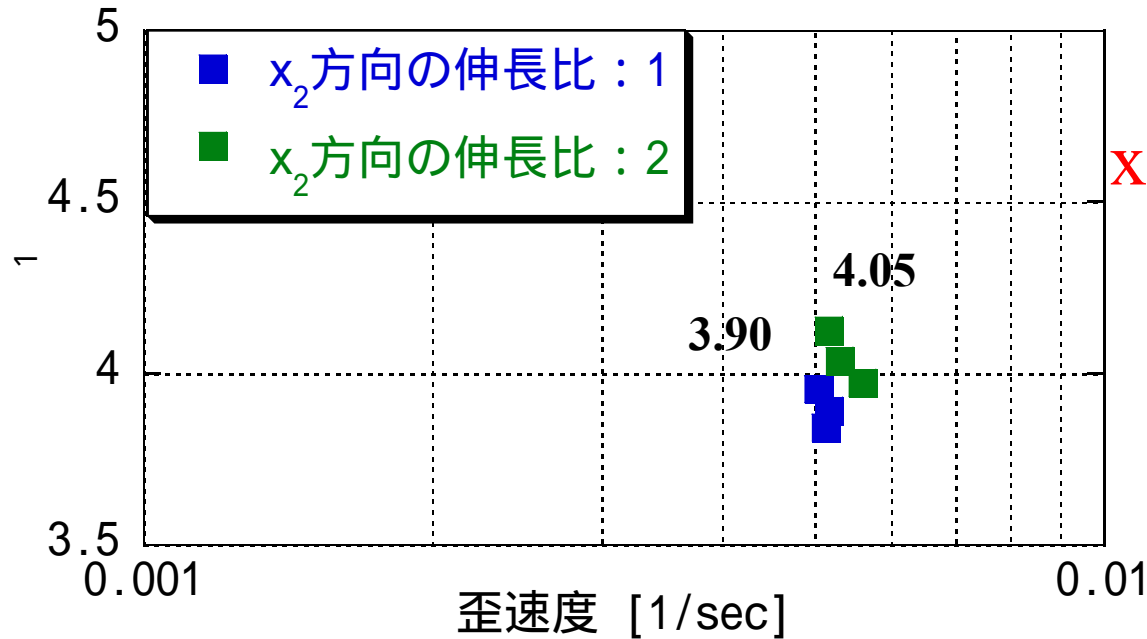
均等二軸引張破壊試験

- 歪速度の影響は小さい
- 均等二軸の  $\lambda_1$  は単軸の  $\lambda_1$  より小さい

$\lambda_1$  :  $x_1$  方向の伸長比

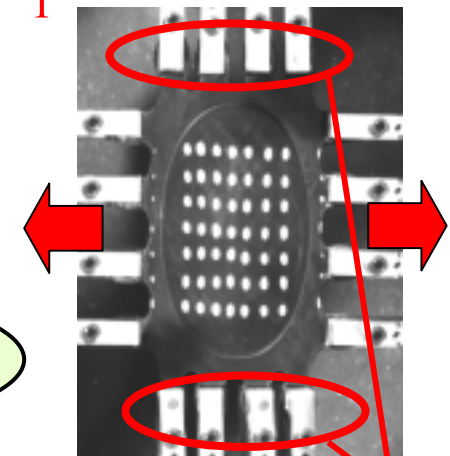
# 歪速度と破断値の関係

・・・一軸固定二軸引張破壊 ( $x_2$ の伸長比: 1, 2)



伸長比: 1

$x_2$ の伸長比: 1



伸長比: 2

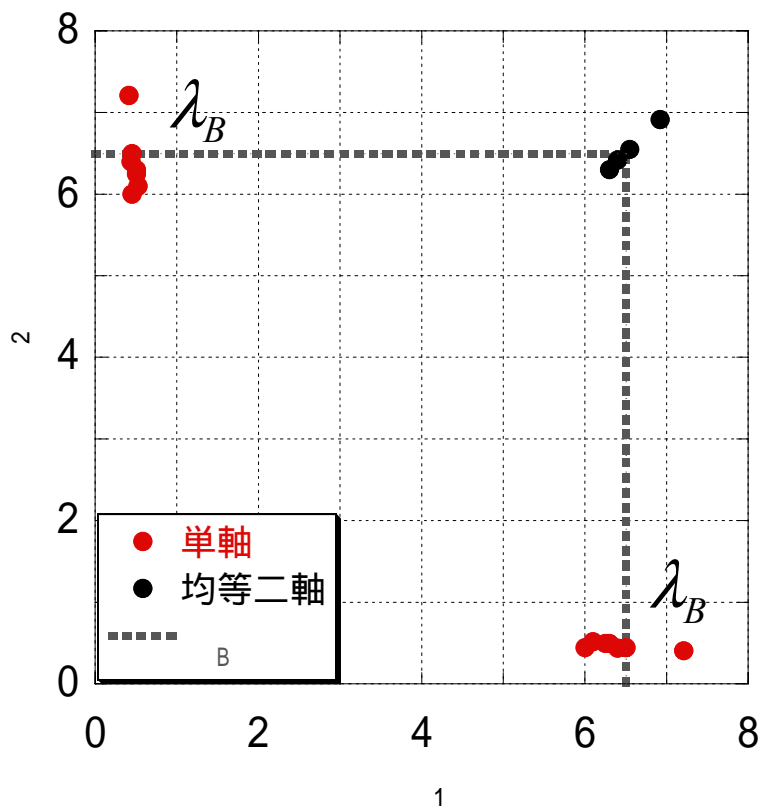
$x_2$ の伸長比: 2

$\lambda_1$  :  $x_1$ 方向の伸長比

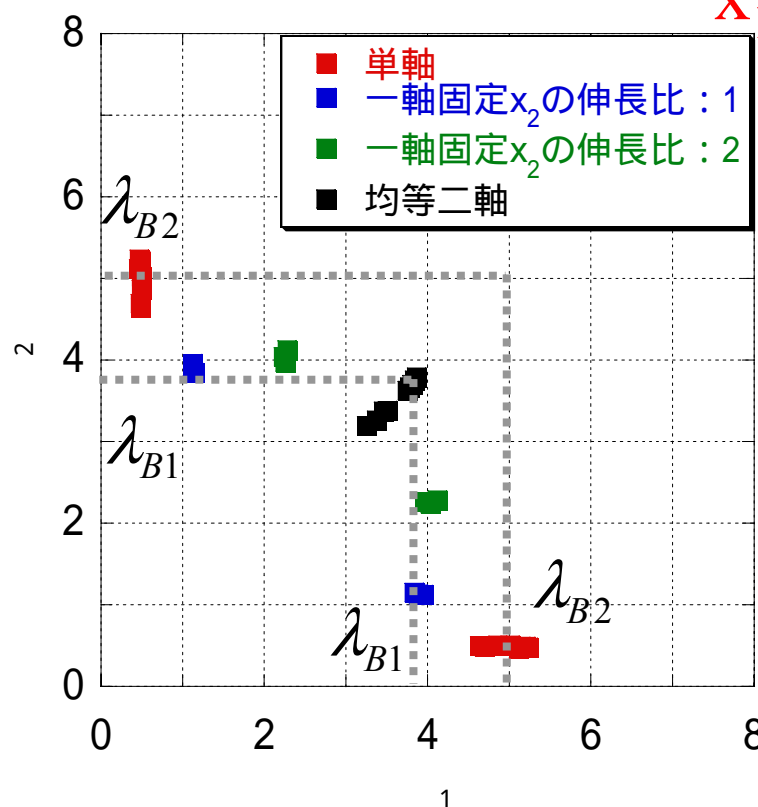
- $x_2$ 方向の伸長比が1,2のときで破断時の  $\lambda_1$  に大きな差はない

# 主軸伸長比の関係

既往の実験結果



本実験結果



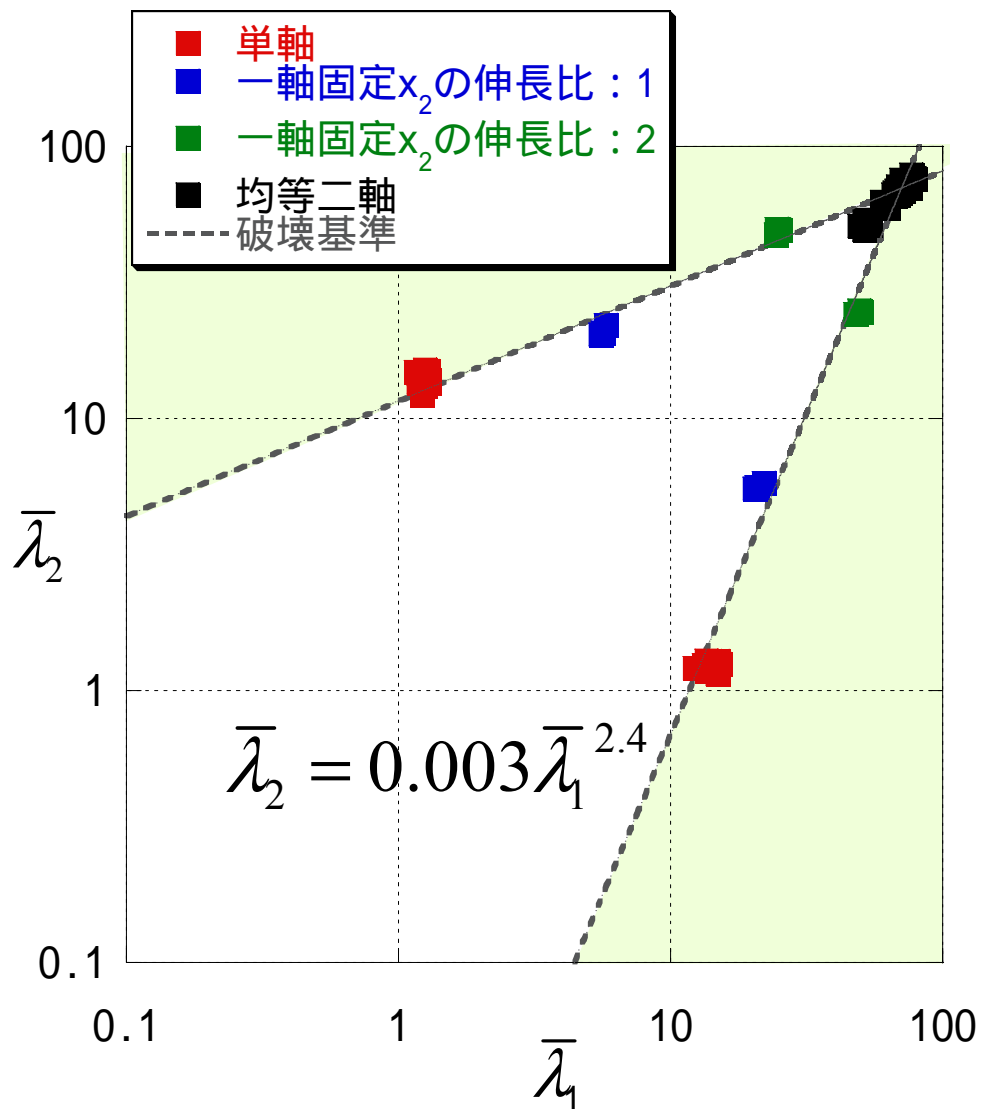
$\lambda_1$ :  $x_1$ 方向の伸長比  
 $\lambda_2$ :  $x_2$ 方向の伸長比

既往の実験結果 → 最大伸長比基準が成り立つ  
 本実験結果 → 最大伸長比基準の関係は成り立たない  
 他のゴムも同様の結果

最大伸長比基準

$$\lambda_1 \text{ or } \lambda_2 \geq \lambda_B$$

# 破壊基準の構築 …… 基準化した主軸伸長比から ゴム材料の破壊基準を構築



## 基準化

$$\bar{\lambda}_1 = \lambda_1 / \lambda_{\min}, \quad \bar{\lambda}_2 = \lambda_2 / \lambda_{\min}$$

$$\begin{cases} \lambda_{\min} & : \text{主軸伸長比の最小値} \\ \lambda_1, \lambda_2 & : \text{その他の主軸伸長比} \end{cases}$$

## 破壊基準式

$$\bar{\lambda}_2 = A(\bar{\lambda}_1)^B \quad \{ A, B : \text{パラメータ} \}$$

ゴムの種類によって主軸伸長比は異なる

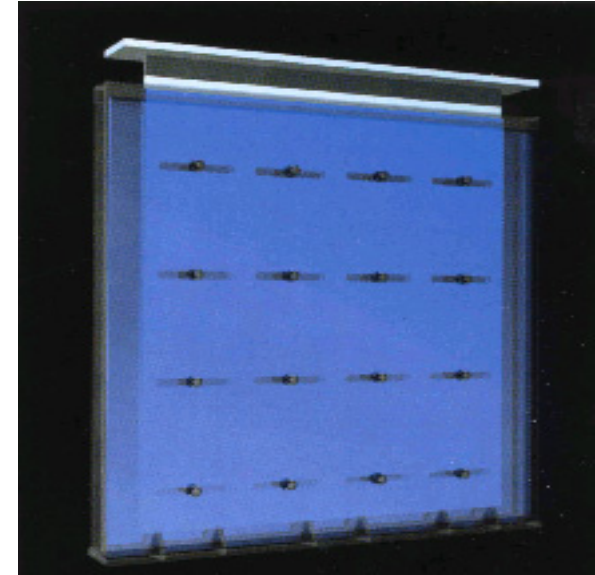


ゴムの種類ごとの最適なパラメータを算出する

# 最近の研究：CAEを用いた制震壁の性能予測システムの構築

## 制震壁

### 高粘性流体



- ・耐久性、耐候性に優れている
- ・高いエネルギー吸収性

構造物の防振・制振装置に広く利用

