

# レオロジー物体のシミュレーションと力学パラメータの同定

## Simulation and Identification of Rheological Object

阿部 慶之, 浪間 一希, 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)

Hirai Lab., Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

Biomedical MR Science Center, Shiga University of Medical Science.

連絡先: 平井慎一 立命館大学ロボティクス学科 滋賀県草津市野路東 1 - 1 - 1

Contact: Shinichi Hirai, Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ,

Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

## 1 はじめに

現在, 食品工学における食品素材や生体組織などの様々な特性を有する物体のモデリングが必要とされている. 粘弾性物体や塑性物体に関してはモデリングがすでに確立されている. しかし, 戻り変位と残留変位を有するパン生地のような食品や生体組織などのレオロジー的変形特性が残る物質のモデリングの手法は確立されていない. この理由として, レオロジー物体が多様な変形特性を持つことが挙げられる. これらのモデリングを行うには, 適切なモデルの設定と力学パラメータの同定が必要となってくる. 本報告では, レオロジー物体のモデリング手法と変形計算方法を提案する.

## 2 レオロジー物体

Fig.1-(a) に示す初期状態の物体に外力を印加したとき, Fig.1-(b) に示すように変形すると仮定する. 粘弾性物体の場合, Fig.1-(c) に示すように外力を開放したときの形状が初期状態のものと同じである. 塑性物体の場合, Fig.1-(d) に示すように外力を開放しても, 変形した時の形状が維持される. レオロジー物体の場合, Fig.1-(e) に示すように初期形状に近づくものの, 残留変位が見られる. このように, レオロジー物体は物体に力を印加したときに, 若干の残留変位を有するという特徴がある.

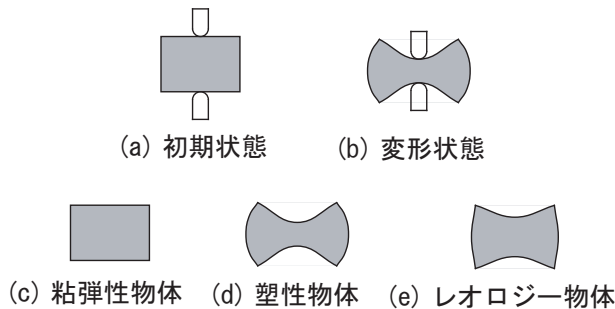


Fig. 1: 粘弾性物体, 塑性物体, レオロジー物体

弾性要素  $k$  と粘弾性要素  $b$  が戻り変形を示す. そして, 粘性要素  $b'$  が残留変形を示す. ゆえに, レオロジー物体の変形特性は  $k, b, b'$  で決まる. 三要素モデルの変位を  $d$ , フォークト部の変位を  $d^{voigt}$ , ダンパー部の変位を  $d^{vis}$ , モデルの発生力を  $f$  とすると, このモデルの挙動は,

$$d = d^{voigt} + d^{vis}, \quad (1)$$

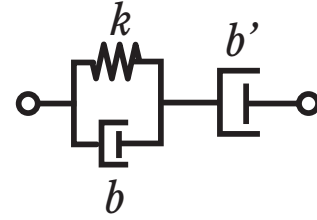


Fig. 2: 三要素モデル

$$f = kd^{voigt} + bd^{voigt}, \quad (2)$$

$$f = b'd^{vis}, \quad (3)$$

で表すことができる. 二次元では三角形要素, 三次元では四面体要素の集合として形状を表す. 各要素の頂点に質点を, 稜線に三要素モデルを配置することにより, レオロジー物体の変形過程を表すことができる.  $i$  番目の質点を  $P_i$  とし,  $k$  番目のレオロジー要素を  $E_k$  とする. レオロジー要素  $E_k$  は, 両端の質点番号を属性として含み, その一方を始点, 他方を終点と呼ぶ.

三要素モデルで構成されたレオロジー物体の運動方程式を導出する. 質点  $P_i$  と  $P_j$  がモデル要素  $E_k$  で接続されているとする. 質点  $P_i$  の位置を  $x_i$ , 速度を  $v_i$ , 質量を  $m_i$  で表し, モデル要素長さを  $l_k$ , フォークト部の長さを  $d_k$  とする. このとき, ダンパー部の長さは  $l_k - d_k$  で表せる. また, フォークト部の自然長を  $L_k$  で表す. このモデルの状態変数は  $x_i, v_i, x_j, v_j, d_k$  である. このとき, レオロジー物体の運動方程式は,

$$m_i \dot{v}_i = \sum_{k \in R_i} f_k e_k - \sum_{k \in S_i} f_k e_k + F_i^{ext}, \quad (4)$$

$$\dot{d}_k = \frac{-k(d_k - L_k) + b'l_k}{b + b'}, \quad (5)$$

と表せる. ここで,  $R_i$  は質点  $P_i$  を始点とする三要素モデルの集合,  $S_i$  は質点  $P_i$  を終点とする三要素モデルの集合であり,  $F_i^{ext}$  は質点  $P_i$  に作用する外力である. 運動方程式の解を数値的に計算することにより, レオロジー物体の変形を求めることができる.

## 3 スライダー付三要素モデル

三要素モデルのダンパー部は, 力が作用している限り変形し続ける. このような無制限の変形を防ぐために, Fig.3 に示すスライダー付き三要素モデルを導入する. ス

ライダーは、指定された条件を満たすときには、ダンパー部の変形を許す．しかし、条件が破られた時には、ダンパー部の変形を禁止する．したがって、ダンパー部の変形を表す式として、式 (3) の代わりに次式を用いる．

$$b'd^{vis} = \begin{cases} f & \text{条件が満たされているとき} \\ 0 & \text{条件が破られているとき} \end{cases} \quad (6)$$

三要素モデルの長さを  $l$ 、フォークト部の長さを  $l^{voigt}$  とする．このとき、レオロジー物体の接続関係を保持するために、以下の条件を課す．

$$0 \leq l^{voigt} \leq l. \quad (7)$$

これを一般化すると、

$$a_{\min}l \leq l^{voigt} \leq a_{\max}l \quad (8)$$

となる．ここで、 $a_{\min}$  と  $a_{\max}$  は、フォークト部の長さ  $l^{voigt}$  と三要素モデルの長さ  $l$  の比  $l^{voigt}/l$  の最小値および最大値を表す．三要素モデルの初期長さを  $l_{\text{init}}$ 、フォークト部の初期長さを  $l_{\text{init}}^{\text{ela}}$  とすると、式 (8) は以下のようになる．

$$a_{\min}(l_{\text{init}} + d) \leq l_{\text{init}}^{\text{voigt}} + d^{\text{voigt}} \leq a_{\max}(l_{\text{init}} + d) \quad (9)$$

図の挿入

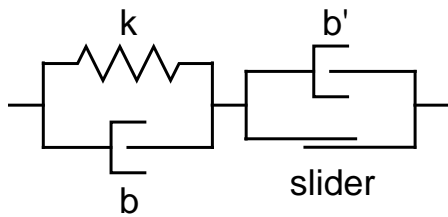


Fig. 3: スライダー付き三要素モデル

## 4 変形シミュレーション

レオロジー物体の変形シミュレーションを行った例を示す．Fig.4 は二次元の計算例である．テーブル上のレオロジー物体に、剛体の棒を押し下げて変形させ、その後に棒を引き上げる．三要素モデルのパラメータは  $k = 1.2$ 、 $b = 1.5$ 、そして  $b' = 15$  であり、物体の質量 30 は各質点に等分に配分されている．図に示すように、戻り変形と残留変形が生じており、レオロジー的な性質を表現できている．三要素モデルのパラメータを変えることにより、弾性に近い変形特性から塑性に近い変形特性まで表現できる．Fig.5 はピザ生地の変形シミュレーションである．テーブル上に置かれた生地を、回転するローラーにより成形する．実際の成形過程で確認できる、生地の後方が膨らむという現象が、シミュレーションにより表されていることが確認できる．このように、仮想レオロジー物体を適用することにより、生地や粘土の変形過程などを、動的にシミュレーションすることができる．

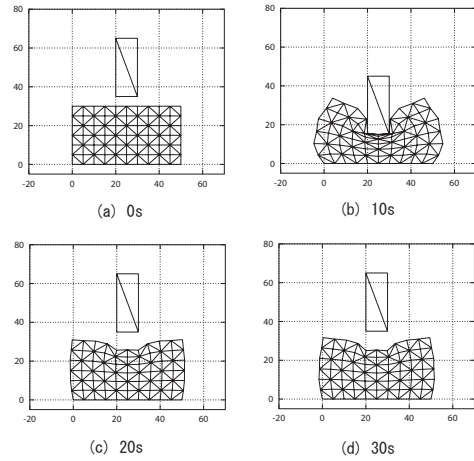


Fig. 4: 二次元のレオロジー変形の計算例

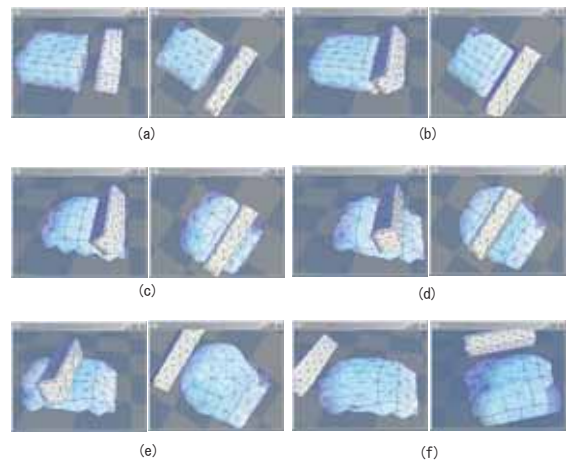


Fig. 5: ピザ生地の変形シミュレーション

## 5 MRIによる内部変形の計測

実際の変形過程をシミュレーションするためには、モデルに含まれる力学パラメータを同定する必要がある。同定を支えるセンシングは、物体の表面形状と表面の分布圧力のセンシングであり、レオロジー物体内部の挙動は未知のまま残されている。結果として、モデル同定の評価が不十分であり、さらには実際のレオロジー物体に表れるであろう変形の非均一性や非線形性、異方性に対応できない可能性が高い。近年、超音波画像装置やCT、MRIに代表される三次元イメージング技術が発展している。これらの技術を用いることにより、柔軟物の内部挙動を計測し、計測結果をベースにするモデリングが可能になると期待できる。

MRIでは、物体の断面を複数枚撮影し、得られた二次元画像を構成して三次元映像を得る。この断面画像をスライス画像、スライス画像間の間隔をスライス間隔と呼ぶ。MRIの長所は、物体内部を任意の切断面で撮影できること、物体内部の三次元的な変形を得られることである。しかし、撮影時間が長いので、物体の動的変化を得ることは困難である。本実験では、滋賀医科大学に設置されているMRI装置を使用した。撮影においては、対象物をRFコイル内に設置した。MRI装置の外見をFig.6-(a)に、RFコイルの外見をFig.6-(b)に示す。

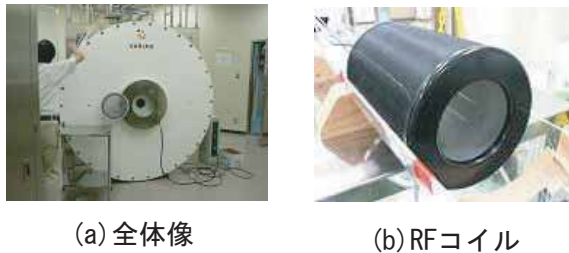


Fig. 6: MRI装置

今回は、非均一な性質を持つ下腿を撮影した。下腿を圧迫していない状態（初期状態）および下腿の下にプラスチックの箱を置き圧迫した状態（変形状態）を撮影した。撮影条件は、スライス間隔2mm、撮像視野20×20cm、積算2回とし、それぞれ76枚のスライス画像を得た。画像サイズは256×256pixels、画素サイズは0.8mm/pixelである。変形状態では、プラスチックの箱を置くために下腿の位置をずらすため、レジストレーションを行う必要がある。剛体部分である頸骨（下腿の太い方の骨）の周りから同一の点である3点を、それぞれ初期状態と変形状態の画像から選択してレジストレーションを行った。レジストレーション後の下腿の初期状態をFig.7-(a)に、変形状態を図7-(b)に示す。これらを画像解析し、変形計測を行った結果をFig.8に示す。

## 6 力学パラメータの同定

前章のMRIを用い、力学パラメータの同定を行う。通常、パラメータの同定は変位量から行っている。しかし、MRIは撮影感覚が長く、内部変位を微小な時間で計測することができない。そこで、今回は力を計測することでパラメータを求める方法を用いた。Fig.9は実験に用いた小麦粉粘土である。サイズは80×80×12.5mmで、0.5mm/sの速度で10mm押し下げる。その後、48秒間10mmの押し込み量を状態を維持し続け、解放する。力

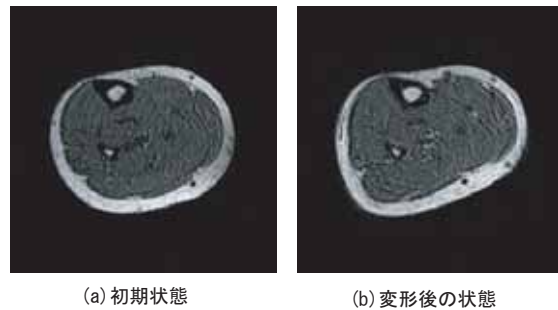


Fig. 7: MRIによる下腿の内部撮影

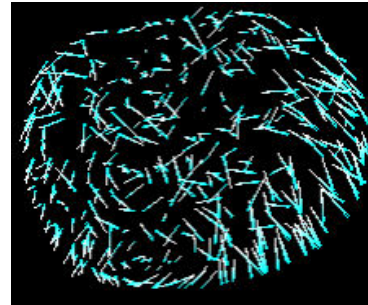


Fig. 8: 下腿の内部変形の計測結果

の計測はFig.10に示す触覚センサーを用いている。

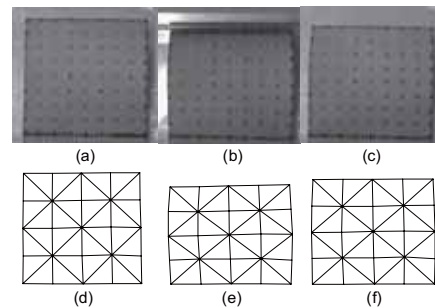


Fig. 9: 小麦粉粘土

次に、実際にシミュレーションにより求めた結果をFig.11に示す。Fig.11-(a)より、小麦粉粘土の変形のシミュレーションはよい結果が得ることができていることがわかる。しかし、Fig.11-(b)の力のシミュレーションは計測結果と大きくずれている。この結果から、三要素モデルだと、力の同定には不十分であることがわかる。

## 7 四要素モデル

前章で、三要素モデルでは力の同定が不十分であることがわかった。そこで、この問題を解決するために、Fig.12に示す四要素モデルを使用する。四要素モデルは図の4つの形が存在するが、いずれも力を求める式は同じになる。

前章と同じ実験を四要素モデルを用いたシミュレーションで検証した。Fig.13はシミュレーションの結果である。Fig.13-(a)より、シミュレーションによる変形の結果が実験による変形と一致していることがわかる。また、Fig.13-(b)より、力の同定も三要素モデルに比べ、近似が正確になっていることがわかる。

## 8 おわりに

本稿では、レオロジー物体のモデリング手法と変形計算手法を示した。この手法は、すでに三次元に拡張しており、生地の変形過程や食品の飲み込み過程のシミュレーションに適用している。

現在のレオロジー物体モデルは、線形の弾性要素と粘性要素から構成されている。ゆえに、粘性要素を含めたモデルの同定方法を新たに提案する必要がある。さらに、現在、レオロジー物体は四要素モデルを用いて同定を行っている。このモデルに非線形要素を用いることで、力学パラメータの同定がより正確になることが期待される。

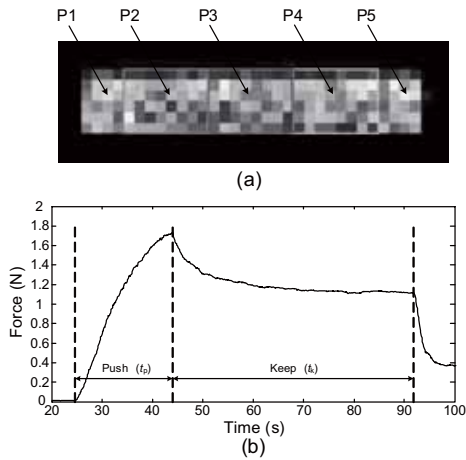


Fig. 10: 触覚センサーと力の計測結果

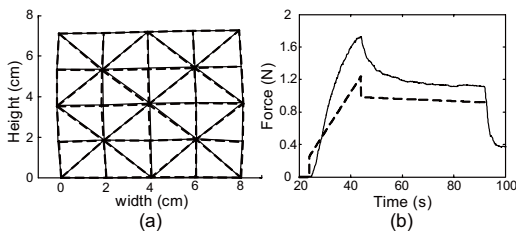


Fig. 11: 三要素モデルのシミュレーション結果

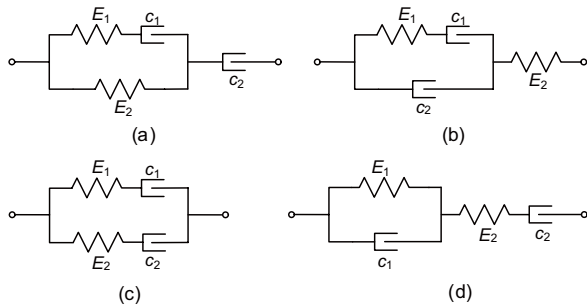


Fig. 12: 四要素モデル

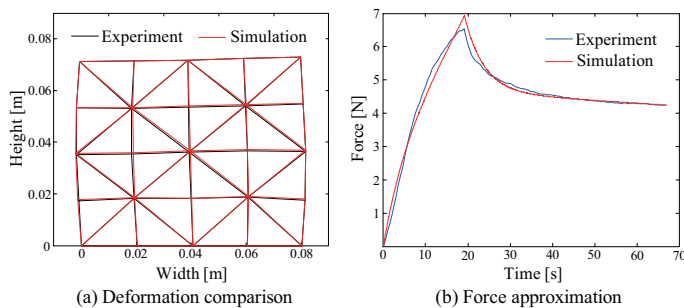


Fig. 13: 四要素モデルのシミュレーションの結果

## 参考文献

- [1] 遠藤 和美, 張 鵬林, 平井 慎一, 徳本 真一, 柔軟物の内部変形計測による非一様 FE モデルの力学パラメータ同定方法の検証, 計測自動制御学会, 2007.
- [2] 活田 崇至, 村松 潤治, 早見 信一郎, 森川 茂廣, 平井 慎一, 超音波画像と MRI を用いた内部計測による柔軟物の FE モデルの検証, ロボティクスシンポジウム予稿集, 2006.
- [3] Ryo Nogami, Hiroshi Noborio, Seiji Tomokuni, and Shinichi Hirai, *A Comparative Study of Rheology MSD Models whose Structures are Lattice and Truss*, IROS04, pp.3809–3616, Sendai, September, 2004.
- [4] Naoki Ueda, Shinichi Hirai, and Hiromi T. Tanaka, *Extracting Rheological Properties of Deformable Objects with Haptic Vision*, ICRA04, pp.3902–3907, New Orleans, April, 2004.
- [5] Ryo Nogami, Fumiaki Ujibe, Hiroki Fujii and Hiroshi Noborio, *Precise Deformation of Rheologic Object under MSD Models with Many Voxels and Calibrating Parameters*, ICRA04, pp.1919–1926, New Orleans, April, 2004.
- [6] 平井慎一, 友國誠至, レオロジー変形の動的モデリング, ロボティクス・メカトロニクス'04 講演会予稿集 CD-ROM, 2004.
- [7] 友國誠至, 杉山勇太, 平井慎一, 実時間計算可能な仮想レオロジー物体の構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp.247–254, 2003.
- [8] 野上良, 榎亮, 登尾啓史, レオロジー物体を表現する 3つのモデルの変形特性に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp.271–278, 2003.