

形状制御のためのレオロジー物体の変形モデリング

徳本真一* 平井慎一*

Deformation Modeling of Rheological Objects for Their Shape Control

Shinichi Tokumoto* and Shinichi Hirai*

A new approach to the deformation modeling of rheological objects for their shape control is presented. Manipulative operations of rheological objects can be found in many industrial fields such as food industry and medical product industry. Automatic operations of rheological objects are eagerly required in these fields. Since rheological objects deform during operation processes, it is necessary to simulate the behavior of the objects and to estimate their deformation for the automatic operations. Consequently, a model of a rheological object is needed for the simulation and the estimation of its deformation.

We will propose a lattice structure based modeling method for rheological object deformation. First, behavior of viscoelastic models is briefly explained. Second, we will introduce a nonlinear damper (NLD) into a viscoelastic model in order to describe the deformation of rheological objects. Next, a rheological object is modeled as a lattice structure, where mass points are connected through viscoelastic models using an NLD. Model parameters of a rheological object are then estimated through a creep experiment. Finally, comparison between the behavior of an actual rheological object and that of an identified model will demonstrate the validity of the proposed model.

Key Words: Modeling, Viscoelasticity, Deformation, Nonlinear Damper, Three Element Model, Identification

1. はじめに

成形作業は、製造業の様々な分野で見受けられる基本的な作業の一つである。例えば、自動車産業におけるフレームの成形、電気機器における筐体の成形、食品産業における生地やペーストの成形、食肉業における食肉の成形など、様々な材料を対象とする成形作業が、数多く存在する。これらの成形作業の内、自動車フレームや筐体の成形は、塑性変形を利用する成形であり、自動化が進んでいる。一方、生地やペースト、食肉の成形は、現在でも人手に頼る部分が多い。

物体が塑性変形する場合、物体にエフェクタで位置変位を与えることにより、物体を成形することができる。一方、生地やペースト、食肉の成形作業においては、エフェクタが物体から離れた後に物体表面が復元し、また、位置変位の履歴によって復元の状況が異なるため、成形作業を位置制御で実現することは難しい。したがって、生地やペースト、食肉などを成形する場合は、物体の力学的性質を考慮した成形制御が必要となる。生地やペースト、食肉などの物体は、粘弾性特性を示すとともに、残留変形が大きいという特性を有する。本研究では、このような物体をレオロジー物体と呼び、その成形作業を研究の対象と

する。レオロジー物体の成形制御を行うためには、あらかじめコンピュータ上で、物体の変形挙動を評価することが有効である。そのためには、レオロジー物体のモデリングと、変形シミュレーションの実現が必要である。

柔軟物体のモデリングは、コンピュータグラフィックスやバーチャルリアリティーの分野で研究されている。Terzopoulosらは、粘弾性物体のコンピュータグラフィックスモデルを提案した[1]。Joukhaderらは、変形物体間の衝突シミュレーションを行った[2]。Chaiらは、バーチャルリアリティーシステムにおける、仮想現実の変形シミュレーションを提案した[3]。これらの研究は、コンピュータ上で粘弾性物体の挙動を表現することを目的としており、実物体の挙動との整合性は考慮されていない。また、レオロジー物体のモデリングは行われていない。一方、柔軟物体のハンドリング操作について、研究が進められている。Taylorらは、衣服や靴の自動ハンドリングについて研究した[4]。Zhengらは、穴に変形梁を挿入する作業方策を提案した[5]。和田らは、伸縮性のある衣服の位置操作のための制御則を提案した[6]。これらの研究は、弾性物体を対象としており、レオロジー物体は扱われていない。レオロジーの分野では、レオロジー材料のモデリングについて様々な研究がなされている[7]。これらのモデリングは1軸方向の力学的挙動のみを対象としており、レオロジー物体の三次元的な変形に関するモデリングは扱われていない。

原稿受付 1999年10月18日

*立命館大学ロボティクス学科

*Department of Robotics, Ritsumeikan University

本研究の目的は、レオロジー物体のモデリング手法を確立し、その変形シミュレーションを実現することである。まず、レオロジー物体の動的挙動を表現する粘弾性要素について説明する。そして、粘弾性モデルを格子状に配置する格子構造法により、レオロジー物体の変形を表現する。次に、粘弾性モデル内に非線形ダンパー（NLD）を導入する。また、非線形粘弾性モデルとして3要素モデルを採用し、その非線形3要素モデル内のパラメータを決定する手法を提案する。最後に、提案するモデルによる変形シミュレーションと、実際の変形とを比較し、モデルの妥当性を検討する。

2. レオロジー物体のモデリング

2.1 レオロジー物体の特性

本章では、レオロジー物体の変形特性を表す力学モデルについて考察する。レオロジー物体の弾性と粘性を表現するために、Fig. 1 (a) に示す粘性要素と、Fig. 1 (b) に示す弾性要素を導入する。これら二つの基本要素を直列あるいは並列に、複数結合することにより、粘弾性モデルを構築することができる。Fig. 2 (a), (b) は、弾性要素と粘性要素をそれぞれ直列、並列に接続して得られるモデルである。Fig. 2 (c), (d), (e), (f), (g), (h) は

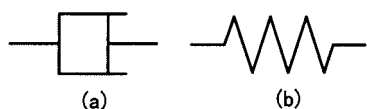


Fig. 1 Fundamental elements

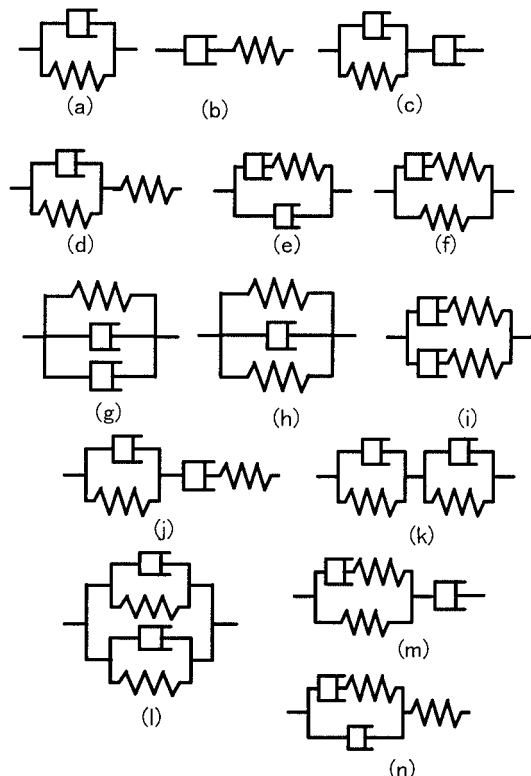


Fig. 2 Viscoelastic elements

3個の基本要素から成るモデル、Fig. 2 (i), (j), (k), (l), (m), (n) は4個の基本要素から成るモデルである。5個以上の基本要素から成るモデルも、構築することができる。

一般に、レオロジー物体に力を与えると、変形が生じる。レオロジー物体に、一定の力を一定時間与えたときの変形を、Fig. 3 に示す。時刻 t_1 で一定の力を与えると、変位が徐々に増加する。時刻 t_2 で力を0に戻すと、変位が減少する。力を0に戻すとき減少する変位を、戻り変位と呼ぶ。また、力を0に戻したときの定常変位を、残留変位と呼ぶ。このとき、レオロジー物体の特性は、以下のようにまとめられる。

- (1) 残留変位を有する。
- (2) 戻り変位を有する。
- (3) 振動が減衰する。

Fig. 2 に示した粘弾性モデルが、上記の条件を満たすか否かを調べる。粘弾性モデルは、基本要素を直列、あるいは並列に接続した形で与えられる。並列接続を構成する要素はすべて、同じ変位を持つ。そこで、同じ変位を有する基本要素の集合を部と呼ぶ。粘弾性モデルは、部の直列結合とみなすことができる。部は(1) 残留変位を有する残留変形部と(2) 残留変位が0である非残留変形部に分類することができる。例えば、Fig. 2 (a) に示す粘弾性要素は、一つの部から構成される。これは、非残留変形部である。Fig. 2 (b) に示す粘弾性要素は、二つの部から構成される。左側の部すなわち粘性要素は、残留変形部であり、右側の部すなわち弾性要素は、非残留変形部である。Fig. 2 (c) に示す粘弾性要素は、二つの部から構成されており、左側の部は非残留変形部であり、右側の部は残留変形部である。また、Fig. 2 (e) は一つの部から構成されており、これは残留変形部である。また、粘性要素のみから成る残留変形部は戻り変位を持たない。一方、弾性要素を含む残留変形部ならびに非残留変形部は、戻り変位を有する。そして、弾性要素が部内に単独で存在する部には、単振動が生じる。したがって、レオロジー物体における上述の三つの特性は、以下のように書くことができる。

- (1) 残留変形部を有する。
- (2) 非残留変形部もしくは弾性要素を含む残留変形部を有する。
- (3) 弾性要素が部内で単独に存在しない。

この三つの条件を満たす粘弾性要素を選択し、レオロジー物体のモデリングに用いる。すべての条件を満たす粘弾性要素は、(c), (e), (m) である。モデリングにおいて、要素数はできる限り少ないほうがよい。したがって、3要素モデル (c) あるいは

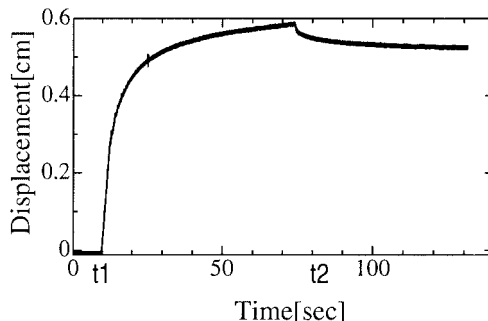


Fig. 3 Deformation response of actual reological object

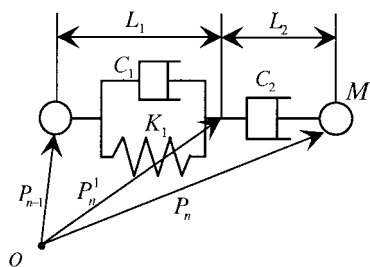


Fig. 4 Three element model

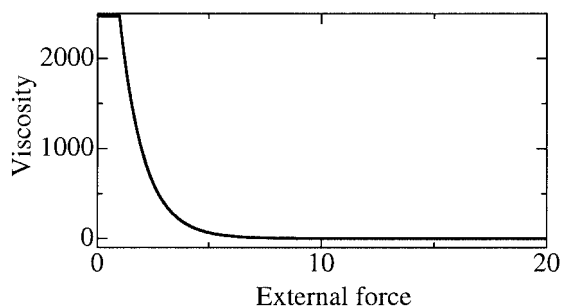


Fig. 5 Viscosity of nonlinear damper

(e) を選択する .

次に、粘弾性モデルを定式化する . ここでは Fig. 2 (c) に示す 3 要素モデルの定式化を示す . Fig. 4 に示すように、座標系の原点を O とする . 3 要素モデルの両端の座標を P_{n-1}, P_n とする . 3 要素モデルの非残留変形部のバネ定数、ダンパー定数を、それぞれ K_1, C_1 とする . また、残留変形部のダンパー定数を C_2 とする . さらに、非残留変形部の自然長を L_1 、残留変形部の自然長を L_2 とする . 両端の質量を M とする . 残留変形部と非残留変形部の結合点の座標を P_n^1 とする . さらに、 $d_n = P_n - P_{n-1}$. と定義する . 3 点 P_{n-1}, P_n^1, P_n は直線上に存在するので、 P_n^1 はパラメータ k を用いて、 $P_n^1 = kd_n + P_{n-1}$ と表現できる . ここで $e_n = d_n/|d_n|$ とすると、 e_n は時変の単位方向ベクトルを表す . また $Z_n = k|d_n|$ とすると、 Z_n は時変の長さ係数を示す . 点 P_n に作用する力を F_e とする . 力 F_e は非残留変形部にかかる力と等しいので、

$$F_e = -C_1 \dot{Z}_n e_n - K_1 (Z_n - L_1) e_n \quad (1)$$

と表すことができる . また、力 F_e は残留変形部にかかる力と一致する . したがって、次式が成立する .

$$F_e = -C_2 \left(\frac{d}{dt} (|d_n| - Z_n) \right) e_n. \quad (2)$$

質点 P_n に働く外力を F_a とする . このとき、質点 P_n の運動方程式は、次式で与えられる .

$$M \ddot{P}_n = F_e + F_a. \quad (3)$$

式 (1)(2)(3) が、3 要素モデルの運動方程式を与える . 式 (1)(2) から F_e を消去すると、パラメータ k を導出することができる . パラメータの値より 3 要素モデルにかかる力を計算することができ、質点 P_n の運動を計算することができる . なお、他の粘弾性モデルに対しても、同様の定式化が可能であり、質点の運動を計算することができる .

上述の粘弾性モデルには一つの問題点がある . それは、力を作用させる限り変形が続くという点である . 例えば、パン生地の上に軽い物体を置く場合を想定する . このとき、パン生地に変形は生じない . しかし、この粘弾性モデルでは、残留変形部のダンパーが伸縮し続け、結果として変形を生じる . これは、残留変形部のダンパーが、線形であることに起因する . そこで次章では、この問題を解決するために、非線形ダンパーを導入する .

2.2 非線形ダンパーを用いた粘弾性モデル

十分小さい力に対する線形粘弾性モデルの変形と、実際のレオロジー物体の変形との違いは、粘弾性モデルの残留変形部の線形ダンパー要素によって生じる . そこで、実際の粘弾性物体の挙動をモデリングするために、残留変形部に非線形ダンパー (nonlinear damper. 以下 NLD と略す) を導入する . 十分力が小さい場合に変形が生じないためには、粘性の値が大きくなってはならない . そこで、力が大きい場合には粘性要素の値が小さく、力が小さい場合には粘性要素の値が大きくなるような、NLD を導入する . NLD に生じる力の大きさを f で表し、NLD のダンパー係数を $C_2(f)$ とする . 例えば、 $C_2(f)$ を次のように定める .

$$C_2(f) = \begin{cases} C_{MAX} & (f < F_0) \\ e^{A+Bf} & (F_0 \leq f \leq F_1) \\ C_{MIN} & (F_1 < f) \end{cases} \quad (4)$$

ここで A, B, F_0, F_1 は適当な定数である . ダンパー係数の最大値は $C_{MAX} = e^{A+BF_0}$ 、最小値は $C_{MIN} = e^{A+BF_1}$ で与えられる . 最大値 C_{MAX} の値は十分に大きいとする . 力が F_0 よりも小さい場合、ダンパー係数の値は C_{MAX} となり、NLD はほとんど伸縮しない . 一方、力が F_0 を超えた場合は、 $C_2(f)$ の値は C_{MAX} より小さく、NLD は伸縮する . 力が F_1 を超えると、ダンパー係数は、一定の値 C_{MIN} となる . パラメータ F_0 は NLD が、伸縮するか否かの限界力に相当する . Fig. 5 に、 $A = 8.715, B = -0.904, F_0 = 1, F_1 = 10$ に対応する $C_2(f)$ のグラフを示す . このとき、 $C_{MIN} = 0.720, C_{MAX} = 2470$ 、である .

ここで Fig. 2 (c) の 3 要素モデルを例に取り、NLD を用いた結果を示す . 残留変形部のダンパーを NLD とする . Fig. 6 に、線形 3 要素モデルに対するステップ応答と、NLD を用いた 3 要素モデルに対するステップ応答を示す . 線形 3 要素モデルのパラメータは $K_1 = 1, C_1 = 1, C_2 = 27, M = 1$ である . NLD の特性は、Fig. 5 に示す通りである . 図中の実線は、NLD を用いた 3 要素モデルの応答、破線は線形 3 要素モデルの応答を示す . Fig. 6 (a) は、入力 F の大きさが 6 のときの応答、Fig. 6 (b) は、入力 F の大きさが 1 のときの応答である . 力の大きさが 6 の場合、線形ダンパーの粘性係数 C_2 の値と、NLD の粘性係数 $C_2(f)$ の値はほぼ等しい . 結果として、Fig. 6 (a) に示すように、NLD を用いた 3 要素モデルの応答は、線形 3 要素モデルの応答とほぼ同じである . 一方、力の大きさが 1 の場合、

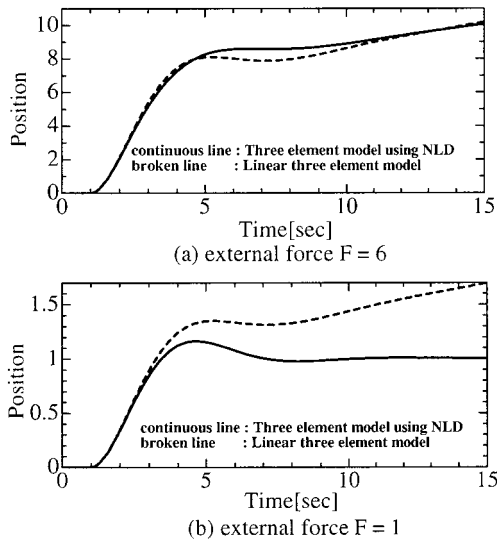


Fig. 6 Response of three element model using NLD for step input of force

$C_2(f)$ の値は C_2 の値より十分に大きい。結果として、線形 3 要素モデルは変形し続けるのに対して、NLD を用いた 3 要素モデルは一定の値に収束する。以上のように、NLD のパラメータを適切に設定することにより、実際のレオロジー物体に近い挙動を得ることができる。

2.3 レオロジー物体の格子構造モデル

本研究では、レオロジー物体の成形作業を対象とし、成形作業のための物体モデルを構築する。レオロジー物体の成形作業において、物体は空間的な変形を伴う。したがって、レオロジー物体の三次元変形モデルを構築することが必要である。

本研究において、レオロジー物体の物体モデルとして、格子構造モデルを提案する。格子構造モデルの概念を Fig. 7 に示す。まず、格子の単位長さを設定する。そして、その単位長さにあわせて、Fig. 7 (a) に示すように、レオロジー物体を空間 3 軸方向に等間隔に分割する。次に、物体内部の格子点に、質点を配置する。Fig. 7 (b) に示すように、すべての隣り合った質点間に非線形粘弾性モデルを配置する。すなわち、非線形粘弾性モデルは、縦、横、斜め方向に配置される。物体の粘弾性変形は、配置した非線形粘弾性モデルの変形によって表現することができる。格子点 (i, j, k) の位置ベクトルを $P_{i,j,k}$ とする。ここで、質点 $P_{i,j,k}$ の運動方程式を導出する。質点 $P_{i,j,k}$ とその近傍の点 $P_{i+\alpha, j+\beta, k+\gamma}$ 間の非線形粘弾性モデルによって、質点 $P_{i,j,k}$ に働く力を $F_{i,j,k}^{\alpha, \beta, \gamma}$ で表す。このとき、 $P_{i,j,k}$ に働くすべての内力は、 $F_{i,j,k}^{\alpha, \beta, \gamma}$ の合計で与えられる。すなわち、 $P_{i,j,k}$ に働く内力の合計は、次式で表される。

$$F_{i,j,k}^e = \sum_{\substack{\alpha, \beta, \gamma \in \{-1, 0, 1\} \\ (\alpha, \beta, \gamma) \neq (0, 0, 0)}} F_{i,j,k}^{\alpha, \beta, \gamma} \quad (5)$$

力 $F_{i,j,k}^{\alpha, \beta, \gamma}$ は、2.1 章で述べた手続きにより計算することができる。よって、力 $F_{i,j,k}^e$ を計算する事ができる。質点 $P_{i,j,k}$ に働くすべての外力の和を $F_{i,j,k}^a$ とする。すると、次の運動方程式が得られる。

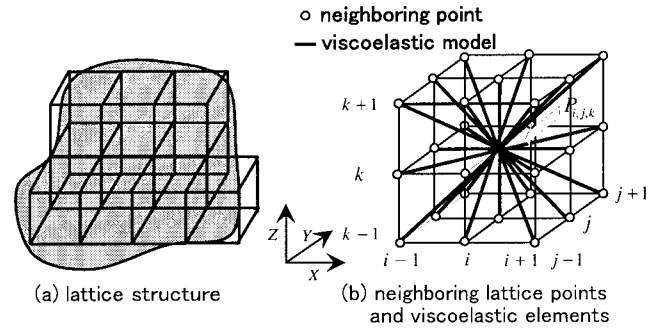


Fig. 7 Lattice model of rheological object

$$M\ddot{P}_{i,j,k} = F_{i,j,k}^e + F_{i,j,k}^a \quad (6)$$

モデルを構成するすべての質点の運動方程式を解くことによって、レオロジー物体の変形を計算することができる。

3. レオロジー物体のモデル同定

3.1 クリープ試験による非線形 3 要素モデルの同定

本章では、非線形粘弾性モデルの同定法を述べる。非線形粘弾性モデルの各パラメータを求めるためには、荷重に対する変形を計測する必要がある。そこで、市販の粘弾性計測装置を用いて、レオロジー物体に対するクリープ試験を行う。クリープ試験では、レオロジー物体に一定荷重を加え、ある時間が経過した後に除重する。荷重を加えているとき、ならびに除重した後のレオロジー物体の変位を計測する。例えば、2.1 節に示した Fig. 3 は、クリープ試験において計測された変位データである。

ここで、モデル同定の観点から、3 要素モデル Fig. 2 (c), (e) のどちらが適当かを考察する。モデルに NLD を用いる場合、NLD は残留変形部に導入される。Fig. 2 (c) に示すモデルでは、右側の粘性要素に NLD を導入する。このとき、モデルに生じる変位の中で、左側の非残留変形部が寄与する割合と NLD が寄与する割合が、外力の大きさによって異なる。したがって、同定試験において、適切な外力を与えることにより、非残留変形部の挙動と NLD の挙動を分離することができる。Fig. 2 (e) に示すモデルでは、二つの粘性要素の少なくとも一方に NLD を導入する必要がある。このモデルは、一つの部から成っているので、NLD の挙動とそれ以外の部分の挙動とを分離することができない。モデル同定においては、NLD の挙動とそれ以外の部分の挙動を分離することが望ましい。そこで、Fig. 2 (c) に示す 3 要素モデルを選択する。

クリープ試験においては、レオロジー物体に一方方向の荷重を加え、その方向の変位を計測する。このとき、レオロジー物体には、その方向以外の変形が生じる。例えば、Fig. 8 に示すように、直方体のレオロジー物体に一定荷重を作用させると、上面の面積が増加し、高さが減少する。格子構造モデルにおける格子点の間隔は、単位長さである。したがって、上面にある格子点の数は、上面の面積に比例すると考えられる。すなわち、格子要素モデルにおいて質点に作用する力は、連続体であるレオロジー物体においては応力に相当する。以上の議論より、レオロジー要素の同定においては、荷重を応力に換算する必要があ

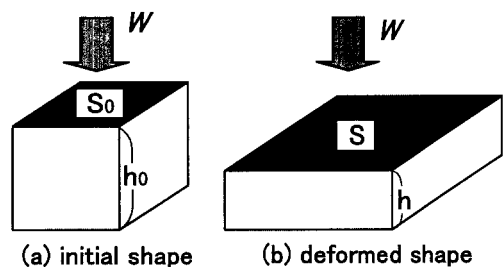


Fig. 8 Deformation in creep test

ることが分かる．本論文では，クリープ試験において，直方体のレオロジー物体を用いる．Fig. 8 (a) に示すように，初期形状における上面の面積を S_0 ，高さを h_0 とする．また，Fig. 8 (b) に示すように，クリープ試験時の上面の面積を S ，高さを h とする．レオロジー物体に作用する荷重を W とする．クリープ試験では，荷重 W ，面積 S_0 ，高さ h_0 ，の値は既知であり，高さ h の値は，計測する変位の値より求めることができる．そこで，これらの値から応力を計算する．まず，レオロジー物体の体積が変化しないと仮定すると

$$Sh = S_0 h_0. \quad (7)$$

が成り立つ．応力を P とすると

$$P = \frac{W}{S}. \quad (8)$$

式(7)(8)より，

$$P = \frac{W}{S_0 h_0} h. \quad (9)$$

が得られる．結局，式(9)を用いて，レオロジー物体に作用する応力を求めることができる．

非線形3要素モデルは，線形ダンパーとバネ要素から成る非残留変形部と，NLD から成る残留変形部から構成されている．非残留変形部のパラメータ K_1, C_1 と，応力 P に依存するNLDのダンパー係数 $C_2(P)$ を同時に求めることは困難である．そこで，非残留変形部の同定と残留変形部の同定を分離する．応力 P の値が小さいとき，NLDのダンパー係数 $C_2(P)$ は大きくなり，結果としてNLDの変位は小さくなる．したがって，応力が小さい状態から除重すると，除重後の挙動は，主に非残留変形部のパラメータ K_1, C_1 に依存する．除重した時刻を 0，除重直前に物体に作用している応力を P_0 ，時刻 t における戻り変位を $x(t)$ とすると，次式が得られる．

$$x(t) = \frac{P_0}{K_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{K_1}{C_1} t\right) \right\}. \quad (10)$$

まず，クリープ試験の結果より，除重直前の応力 P_0 ，戻り変位 $x(t)$ を求める．次に，最小二乗法を用いて，非残留変形部のパラメータ K_1, C_1 を求める．非残留変形部が同定できれば，荷重時の応力 $P(t)$ を式(10)に代入することによって，荷重時における非残留変形部の変位を求めることができる．さらに，変位の計測値から非残留変形部による変位を引くことにより，NLDの変位を求める．変位を微分することにより，NLDの速度 $v(t)$ を計算する．NLDの粘性係数 $C_2(P)$ は， $C_2(P(t)) = P(t)/v(t)$ ．

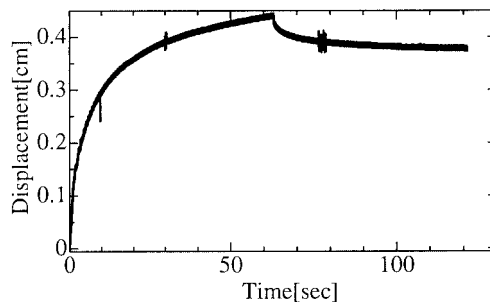


Fig. 9 result of creep experimentation ($F = 50$ [gf])

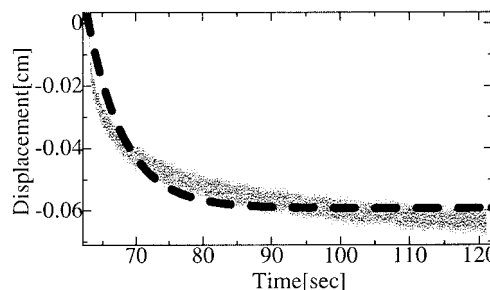


Fig. 10 Step response of non-residual deformable part

から求めることができる．以上のような方法で，非線形3要素モデルの各パラメータ $C_1, K_1, C_2(P)$ の値を荷重ごとに算出し，平均値を取ることでパラメータ値を決定する．

3.2 パラメータ同定結果

今回，クリープ試験での荷重条件は，10 [gf]，30 [gf]，50 [gf]，70 [gf]，90 [gf] の5種類を設定する．荷重時間は約1分間で，その後1分間除重する．今回の実験で使用した試験片は，各辺1 [cm] の立方体である．

Fig. 9 に，荷重 50 [gf] に対するクリープ試験の結果を示す．約60秒間荷重したあと，0 [gf] に除重する．まず，非残留変形部のパラメータを同定する．Fig. 9 より求めた除重後の戻り変位を，Fig. 10 の実線に示す．除重する瞬間にレオロジー物体に作用している応力 P_0 を，式(9)から求めると $P_0 = 28$ [gf/cm²] となる．除重後の戻り変位の値と式(10)の差が最小となるパラメータ K_1, C_1 を最小二乗法により求めると， $K_1 = 470$ [gf/cm³]， $C_1 = 2,500$ [gfs/cm³] が得られる．この値を式(10)に代入したときの戻り変位 $x(t)$ を，Fig. 10 の点線に示す．

次に，NLDのパラメータを同定する．Fig. 9 に示す変位を式(9)に代入し，応力 $P(t)$ を計算する．得られた応力 $P(t)$ の値を，Fig. 11 に示す．Fig. 9 に示す変位から，式(10)により計算される非残留変形部の変位を引くことにより，NLDの変位を求める．NLDの変位を微分し，NLDの速度 $v(t)$ を求め， $C_2(P(t)) = P(t)/v(t)$ より $C_2(P)$ を求める．得られた $C_2(P)$ の値を，Fig. 12 に示す．

各荷重に対して上述の計算を行う．パラメータ K_1, C_1 の値は，各荷重における値の平均値とする．次に，各荷重におけるNLDの粘性係数 $C_2(P)$ より，平均的な粘性係数を視察により求める．これより，NLDのパラメータ F_0, F_1, A, B を定める．パラメータ F_0, F_1 は視察により，パラメータ A, B は最

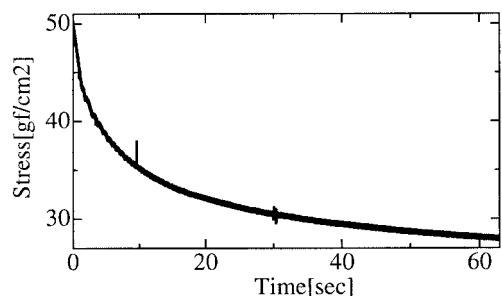


Fig. 11 Stress applied to rheological object

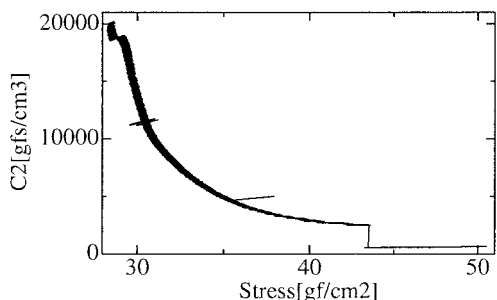


Fig. 12 Relation between force and damper coefficient in NLD

小二乗法により決定する．今回の同定試験では，各パラメータ値は $C_1 = 2,000$ [gfs/cm³]， $K_1 = 400$ [gf/cm³]， $A = 11.31$ ， $B = -0.0815$ ， $F_0 = 9$ [gf/cm²]， $F_1 = 80$ [gf/cm²] が得られた．このとき $C_{MAX} = 40,000$ [gfs/cm³]， $C_{MIN} = 120$ [gfs/cm³] である．

3.3 モデルパラメータの格子構造モデルへの適用

前節で述べたように，クリープ試験を通して非線形 3 要素モデルのパラメータを同定することができる．クリープ試験では一次元変形を対象としているのに対し，格子構造法では，三次元変形をモデル化している．したがって，クリープ試験により得られたモデルパラメータを，直接格子モデルに適用することは適切ではない．本節では，同定したパラメータを，格子構造モデルに適用する手法について考察する．

Fig. 13 (a) に示すように，格子構造モデルにおいては，隣り合う質点間に 3 要素モデルが配置される．クリープ試験において上下方向の変形が生じると仮定する．一つの格子に含まれる 28 個の 3 要素モデルのうち，上下方向の変形を生じるのは，28 個のうちの上下方向に垂直に結合している 4 個と，四つの側面上で斜め方向に結合している 8 個と，対角頂点間に斜め方向に結合している 4 個の計 16 個である．この 16 個の 3 要素モデルは，上下方向の変形に関して，同一の特性を示すと近似する．このとき，Fig. 13 (a) に示す格子構造モデルは，上下方向の変形に関して，Fig. 13 (b) に示すように，16 個の 3 要素モデルから構成される一次元モデルで近似することができる．さらに，Fig. 13 (b) の 3 要素モデルの各パラメータが同じ値であると仮定すると，Fig. 13 (b) のモデルは Fig. 13 (c) のモデルに等価変換できる．Fig. 13 (c) のモデルが，同定した非線形 3 要素モデルであるとみなす．したがって，同定したモデルパラメータを，Fig. 13 (b) に等価変換し，さらに Fig. 13 (a) に近似展開する．

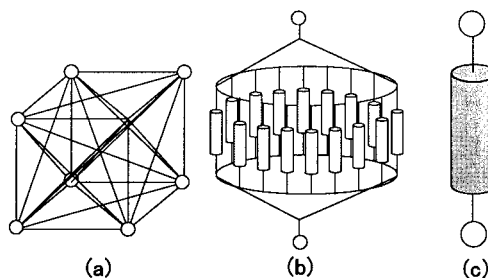


Fig. 13 Simplification of lattice structural model

結局，三次元モデルの各パラメータ値の値は，同定した各パラメータ値の $1/16$ に定めればよい．

4. レオロジー物体モデルの評価

本章では，2，3 章で述べた手法で構築したレオロジー物体モデルを，変形実験を通して評価する．

4.1 レオロジー物体の変形実験

本節では，レオロジー物体の変形実験の結果を示す．本実験では，エンドエフェクタを取りつけたロボットマニピレータを上から押し付けることによって，レオロジー物体を変形させる．エンドエフェクタは幅 1 [cm] の板である．エンドエフェクタの上部を，ロボットマニピレータの手先に取り付ける．下部がレオロジー物体に接触し，レオロジー物体を押し付けることで，レオロジー物体が変形する．本実験で使用したレオロジー物体の材料は，小麦粉と水を 3:1 の重量比で混ぜ合わせ，練ったものである．レオロジー物体の初期形状は，5 [cm] × 5 [cm] × 3 [cm] の直方体である．

変形実験においては，まずエンドエフェクタを垂直下方向に，速度 1 [cm/s] で移動させ，レオロジー物体の中央部に接触させる．次に，さらに 1 [cm] 垂直下方向に押し付けて，その状態で 30 秒間保つ．その後，垂直上方向にエンドエフェクタを移動させ，レオロジー物体との接触状態を解放する．以上の変形作業において，レオロジー物体の初期形状と変形形状を撮影する．あわせて初期形状と変形形状の断面形状を，レーザー変位計によって計測する．

4.2 三次元モデルのシミュレーション

本節では，提案するレオロジー物体のモデリング手法を用いて三次元モデルを構築し，変形シミュレーションを行った結果を示す．Fig. 14 にレオロジー物体の三次元格子モデルを示す．モデルパラメータの同定試験においては，1 [cm] × 1 [cm] × 1 [cm] の試験片を用いた．そこで，格子の単位長さを 1 [cm] とする．実験に用いたレオロジー物体をモデル化すると，Fig. 14 に示す格子構造が得られる．これは，6 × 6 × 4 の質点からなる．非線形 3 要素モデルは，すべての隣り合った質点間に配置される．

4.1 節に示した変形実験と同じように，レオロジー物体の中央上部を押し下げた場合の変形をシミュレートする．ここでは，モデルの中央上部の 12 点を下に押し下げることにより，接触による変形を模擬する．すなわち，座標 (0,2,3) から (5,2,3) の 6 点と，(0,3,3) から (5,3,3) の 6 点を，1 秒間に速度 1 [cm/s] で

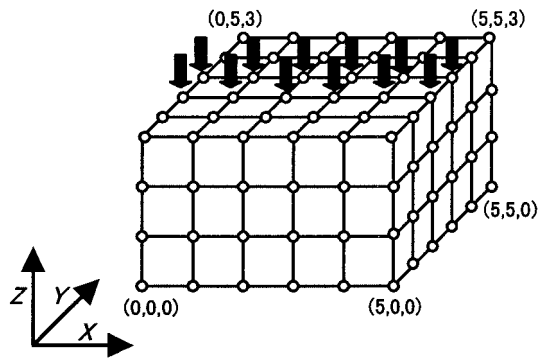


Fig. 14 Three-dimensional model of rheological object

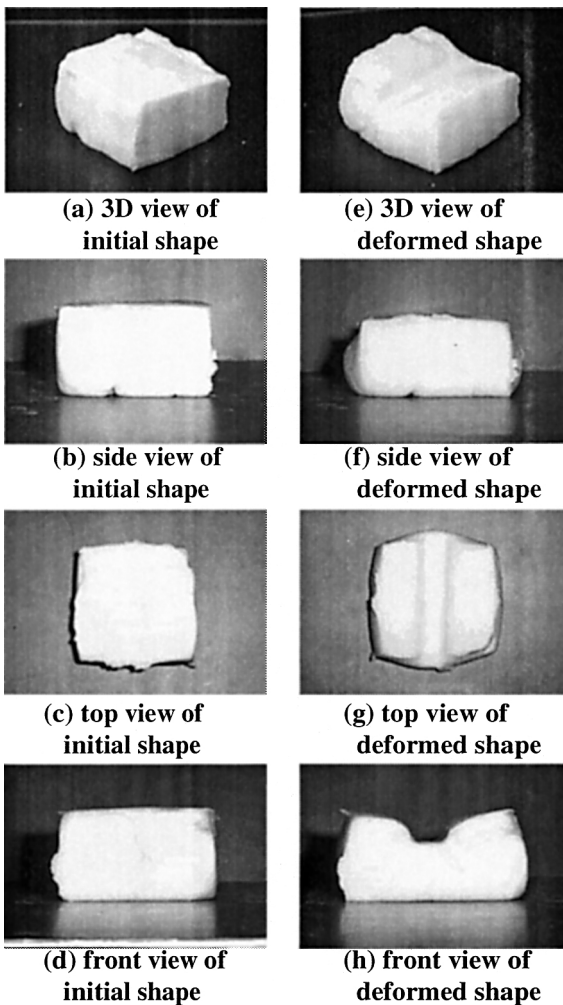


Fig. 15 Deformation of actual rheological object

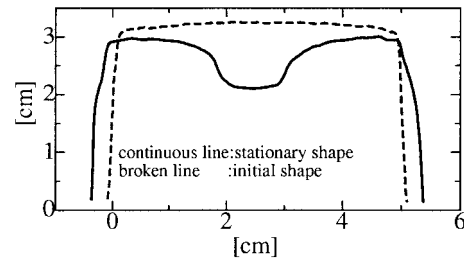


Fig. 16 Cross section of deformed rheological object

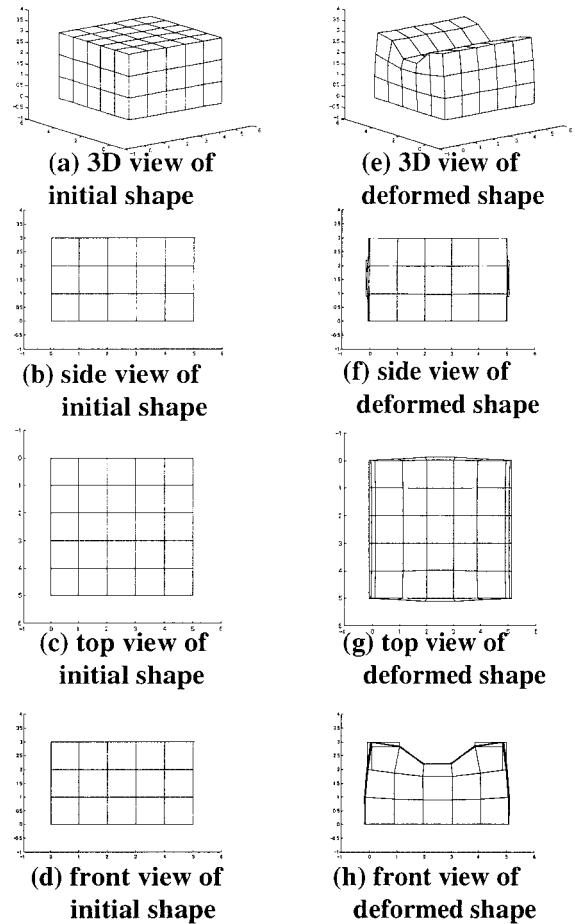


Fig. 17 Deformation of three-dimensional model for displacement input

強制的に下に押し下げ、30秒間その状態を保つ。その後、この12点を解放する。

4.3 変形実験結果とシミュレーション結果の比較

本節では、4.1節での変形実験結果と、4.2節での三次元シミュレーション結果を示し、モデリング手法の有効性を検討する。

まず、Fig. 15に变形実験の結果を示す。Fig. 15(a)~(d)は初期形状であり、Fig. 15(e)~(h)は变形後の形状である。

Fig. 15(a), (e)は斜め上方から見た図である。Fig. 15(b), (f)は側面図、Fig. 15(c), (g)は上面図、Fig. 15(d), (h)は正面図である。また、Fig. 16に断面形状の計測結果を示す。破線が初期形状であり、実線が変形形状である。図から、レオロジー物体の中央上部が下に押し付けられることによって、物体が前後左右に引き伸ばされると同時に、上部側面は、押し下げられた中央上部に引っ張られるように変形していることが分かる。また、エンドエフェクタを引き離れた後、1[cm]下に押し付けられていた中央上部に、若干戻り変位が生じていることが、Fig. 16より分かる。

次に、三次元モデルのシミュレーション結果を、Fig. 17に

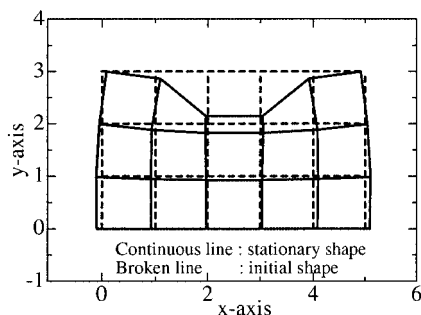


Fig. 18 Cross section of deformed two-dimensional model for displacement input

示す。Fig. 17(a)～(d)は初期形状で、Fig. 17(e)～(h)は変形後の形状である。Fig. 17(a),(e)は斜め上方から見た図である。Fig. 17(b),(f)は側面図、Fig. 17(c),(g)は上面図、Fig. 17(d),(h)は正面図である。また、Fig. 18に、初期形状と定常状態でのモデルの断面形状を示す。実線が定常状態の変形形状で、破線が初期形状である。Fig. 17から分かるように、中央上部が下に押されることによって、モデルの前後左右が若干広がっている。さらにFig. 18から、上部側面が中央上部に引っ張られるように変形していることが分かる。中央上部の12点を解放した後は、それらの点において、戻り変位が生じていることが、Fig. 18, Fig. 17(h)から分かる。

実際の変形とシミュレーション結果を比較すると、変形量に対して若干の違いが見られる。一方、変形形状は、相似している。以上のことから、レオロジー物体がどのように変形するかを推定する上で、このモデルは有効であると考えられる。

5. おわりに

本論文では、レオロジー物体の成形制御を行うことを目的として、レオロジー物体のモデリング法を提案した。まず、レオロジー物体の力学特性を表す粘弾性要素を分析した。その結果、2通りの3要素モデルがモデルとして適切であることが分かつ

た。次に、実際のレオロジー特性に近づけるために、非線形ダンパー(NLD)を提案した。その結果、実際のレオロジー物体の特性を、より適切に表現することが可能になることが分かった。次に、レオロジー物体のモデリング手法として、格子構造法を提案した。さらに、実際のレオロジー物体の同定実験を行い、非線形3要素モデルの各パラメータを同定した。その後、実際のレオロジー物体を使った変形実験とシミュレーションを行い、モデリング法の有効性を確認した。シミュレーションと実験を比較した結果、その変形量に違いがみられた。これは格子の細かさなどの要因も考えられるが、横への広がりシミュレーションにおいて小さかったのは、モデルに体積的な効果を入れていないのも一つの要因であると考えられる。この点は今後の課題である。レオロジー物体に対して任意の作用を加えた場合、どのような形に変形するかを推定することは、現在のモデルを利用することで可能であると考えられる。以上のことから、本論文で提案するレオロジー物体のモデリング手法は、有効であると考えられる。

参考文献

- [1] D. Terzopoulos and K. Fleisher: "Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture," Computer Graphics, vol.22, no.4, pp.269-278, 1988.
- [2] A. Joukhader, A. Deguet and C. Laugier: "A Collision Model for Rigid and Deformable Bodies," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.982-988, 1998.
- [3] Y. Chai and G.R. Luecke: "Virtual Clay Modeling Using the ISU Exoskeleton," Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp.76-80, 1998.
- [4] P.M. Taylor, et al: Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials. Springer-Verlag, 1990.
- [5] Y.F. Zheng, R. Pei and C. Chen: "Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2598-2603, 1991.
- [6] T. Wada, S. Hirai and S. Kawamura: "Indirect Simultaneous Positioning Operations of Extensionally Deformable Objects," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, October, 1998.
- [7] 村上謙吉: レオロジー基礎論。産業図書, pp.85-114, 1991.



徳本真一 (Shinichi Tokumoto)
1972年7月16日生。1995年立命館大学工学部機械工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科情報システム専攻修士課程修了。1998年同大学理工学研究科総合理工学専攻博士課程後期課程に入学、現在に至る。(日本ロボット学会学生会員)



平井慎一 (Shinichi Hirai)
1963年3月19日生。1990年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻単位取得退学。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手。1995年同助教授。1996年立命館大学理工学部ロボティクス学科助教授となり、現在に至る。1990年度計測自動制御学会論文賞。1996年度日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門業績賞。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)