

生体組織の力学特性の計測装置の試作

山口 佳紀 (立命館大学) 平井 慎一 (立命館大学)

1. 緒言

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。そこで、本報告では、力学パラメータの同定を行うために必要な、人体組織に力を加えた際の力と変位を計測する機器の考案について述べる。

1.1 レオロジー物体

図 1-(a) に示す初期状態の物体に外力を印加したとき、図 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、図 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一致する。塑性物体の場合、図 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。

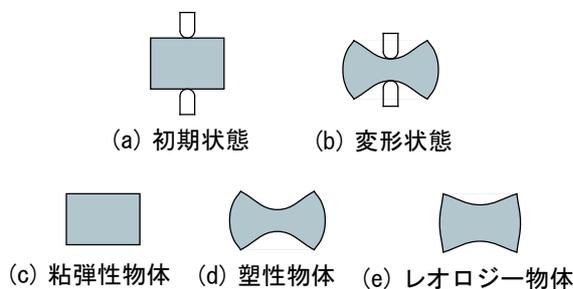


図 1 粘弾性物体，塑性物体，レオロジー物体

1.2 特徴と問題点

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。レオロジー物体の特徴は力を印加した際に残留変形が発生するという点であり、それによってモデリングとパラメータの推定が難しくなっている。特に、力と残留変形を同時に再現するのが難しくなっている [1]。

1.3 物理モデル

レオロジー物体の力と変形を同時に再現するために、図 2-(a) の多重粘性要素を提案した [2]。多重粘性要素はシミュレーション中にパラメータを変化させることができる。これを使用することで図 2-(b) の並列 5 要素

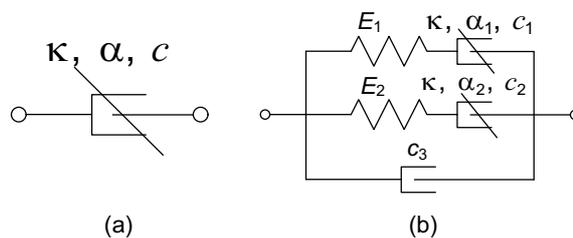


図 2 多重粘性要素 (a) と並列 5 要素モデル (b)

素モデルを構築している。式 1、式 2 は多重粘性要素の構成則である。

$$\sigma(t) = (\kappa\alpha + c)\dot{\epsilon}(t), \quad (1)$$

ここで、

$$\kappa = \begin{cases} 1 & \text{Criterion is satisfied,} \\ -1 & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

2. 2D/3D 有限要素モデル

有限要素法は、物体の変形の計算方法に最も適している。FE モデルでは、物体を一連の要素で記述し、個々の要素の挙動を分析することで物体の動作を算出する。式 3 にレオロジー物体の二次元モデルを示す。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}_N &= \mathbf{v}_N, \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_N &= \mathbf{A}\ell_1 + \mathbf{B}\ell_2 - \mathbf{F}^{rheo} + \mathbf{F}^{ext}, \\ -\mathbf{A}^T\dot{\mathbf{v}}_N &= \mathbf{A}^T(2\omega\mathbf{v}_N + \omega^2\mathbf{u}_N), \\ -\mathbf{B}^T\dot{\mathbf{v}}_N &= \mathbf{B}^T[2\omega(\mathbf{v}_N - \dot{\mathbf{d}}) + \omega^2(\mathbf{u}_N - \mathbf{d})] - \ddot{\mathbf{d}}, \\ \dot{\mathbf{F}}_1 &= -\frac{E_1}{c_1}\mathbf{F}_1 + (\lambda_1^{ela}\mathbf{J}_\lambda + \mu_1^{ela}\mathbf{J}_\mu)\dot{\mathbf{u}}_N, \\ \dot{\mathbf{F}}_2 &= -\frac{E_2}{c_2}\mathbf{F}_2 + (\lambda_2^{ela}\mathbf{J}_\lambda + \mu_2^{ela}\mathbf{J}_\mu)\dot{\mathbf{u}}_N, \\ \mathbf{F}_3 &= (\lambda_3^{vis}\mathbf{J}_\lambda + \mu_3^{vis}\mathbf{J}_\mu)\mathbf{v}_N, \\ \mathbf{F}^{rheo} &= \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u}_N は FE モデルの格子点の変位を、 \mathbf{v}_N は格子点の速度を、 \mathbf{M} は慣性行列を、 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} は CSM の制約行列を、 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 、 \mathbf{F}_3 、 \mathbf{F}^{rheo} は格子点に作用する力を、 \mathbf{J}_λ 、 \mathbf{J}_μ は接続行列を、 E_1 、 E_2 、 c_1 、 c_2 は弾性と粘性のパラメータを表す。

3. 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。3 は二次元の計算例である [3]。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

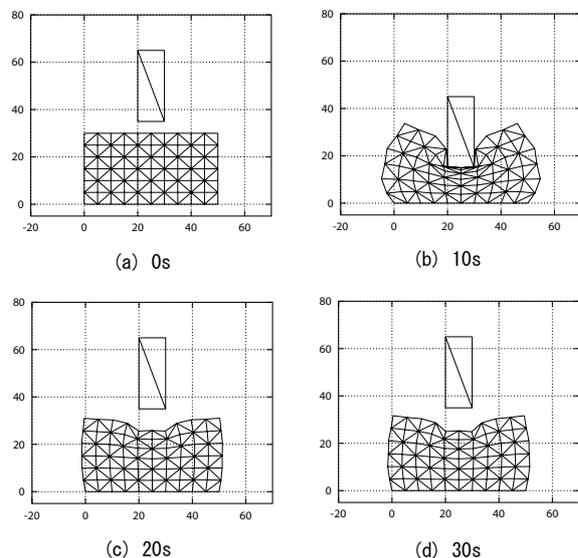


図3 二次元のレオロジー変形の計算例

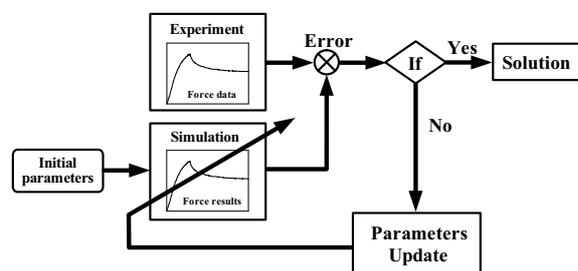


図4 パラメータの最適化

の後に棒を引き上げる．図から分かるように，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．このように，仮想レオロジー物体を適用することにより，変形過程を動的にシミュレーションすることができる．

4. パラメータの推定法

次に，パラメータの最適化の方法を図4に示す．変形物体の物理的パラメータの推定に使用される最も一般的な方法は，シミュレーションベースの最適化である[4, 5]．このシミュレーションは，図4に示すようにシミュレーションと実験の誤差が最小になるまで物理的パラメータの更新を繰り返す．

5. 計測器

臓器などは体から取り外すと物性が変わる．それは血が通っているかどうかで物体の粘性係数等に変化が現れるためである．よって，人体の臓器の変形特性を調べるためには対象が体と繋がっている状態で無ければ正確な値が得られない．

本研究では体内に器具を入れた状態で，動物の臓器の変形における力と変形量の計測をするための計測機器の製作を目的とする．測定器は負担が少ない内視鏡手術で行えるよう，可能な限り小型化を目指して作成する．

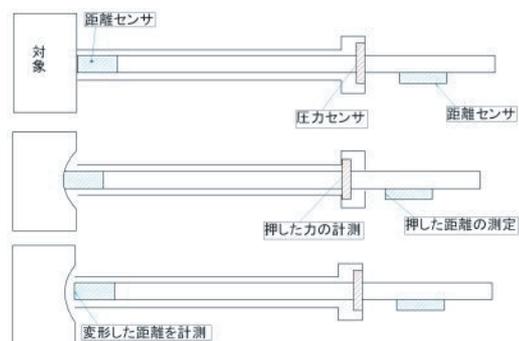


図5 計測器概略図



図6 作成途中の計測器

FEモデルに含まれる力学パラメータを推定するのに必要なデータを得るために，図5に示される形状の機器を考案した．また，作成途中の機器を図6に示す．

6. おわりに

本稿では，レオロジー物体の力学パラメータの同定を行うために必要な，人体組織に力を加えた際の力と変位を計測する機器の考案について述べた．この機器によって，臓器の物性データが解れば，より正確なモデリングが可能となる．また，医療とは離れるが，小型で持ち運びがしやすいレオロジー物体の変形・力計測器は食品分野等でも活用できる可能性がある．食品の多くは時間がたつと乾いたり，湿気ったりして物性に变化がある．そのため，そのため，小さく持ち運びが可能な機器があれば便利であり，応用できると期待される．

参考文献

- [1] Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, *Modeling and Estimation of Rheological Properties of Food Products for Manufacturing Simulations*, Journal of Food Engineering, Elsevier, 102(2), pp. 136-144, Jan., 2011.
- [2] Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, *Modeling and Parameter Estimation of Rheological Objects for Simultaneous Reproduction of Force and Deformation*, Proc. 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics (ICABB 2010), Venice, Oct., 2010.
- [3] 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.
- [4] Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, *Modeling and Parameter Identification of Rheological Object Based on FE Method and Nonlinear Optimization*, Proc.

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009), pp.1968-1973, St. Louis.

- [5] Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, *Modeling and Property Estimation of Sweets for Their Manufacturing Simulation*, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), pp. 3536-3541, Taipei, Oct., 2010.