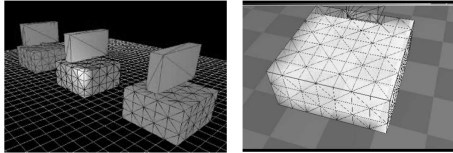
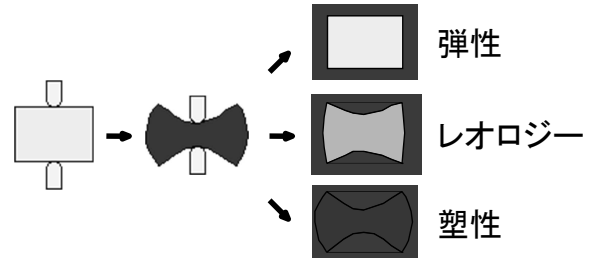


## レオロジー物体の変形シミュレーションと 変形特性の計測



森厚郎 谷口祐介 木下正稔 王忠奎 平井慎一  
(立命館大学 ロボティクス学科 平井研究室)  
森川茂廣  
(滋賀医科大学 MR医学総合研究センター)

## レオロジー物体



## レオロジー物体



## 目的

レオロジー物体の変形をコンピュータで再現  
(シミュレーション)

変形に関する力学パラメータを実物から同定

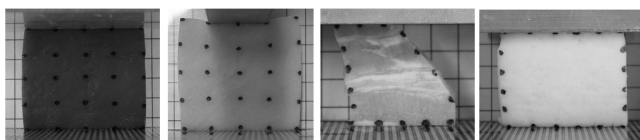
## 応用

生地成形, 咀嚼過程のシミュレーション

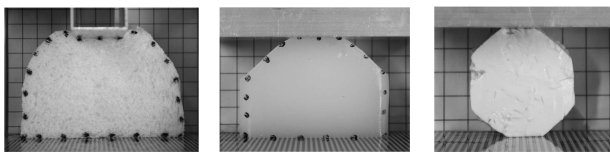
食品の変形特性の数値化

(レオメータ等, 既存の装置で測れない特性の  
数値化)

## 実験材料

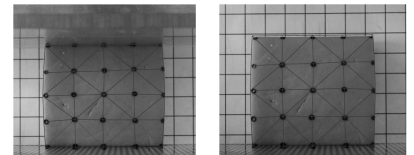
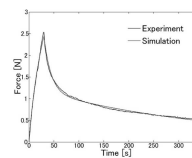


粘土 和菓子 ベーコン はんぺん

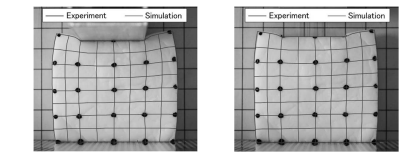
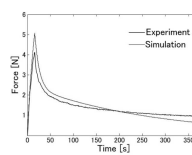


パン こんにゃく 豆腐

## 粘土(力と形状)

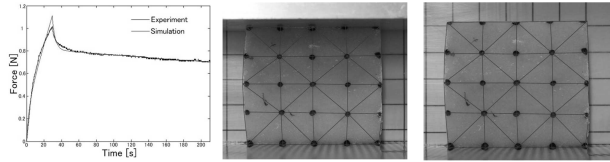


計測(上から全体を押す)

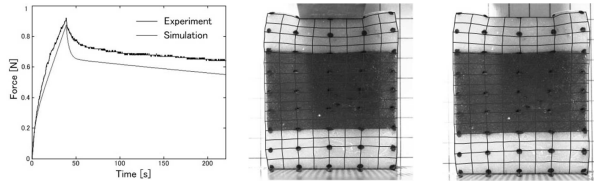


検証(上から中央部を押す)

## 和菓子(力と形状)

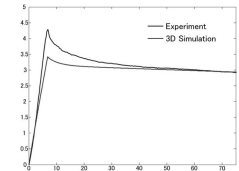
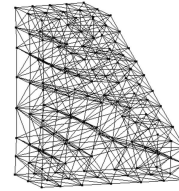


計測(個々の材料)

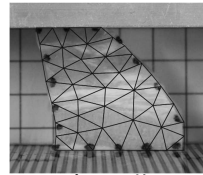


検証(層状の和菓子)

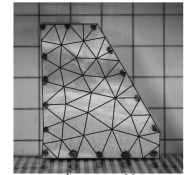
## ベーコン



力の再現

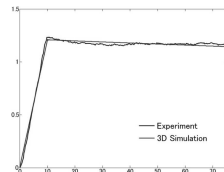
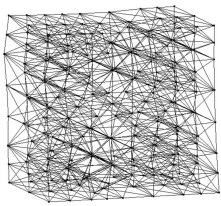


変形形状

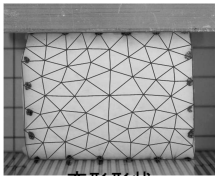


成形形状

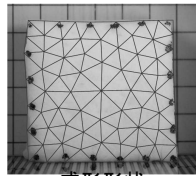
## はんぺん



力の再現

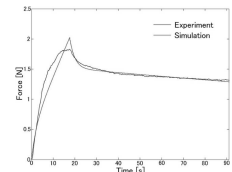
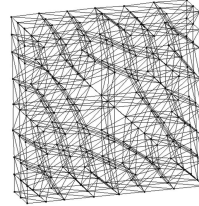


変形形状

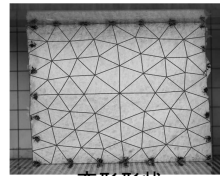


成形形状

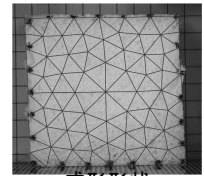
## パン



力の再現

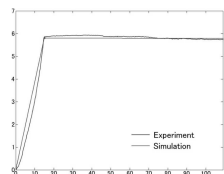
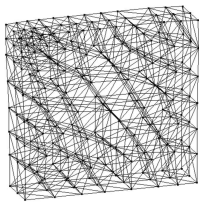


変形形状

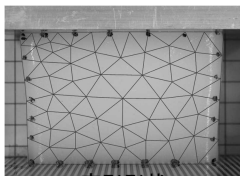


成形形状

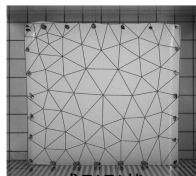
## こんにゃく



力の再現

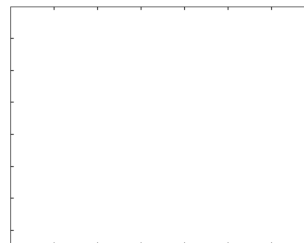


変形形状



成形形状

## 測定方法

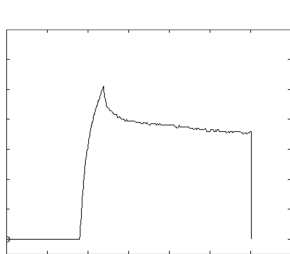


力の計測

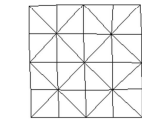


変形の撮影

## シミュレーション



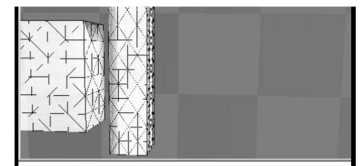
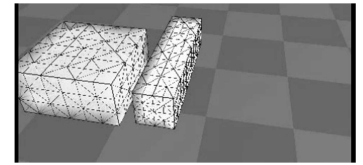
力の再現



Progress : Virtual:0.000000[s]

変形の再現

## シミュレーション



## レオロジー変形特性の表現

弾性要素

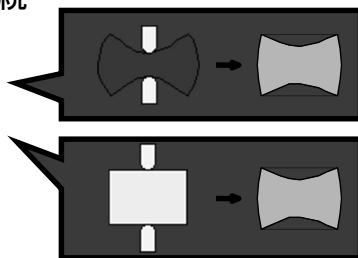
粘性要素

並列・直列に接続

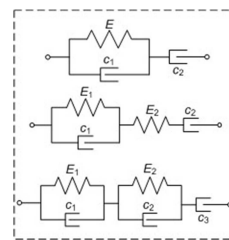
戻り変位

残留変形

戻り速度

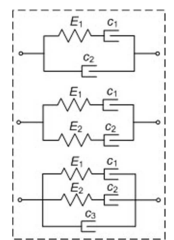


## 二種類のレオロジー要素



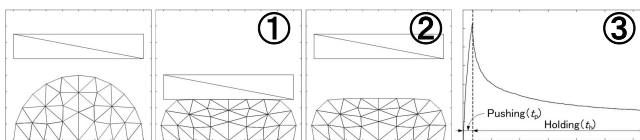
直列モデル

変換可能



並列モデル

## 問題点

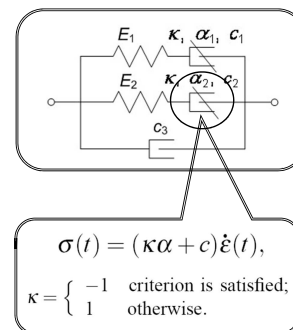


同時に再現 { ① + ③ → 😊  
① + ③ + ② → 😞

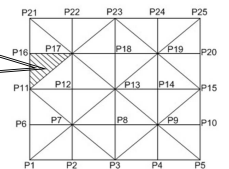
### 結論:

多くの食品材料では、一つのパラメータのセットを使用して残留変形と力を同時に再現することは不可能

## 解決法



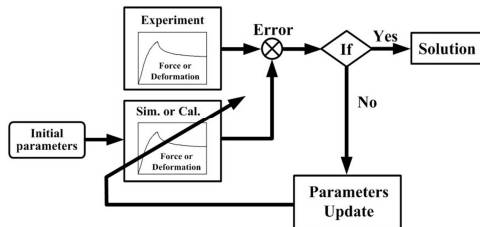
多重粘性要素



有限要素 (FE) モデル

$$\begin{aligned} \dot{u}_N &= v_N, \\ M \dot{v}_N &= A \ell_1 + B \ell_2 - F^{rheo} + F^{ext}, \\ -A^T \dot{v}_N &= A^T (2\omega v_N + \omega^2 u_N), \\ -B^T v_N &= B^T [2\omega (v_N - \dot{d}) + \omega^2 (u_N - d)] - \dot{d}, \\ \dot{F}_1 &= -\frac{E_1}{c_1} F_1 + (\lambda_1^{ela} J_\lambda + \mu_1^{ela} J_\mu) \dot{u}_N, \\ \dot{F}_2 &= -\frac{E_2}{c_2} F_2 + (\lambda_2^{ela} J_\lambda + \mu_2^{ela} J_\mu) \dot{u}_N, \\ F_3 &= (\lambda_3^{vis} J_\lambda + \mu_3^{vis} J_\mu) v_N, \\ F^{rheo} &= F_1 + F_2 + F_3. \end{aligned}$$

## パラメータの同定(数値化)



内部変形と力を計測

計測値とシミュレーション値を比較

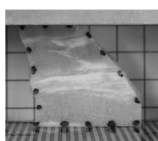
誤差が小さくなる変形パラメータを算出

## 推定パラメータ

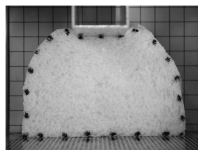
| Mat.  | Trial   | $\gamma$ | $E_1$<br>MPa | $E_2$<br>MPa | $C_1$<br>MPa·s | $C_2$<br>MPa·s | $\alpha_1$<br>MPa·s | $\alpha_2$<br>MPa·s |
|-------|---------|----------|--------------|--------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|
| 粘土    | Red-06  | 0.2672   | 0.0287       | 0.0604       | 8.8323         | 0.5482         | —                   | —                   |
|       | Red-08  | 0.2902   | 0.0318       | 0.0721       | 13.291         | 0.6973         | —                   | —                   |
|       | Red-10  | 0.2367   | 0.0220       | 0.0675       | 8.4719         | 0.6829         | —                   | —                   |
| 和菓子   | Mat.1   | 0.3746   | 0.0135       | 0.0247       | 14.820         | 0.0539         | 14.811              | 0.0185              |
|       | Mat.2   | 0.3353   | 0.0106       | 0.0373       | 6.6096         | 0.0783         | 6.6034              | 0.0377              |
|       | Mat.3   | 0.3267   | 0.0092       | 0.0508       | 4.0958         | 0.0822         | 4.0851              | 0.0521              |
| ベーコン  | Trial.1 | 0.4850   | 0.0083       | 0.0557       | 0.0224         | 23.352         | 0.0197              | 23.314              |
| はんぺん  | Trial.1 | 0.4252   | 0.00024      | 0.0055       | 0.1388         | 3.2316         | 0.1385              | 3.2307              |
| パン    | Trial.1 | 0.0290   | 0.00996      | 0.00406      | 0.0234         | 1.8503         | —                   | —                   |
| こんにゃく | Trial.1 | 0.4595   | 0.00103      | 0.01377      | 30.006         | 400.86         | —                   | —                   |

## 考察

推定が良くない材料: 非均一な材料



ベーコン



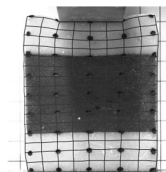
パン

複合材料としてモデリングする必要

赤身と白身(ベーコン) 生地と穴(パン)

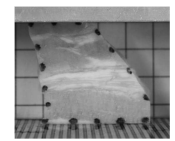
## 考察

複合材料のモデリング



層状の和菓子

個別に材料の  
特性を推定



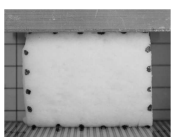
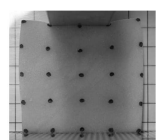
ベーコン

材料の分離が難しい

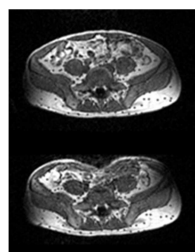
まとめて材料の  
特性を推定

## 考察

変形の計測



マーカーを使う計測



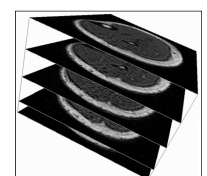
マーカーを使わない計測  
(模様から変形を計測)

## 内部変形

自然状態と変形状態で内部をMRIで撮影  
模様を手掛かりに内部変形を推定

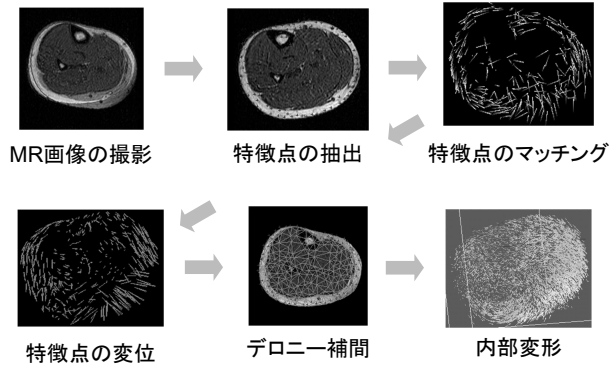


MRI(磁気共鳴装置)

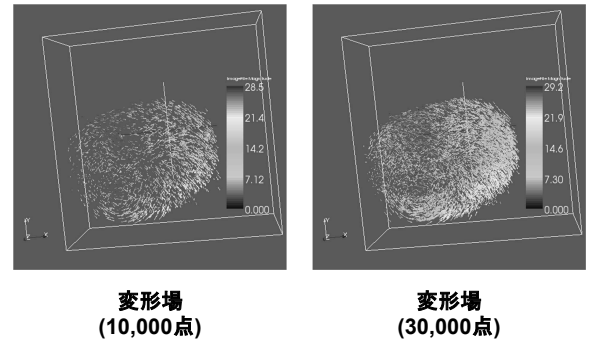


MRスライス画像

## 内部変形



## 内部変形の計算結果



## 結論

レオロジー物体のモデリング  
内部変形と力を計測し、力学パラメータを推定  
残留変形と力を同時に再現することは困難  
多重粘性要素を提案  
さまざまな食材への適用

## 課題

シミュレーションの高速化  
SPH法とハプティックデバイスを使った  
和菓子製作の再現  
切断、接合などの位相的な変形のモデリング