

レオロジー物体の モデリングと成形制御

2001年3月

徳本真一

論文要旨

成形作業は、製造業の様々な分野で見うけられる基本的な作業の一つである。たとえば、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く、省力化や衛生面の点から機械システムによる自動化が望まれている。

生地やペーストなどの物体は、1) 残留変位を有する、2) 戻り変位を有する、という特性を持っている。一方、弾性物体は、戻り変位を有するが、残留変位を持たない。塑性物体は、残留変位を有するが、戻り変位を持たない。生地やペーストのように、残留変位と戻り変位を両方持つ物体を、本研究ではレオロジー物体と呼ぶ。これらレオロジー物体の成形制御を行うためには、理論的・解析的手法を用いて最適な成形作業方策を導く必要がある。著者は、成形作業の機械システムによる自動化を実現するために、a) 変形挙動を記述するためのモデルの構築、b) 成形作業の解析、c) 成形作業に適した専用ハードウェアの開発、d) 成形のための作業方策の導出、という4つの項目をキーとして研究を行った。

本論文では、まず、レオロジー物体の変形モデリング手法を提案する。レオロジー物体の動的挙動を表現するために、粘弹性要素として、非線形ダンパー(NLD)を導入した非線形3要素モデルを採用する。この非線形粘弹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。さらに、実際の変形試験から非線形3要素モデル内のパラメータを同定し、変形シミュレーションと実際の変形との比較を行い、モデルの妥当性を検討する。次に、新しい伸長成形メカニズムを提案する。成形制御のために必要とされる自由度について検討し、ローラとテーブルの位置を任意に変化させることでできるメカニズムを提案する。レオロジー物体の形状計測にはCCDカメラを用い、ビジョンフィードバックによる成形システムを提案する。次に、人の実演による伸長成形制御を提案する。人間による伸長成形作業の分析から、円形に成形する成形制御則を導出し、成形制御実験から、円形成形が可能であることを示す。さらに、円形以外の形状に成形するための成形制御則を提案する。成形実験から、物体の幾何学的な変形則を導き、変形過程のモデリング法を提案する。次に、そのモデリング法を用いた成形制御則を提案し、2種類の目標形状に対して、成形制御実験を行う。

目 次

1	緒論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	従来の研究	2
1.3	レオロジー物体	5
1.4	本研究のアプローチ	6
1.5	本論文の概要	6
2	レオロジー物体の動的変形モデリング	9
2.1	緒言	9
2.2	レオロジー物体のモデリング	10
2.2.1	レオロジー物体の特性	10
2.2.2	非線形ダンパーを用いた粘弾性モデル	14
2.2.3	レオロジー物体の格子構造モデル	16
2.3	レオロジー物体のモデル同定	16
2.3.1	クリープ試験による非線形3要素モデルの同定	16
2.3.2	パラメータ同定結果	19
2.3.3	モデルパラメータの格子構造モデルへの適用	22
2.4	レオロジー物体モデルの評価	23
2.4.1	レオロジー物体の変形実験	23
2.4.2	3次元モデルのシミュレーション	24
2.4.3	変形実験結果とシミュレーション結果の比較	24
2.5	結言	29
3	ビジョンを用いた多自由度伸長成形システム	31
3.1	緒言	31
3.2	伸長成形の自由度	31
3.3	伸長成形メカニズム	32
3.4	伸長成形メカニズムのコントローラ	33
3.4.1	ビジョンシステム	33
3.4.2	運動コントローラ	33
3.5	成形システムプロトタイプ	35
3.6	結言	37

4 人間の実演に基づくレオロジー物体の円形成形	39
4.1 緒言	39
4.2 レオロジー物体の形状表現	39
4.2.1 輪郭関数	39
4.2.2 変形形状の相違度	41
4.3 人間による伸長成形作業の分析	44
4.4 人間作業を基にしたレオロジー物体の円形成形法	47
4.5 伸長成形実験	50
4.5.1 提案制御則による実験結果	50
4.5.2 提案制御則と他の制御則との比較	58
4.6 結言	60
5 レオロジー物体の成形過程モデリング	61
5.1 緒言	61
5.2 レオロジー物体の変形形状表現	61
5.3 成形過程における面積推移の分析	62
5.4 成形形状の推定	71
5.5 定数倍伸長部と余剰伸長部の推定	72
5.6 結言	80
6 成形過程モデルを用いたレオロジー物体の成形	81
6.1 緒言	81
6.2 成形過程モデルを用いたレオロジー物体の成形制御則	81
6.3 成形制御実験	81
6.4 結言	92
7 結論	93
謝 辞	95
参考文献	97
関連研究	103
論文	103
口頭発表	103
その他の研究	104
論文	104
口頭発表	104

図 目 次

2.1	Fundamental elements	10
2.2	Viscoelastic elements	11
2.3	Deformation response of actual rheological object	12
2.4	Three element model	13
2.5	Viscosity of nonlinear damper	14
2.6	Response of three element model using NLD for step input of force	15
2.7	Lattice model of rheological object	17
2.8	Deformation in creep test	18
2.9	Result of creep experimentation ($F = 50\text{gf}$)	20
2.10	Step response of non-residual deformable part	21
2.11	Stress applied to rheological object	21
2.12	Relation between force and damper coefficient in NLD	22
2.13	Simplification of lattice structural model	23
2.14	Three-dimensional model of rheological object	24
2.15	Deformation of actual rheological object	26
2.16	Deformation of three-dimensional model for displacement input	27
2.17	Cross section of deformed rheological object	28
2.18	Cross section of deformed two-dimensional model for displacement input	28
3.1	Motion freedoms of forming machine	32
3.2	Mechanism of proposed forming machine	33
3.3	Belt Mechanism to synchronize roller rotation with table translation	34
3.4	Position-controlled variables	34
3.5	Forming system	35
3.6	Prototype of forming machine	36
4.1	Extraction of rheological object : (a) Before image processing, (b) After image processing	40
4.2	Concept of outline function	41
4.3	Examples of outline function	42
4.4	Outline functions for different orientations	43
4.5	Outline functions for different sizes	43
4.6	Human demonstration of extensional forming of wheat dough	45
4.7	Outline graph of deformed shapes in human demonstration	46

4.8	Direction of roller in human forming	47
4.9	Another human demonstration of extensional forming of wheat dough	48
4.10	Outline graph of deformed shapes in another human demonstration	49
4.11	Determination of roller direction using outline graph	50
4.12	Example of automatic extensional forming	54
4.13	Difference degree during automatic extensional forming	55
4.14	Automatic extensional forming corresponding to different initial shapes	57
4.15	Comparison between proposed algorithm and other algorithms	59
4.16	Difference degree comparison during extensional forming	60
5.1	Area of outline function	62
5.2	Formed shapes	63
5.3	Area ratio corresponding to different forming parameters	64
5.4	Formed shapes of semicircle object	66
5.5	Area ratio corresponding to different forming parameters(semicircle object)	66
5.6	Formed shapes of teardrop object	68
5.7	Area ratio corresponding to different forming parameters(teardrop object)	68
5.8	Initial shapes with constant area and height	69
5.9	Area ratio corresponding to different initial shapes	70
5.10	Fromed shapes in Trial 1	71
5.11	Transition of area ratio	72
5.12	Estimation of deformed shape	74
5.13	Forming parameters of expansions	74
5.14	Estimated shapes	75
5.15	Residual area	77
5.16	Flow chart of estimation	78
5.17	Estimated shapes	79
5.18	Estimated outline functions	79
6.1	Forming process parameters	82
6.2	Formed shapes by automatic forming control to circuler shape (Trial 1)	83
6.3	Outline functions of formed shapes by automatic forming control to circuler shape (Trial 1)	84
6.4	Transition of evaluation function during automatic forming control to circuler shape (Trial 1)	84
6.5	Formed shapes by automatic forming control to circuler shape (Trial 2)	85
6.6	Outline functions of formed shapes by automatic forming control to circuler shape (Trial 2)	86
6.7	Transition of evaluation function during automatic forming control to circuler shape (Trial 2)	86

6.8	Formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 1)	88
6.9	Outline functions of formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 1)	89
6.10	Transiton of evaluation function during automatic forming control to long and narrow shape (Trial 1)	89
6.11	Formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 2)	90
6.12	Outline functions of formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 2)	91
6.13	Transition of evaluation function during automatic forming control to long and narrow shape (Trial 2)	91

表 目 次

4.1	Direction of roller in human demonstration	44
4.2	Motion parameters in automatic forming	51

第1章

緒論

1.1 研究の背景

近年における機械システムの普及は、産業分野の中の製造工程において著しい。自動車や家電などを製造工程において、これら機械システムが、数多く配置されている。プレス成形機、溶接ロボット、組み立てロボットなどは、これら機械システムによる自動化の最たるものといえる。これらの製造工程では、主に金属材料、もしくはプラスチックなどの非金属材料を取り扱った作業がほとんどである。これらの作業のうち成形作業は、物体の塑性変形を利用した塑性加工などがほとんどである。ハンドリングなどの作業においては、物体を剛体とみなした、剛体力学に基づく解析的手法によるハンドリングがほとんどである。

その一方で、ゴムや食品、生体などを扱う製造工程も、機械システム化による自動化が進められている。これらの物体は金属やプラスチックとは異なり粘弾性的性質を持っている。一口に粘弾性的性質と言っても、物体の材質、形状などによって特性が異なる。また、食品などに関して言えば、温度、湿度などの環境によっても特性が異なってしまう。これらの物体の挙動は非線形であり、ヒステリシス現象を生じる。これら粘弾性的性質を持った物体を扱う作業において、大量に生産する工程では、機械システムが導入されているが、多品種少量生産の工程では、現在のところ人に頼っている部分が多く、機械システムによる自動化が遅れている。

機械システムによる自動化が遅れている分野として、食品産業が挙げられる。食品分野において、食品は多様であり、それらの物性は個々によって複雑であることから、機械システムが極めて多種多様となり、かつ多岐にわかれてしまう。また、需要志向による受注機械がほとんどを占めている[3]。よって、金属加工の機械システムとは異なり大量生産ができないため、機械システムによる自動化が遅れていた。また、食品作業を扱う作業を前提とした工学的研究の少なさも、原因として挙げられる。しかしながら、近年においてはこれらの作業の機械システムによる自動化が、省力化や衛生面の観点から望まれている。

機械システムによる自動化を考えるとき、まず、人による作業について考える必要がある。人間は視覚、聴覚、触覚、力覚、味覚、嗅覚などをセンサーに持ち、腕や足などの多自由度メカニズムを持ち、さらに、センサー情報と過去の経験に基づき、蓄積された広大なデータベースの中から、状況に応じて対応する動作を選択、それを実行するインテリジェンスも持っている。人間は、これら多種多様なセンサーと多自由度メカニズムを持ち、それらを統合するインテリジェンスを備えた、非常に優れた機械システムであるといえる。製造工程における熟練経験者の作業は、これら人間の五感情情報をもとに、過去の経験から最適な作業方策を導出し、多自由度の身体を操作し作業を行う。人が無意識の内に

行う作業は、データの取得や作業戦略の導出を無意識に行っている。そのために、具体的に人間がどの情報を取得し、どのような判断により作業戦略を行われているかという、系統的な作業戦略の導出が困難である。

しかしながら、筆者は、人間による作業を機械システムによる自動化することは、困難ではあるが不可能ではないと考える。そのためには、1) 対象とする変形物体の物理的、もしくは幾何学的な変形を解析し、モデリング法を確立する、2) 人間作業の解析から、作業に必要な要素を抽出し、作業に必要な機械システムを構築する、3) 物体の特性に合った作業戦略を導出し、制御を行うことが重要である。

本論文は、粘弾性的性質を持った食品などの変形物体を取り扱う作業の自動機械システム化に関して、変形物体のモデリングから制御の提案を行う。

1.2 従来の研究

変形物体を扱う作業に関する研究において、次の3つの項目がキーポイントとして挙げられる。

(1) モデリング

(2) 機械システム

(3) 作業戦略

(1) モデリングとは、変形物体自体をモデル化する手法と、変形物体を取り扱う機械システムを含めた、作業全体のモデリング手法を示す。一口に変形物体といっても、弾性物体、粘性物体、弾塑性物体、粘塑性物体、粘弹性物体など様々な物理的特性を持った物体が存在する。モデル化される変形物体も、対象となる物体によって構成が大きく異なる。コンピュータ・グラフィックスの分野で用いられている変形物体には、物理的特性を持たずには幾何学的な拘束条件により変形するモデルも存在する。

(2) 機械システムとは、作業を機械システムによる自動化するために選択される、センサ、アクチュエータを含んだハードウェアを意味する。汎用性を持った機械システムを用いるか、その作業に特化した機械システムを用いるかで、研究の方向性が変わる。

(3) 作業戦略は、物体の運動制御則や作業方策を表す。物体の運動を制御するとき、対象となる物体の物理的特性によって、制御則や作業方策は大きく変わること。

上記3つの項目はそれぞれ単体で存在しているわけではなく、それぞれが深く関連している。たとえば、対象となる作業に対して、モデル化や機械システムが提案される。そして、モデルと機械システムにより、作業戦略が導かれる。逆の場合も考えられる。対象となる作業に対して、作業戦略が提案される。そして、作業戦略により、モデル化や機械システムが導かれる。このように、それぞれの項目に対する研究は深く関連しているため、厳密に分類することはできない。ゆえに本節では、これまでの研究に対して、研究の比重を考慮し、大まかにこの3つの項目に分類する。

(1) モデリング

変形物体のモデリングにおける、基本的なツールとして挙げられるのは有限要素法(FEM)による変形解析である。有限要素法を用いた変形解析は、主に金属材料などで数多く行われている。富田は、3次元空間上での有限要素法を記述する、剛塑性有限要素法、弾塑性有限要素法の定式化を提案している[4]。渡部らは、2次元平面における弹性大変形シミュレーション手法を提案している[5]。ここでは、応力増分に用いられているGreen速度構成式と、Jaumann速度構成式などの有限要素構成式、要素種類などを比較・検討している。森は、板材圧延の解析において、初等解析法、エネルギー法、剛塑性FEM、弾塑性FEMなどの数値解析法を用いて、3次元変形シミュレーションを行っている[6]。また、谷本らは動的非弹性変形を記述するための引張り弾・塑性・粘塑性構成式を提案している[7]。これら有限要素法によるモデリングは、必ずしもモデル構築が簡単ではなく、正確なモデリングをするためにはより熟練を要する。

その他のモデリング手法に関しても、数多く報告されている。西谷らは、物体のモデルとして体積力法を用い、面外せん断問題に対して汎用解析理論を確立している[8]。Terzopoulosらは、コンピュータグラフィクス上に示す弹性変形モデルを提案している[9]。このモデルは、物体の変形量をエネルギー関数で表し、物体の運動・変形の運動方程式を導出し、その式の離散化によって、コンピュータ上の変形アニメーションを実現している。さらに、粘弹性、塑性などの基礎要素を用いることで、より実物体に近い変形をコンピュータグラフィクスで実現している[10]。広田らは、有限要素法と弹性モデルの組み合わせによって、バーチャル・リアリティ空間における、リアルタイム応答に適した計算手法を提案している[11]。このモデルは、マスバネモデルによるモデルと有限要素モデルが結合された形となっている。宮崎らは、マスバネ要素を格子状に結合させたモデルを構築し、変形シミュレーションにおいて改良を加え、より実現象にあったモデルの提案を行っている[12][13]。宮崎らは、質点モデルの問題点である質点追い越し現象に対して、質点間の相対速度に対して弹性を変化させ、追越を防いでいる。また、物体モデルを質点に応じた多面体要素に分割し、多面体要素ごとの平衡位置に基づき、質点に応力を加えることで、物体の復元力を設定している[14]。これらの研究においては、より実現象に近い運動を表現するために、様々なモデリングの工夫が成されているが、実現象のデータからパラメータを決定する手法まで述べられていない。

仮想粘土物体に関するモデリング手法も、数多く報告されている。Chaiらは、バーチャルリアリティーシステムにおける、仮想粘土の変形シミュレーション手法を提案している[15]。システムから人に提示する力は、簡単なバネーダンパーモデルにより出力されている。水野らは、バーチャルリアリティー空間での、仮想彫刻作業を実現するためのモデリング手法を提案している[16]。荒田、高井などは、3次元セル構造オートマトンを応用して、仮想粘土モデルを構築する手法を提案している[17][18]。セル構造オートマトンとは、トポロジーで連結された並列計算モデルを表す。Wyvillらは、物体表面に多数のパッチを構築し、その点のコントロールで、仮想粘土のモデリングを実現する手法を提案している[19]。加藤らは、変形操作を目的とした、ボリュームデータによる仮想弹性モデルの生成

を行っている[20]。これは、格子状のマス-バネモデルと、ボクセル空間上のボリュームデータを組み合わせてモデルを構築している。これらのモデルに関しても、実現象に近い運動をコンピュータ上で表現するために行われており、パラメータの同定法まで述べられていない。

変形物体を取り扱った作業の解析に主眼を置いたモデリングの手法に関しても、様々な研究が報告されている。山崎らは、3次元空間における弾性物体の接触解析を、境界要素法（BEM）で実現している[21]。この研究では、ペナルティ法を用いた2次元接触による境界要素法を、3次元静弹性接触問題に拡張して行われている。木内らは、ロール成形加工における解析モデルと、その汎用シミュレータとロールの自動設計システムを提案している[22]。古元らは、左右非対称圧延成形を、剛塑性有限要素法を用いて解析する手法を提案している。このモデリングにより、板厚差および板曲がり[23]、また蛇行特性[24]の解析を行い、実際の変形との比較によって手法の有効性が示されている。奥名らは、プリンタなどの用紙を離散化した梁モデルと定義し、摩擦抵抗と用紙の大変形を考慮した解析法を提案している[25]。これにより、用紙の最大反力を簡易的に求める方法を提案している。また、西垣戸らは、プリンタでの転写画像ずれを解析し、防止法を検討している[26]。その他、末岡らは、抄紙機における振動に起因するパターン形成を解析するために、ロール部軸の曲げ変形を粘弹性要素を持つ物理モデルでモデル化し、現象の解析を行っている[27]。これらは、作業に特化した、独自のモデリング法により解析が行われており、統一的な手法を示している訳ではない。

(2) 機械システム

専用の機械システムは、作業により様々存在する。楊らは、薄板のV曲げ加工のための、機械システムを提案している[28][29]。このシステムは、加工におけるF-S曲線を蓄積するデータベースを構築し、通信ネットワークによりコンピュータの分散処理を実現、加工中にデータベースからF-S曲線を検索、ファジイ推論により加工を評価し、最適な条件で加工を制御する。藤村らは、プリンタ等の紙送り機構において、横方向の位置決め精度を改善するために、新しい機構を提案している[30]。今江らは、2ロールシキマンドレルミルによる圧延の問題点である、割れや穴空きなどを防止するため、3ロール式、4ロール式のマンドレルミルを開発し、圧延特性を計測している[31][32]。また、作業のシミュレーションシステムの開発としては、以下の研究が挙げられる。高田らは、切削加工のシミュレーションにおいて、力・熱・振動などの物理パラメータを加えたモデルベースドシミュレーションシステムを開発している[33]。柳本らは、圧延作業のシミュレータの開発を行っている[34][35]。これらに示すシステム構築は、それぞれの作業に対応して製作されたシステムであり、異なる作業への対応は難しい。

(3) 作業戦略

変形物体を扱った作業戦略は数多く報告されている。小菅らは、柔軟ぱりを有限要素法でモデル化し、インピーダンス制御によって、物体の変形を制御している[36][37]。平井

らは、ゴムホースを軸に挿入する作業についての作業戦略を提案している[38] [39]。この研究では、力と運動データから、作業状態を分類している。Zhengらは、はりの穴挿入作業において、はりの軸先端の角度制御により、接触抗力を減少させる手法の提案を行っている[40]。また、Al-Jarrahらは、薄板のモデルを構築し、変形を実現する上で最小力となる軌道を導出法を提案している[41]。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ている[42] [43] [44]。この研究では、対象物体をバネを格子状に結合したモデルを用い、ビジョンフィードバックによる、繰り返し位置制御を行っている。楊らは、ロール曲げ加工において、制御FEMシミュレーションを用い、任意の不均一曲率分布を持つ板材を成形するための、ロールの移動軌跡を決定している[45]。福田らは、シールをめくる人間の動作解析から、シールをめくる作業の機構と制御法を提案している[46]。これらの研究における作業戦略は、作業ごとに設計されており、他の作業へそのまま移植することは困難である。

以上3つの項目に分類し、従来の様々な研究を調査した結果、食品生地を扱う作業のモデルリング、制御に関する研究は、ほとんど行われていないことがわかった。食品生地の物性を示す研究などは、いくつか報告されている反面、食品生地のハンドリングや制御に関する研究は、ほとんど行われていない。また、従来の研究においては、作業に特化したモデルリング、機械システム、制御の手法を構築した研究が多いことも確認できた。このことが、作業の機械システムによる自動化を実現する上では、重要なポイントであると考える。これは、著者が扱う食品生地を扱う作業においても、同様であると考えられる。

1.3 レオロジー物体

本節では、本研究で対象とする食品生地の特性を表現する、レオロジーという語句について説明する。

レオロジーという言葉はギリシア語の $\rho\epsilon'\omega$ (=流れる, rheo) という言葉に由来し、直訳すれば流動学となる。ドイツでは同様な意味で Fliesskunde と訳されている。日本ではこのままレオロジーと仮名で訳されて、今日に至っている。

レオロジーとは、生体、塑性体、粉体、固体ー液体混相流、高分子溶液、血液およびチョコレートや生パンのような食品を含め、各種物質に作用する応力や力に対して、それらの内部構造の変化を伴う場合もあるが、変形(deformation)と流動(flow)の経過を力学的に記述する学問であり、金属材料を含む機械工学、化学工学、食品工学や建築材料ならびに土ー石ー水流関係にも広く、この学問技術が応用されている。したがってレオロジーの学問領域は、水力学、流体力学、弾性学、塑性学、生物工学などの学問領域を包み込んでいる[1]。

機械工学分野において、レオロジーという言葉はなじみが少ない。物理的特性から物体を表すとき、弹性的特性を持っていれば弹性物体、弹塑性的特性を持っていれば弹塑性物体、粘弹性的特性を持っている物体を表す場合は、粘弹性物体と表現している。我々が本

研究で対象とする食品生地などの物体は、このカテゴリーで言えば粘弾性物体に当てはまる。粘弾性とは、言葉通り粘性と弾性の性質を併せ持つ物体であり、食品生地はこれら2つの特性を併せ持っている。しかしながら一口に粘弾性といっても、粘性、弾性の組み合せによって、残留変形を生じるものと、生じないものに分けられる。食品生地は残留変形を生じる。著者は、残留変形を生じる粘弾性物体である食品生地を、残留変形を生じない粘弾性物体と区別して考えたい。

現在のレオロジーの研究において、粘弾性学が研究の中核を成している[2]。このことから、著者は、食品や生体に代表される、残留変形を生じる粘弾性物体をレオロジー物体(rheological object)と定義付ける。本論文において、レオロジー物体とはこれらの物体を指す。

1.4 本研究のアプローチ

本節では、本研究の位置づけ、アプローチについて述べる。1.2節で述べたように、変形物体を扱う作業を、機械システムによる自動化で実現する上では、1) モデリング法の確立、2) 専用の機械システムの開発、3) 作業戦略の導出が重要である。

モデリングに関しては、対象となる物体のみのモデリングと、作業過程を含めたモデリングがある。前者の場合は、ある程度一般的な形でのモデリングが適していると考えられる。物体のみのモデリングは、外部からの入力を限定していない。外部からの入力は作業によって異なるため、様々な外部とのインタラクションにおいて、対応できるモデルである必要があるからである。それに対して作業過程を含めたモデリングは、作業に特化したモデリングでよい。計算量を減らすため、より作業に対応したモデリングで十分である。

専用の機械システムに関しては、作業の解析が重要である。それにより、作業に最低限必要な自由度の決定、シンプルなメカニズムの構築、作業の実現に必要なセンサーの選択が実現できるからである。本研究における作業のオリジナルは、人によって行なわれているため、人間による作業の解析から、その運動を再現できる機械システムの構築が重要である。

作業戦略に関しては、モデリングや機械システムに合わせた形のものを導出する必要がある。本研究において、作業戦略の導出は2パターンあると考えられる。1つは人間の作業の解析から、直接制御則を導出する場合である。もう1つは、モデリングと機械システムから、理論的、または実験的に作業戦略を導出する場合である。どちらの場合においても導出は可能であるが、モデリングを使ったほうが一般的ではある。

本研究では、以上のような3つのアプローチから研究を進める。

1.5 本論文の概要

まず、レオロジー物体の挙動を表現する、モデルの構築を行う必要がある。物体モデリングであり、様々な作業を想定し、モデルはシンプルで、物体の特性を表現できるものでなければならない。第2章ではレオロジー物体のモデリング法を提案する。このモデリン

グ手法は、物体単体のみのモデリングであり、作業も含めたモデリングではない。はじめに、今回対象とする食品生地に対応する、粘弾性要素の選択を行う。さらに、実物体の非線形挙動をモデルで表現するために、粘弾性要素内に非線形ダンパー(NLD)を導入する。この粘弾性要素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。また、要素内のパラメータを決定する手法を提案し、変形実験から値を求める。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。

作業の機械システム化には、専用の機械システムの開発が重要である。第3章では、新しい成形システムを提案する。人間による成形過程の解析から、成形に必要とする自由度について検討する。必要とされる自由度から伸長成形メカニズムを提案する。このメカニズムでは、ローラとテーブルの位置関係を任意に変化させることができる。レオロジー物体の形状を計測するセンサーとして、CCDカメラを用いる。提案されたメカニズムによる運動と、CCDカメラによるビジョンセンサーを組み合わせ、ビジョンフィードバックによる自動成形システムを構築する。

次に、作業戦略の導出と、実際の成形制御を行う。そこで第4章では、人間の実演から導いた制御則を用い、レオロジー物体の円形伸長成形を試みる。まず、CCDカメラで撮影したレオロジー物体の形状を、輪郭関数を用いて表現する。さらに、2つの形状の違いを定量的に評価する相違度を提案する。そして、人間によるレオロジー物体の伸長成形の分析から、円形伸長成形の制御則を提案する。最後に、円形伸長成形実験を行い、提案する伸長成形制御則を評価する。

第4章の制御則は円形にのみ成形できる。しかし、様々な目標形状への成形のためには、成形過程のモデリングを行い、モデリングに基づいた成形制御が必要である。そこで第5章では、成形機による実際の成形過程を解析し、実験的に導かれるレオロジー物体の成形過程モデルを提案する。成形によるレオロジー物体の面積の推移を分析し、成形形状の推定法を提案する。最後に、実際の変形データから定数倍伸長部と余剰伸長部を推定する。

第6章では、第5章で提案した成形過程モデリング法を用いた成形制御則を提案する。目標形状に対して評価関数を設定し、その評価関数が最小となるように制御を行う。実際に2種類の目標形状に対してレオロジー物体の成形制御を行い、制御則の有効性を検討する。

第2章

レオロジー物体の動的変形モデリング

2.1 緒言

実際のレオロジー物体の挙動を、コンピュータ上で再現することは、様々な分野において有益である。たとえば、食品産業でのレオロジー物体の成形作業においては、最終的な成形は人によって行なわれている。省力化や衛生面から、この作業の自動機械システム化は望まれており、成形のための作業戦略を構築するためには、物体挙動のモデリングは必要となる。また、バーチャル・リアリティーの分野において、実空間の現象を仮想空間に構築するためには、レオロジー物体の立体モデルは必要不可欠である。

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[10]。Joukhader らは、変形物体間の衝突シミュレーションを行った[47]。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[15]。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。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[48]。Zheng らは、穴に変形梁を挿入する作業方策を提案した[40]。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[42]。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[2]。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3次元的な変形に関するモデリングは扱われていない。

本章の目的は、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2.2.1節では、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。次に、2.2.2節に示す粘弾性モデル内に非線形ダンパー(NLD)を導入する。そして、2.2.3節に示す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。また2.3節では、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2.4節において、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。

2.2 レオロジー物体のモデリング

2.2.1 レオロジー物体の特性

本節では、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. 2.1-(a)に示す粘性要素と、Fig. 2.1-(b)に示す弾性要素を導入する。これら2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. 2.2-(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. 2.2-(c), (d), (e), (f), (g), (h)は3個の基本要素から成るモデル、Fig. 2.2-(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。

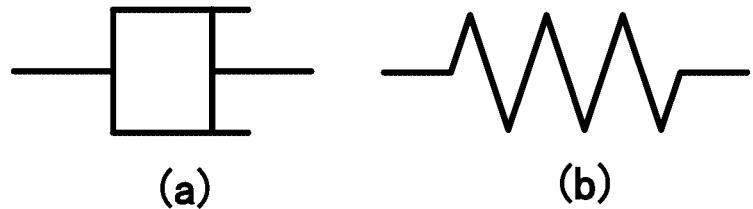


Fig. 2.1. Fundamental elements

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. 2.3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、我々が用いる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. 2.2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。たとえば、Fig. 2.2-(a)に示す粘弹性要素は、1つの部から構成される。これは、非残留変形部である。Fig. 2.2-(b)に示す粘弹性要素は、2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. 2.2-(c)に示す粘弹性要素は、2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

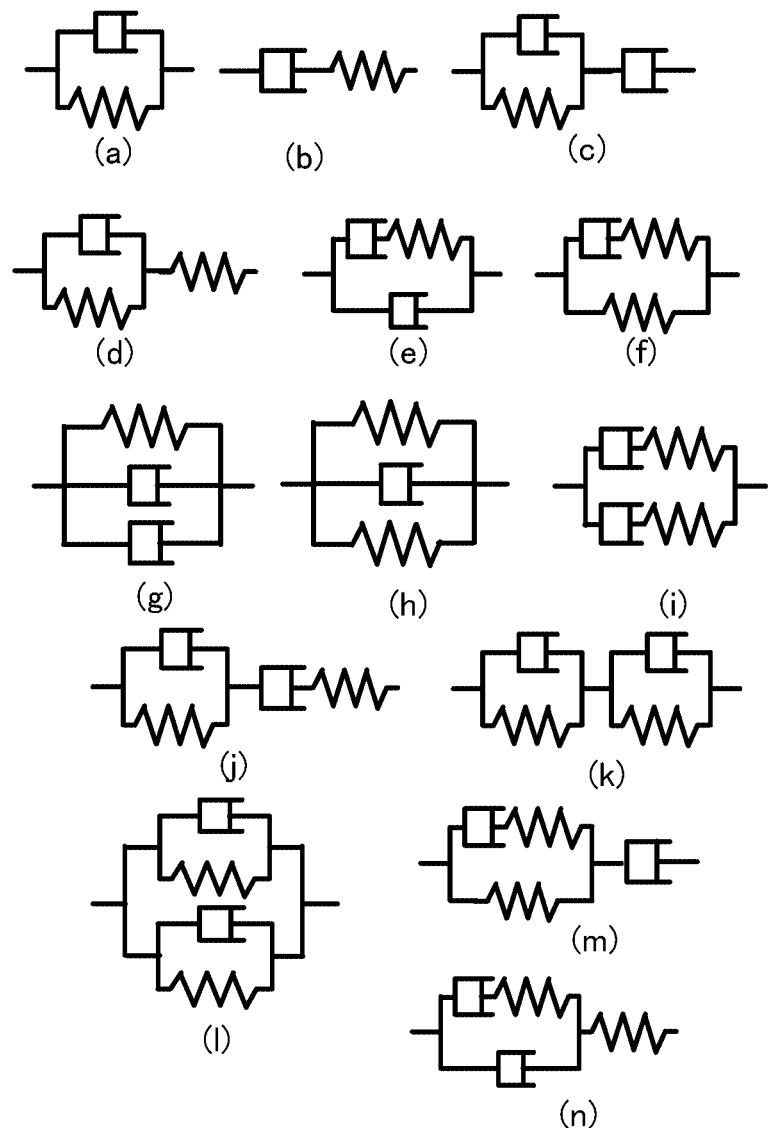


Fig. 2.2. Viscoelastic elements

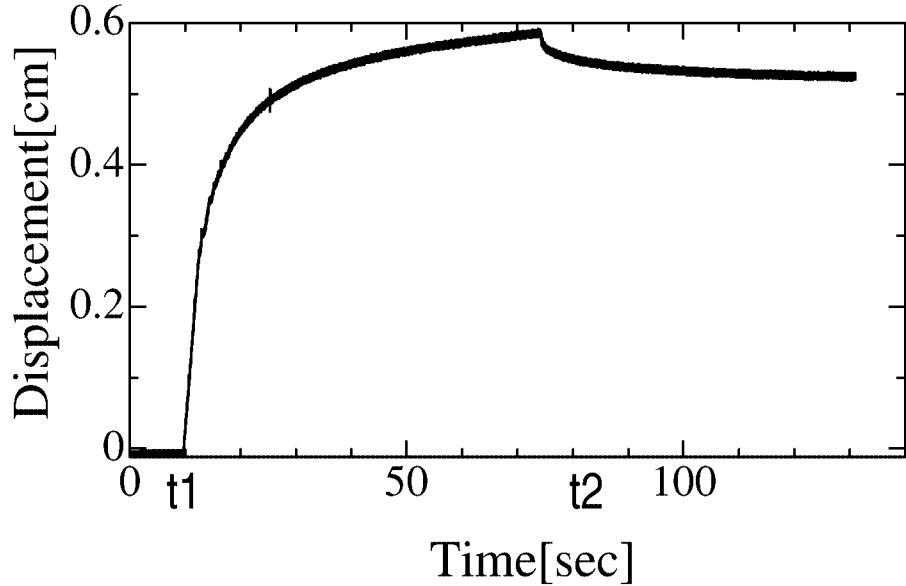


Fig. 2.3. Deformation response of actual rheological object

留変形部である。また、Fig. 2.2-(e)は1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3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良い。したがって、3要素モデル(c)あるいは(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. 2.2-(c)に示す3要素モデルの定式化を示す。Fig. 2.4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 は時変の長さを与える。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,

$$F_e = -C_1 \dot{Z}_n e_n - K_1 (Z_n - L_1) e_n \quad (2.1)$$

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。

$$F_e = -C_2 \left(\frac{d}{dt} (|d_n| - Z_n) \right) e_n. \quad (2.2)$$

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。

$$M \ddot{P}_n = F_e + F_a. \quad (2.3)$$

式(2.1), (2.2), (2.3)が、3要素モデルの運動方程式を与える。(2.1), (2.2)式から 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。

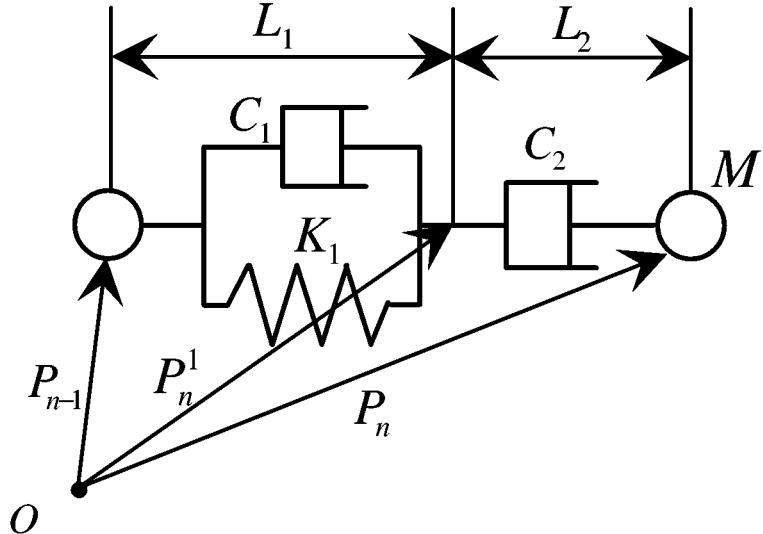


Fig. 2.4. Three element model

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。たとえば、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。そこで次節では、この問題を解決するために、非線形ダンパーを導入する。

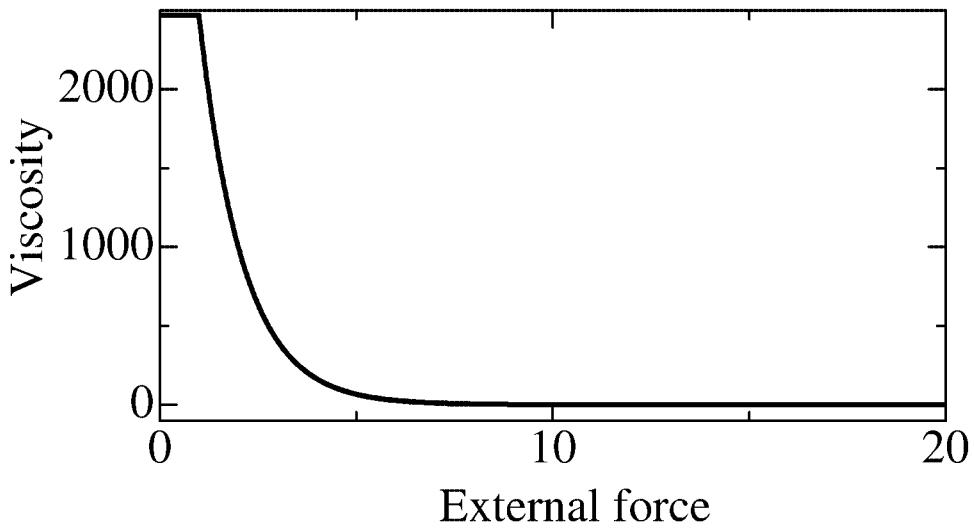


Fig. 2.5. Viscosity of nonlinear damper

2.2.2 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くてはならない。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。たとえば、 $C_2(f)$ を次のように定める。

$$C_2(f) = \begin{cases} C_{MAX} & (f < F_0) \\ e^{A+BF} & (F_0 \leq f \leq F_1) \\ C_{MIN} & (F_1 < f) \end{cases} \quad (2.4)$$

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. 2.5 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. 2.2-(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. 2.6 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. 2.5 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. 2.6-(a) は、入力 F の大きさが 6 のときの応答、Fig. 2.6-(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. 2.6-(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、 $C_2(f)$ 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。

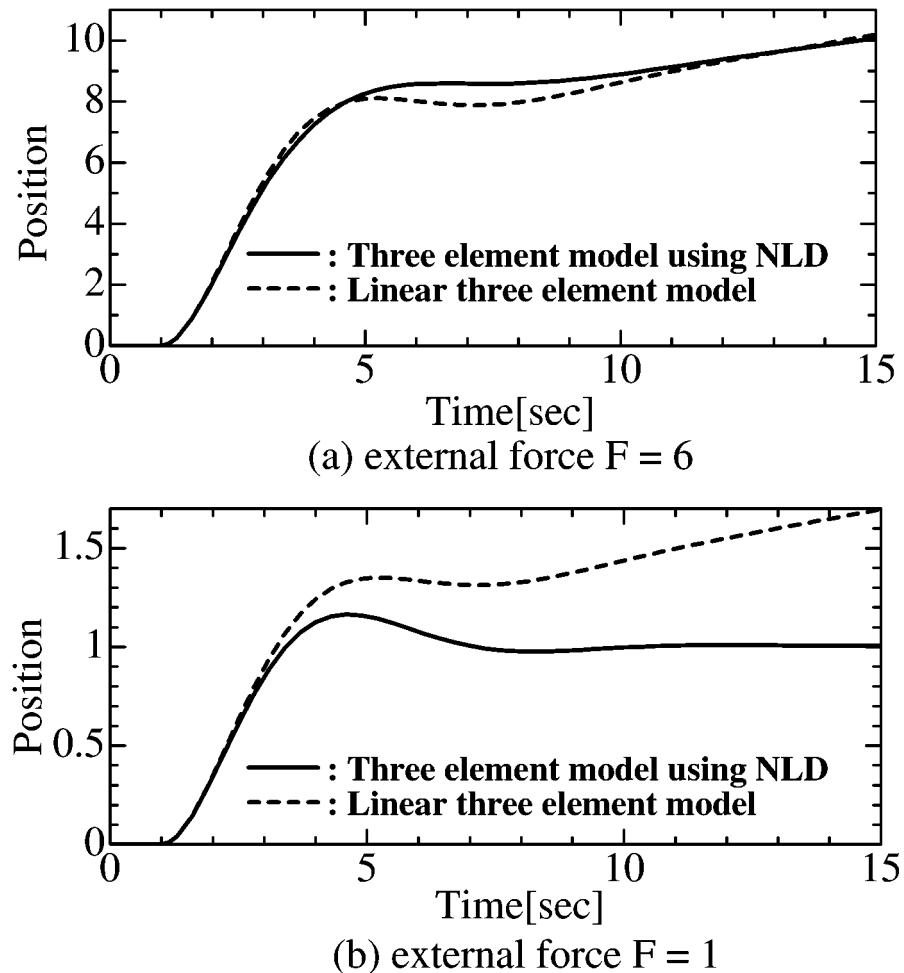


Fig. 2.6. Response of three element model using NLD for step input of force

2.2.3 レオロジー物体の格子構造モデル

本研究では、レオロジー物体の変形モデルを構築する。レオロジー物体を変形させると、変形を与える外乱が1次元方向であっても、物体には3次元変形が生じる。したがって、レオロジー物体の3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. 2.7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. 2.7-(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. 2.7-(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、次式で表わされる。

$$F_{i,j,k}^e = \sum_{\substack{\alpha, \beta, \gamma \in \{-1, 0, 1\} \\ (\alpha, \beta, \gamma) \neq (0, 0, 0)}} F_{i,j,k}^{\alpha,\beta,\gamma} \quad (2.5)$$

力 $F_{i,j,k}^{\alpha,\beta,\gamma}$ は、2.2.1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。

$$M \ddot{P}_{i,j,k} = F_{i,j,k}^e + F_{i,j,k}^a \quad (2.6)$$

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。

2.3 レオロジー物体のモデル同定

2.3.1 クリープ試験による非線形3要素モデルの同定

本節では、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、

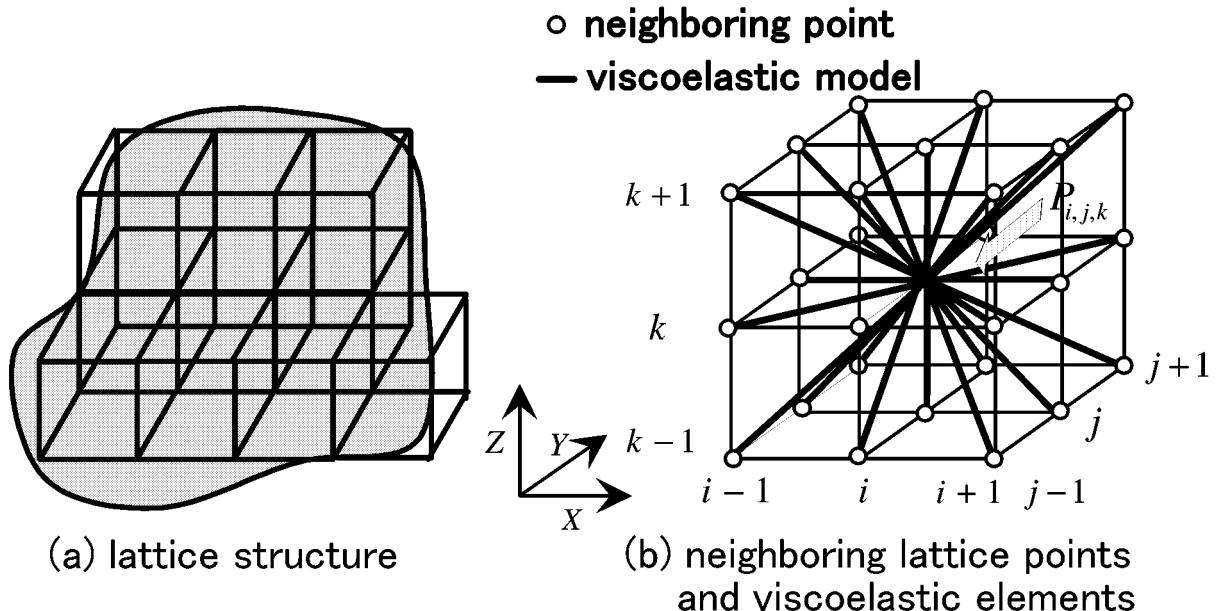


Fig. 2.7. Lattice model of rheological object

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、2.2.1節に示したFig. 2.3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. 2.2-(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. 2.2-(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. 2.2-(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、1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できることが望ましい。そこで、Fig. 2.2-(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。たとえば、Fig. 2.8に示すように、直方体のレオロジー物体に一定荷重を作成すると、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。結果として、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ることがわかる。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. 2.8-(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. 2.8-(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

$$Sh = S_0 h_0 \quad (2.7)$$

が成り立つ。応力を P とすると

$$P = \frac{W}{S}. \quad (2.8)$$

式(2.7)(2.8)より、

$$P = \frac{W}{S_0 h_0} h \quad (2.9)$$

が得られる。結局、(2.9)式を用いて、レオロジー物体に作用する応力を求めることができる。

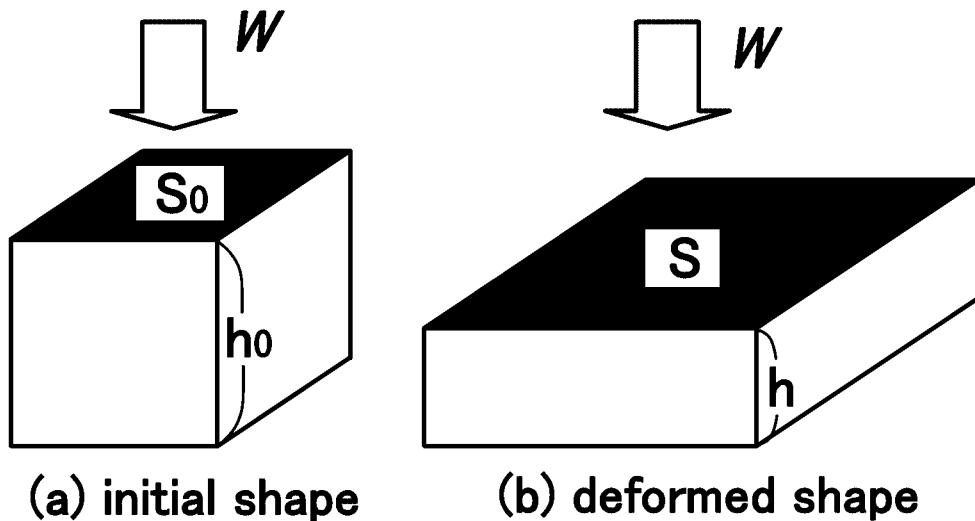


Fig. 2.8. Deformation in creep test

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。

$$x(t) = \frac{P_0}{K_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{K_1}{C_1}t\right) \right\}. \quad (2.10)$$

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(2.10)式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、 $C_2(P(t)) = P(t)/v(t)$ 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、平均値を取ることによりパラメータ値を決定する。

2.3.2 パラメータ同定結果

今回、クリープ試験での荷重条件は、10gf, 30gf, 50gf, 70gf, 90gf 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、小麦粉と水を3:1の重量比で混ぜ合わせた生地を用い、各辺1cmの立方体である。

Fig. 2.9に、荷重50gf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、0gf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. 2.9より求めた除重後の戻り変位を、Fig. 2.10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、(2.9)式から求めると $P_0 = 28[gf/cm^2]$ となる。除重後の戻り変位の値と(2.10)式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、 $K_1 = 470[gf/cm^3]$, $C_1 = 2500[gfs/cm^3]$ が得られる。この値を(2.10)式に代入したときの戻り変位 $x(t)$ を、Fig. 2.10の点線に示す。

次に、NLD のパラメータを同定する。Fig. 2.9に示す変位を(2.9)式に代入し、応力 $P(t)$ を計算する。得られた応力 $P(t)$ の値を、Fig. 2.11に示す。Fig. 2.9に示す変位から、(2.10)式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. 2.12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観察により求める。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 は観察により、パラメータ A , B は最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 $C_1 = 2000[gfs/cm^3]$, $K_1 = 400[gf/cm^3]$, $A = 11.31$, $B = -0.0815$, $F_0 =$

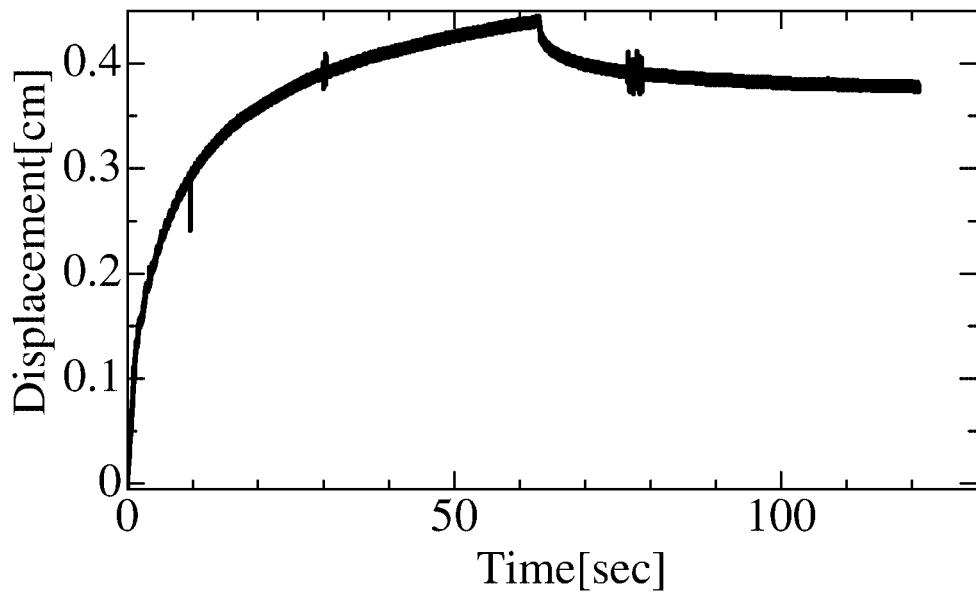


Fig. 2.9. Result of creep experimentation ($F = 50\text{gf}$)

$9[\text{gf}/\text{cm}^2]$, $F_1 = 80[\text{gf}/\text{cm}^2]$ が得られた。このとき $C_{MAX} = 40000[\text{gfs}/\text{cm}^3]$, $C_{MIN} = 120[\text{gfs}/\text{cm}^3]$ である。

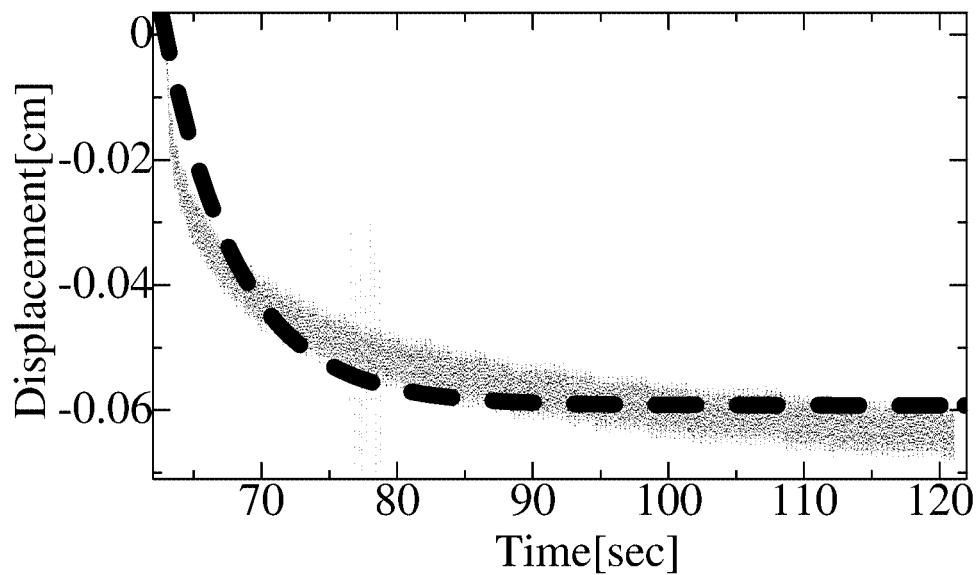


Fig. 2.10. Step response of non-residual deformable part

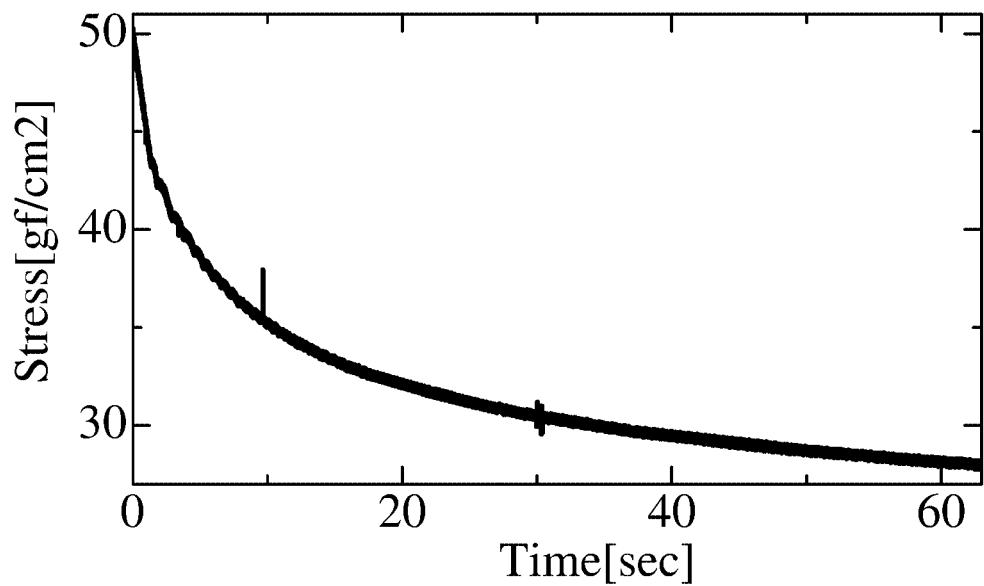


Fig. 2.11. Stress applied to rheological object

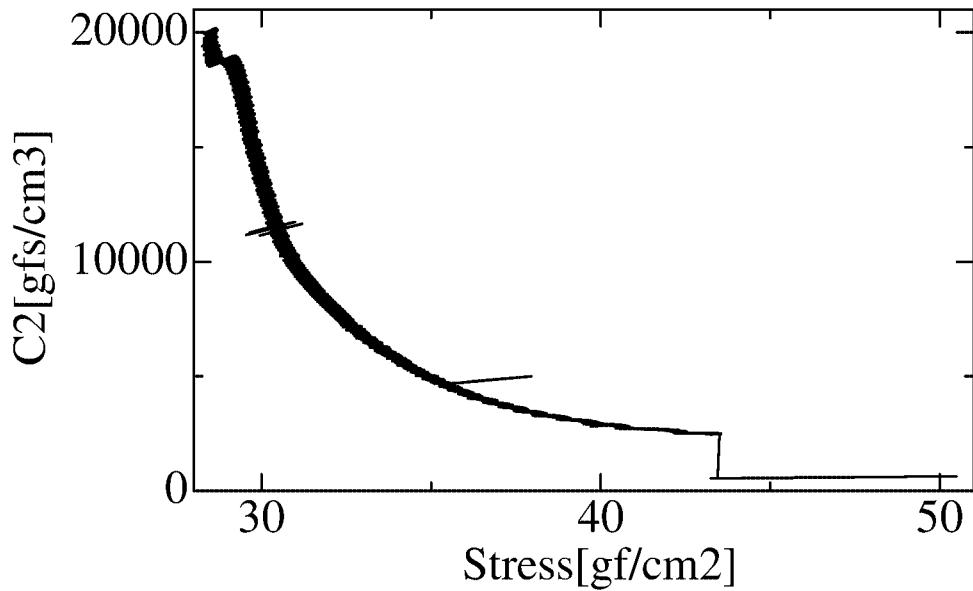


Fig. 2.12. Relation between force and damper coefficient in NLD

2.3.3 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1次元変形を対象としているのに対し、格子構造法では、3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. 2.13-(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。一個の格子に含まれる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、4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仮定する。このとき、Fig. 2.13-(a)に示す格子構造モデルは、上下方向の変形に関して、Fig. 2.13-(b)に示すように、16個の3要素モデルから構成される1次元モデルで近似することができる。さらに、Fig. 2.13-(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. 2.13-(b)のモデルはFig. 2.13-(c)のモデルに等価変換できる。Fig. 2.13-(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. 2.13-(b)に等価変換し、さらにFig. 2.13-(a)に近似展開する。結局、3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。

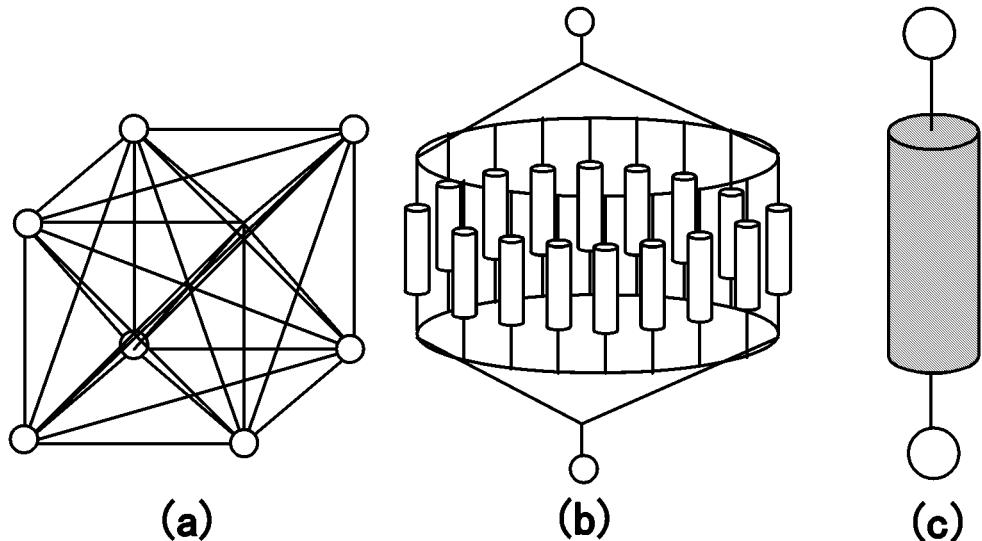


Fig. 2.13. Simplification of lattice structural model

2.4 レオロジー物体モデルの評価

本節では、2.3節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。

2.4.1 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、エンドエフェクター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。エンドエフェクターは幅1cmの板である。エンドエフェクターの上部を、ロボットマニピレータの手先に取りつける。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、5cm × 5cm × 3cm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ーを垂直下方向に、速度1cm/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1cm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ーを移動させ、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。

2.4.2 3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3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. 2.14にレオロジー物体の3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、 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ の試験片を用いた。そこで、格子の単位長さを 1cm 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. 2.14に示す格子構造が得られる。これは、 $6 \times 6 \times 4$ の質点から成る。非線形3要素モデルは、全ての隣り合った質点間に配置される。

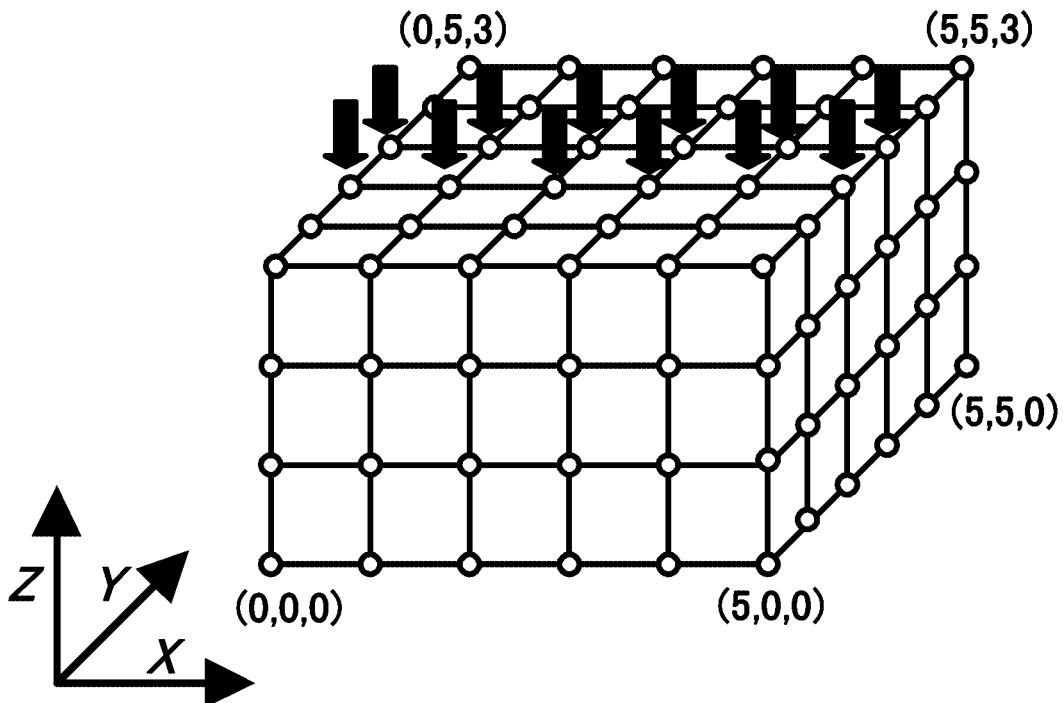


Fig. 2.14. Three-dimensional model of rheological object

2.4.1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により、接触による変形を模擬する。すなわち、格子点 $(0,2,3)$ 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 $1\text{cm}/\text{s}$ で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。

2.4.3 変形実験結果とシミュレーション結果の比較

本節では、2.4.1節での変形実験結果と、2.4.2節での3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. 2.15に変形実験の結果を示す。Fig. 2.15-(a)～(d)は初期形状であり、Fig. 2.15-(e)～(h)は変形後の形状である。Fig. 2.15-(a), (e)は斜め上方から見た図である。Fig.

Fig. 2.15-(b), (f) は側面図, Fig. 2.15-(c), (g) は上面図, Fig. 2.15-(d), (h) は正面図である。また, Fig. 2.17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わかる。また, エンドエフェクターを引き離した後, 1cm 下に押え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. 2.17よりわかる。

次に, 3次元モデルのシミュレーション結果を, Fig. 2.16に示す。Fig. 2.16-(a)~(d) は初期形状で, Fig. 2.16-(e)~(h) は変形後の形状である。Fig. 2.16-(a), (e) は斜め上方から見た図である。Fig. 2.16-(b), (f) は側面図, Fig. 2.16-(c), (g) は上面図, Fig. 2.16-(d), (h) は正面図である。また, Fig. 2.18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. 2.16からわかるように, 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. 2.18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わかる。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. 2.18, Fig. 2.16-(h) からわかる。

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。

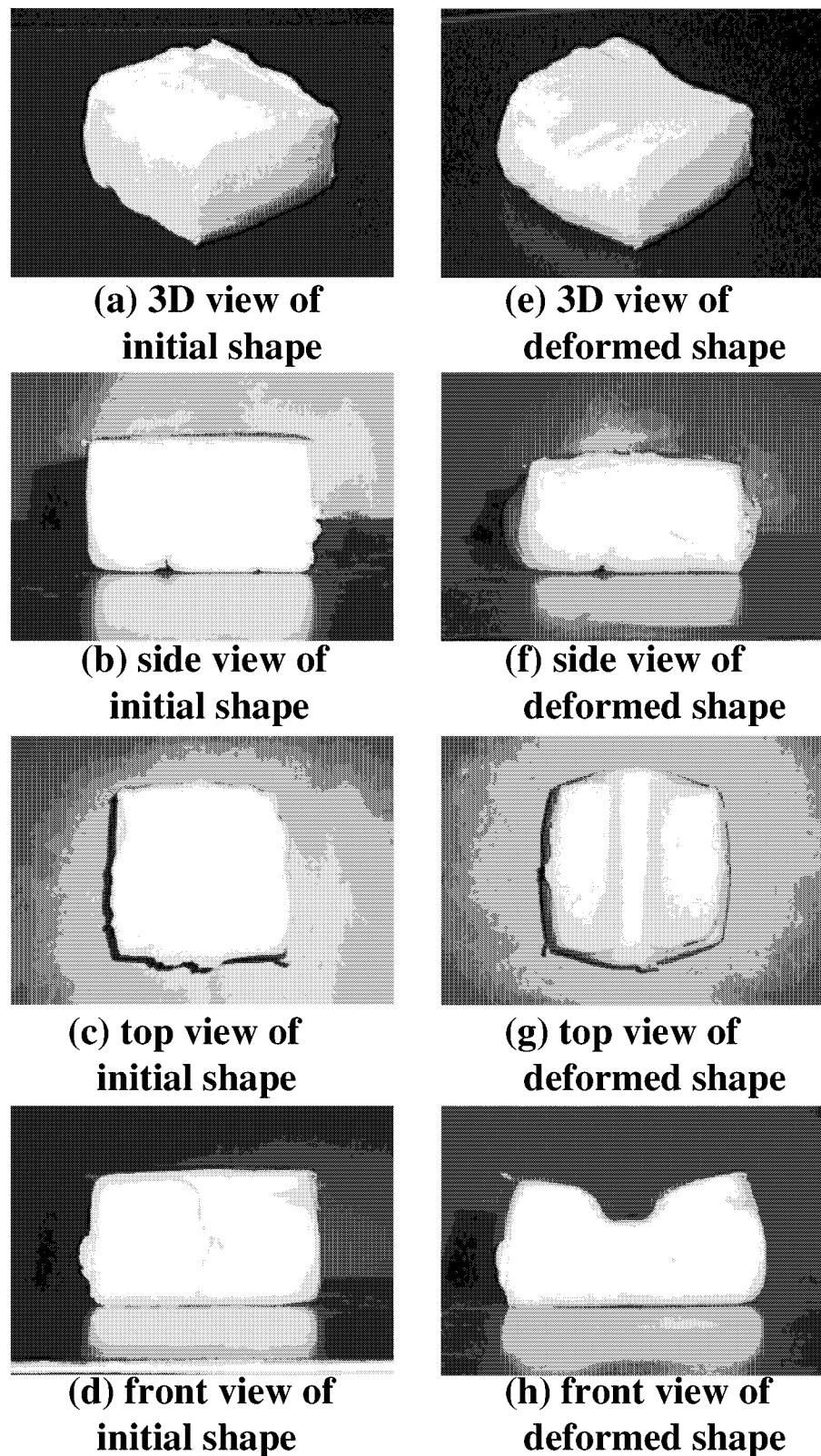


Fig. 2.15. Deformation of actual reological object

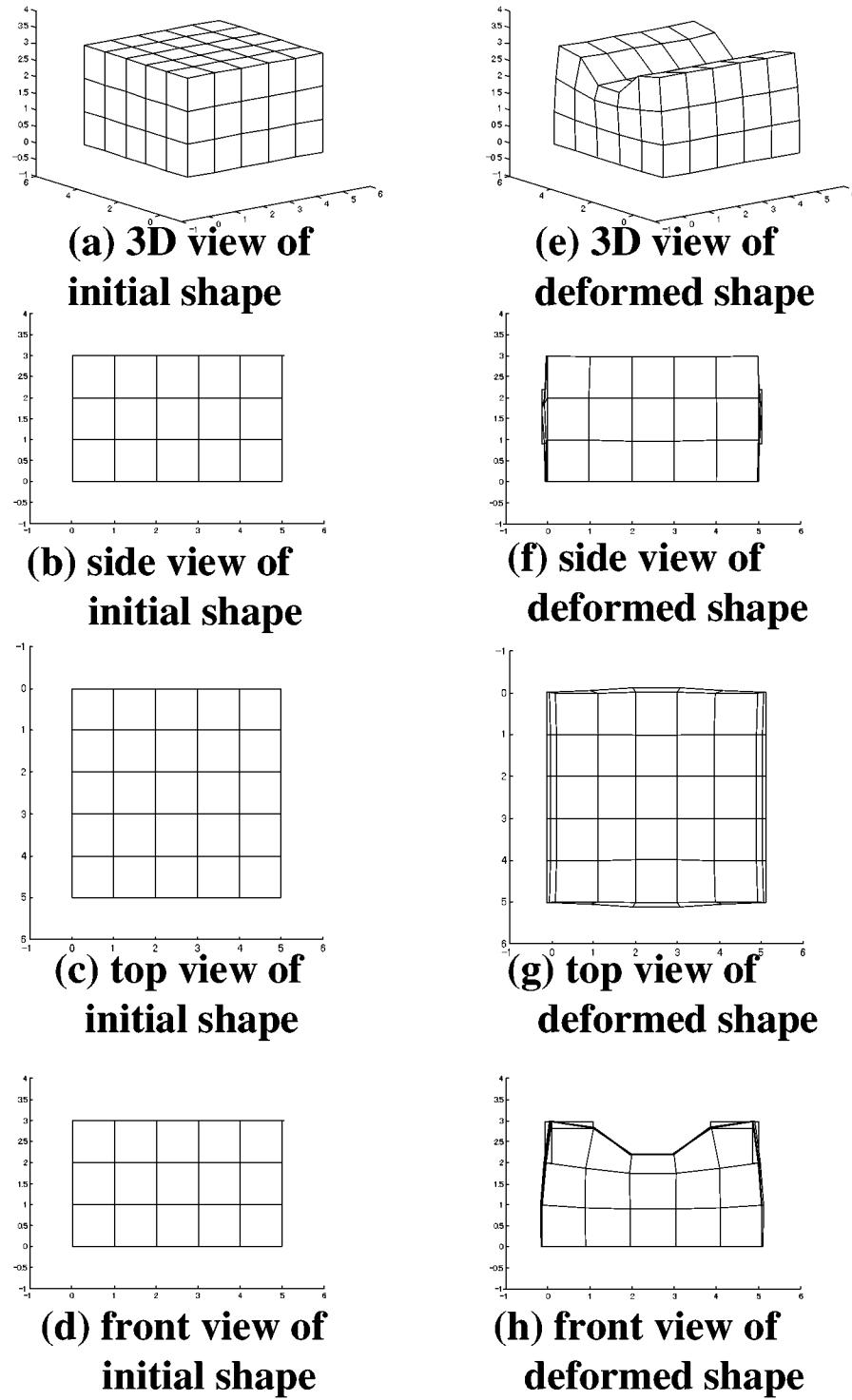


Fig. 2.16. Deformation of three-dimensional model for displacement input

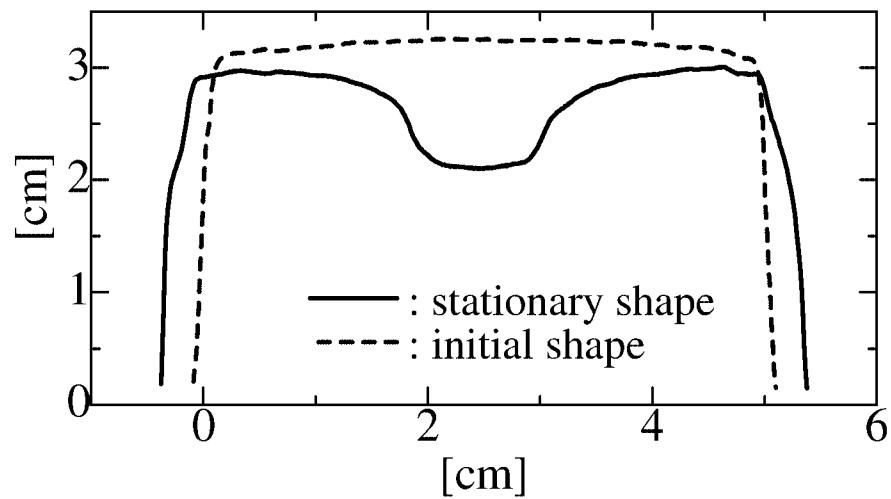


Fig. 2.17. Cross section of deformed reological object

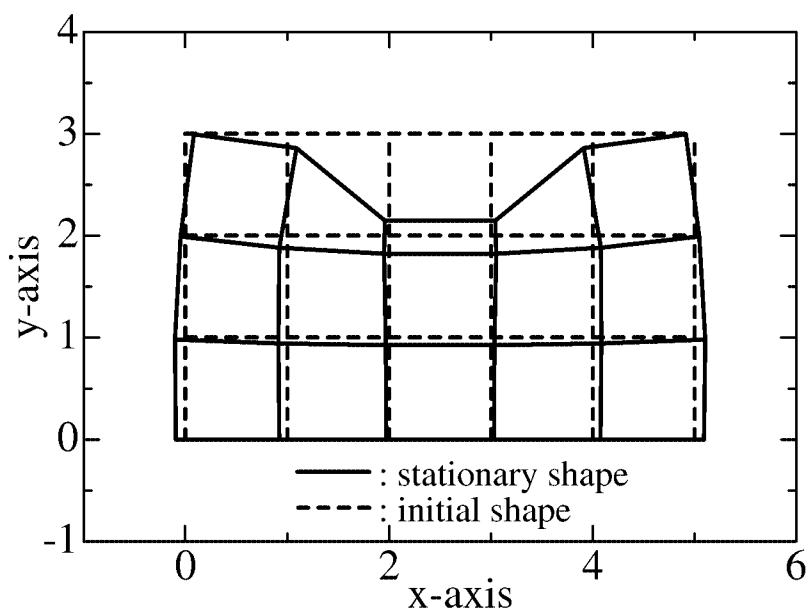


Fig. 2.18. Cross section of deformed two-dimensional model for displacement input

2.5 結言

本章では、レオロジー物体の変形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あらわ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わかった。次に、モデルの挙動を実際のレオロジー物体に近づけるために、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わかった。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。横への広がりが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ことが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。本章で述べた手法を用いることにより、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、本章で提案するレオロジー物体のモデリング手法は、有効であると考える。

第3章

ビジョンを用いた多自由度伸長成形システム

3.1 緒言

第2章で述べたように、現在のピザ生地などの食品生地成形工程においては、一定間隔に設置されたローラとコンベアの間を生地が通過し、引き延ばされる。しかしながら、最終的な成形は人によって行われ、成形作業の完全な自動化は行われていない。省力化や衛生面から、この作業の自動機械システム化は望まれている。そのためには、成形作業に必要とされる自由度を検討し、その自由度の運動を実現できる新たな成形メカニズムを開発する必要がある。さらに自動システム化に向け、成形制御を実現することができるアクチュエータやセンサーを検討し、一つの成形システムを構築する必要がある。

本章では、ローラとテーブルの位置関係を任意に変化させることのできる新しい成形メカニズムを提案する。3.2節では、レオロジー物体の成形制御を行うために、必要とされる自由度について検討する。3.3節では、必要とされる自由度から伸長成形メカニズムを提案する。3.4.1節では、レオロジー物体の形状計測に用いるCCDカメラを用いた、ビジョンシステムを提案する。3.4.2節では、各メカニズムの制御方法を検討する。3.5節では、試作した成形システムを示す。

3.2 伸長成形の自由度

本節では、伸長成形のためのメカニズムに、必要とされる自由度について検討する。成形作業において、ローラとテーブルの相対的な位置関係をFig. 3.1に示す。ローラは、並進自由度 T_1 , T_2 , T_3 と回転自由度 R_1 , R_2 , R_3 を有する。軸に沿う並進 T_3 と軸周りの回転 R_1 は、ローラとテーブルの位置関係を変えない。これ以外の自由度は、ローラとテーブルの位置関係を変化させる。すなわち、ローラとテーブルの位置関係を変化させる自由度は、二つの並進自由度 T_1 , T_2 と二つの回転自由度 R_2 , R_3 である。これらの自由度をローラ部分とテーブル部分に割り当てる。自由度 T_1 ならびに R_2 は、テーブル面内の平面運動であるので、テーブルに割り当てる。それ以外の自由度 R_1 , T_2 はローラに割り当てる。また、ローラの回転 R_1 は、テーブルの並進運動 T_1 に同期させる。

ここで、人間が麺棒を用いて生地を伸長成形する作業から、各自由度について考察する。Fig. 3.1に示すように、人間が生地を成形する時は、生地の上に麺棒を転がす。この時、麺棒は生地の上を滑らない。従って、Fig. 3.1に示す並進自由度 T_1 と回転自由度 R_1 は

同期して運動することがわかる。また、麵棒を対象物に接近させる方向、麵棒の高さ、麵棒の傾きは麵棒を転がしている間は、一定であると考えられる。従って、回転自由度 R_2 、並進自由度 T_2 、回転自由度 R_3 は、麵棒を転がしている間は一定の値を保つ。ただし、成形作業においては、一回麵棒を転がすのみで目標形状に達することはまれであり、一般に複数回麵棒を転がすことにより目標形状に到達する。すなわち、成形作業は、複数の成形動作、すなわち麵棒を転がす動作から成り立つ。各々の成形動作においては、回転自由度 R_2 、並進自由度 T_2 、回転自由度 R_3 が異なる値を持つ。一方、並進自由度 T_3 方向は麵棒が十分に長い限り、動かす必要がない。以上のように、人間の成形動作は、 T_1 、 T_1 に同期する R_1 、 R_2 、 T_2 、 R_3 から成ることがわかる。独立な自由度の個数は4である。また、成形動作中の自由度は、 T_1 のみであり、ある成形動作から次の成形動作に移る時は、 R_2 、 T_2 、 R_3 の値を調整している。

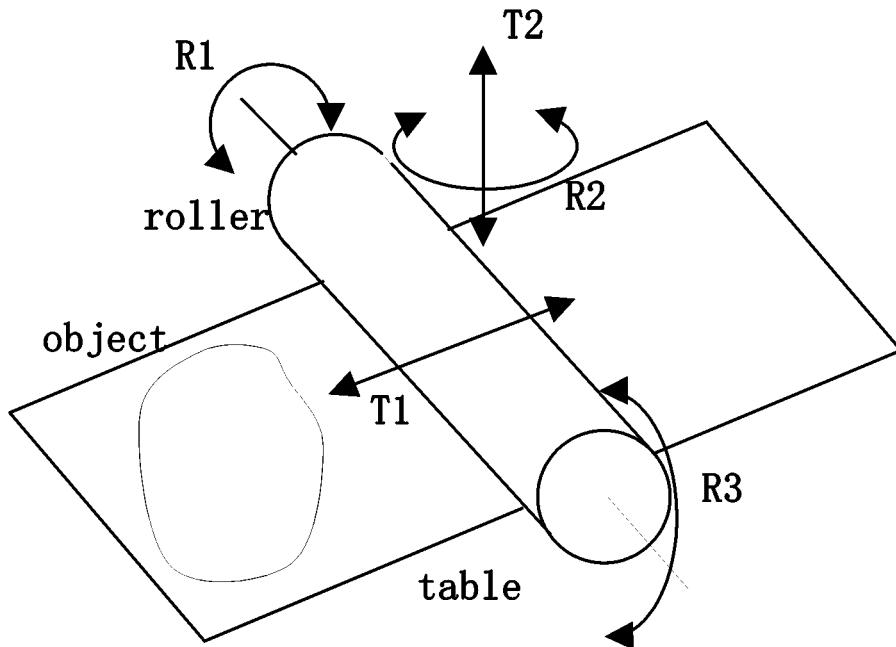


Fig. 3.1. Motion freedoms of forming machine

3.3 伸長成形メカニズム

本節では、前節までに述べた内容を基に、Fig.3.2に示す伸長成形メカニズムを提案する。このメカニズムは、ローラとテーブルの間隔、ローラの傾きを変えることができる。また、テーブルの回転運動と並進往復運動を実行できる。ローラ部は、受動回転ジョイント a_1 , a_2 , a_3 と能動伸縮ジョイント b_1 , b_2 からなる。能動伸縮ジョイント b_1 , b_2 を制御することにより、ローラの傾き、ローラとテーブルの間隔を変化させることができる。テーブル部は、能動回転ジョイント a_4 と能動並進ジョイント b_3 からなる。また、Fig.3.3に示

すように、ローラとテーブルはベルト機構を用いて連結されている。このとき、テーブルの並進移動速度とローラの回転接線速度は等しい。

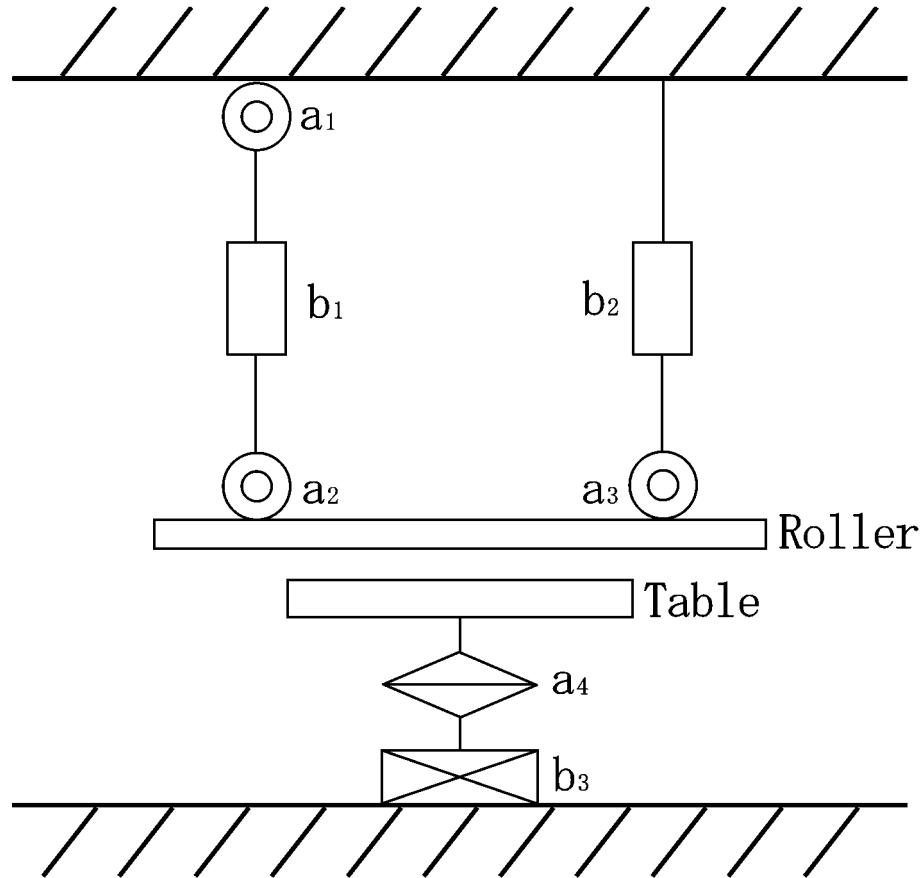


Fig. 3.2. Mechanism of proposed forming machine

3.4 伸長成形メカニズムのコントローラ

3.4.1 ビジョンシステム

レオロジー物体の変形形状を計測し、レオロジー物体伸長成形システムを制御するために、ビジョンシステムを導入する。レオロジー物体の伸長成形において、上部から見た変形形状により、次の成形動作が決まると考えられる。従って、伸長成形においては、白黒単眼視で十分である。

3.4.2 運動コントローラ

本節では、各メカニズムの制御について検討する。成形動作中に並進自由度 T_1 以外のローラとテーブルの位置関係は変化させないとする。よって、能動伸縮ジョイント b_1 , b_2

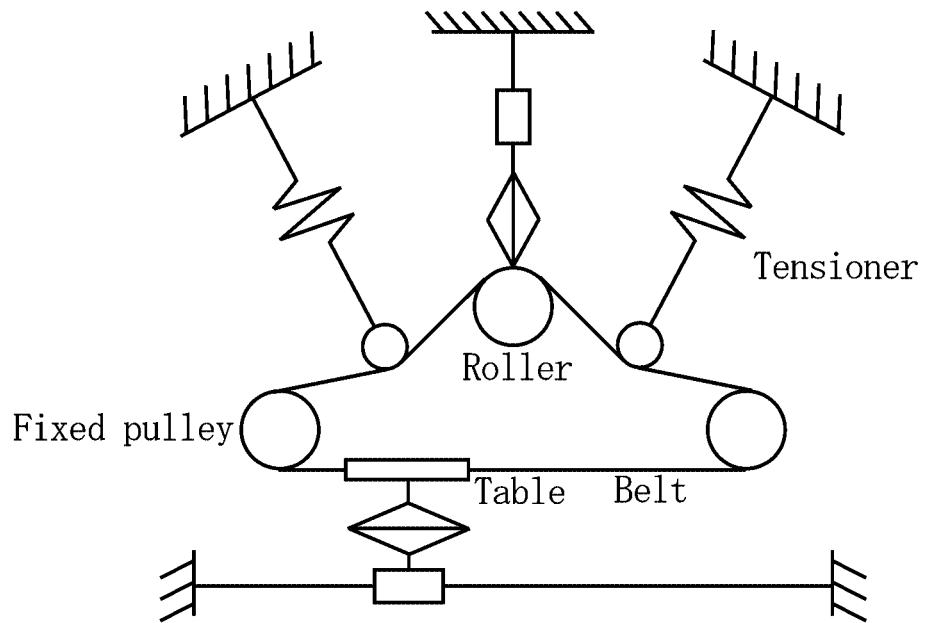


Fig. 3.3. Belt Mechanism to synchronize roller rotation with table translation

とテーブルの回転部は、位置制御を行う。Fig. 3.4に示すように、ローラとテーブルの間隔を D 、ローラの傾きを φ 、テーブルの回転角を ψ とする。これらの値は成形動作中に変化させない。したがって、個々の成形動作は、 D 、 φ 、 ψ の値で表される。以降では、これらの値を成形における制御パラメータとする。

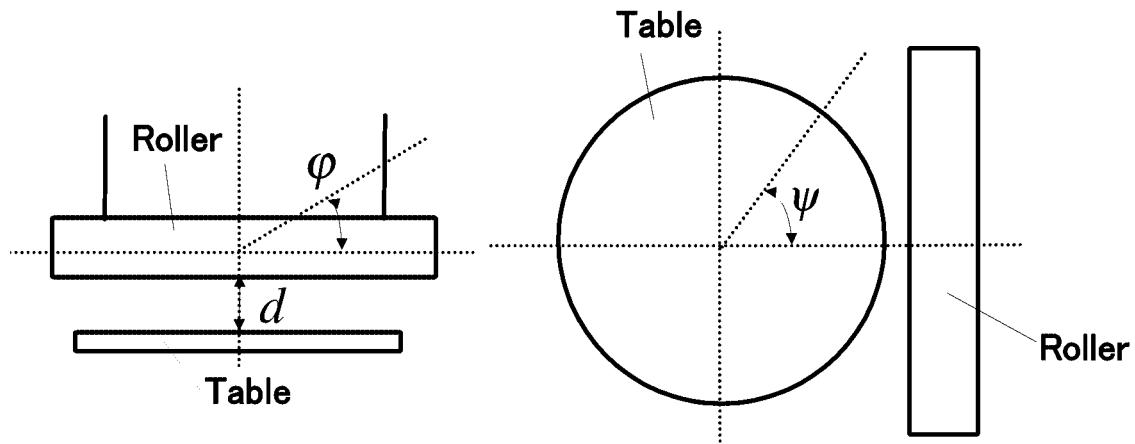


Fig. 3.4. Position-controlled variables

制御システムをFig. 3.5に示す。まず、CCDカメラが、物体の2次元形状を撮影し、その形状画像をビデオキャプチャーボードによりPCに取り込む。次に取り込んだ画像からレオロジー物体の形状を認識し、形状によって、成形機の制御パラメータを決定する。

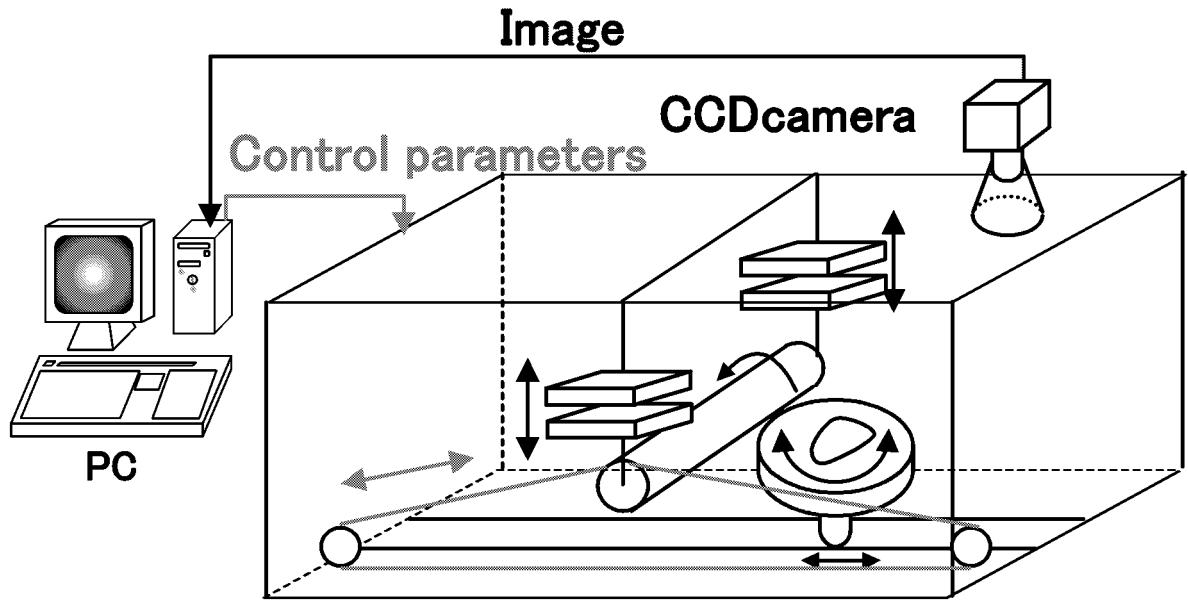


Fig. 3.5. Forming system

3.5 成形システムプロトタイプ

3.3節で述べた成形メカニズムと、3.4節で述べたコントローラを有する成形システムのプロトタイプを、Fig.3.6に示す。Fig.3.2に示す自由度 b_1 , b_2 , b_3 , a_4 は、DC サーボモータ（山洋電気 V506-012）で駆動される。また、テーブル初期位置上部に、白黒CCDカメラ（ソニー XC-77）を取りつけてある。CCDカメラから取り込んだ画像はビデオキャプチャーボード（I・O DATA GV-VCP2/PCI）を通してPCに取りこむ。画像サイズは320[pixel] × 240[pixel]である。

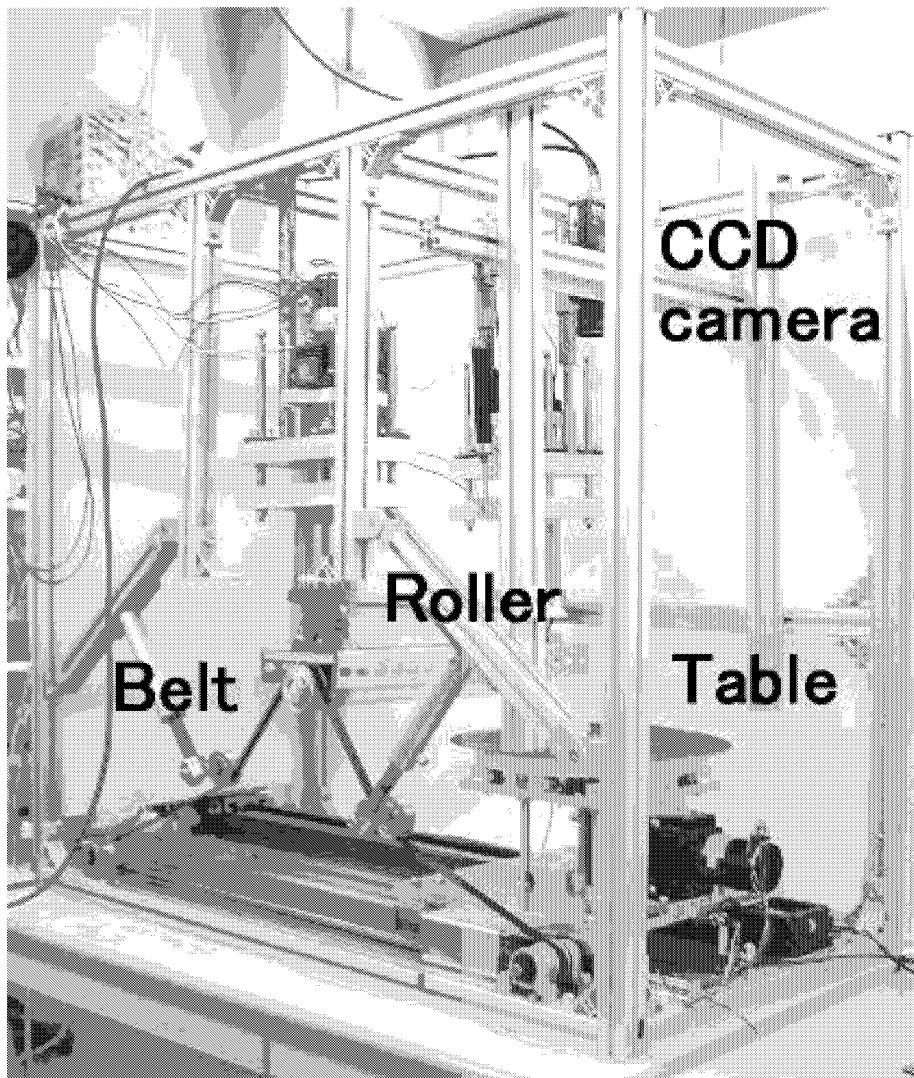


Fig. 3.6. Prototype of forming machine

3.6 結言

本章では、レオロジー物体を成形するための自由度を検討し、ローラとテーブルの位置関係を任意に変化させることのできる新しい成形メカニズムを提案を行った。そして、そのメカニズムを基に、成形試験機を製作した。また、物体の形状を計測するセンサーとしてCCDカメラを用いた。最終的に、CCDカメラでレオロジー物体の形状を計測し、計測された形状によって制御パラメータを決定する、ビジョンフィードバックによる成形システムを構築した。

本成形システムを用いることで、第4章、第6章で述べるレオロジー物対の成形制御を行うことができる。

第4章

人間の実演に基づくレオロジー物体の円形成形

4.1 緒言

現在の食品生地成形工程において、レオロジー物体の最終的な成形作業は、人によって行われている。人による作業を自動化する上において、成形制御の作業方策を導出することは重要である。作業方策を導く方法の一つに、実演ベースド制御が考えられる。これは、実際の人間による成形作業を実演からデータを抽出し、機械に移植することにより、成形制御を実現するというものである。少なくとも、現在の成形工程が人により行われていることを考えると、人による成形作業を解析することは、作業方策を導く上では有効であると考える。そして、人による成形作業を機械システムに移植できれば、成形作業の自動化は可能である。

本章では、レオロジー物体を伸ばしながら成形する作業を対象とする。このような成形を、伸長成形と呼ぶ。4.2.1節では、CCDカメラで撮影した、レオロジー物体の形状の表現法を提案する。4.2.2節では、二つの形状の違いを定量的に評価する相違度を提案する。4.3節では、人間によるレオロジー物体の伸長成形を分析する。4.4節では、分析結果とともに、円形伸長成形の制御則を提案する。4.5節では、円形伸長成形実験を行い、提案する伸長成形制御則を評価する。

4.2 レオロジー物体の形状表現

4.2.1 輪郭関数

本節では、CCDカメラで撮影した、レオロジー物体の形状の表現法を提案する。Fig. 4.1-(a)に示すように、上方からレオロジー物体の形状を撮影する。レオロジー物体の形状を計測するためには、画像処理によって物体とそれ以外の部分を分離しなければならない。テーブルの位置は常に一定に制御されるので、テーブル部と背景部は簡単に分離できる。そこで、Fig. 4.1-(b)に示すように、レオロジー物体とそれ以外の部分との2値化処理を行い、レオロジー物体のみの形状を抽出する。

次に物体の形状を計算する。画像は、格子点 (i, j) ($i = 0, 1, \dots, x_{max}$, $y = 0, 1, \dots, y_{max}$)上で与えられるとする。格子点 (i, j) における明度の値を $p(i, j)$ で表す。物体の形状を計測するために、まず物体の重心 G の座標 $[X_g, Y_g]^T$ を計算する。重心位置は、以下の式で

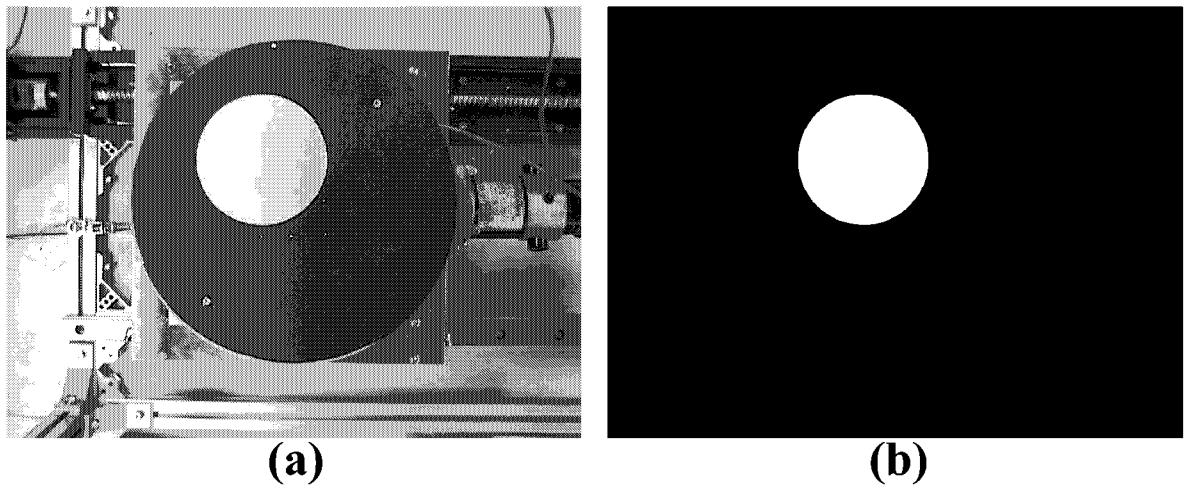


Fig. 4.1. Extraction of rheological object :(a) Before image processing, (b) After image processing

導出される。

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \end{bmatrix} = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{x_{max}} \sum_{j=0}^{y_{max}} p(i, j) \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

ここで

$$W = \sum_{i=0}^{x_{max}} \sum_{j=0}^{y_{max}} p(i, j) \quad (4.2)$$

とする。次に, Fig. 4.2に示すように, 重心を始点とする基準半直線を定める。基準半直線から角度 θ の方向において, 重心からレオロジー物体の輪郭までの距離を $f(\theta)$ で表す。物体の輪郭は, 関数 $f(\theta)(0 \leq \theta \leq 2\pi)$ で記述される。これを, 変形形状の輪郭関数と呼ぶ。輪郭関数は, 周期 2π の周期関数である。Fig. 4.3に輪郭関数の例を示す。

Fig. 4.3-(a)に円形形状を示し, Fig. 4.3-(b)に円形形状に対応する輪郭関数を示す。Fig. 4.3-(c)に正方形の形状を示し, Fig. 4.3-(d)に正方形形状に対応する輪郭関数を示す。

位置が異なり, 姿勢が一致する二つの合同な形状の輪郭関数は, 相等しい。また, Fig. 4.4に示すように, 二つの合同な形状が, 相対角度 ψ だけ姿勢が異なる場合, 一方の輪郭関数を $f(\theta)$ とすると, 他方の輪郭関数は $f(\theta + \psi)$ で与えられる。一方, Fig. 4.5に示すように, 姿勢が一致し, 拡大率 α の二つの相似形状に対しては, 一方の輪郭関数を $f(\theta)$ とすると, 他方の輪郭関数は, $\alpha f(\theta)$ で与えられる。

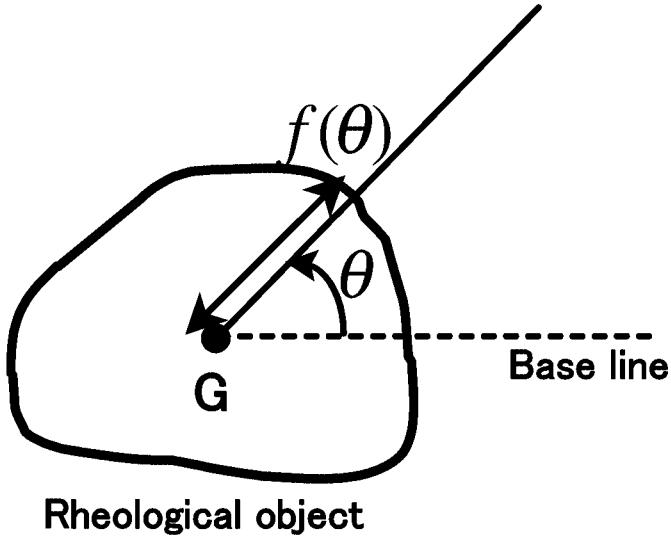


Fig. 4.2. Concept of outline function

4.2.2 変形形状の相違度

レオロジー物体の成形制御を行うためには、物体の形状と成形目標の形状との違いを定量的に評価する必要がある。向井らは、形状モデルをロボットの認識機構や知識の表現などに応用するために、物体の3次元形状を分類するためのアルゴリズムを提案している[49] [50]。本研究では、物体の2次元形状において違いを定量的に評価する。そこで本節では、二つの変形形状の違いを定量的に評価する基準として、相違度を導入する。相違度は、相似な変形形状は相等しいとみなす。このとき、二つの変形形状の違いを評価するためには、Fig. 4.4, Fig. 4.5に示すような変形形状の位置、姿勢、大きさの違いを取り除き、形状のみを抽出しなければならない。

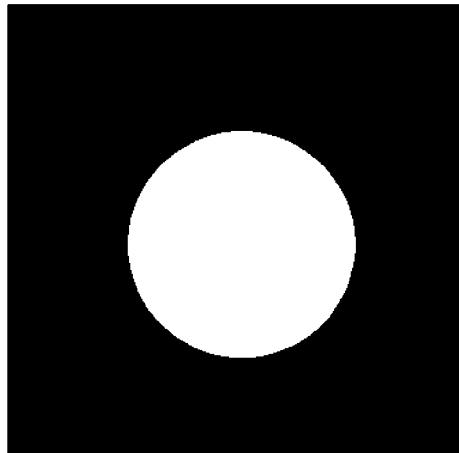
二つの変形形状を比較するために、それぞれの輪郭関数を計算する。前述のように、輪郭関数は物体の位置に依存しないので、この段階で位置の違いが除去される。次に、形状の拡大率 \bar{f} を次式で求める。

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta. \quad (4.3)$$

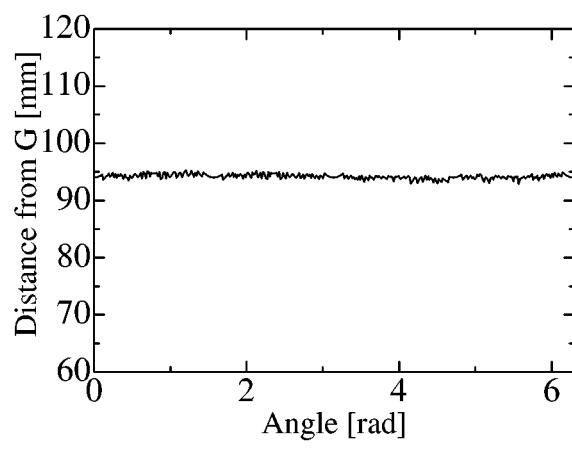
形状の大きさの基準を b で表す。形状の拡大率を一定にするためには、輪郭関数に b/\bar{f} を乗じ、その平均値を b に一致させねばよい。さらに、 b を減じ、平均値を0に一致させる。すなわち、次式を計算する。

$$F(\theta) = \frac{b}{\bar{f}} f(\theta) - b. \quad (4.4)$$

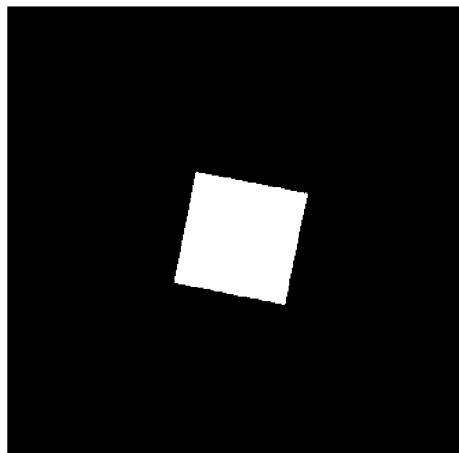
関数 $F(\theta)$ を正規化輪郭関数と呼ぶ。姿勢が等しい相似形状の正規化輪郭関数は、互いに一致する。すなわち、この段階で大きさの違いが除去される。次に、変形形状の姿勢を求める。二つの形状の正規化輪郭関数を $F(\theta)$, $G(\theta)$ とする。ここで、次式で与えられる関



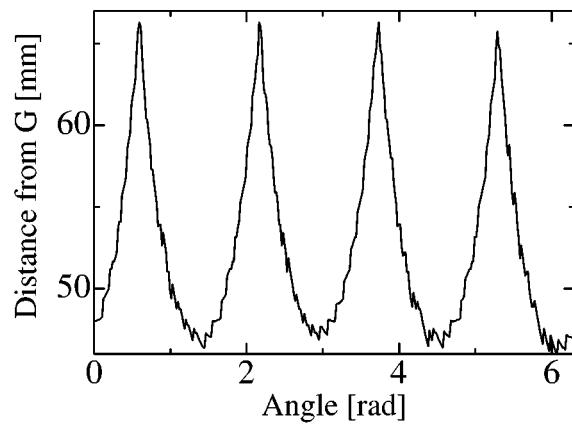
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.3. Examples of outline function

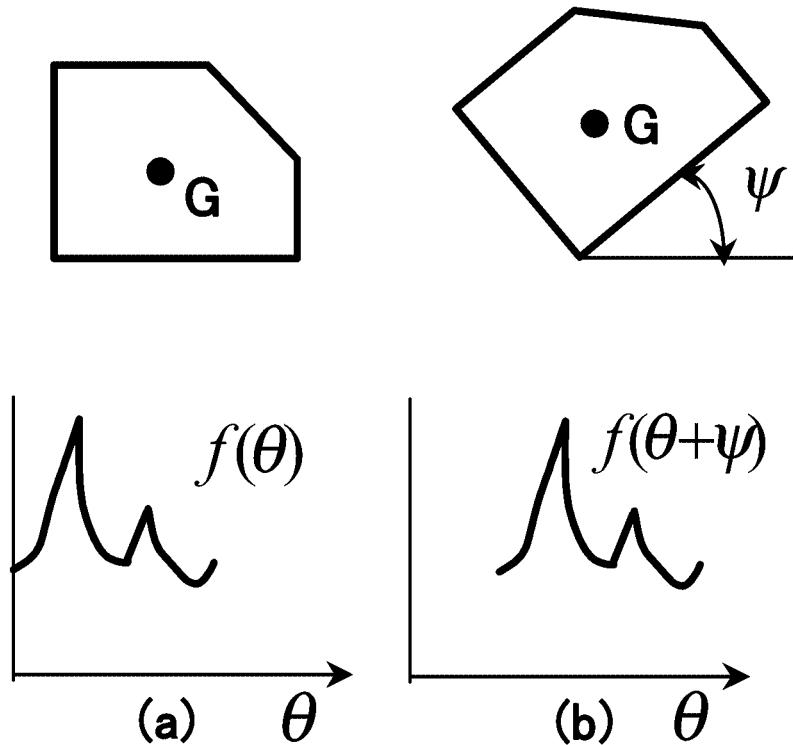


Fig. 4.4. Outline functions for different orientations

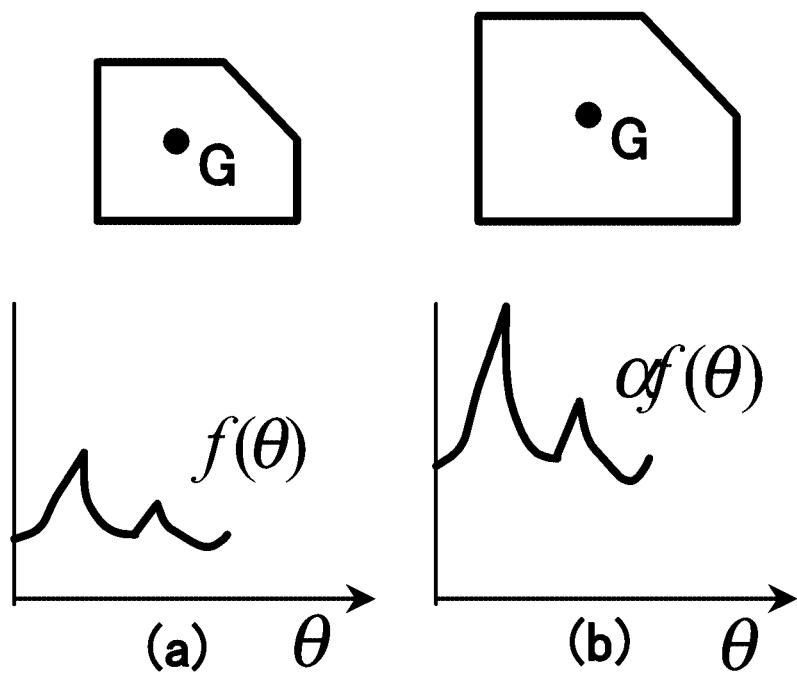


Fig. 4.5. Outline functions for different sizes

数 $\sigma(\tau)$ を計算する。

$$\sigma(\tau) = \int_0^{2\pi} \{F(\theta + \tau) - G(\theta)\}^2 d\theta. \quad (4.5)$$

二つの変形形状が相似である場合、 $F(\theta + \tau) = G(\theta)$ を満たす τ が存在する。したがって、 $\sigma(\tau) = 0$ となる τ が存在する。この τ の値が姿勢角に等しい。関数 $\sigma(\tau)$ は $\tau = \tau_{min}$ で最小値 $\sigma_{min} = \sigma(\tau_{min})$ を取るとする。この σ_{min} を二つの形状の相違度と定義する。二つの形状が相似であるときは、相違度は 0 である。二つの形状が似ているほど、相違度は小さい。

4.3 人間による伸長成形作業の分析

レオロジー物体の成形において人間は、対象物の変形や物理特性の変化に対応して、成形作業を実行することができる。そこで、本章では、人間による作業を分析することにより、レオロジー物体を成形する制御則を導出する。

本節では、人間による生地の成形作業を分析し、人間がどのように伸長成形を行っているのかを明らかにする。人間が麺棒を用いて、生地を円形に伸ばす成形作業を分析する。麺棒を転がす方向、すなわち回転自由度 R_2 の値を、人間による成形作業の実演から分析する。そのために、人間による生地の成形作業を上部からカメラで撮影し、麺棒を転がす方向と生地の形状を記録する。実験結果の一例を Fig.4.6 に示す。Fig.4.6-(a) に示す初期形状に対して、1回目の成形動作を行う。1回目の成形動作における麺棒を転がす方向を図中の矢印で示す。2回目～7回目の成形動作における麺棒を転がす方向を、それぞれ Fig.4.6-(b)～(g) に矢印で示す。この成形作業は、7回の成形動作から成り、最終的に Fig.4.6-(h) に示す変形形状が得られた。図中の矢印は、麺棒を転がす方向を表す。横方向右向きに x 軸を設定し、 x 軸と麺棒を転がす方向が成す角度を求めた結果を Table 4.1 に示す。

Table 4.1. Direction of roller in human demonstration

Forming action	Angle [deg]
1	290
2	150
3	30
4	140
5	260
6	175
7	280

Fig.4.6 に示す変形形状に対して輪郭グラフを描いた結果を Fig.4.7 に示す。さらに、Table 4.1 に示す麺棒を転がす方向を破線で示す。Fig.4.7 より、麺棒を転がす方向は輪郭グラフの極小値の近傍であることがわかる。

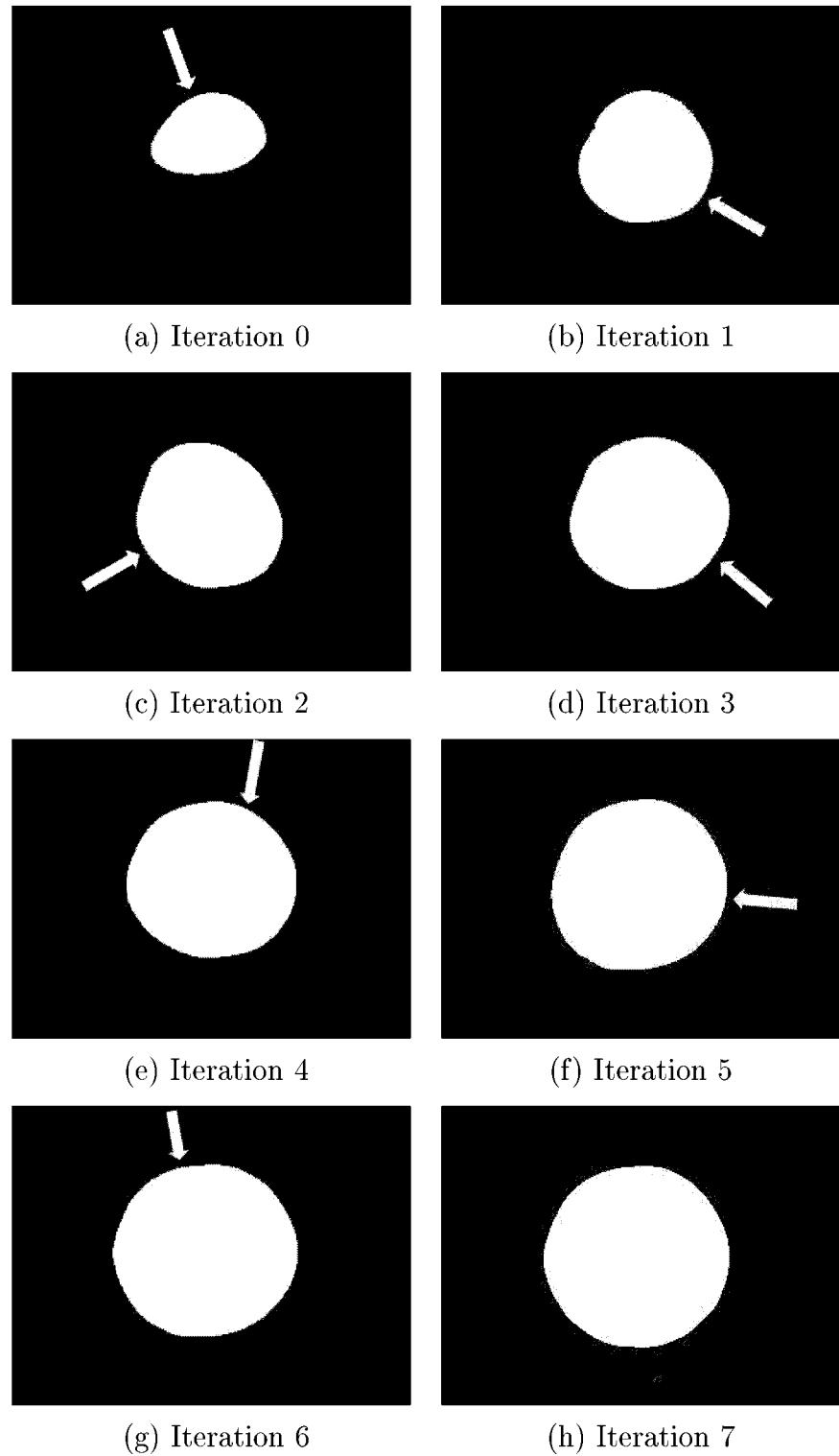


Fig. 4.6. Human demonstration of extensional forming of wheat dough

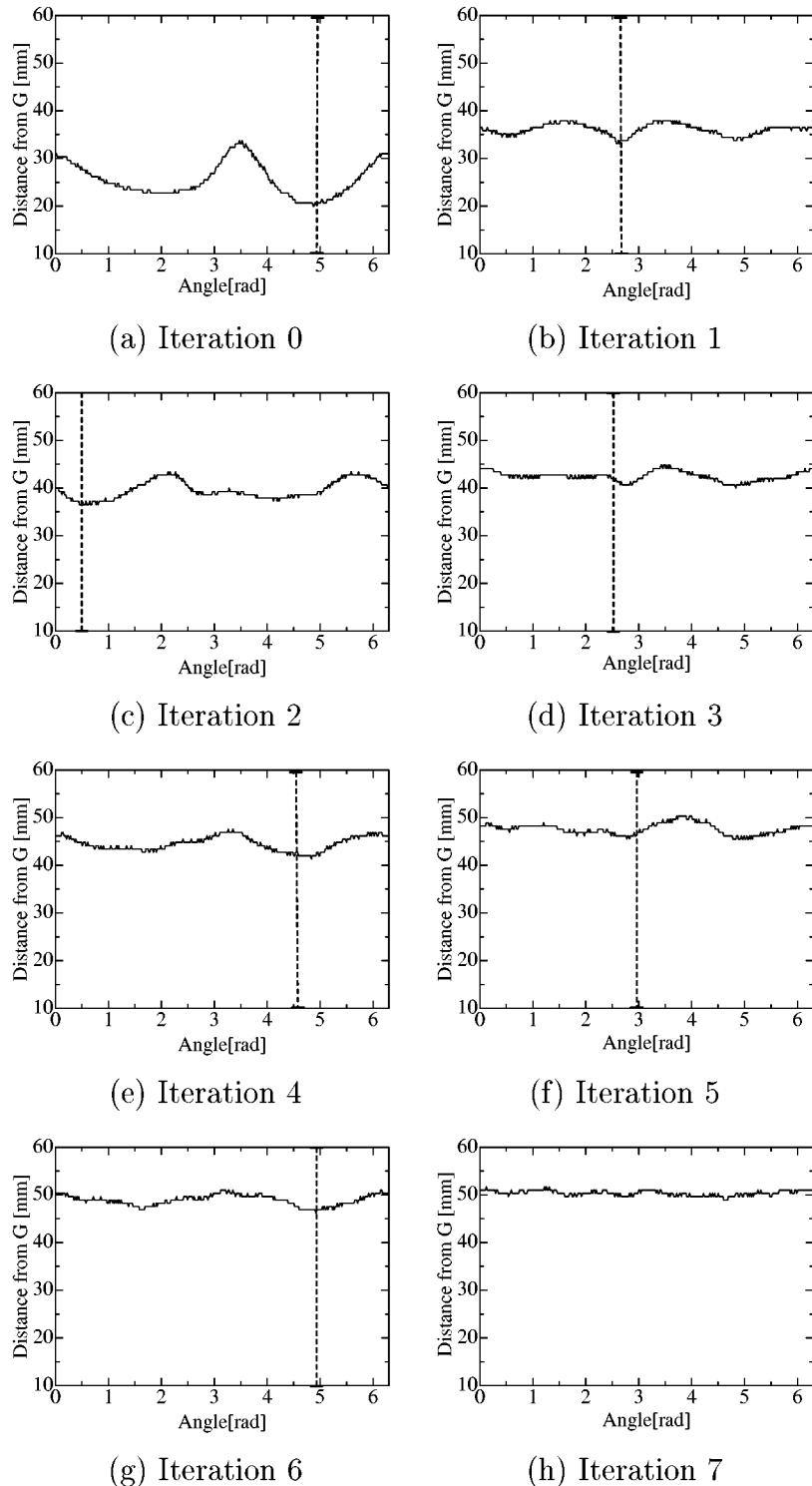


Fig. 4.7. Outline graph of deformed shapes in human demonstration

輪郭グラフの極小値は、Fig.4.8に示すように、物体の輪郭が凹んでいる部分Aに対応する。別の実演をFig.4.9に示す。Fig.4.9に示す変形形状の輪郭グラフと麵棒を転がす方向を、Fig.4.10に示す。この実演においても、麵棒を転がす方向は、輪郭グラフの極小値の近傍であることがわかる。結果、Fig.4.8に示すように、人間は凹部の反対側から麵棒を転がしていることが判明した。

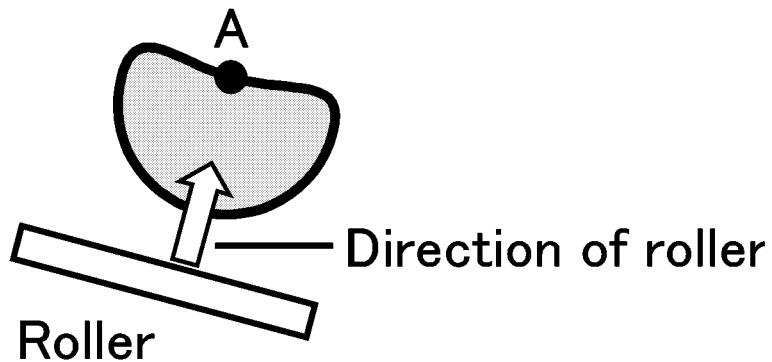


Fig. 4.8. Direction of roller in human forming

4.4 人間作業を基にしたレオロジー物体の円形成形法

本節では、3章に示した成形機を用いて伸長成形制御を行うために必要な制御方法について検討する。人間の成形作業のように、テーブル上に載せられたレオロジー物体を、ローラにより伸長成形する。前述のように、人間の成形動作は、独立な4自由度 T_1, R_2, T_2, R_3 から成り立つ。ここで3章に示す成形機では、ローラの回転 R_1 は、テーブルの並進運動 T_1 に同期させている。

次に、各自由度の制御方法を定める。前述のように、成形動作中の自由度は、 T_1 のみである。人間は、ほぼ一定の速さで麵棒を転がしていると考えられる。そこで、自由度 T_1 は速度制御を行う。これ以外の独立な自由度 R_2, T_2, R_3 の値は、成形動作中は一定であり、ある成形動作中から次の成形動作へ移るときに、それらの値を調節する。したがって、自由度 R_2, T_2, R_3 は、位置制御を行う。4.3節で述べたように、生地を円形に成形するとき、人間は、生地の凹部の反対側からローラを接近させる。生地の凹部は、輪郭グラフの極小点に相当する。したがって、人間による伸長成形作業は、次の手順で実現することができる。

STEP 1 レオロジー物体の形状を取得する。

STEP 2 並進自由度 T_1 の方向を基準線として、輪郭グラフを描く。

STEP 3 Fig.4.11-(a)に示すように、輪郭グラフの値が最小となる角度 α を求める。

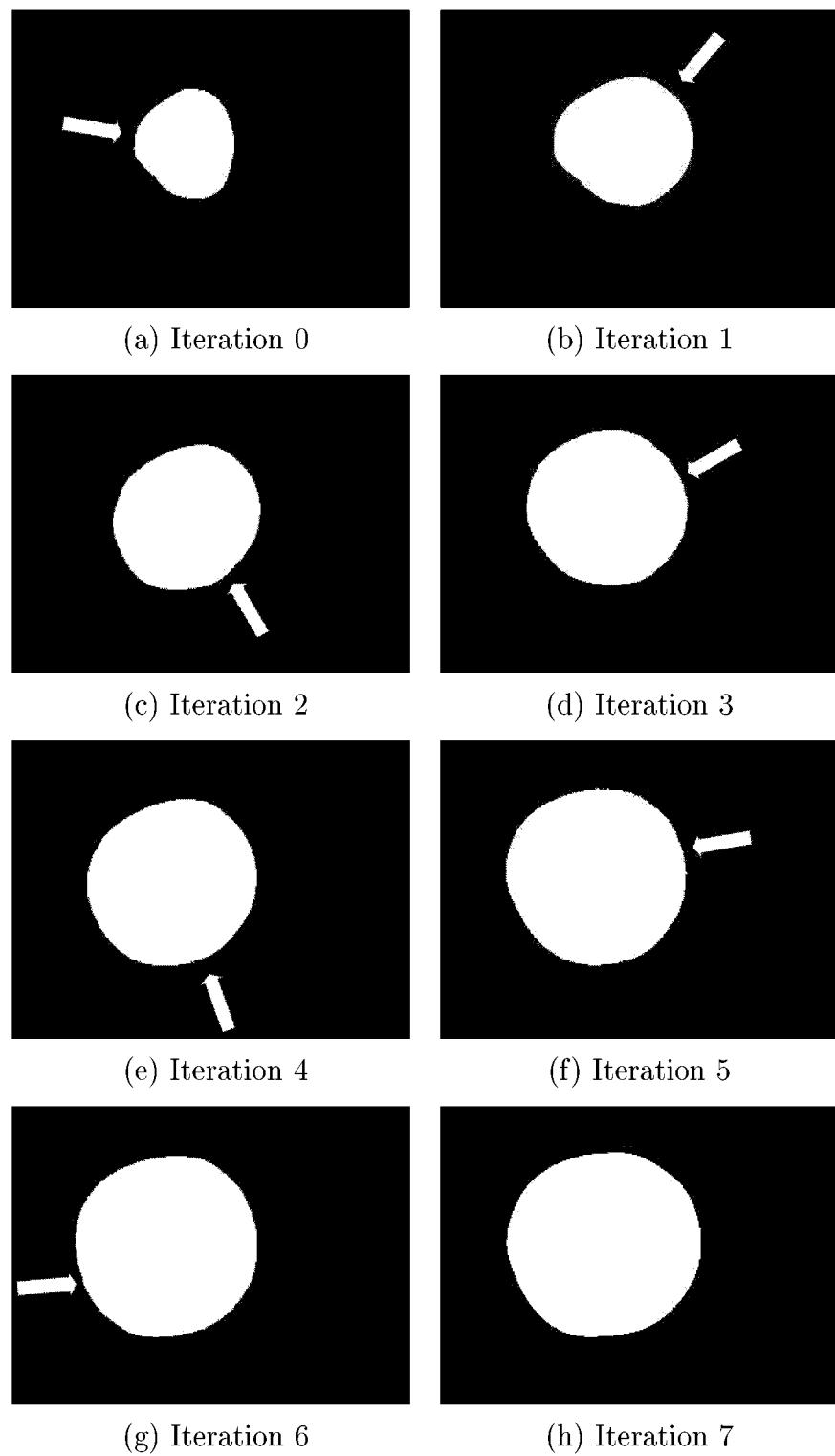


Fig. 4.9. Another human demonstration of extensional forming of wheat dough

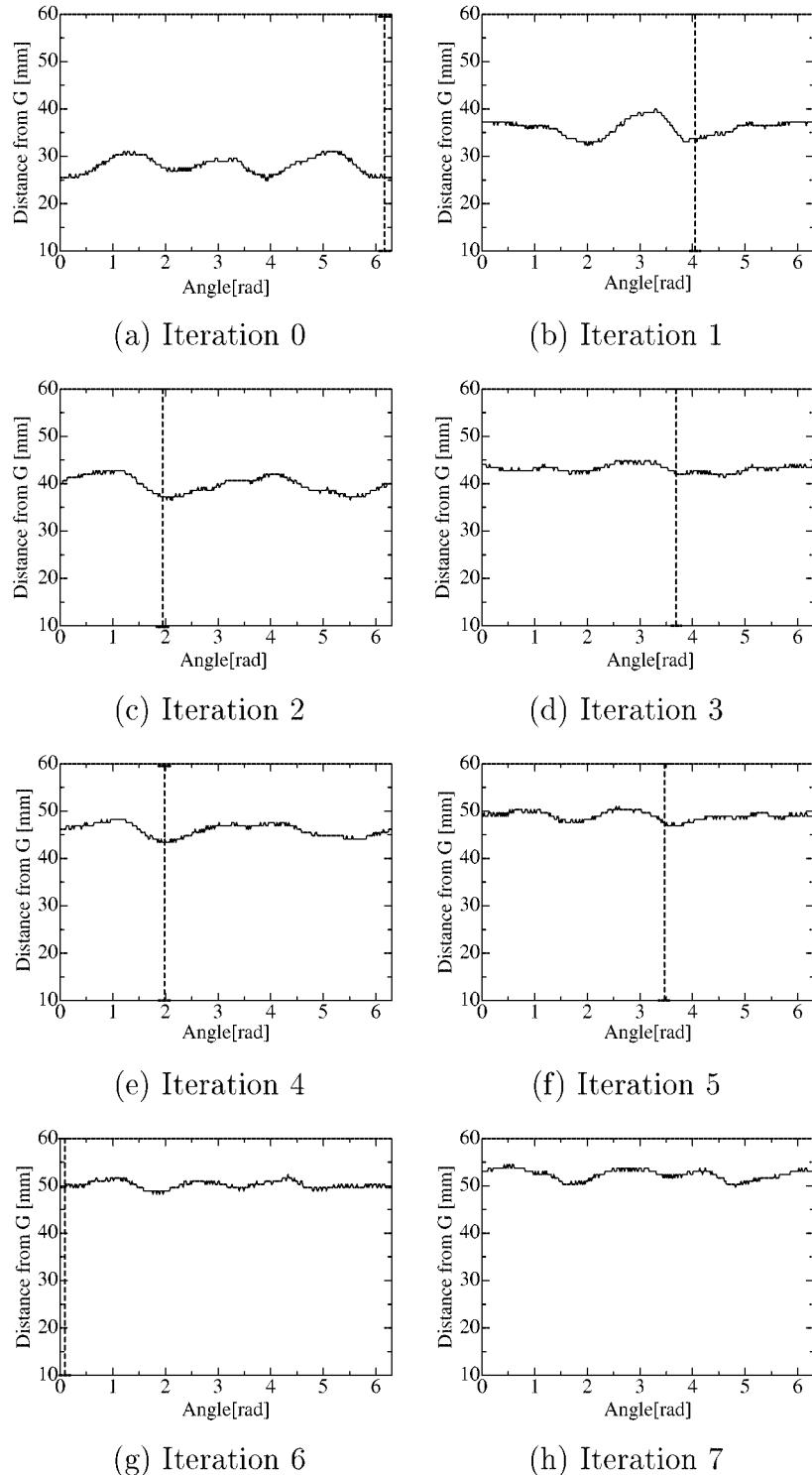


Fig. 4.10. Outline graph of deformed shapes in another human demonstration

STEP 4 Fig.4.11-(b)に示すように、物体を角度 $-\alpha$ 回転させる。

STEP 5 伸長成形動作を行う。

以上の動作を繰り返すことにより、レオロジー物体の伸長成形作業を実行する。

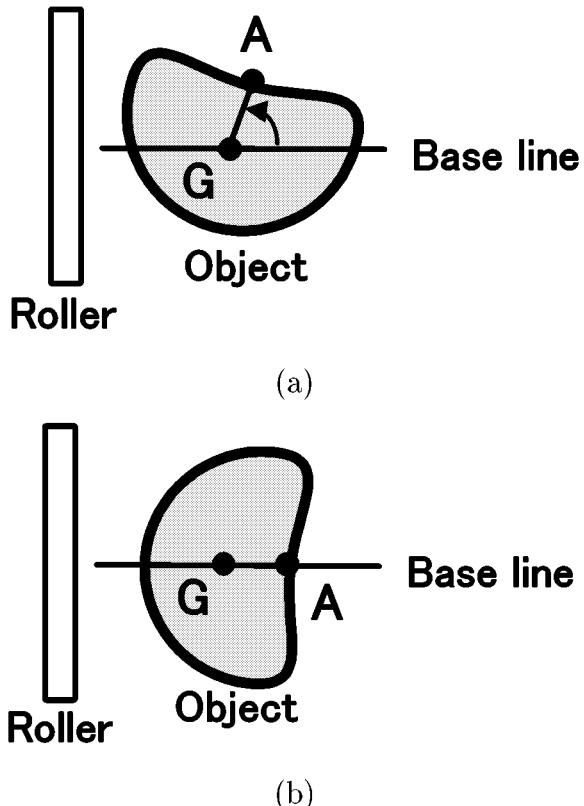


Fig. 4.11. Determination of roller direction using outline graph

4.5 伸長成形実験

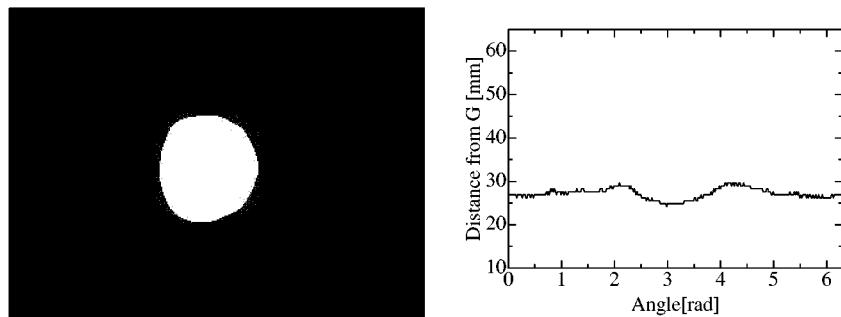
4.5.1 提案制御則による実験結果

本節では、前節で述べたアルゴリズムを用い伸長成形実験を行う。実験で使用した生地は小麦粉と水を重量比約2:1で混ぜたものである。重量は約66gである。また、ミキサーでこねた直後の状況を想定し、初期形状は適当に与える。初期形状を4.4節で示した制御則に従って成形する。その結果をFig.4.12に示す。Fig.4.12-(a)に初期形状とその輪郭グラフを示す。成形作業は、10個の成形動作から成っており、1回目～10回目の成形動作後の変形形状を、Fig.4.12-(b)～(k)に示す。最終的に、Fig.4.12-(k)に示す変形形状が得られた。

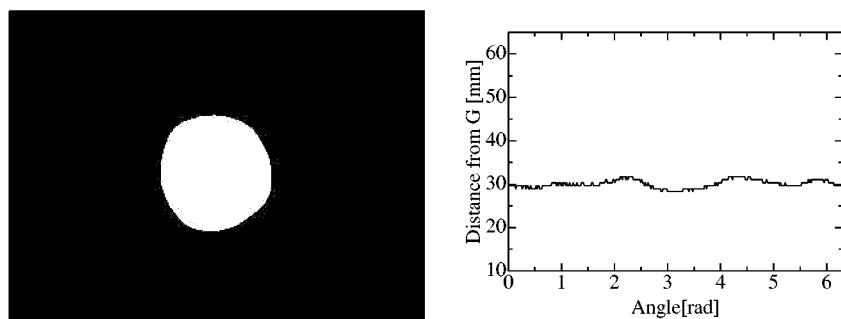
Table 4.2. Motion parameters in automatic forming

Forming action	Angle [deg]	Height [mm]
1	263	20
2	276	15
3	113	12
4	125	10
5	346	8
6	124	6
7	354	4.7
8	133	3.7
9	9	2.9
10	110	2.3

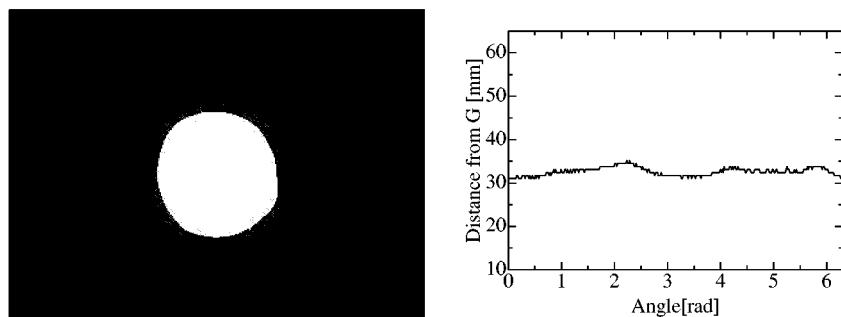
1回目～10回目の成形動作における、ローラを転がす方向とローラの高さを Table 4.2に示す。4.4節で提案したように、ローラを転がす方向は、輪郭グラフの最小値から計算する。ローラの高さは実験的に最も円形に近づきやすい値を設定した。輪郭グラフは、形状が円に近づくに従って、一定となる。Fig.4.12に示すように、提案した成形動作を繰り返すことにより、変形形状が円形に近づいていることがわかる。



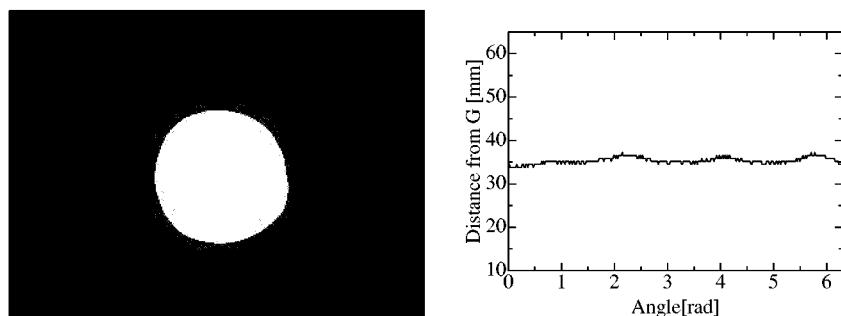
(a) Iteration 0



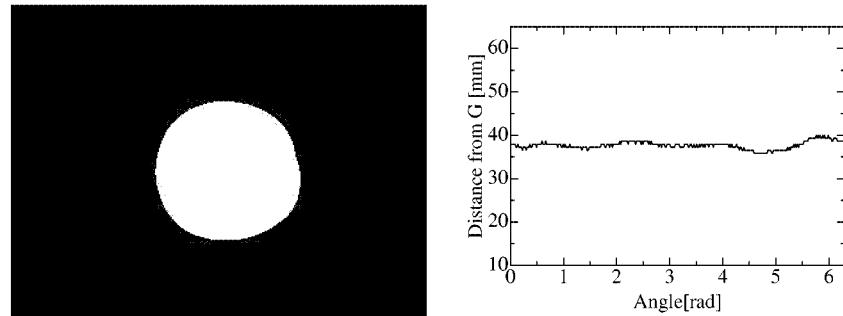
(b) Iteration 1



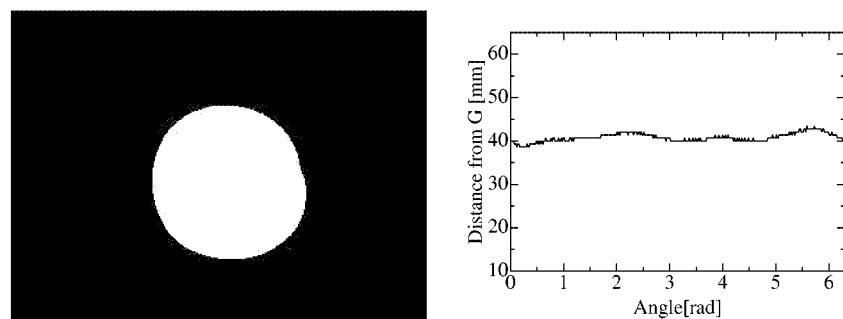
(c) Iteration 2



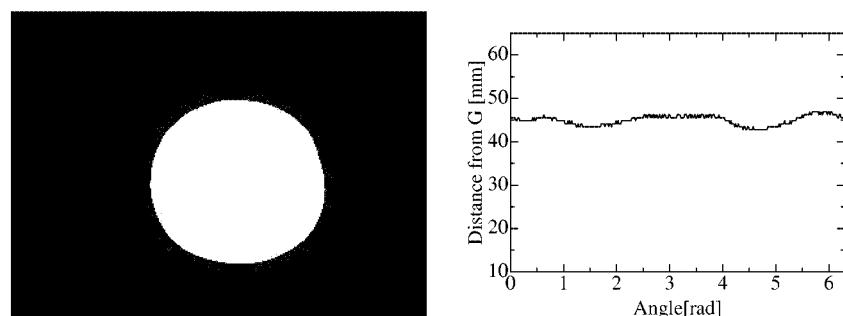
(d) Iteration 3



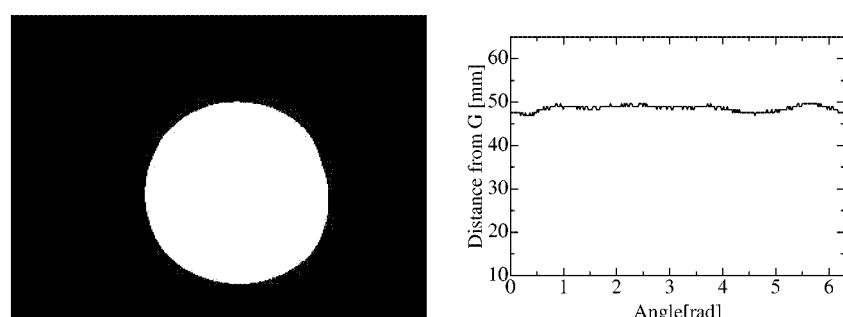
(e) Iteration 4



(f) Iteration 5



(g) Iteration 6



(h) Iteration 7

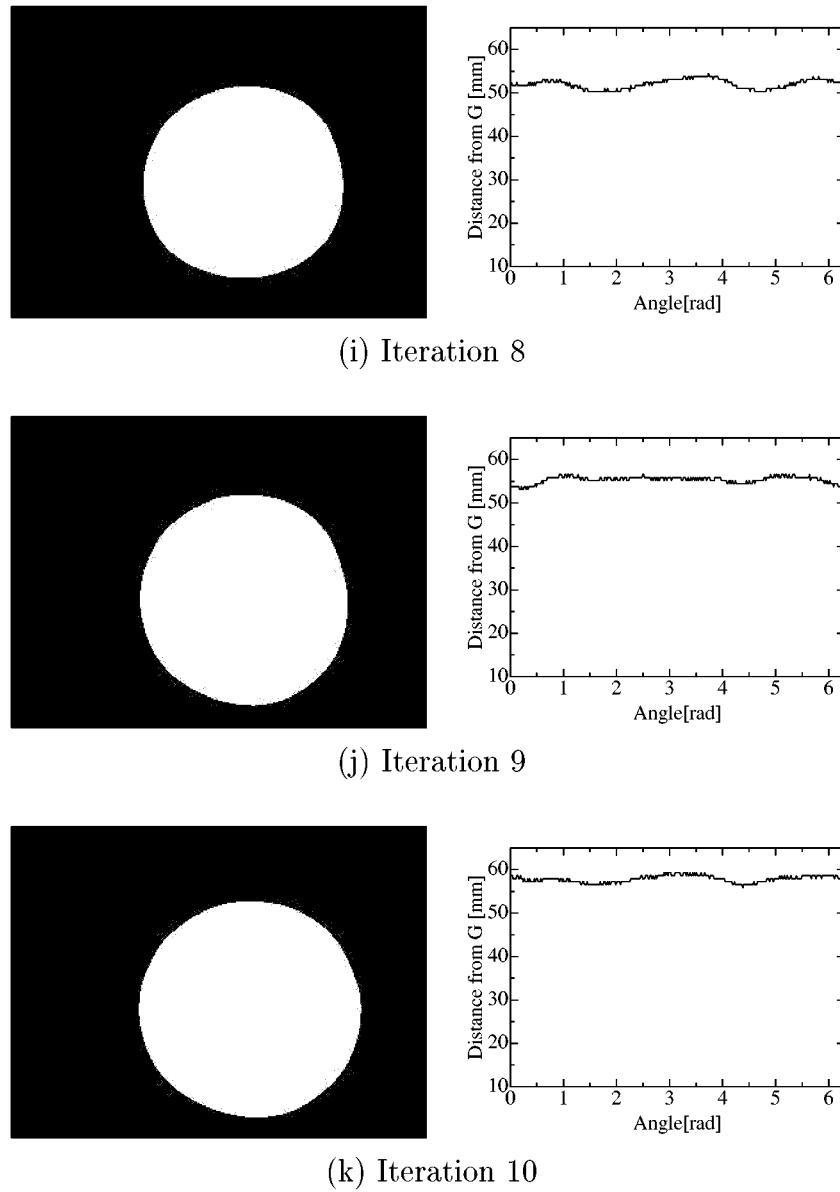


Fig. 4.12. Example of automatic extensional forming

変形形状が目標形状に近づいていることを定量的に評価するために、相違度を用いる。Fig.4.12-(a)～(k)に示す変形形状と円形との相違度を求めた結果を、Fig.4.13に示す。相違度の値はほぼ単調に減少しており、円形への成形が達成されていることがわかる。

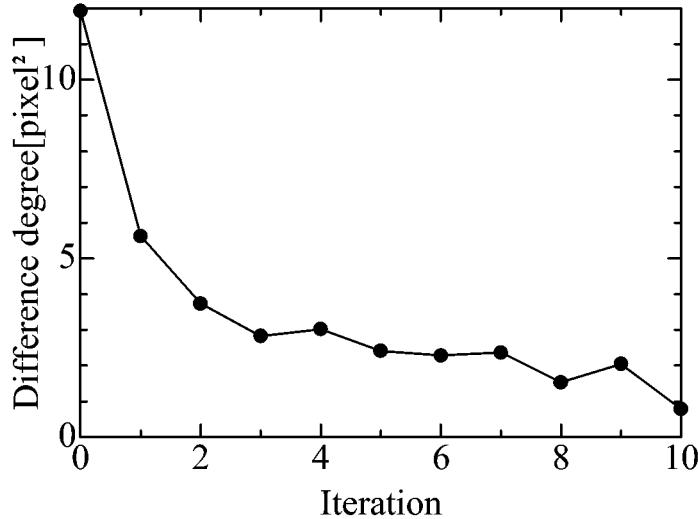
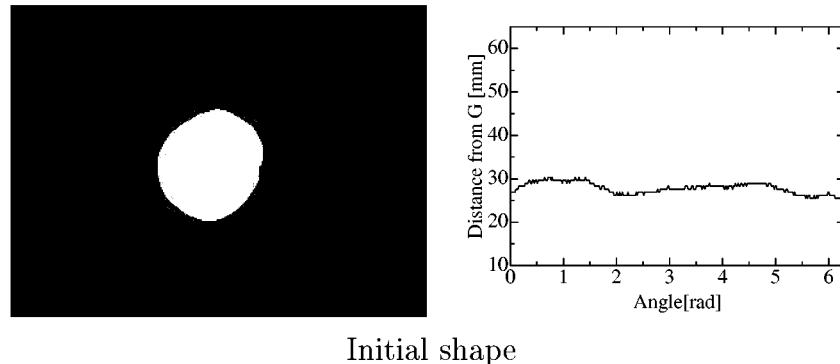


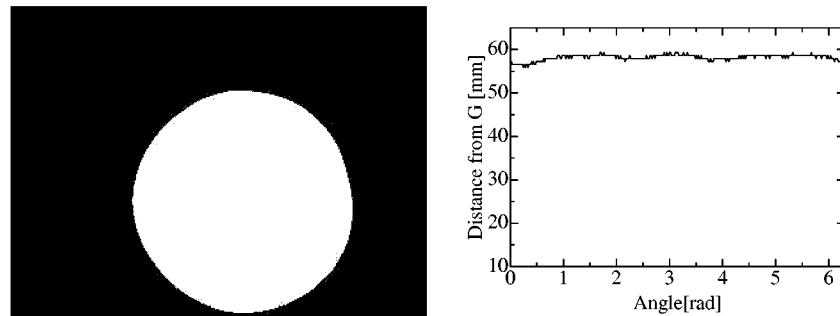
Fig. 4.13. Difference degree during automatic extensional forming

異なる初期形状に対して、提案した手法を適用した結果を、Fig.4.14に示す。上側に初期形状とその輪郭グラフ、下側に最終形状とその輪郭グラフを示す。Fig.4.14-(a)～(c)に示すように、いずれの初期形状に対しても、ほぼ円形に成形されていることがわかる。

次に、ローラを転がす方向を決定するために必要な計算時間を評価する。ローラを転がす方向の決定においては、CCDカメラから取得した変形形状に対して、1)重心位置の計算、2)輪郭グラフの生成、3)輪郭グラフの最小点の抽出を行う必要がある。Pentium II 350MHzのPCで計算を行ったところ、それぞれ、0.97[msec], 2.24[msec], 11.35[msec]の時間要した。従って、ローラを転がす方向の決定においては、約14.56[msec]が必要である。また、Fig.4.12に示す成形作業においては、約260[sec]を要した。各成形動作に対して、平均的に約26[sec]必要である。

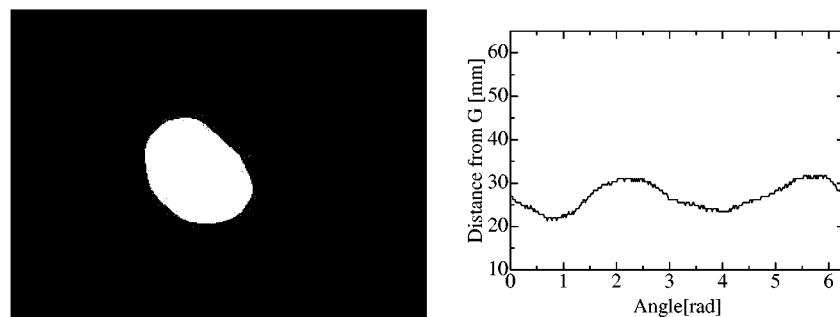


Initial shape

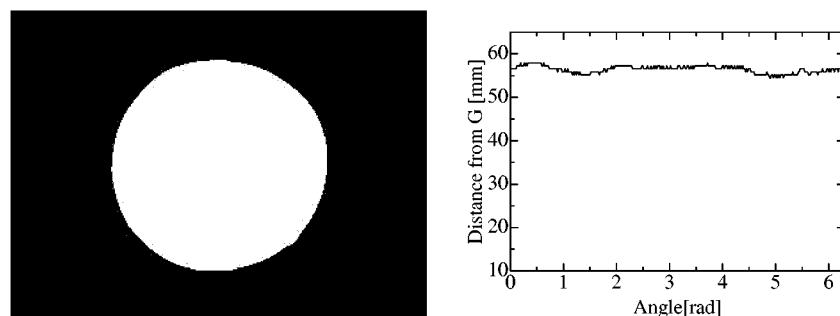


Final shape

(a) Case 1



Initial shape



Final shape

(b) Case 2

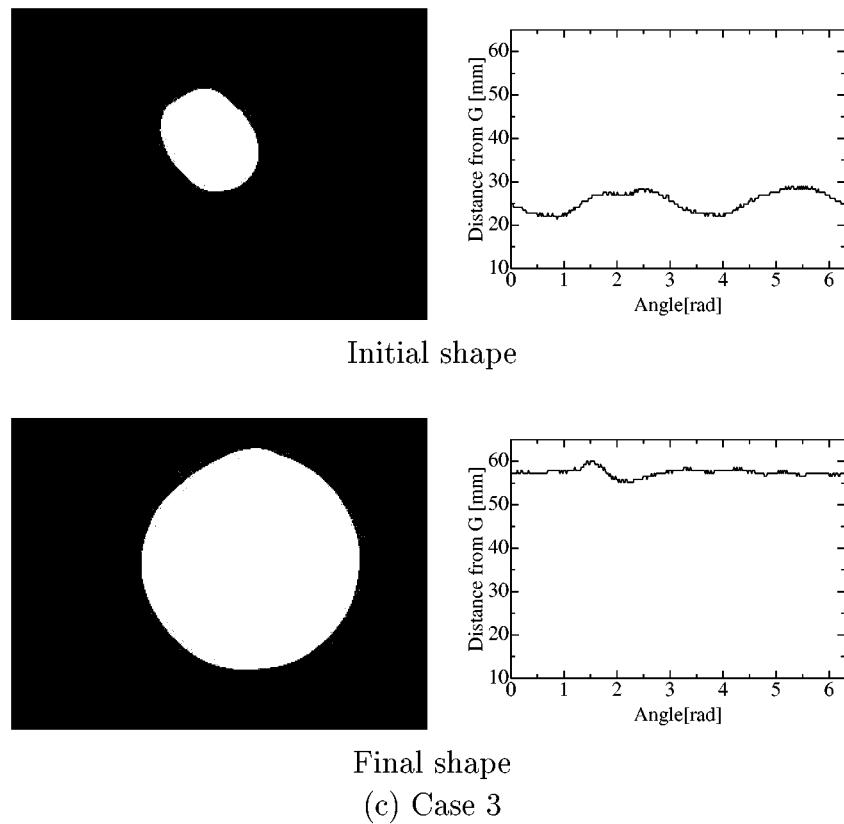


Fig. 4.14. Automatic extensional forming corresponding to different initial shapes

4.5.2 提案制御則と他の制御則との比較

本節では、提案制御則と他の制御則とを比較する。提案制御則においては、変形形状に応じてローラを転がす方向を適応的に変化させる。他の制御則として、ローラを転がす方向を一定の角度で変化させる手法を考えられる。例えば、1回目の成形動作では $0[\text{rad}]$ の方向からローラを転がし、2回目では $\pi/2[\text{rad}]$ の方向から、3回目は $\pi[\text{rad}]$ の方向からローラを転がす。すなわち、ローラを転がす方向の角度を各成形動作に対して、 $\pi/2[\text{rad}]$ づつ増加させる手法が考えられる。

本節では、提案制御則と、(1)ローラを転がす方向の角度を $\pi/2[\text{rad}]$ づつ増加させる手法、(2)ローラを転がす方向の角度を $\pi[\text{rad}]$ づつ増加させる手法を比較する。実験条件を一定にするために、型を使用して初期形状を等しくする。初期形状をFig.4.15-(a)に示す。初期形状の高さは、一定値3cmである。提案制御則により成形した結果をFig.4.15-(b)に示す。アルゴリズム(1)により成形した結果を、Fig.4.15-(c)に示す。また、アルゴリズム(2)により成形した結果を、Fig.4.15-(d)に示す。ローラを転がす方向の角度を $\pi/2[\text{rad}]$ あるいは $\pi[\text{rad}]$ づつ増加させる手法では、図に示すように円形に成形させることができない。一方、提案する手法では、円形に成形することが可能である。各手法における相違度の変化をFig.4.16に示す。図に示すように、提案制御則では、相違度が0に近づく。すなわち成形形状が円に近づく。一方、ローラを転がす方向を $\pi[\text{rad}]$ づつ増加させる手法では、相違度はある値から減少しない。また、ローラを転がす方向を $\pi/2[\text{rad}]$ づつ増加させる手法では、提案制御則ほど相違度が減少しない。したがって、提案する手法は、ローラを転がす方向の角度を一定の割合で変化させる手法より優れていることがわかる。

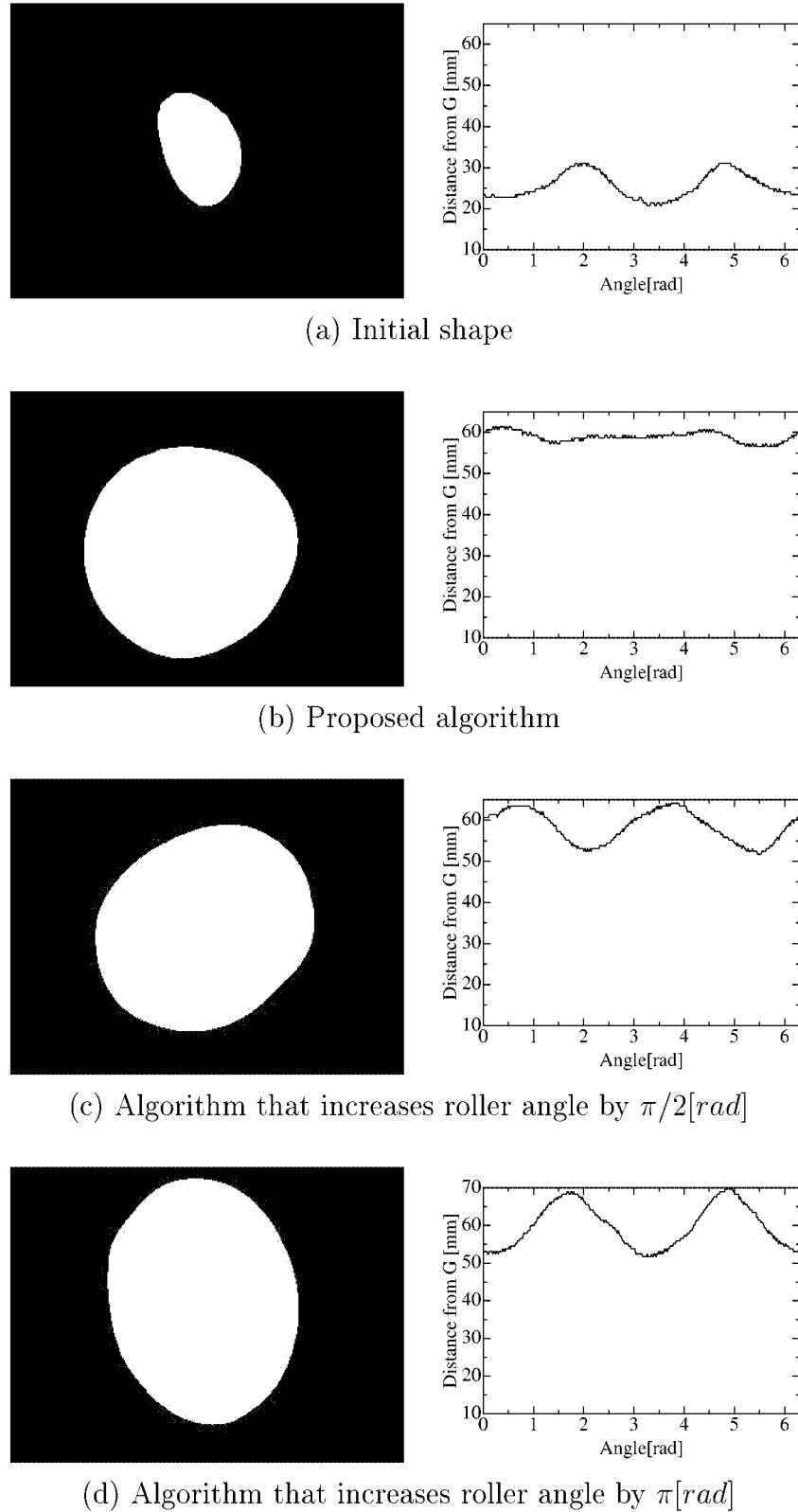


Fig. 4.15. Comparison between proposed algorithm and other algorithms

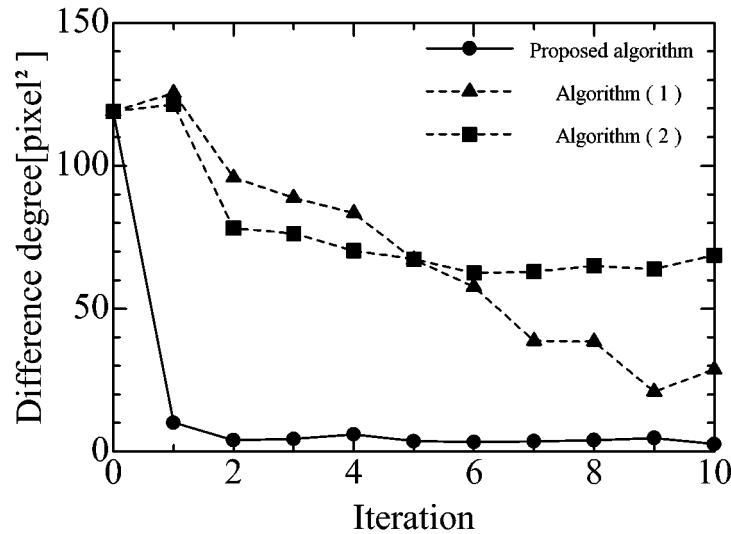


Fig. 4.16. Difference degree comparison during extensional forming

4.6 結言

本章では、人の実演による成形から伸長成形制御則を構築し、円形への伸長成形を実現した。まず、人間が行っている伸長成形作業を分析した。その結果、人間はレオロジー物体の凹部と反対側の方向からローラを転がして円形に近づけようとしていることがわかった。次に、3章で開発した機械システムに、人間による伸長成形に基く成形アルゴリズムを実装した。その結果、レオロジー物体を円形に伸長成形することが可能であることを示した。さらに、ローラを転がす方向を一定の割合で変化させる手法と比較し、提案アルゴリズムの有効性を示した。ローラを転がす方向をレオロジー物体の形状から決定した。一方、ローラの高さは、あらかじめ定めた順序で与えている。ローラの高さを適応的に決定する手法は、今後の課題である。さらに、ローラの傾きやテーブルの並進移動速度の決定も、今後の課題である。

第5章

レオロジー物体の成形過程モデリング

5.1 緒言

4章では、円形に成形するという条件において、人間の成形作業の実演に基づいた成形制御則を提案し、円形に成形できることを示した。しかしながら円形以外の形状に対する成形は制御則には含まれていない。円形以外の形状に成形するときは、再び人による成形の実演を行う必要がある。さらに、人の実演による成形過程の解析を行い、成形制御則を導き出さなくてはならない。もし、凹凸のある形状を目標形状とした場合、円形のように明確な制御則を導き出せるとは限らない。しかしながら、任意の成形に対して、あらかじめ成形後の形状を予測することができれば、成形形状を目標の形状に最も近づける成形を選択することができる。そのためには、成形過程モデルが必要となる。そこで本章では、3章で開発した成形機による成形過程を解析し、レオロジー物体の成形過程モデルを提案する。まず、5.3節では、レオロジー物体の成形過程を解析し、面積の推移を分析する。次に、5.4節では、成形形状の推定法を提案する。5.5節では、実際の変形データから定数倍伸長部と余剰伸長部を推定する。

5.2 レオロジー物体の変形形状表現

レオロジー物体は、3章で開発した成形機を用いて成形される。またCCDカメラから計測されたレオロジー物体の二次元形状は、4.2.1節に示す輪郭関数によって表現される。この輪郭関数より、形状の面積を計算することができる。Fig. 5.1における灰色部の面積は、角度 $d\theta$ が微小であるならば、 $f^2(\theta) \cdot d\theta/2$ で得られる。よって形状全体の面積は、

$$A = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} f^2(\theta) d\theta \quad (5.1)$$

で求められる。

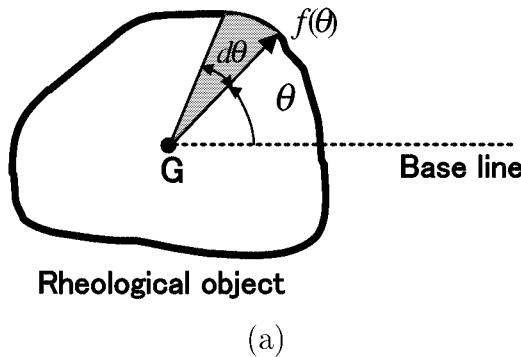


Fig. 5.1. Area of outline function

5.3 成形過程における面積推移の分析

本節では、レオロジー物体の成形過程を解析し、面積の推移を分析する。ローラ高さとテーブル回転角を設定し、それによって行う一回の成形を、成形動作と定義する。また、一つの初期形状に対して、一回または複数の成形を行った場合、一連の変形形状と成形動作を、成形過程と定義する。

実験におけるレオロジー物体として、小麦粉と水を3:1の重量比で混ぜ合わせた生地を用いる。ローラの傾きを $0[\text{rad}]$ 、並進速度を $100[\text{mm/sec}]$ とする。まず、テーブル回転角度 ψ とローラの高さ h の違いによる成形過程を解析する。Fig. 5.2に、単一の成形動作を持つ成形過程を複数示す。初期形状が長方形の物体に対して、3種類のテーブル回転角度、4種類のローラ高さを設定し成形を行った。白色は初期形状、灰色は成形後の変形形状を示す。画像の水平方向右向きを、角度 ψ の基準線とする。Fig. 5.2-(a), (d), (g), (j)においては $\psi = 0[\text{rad}]$ 、Fig. 5.2-(b), (e), (h), (k)においては $\psi = \pi/4[\text{rad}]$ 、Fig. 5.2-(c), (f), (i), (l)においては $\psi = \pi/2[\text{rad}]$ である。また、Fig. 5.2-(a), (b), (c)においては $h = 12[\text{mm}]$ 、Fig. 5.2-(d), (e), (f)においては $h = 10[\text{mm}]$ 、Fig. 5.2-(g), (h), (i)においては $h = 8[\text{mm}]$ 、Fig. 5.2-(j), (k), (l)においては、 $h = 6[\text{mm}]$ である。なお、初期形状における物体の高さは $13[\text{mm}]$ である。

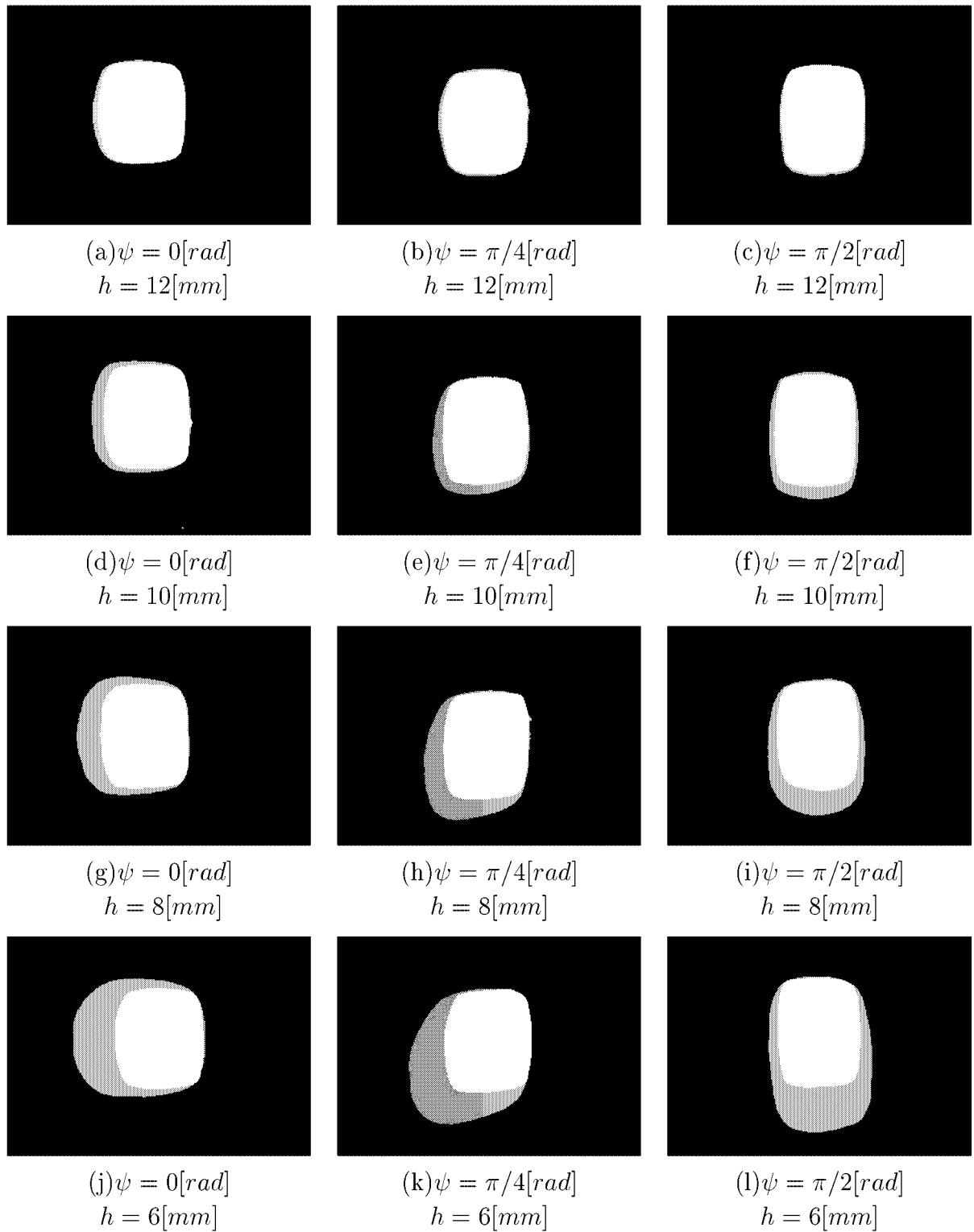


Fig. 5.2. Formed shapes

Fig. 5.2において、テーブル回転角 ψ ごとの変形形状を見ると、いずれも $\psi + \pi[\text{rad}]$ の方向に、最も伸びていることがわかる。また、ローラの高さ h が低くなるほど、成形後の面積は増加する。次に、成形前の面積を A_{init} 、成形後の面積を A_{def} と定義し、面積比 $\alpha = A_{def}/A_{init}$ と、 ψ 、 h の関係を調べる。Fig. 5.3に、テーブルの回転角度 ψ およびローラの高さ h に対する、面積比を示す。白丸は $\psi = 0[\text{rad}]$ に対する面積比を示す。黒丸は $\psi = \pi/4[\text{rad}]$ に対する面積比、三角は $\psi = \pi/2[\text{rad}]$ での面積比を示す。Fig. 5.2から、1回の成形動作を持つ成形過程において、物体の初期形状における体積と成形ローラ高さ h が等しければ、テーブル回転角 ψ によらず面積比 α は等しくなることがわかる。複数回の成形を試みたところ、同じ傾向が見られた。以上のことから、成形前の物体の体積、ローラ高さ h が等しければ、面積比はテーブルの回転角度 ψ に依存しないことがわかる。

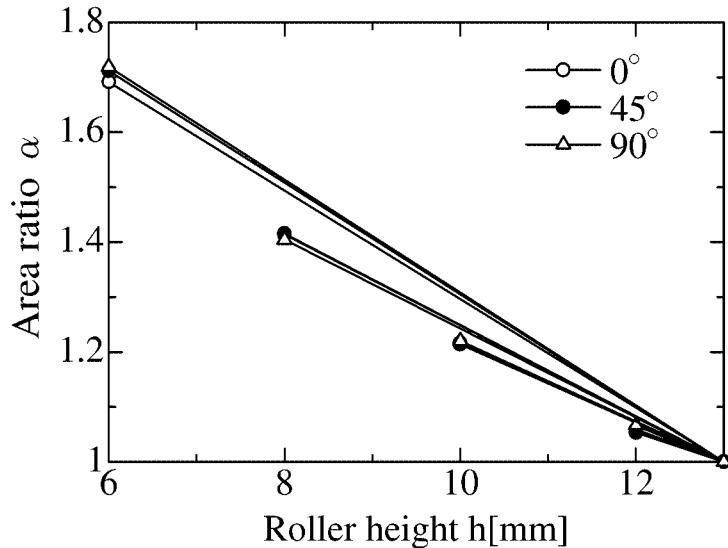
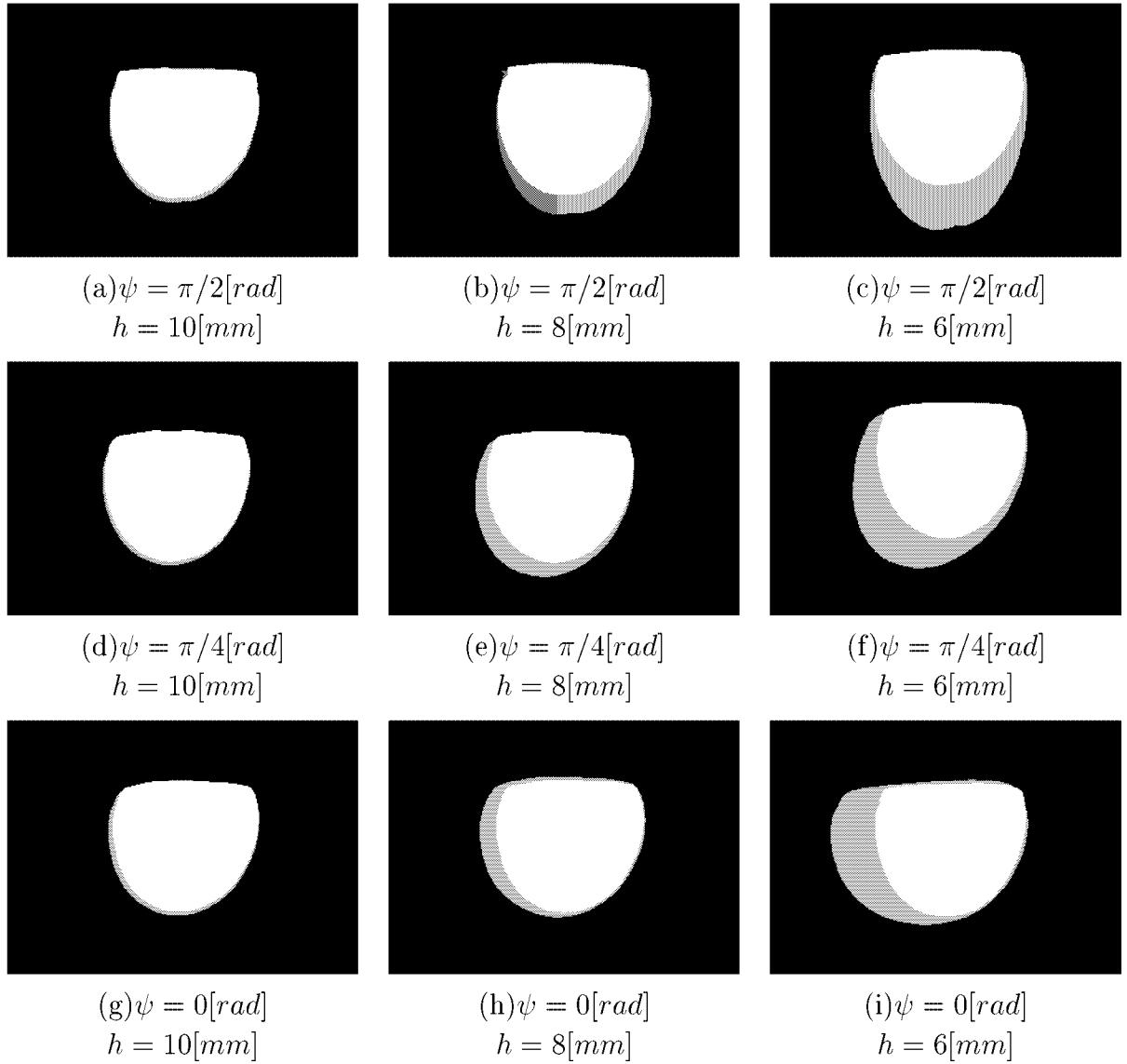


Fig. 5.3. Area ratio corresponding to different forming parameters

その他の形状に関しても、同様の実験を行い、解析した。Fig. 5.4, Fig. 5.6に一例を示す。Fig. 5.4-(a), (b), (c)においては $\psi = \pi/2[\text{rad}]$ 、Fig. 5.4-(d), (e), (f)においては $\psi = \pi/4[\text{rad}]$ 、Fig. 5.4-(g), (h), (i)においては $\psi = 0[\text{rad}]$ 、Fig. 5.4-(j), (k), (l)においては $\psi = -\pi/4[\text{rad}]$ 、Fig. 5.4-(m), (n), (o)においては $\psi = -\pi/2[\text{rad}]$ である。Fig. 5.4-(a), (d), (g), (j), (m)においては $h = 10[\text{mm}]$ 、Fig. 5.4-(b), (e), (h), (k), (n)においては $h = 8[\text{mm}]$ 、Fig. 5.4-(c), (f), (i), (l), (o)においては $h = 6[\text{mm}]$ である。なお、初期形状における物体の高さは11[mm]である。Fig. 5.5に面積比 α のグラフを示す。

また、Fig. 5.6-(a), (b), (c)においては $\psi = \pi/2[\text{rad}]$ 、Fig. 5.6-(d), (e), (f)においては $\psi = \pi/4[\text{rad}]$ 、Fig. 5.6-(g), (h), (i)においては $\psi = 0[\text{rad}]$ 、Fig. 5.6-(j), (k), (l)においては $\psi = -\pi/4[\text{rad}]$ 、Fig. 5.6-(m), (n), (o)においては $\psi = -\pi/2[\text{rad}]$ である。Fig. 5.6-(a), (d), (g), (j), (m)においては $h = 10[\text{mm}]$ 、Fig. 5.6-(b), (e), (h), (k), (n)においては $h = 8[\text{mm}]$ 、Fig. 5.6-(c), (f), (i), (l), (o)においては $h = 6[\text{mm}]$ である。なお、初期形状における物体の高さは12[mm]である。Fig. 5.7に面積比のグラフを示す。こ

これらの形状に対しても、初期形状の高さと面積、ローラ高さ h が等しければ、面積比 α はテーブルの回転角度 ψ に依存しないことがわかる。



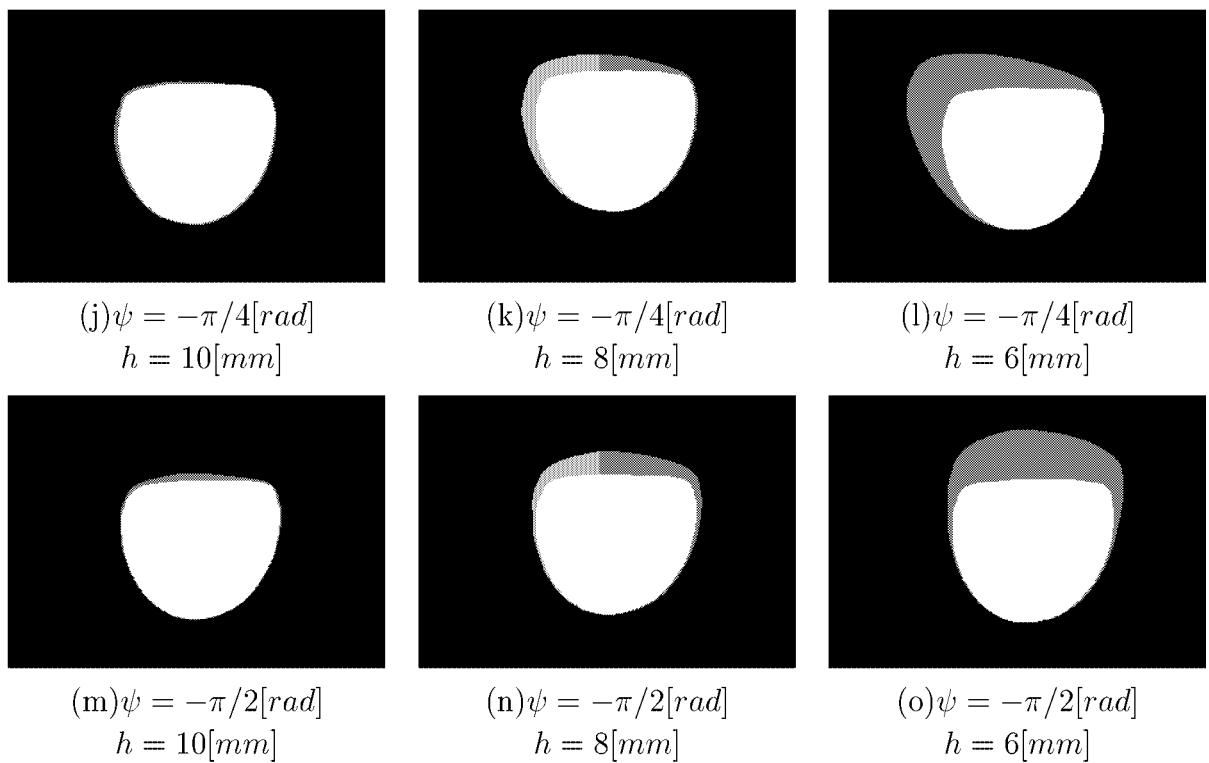


Fig. 5.4. Formed shapes of semicircle object

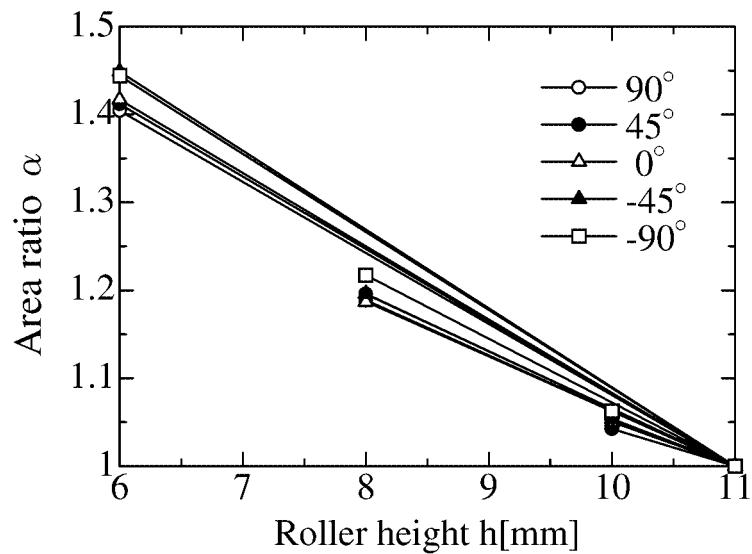
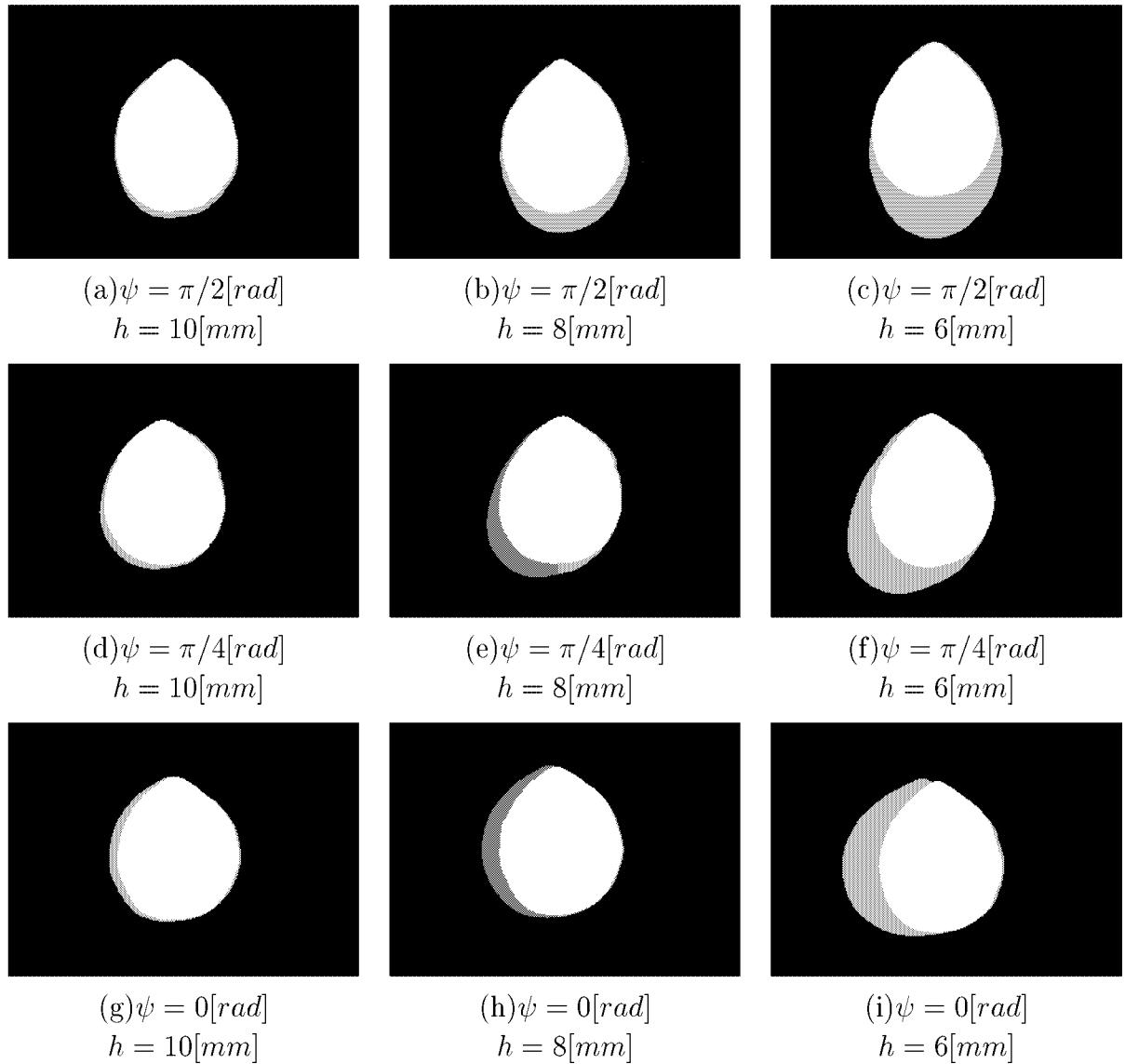


Fig. 5.5. Area ratio corresponding to different forming parameters (semicircle object)



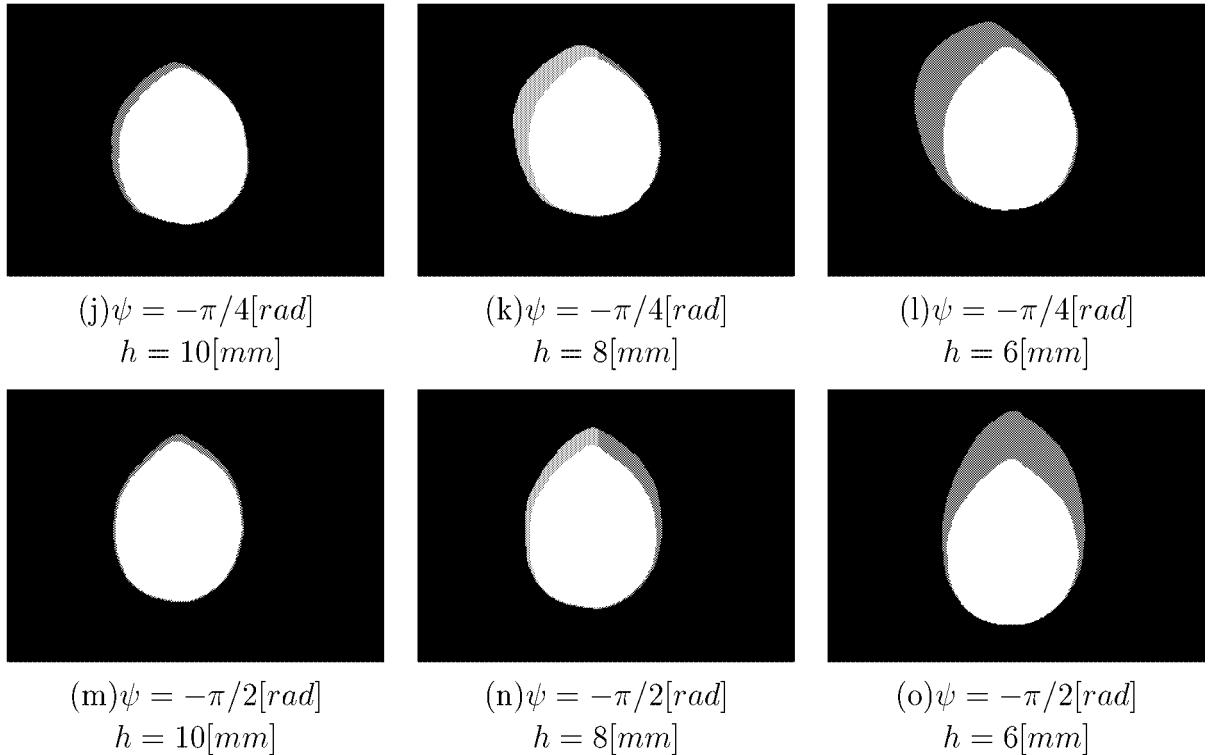


Fig. 5.6. Formed shapes of teardrop object

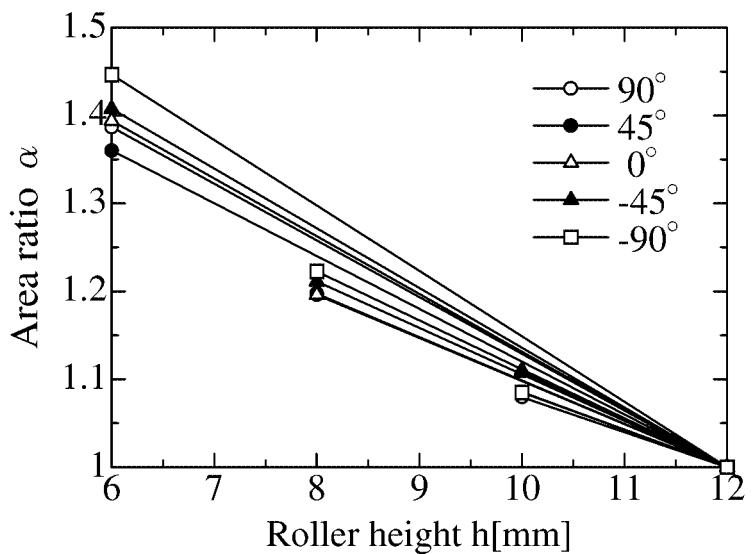


Fig. 5.7. Area ratio corresponding to different forming parameters(teardrop object)

次に、面積、高さが同じで形状の異なる物体に対して、同じ成形動作で成形した場合の面積比 α を調べる。Fig. 5.8-(a)～(g)に7つの初期形状を示す。物体の面積はほぼ等しく、物体の初期高さは16[mm]である。この物体をローラ高さ $h = 13[mm]$ で成形したときの面積比 α をFig. 5.9に示す。図から、物体の初期面積と初期高さ、ローラ高さ h が等しければ、形状によらず面積比 α はほぼ等しくなることがわかる。

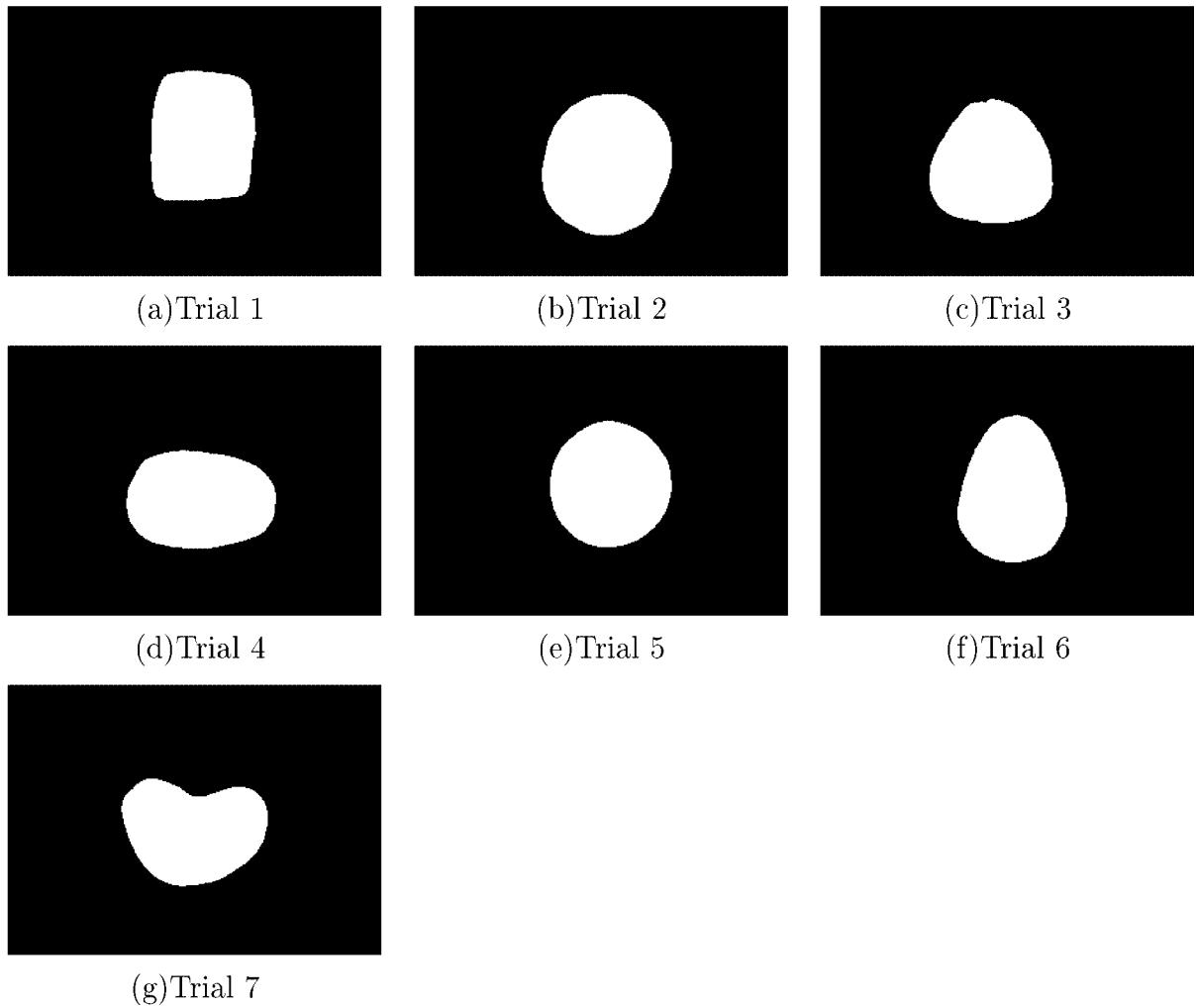


Fig. 5.8. Initial shapes with constant area and height

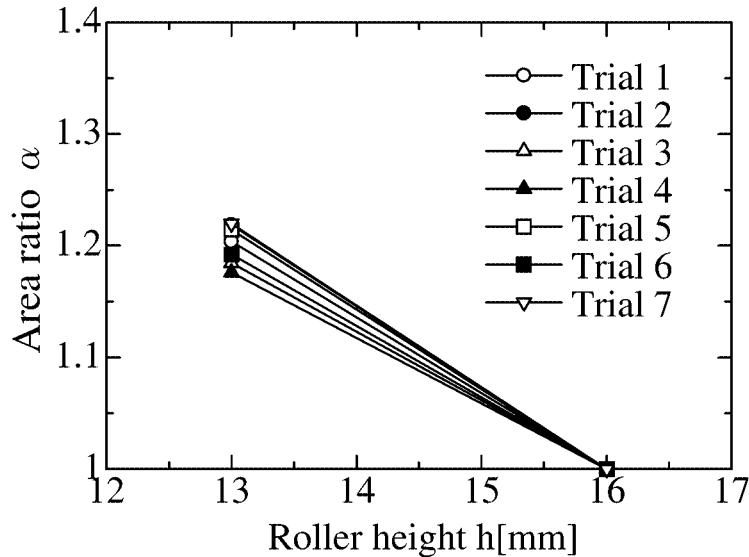


Fig. 5.9. Area ratio corresponding to different initial shapes

次に、複数回の成形動作を持つ成形過程における面積比 α の推移を調査する。物体の初期高さは 16[mm] である。ローラ高さ h の値を、順次 13[mm], 11[mm], 9[mm], 8[mm], 7[mm], 6[mm] と設定し、6 回の成形動作を持つ成形過程を行う。Fig. 5.8-(a)～(g) に示す初期形状に対して、一連の成形動作を実行する。テーブル回転角 ψ は、無作為に適当な値を用いる。Fig. 5.10-(a)～(g) は、Fig. 5.8-(a) に示す初期形状に対する、各成形動作後の変形形状を示す。初期形状の面積に対する各変形形状の面積の比を、順次求める。このような面積比の推移を、Fig. 5.11 に示す。これより、1 回の成形動作を持つ成形過程と同様に、複数回の成形動作を持つ成形過程においても、初期形状の高さと面積、ローラ高さ h の推移が等しければ、面積比の推移はテーブルの回転角度 ψ に依存しないことがわかる。

以上のことから、面積比 α は、初期形状の面積、初期形状の高さ、ローラ高さの推移に依存し、物体の形状、テーブルの回転角には依存しない関数であると結論できる。

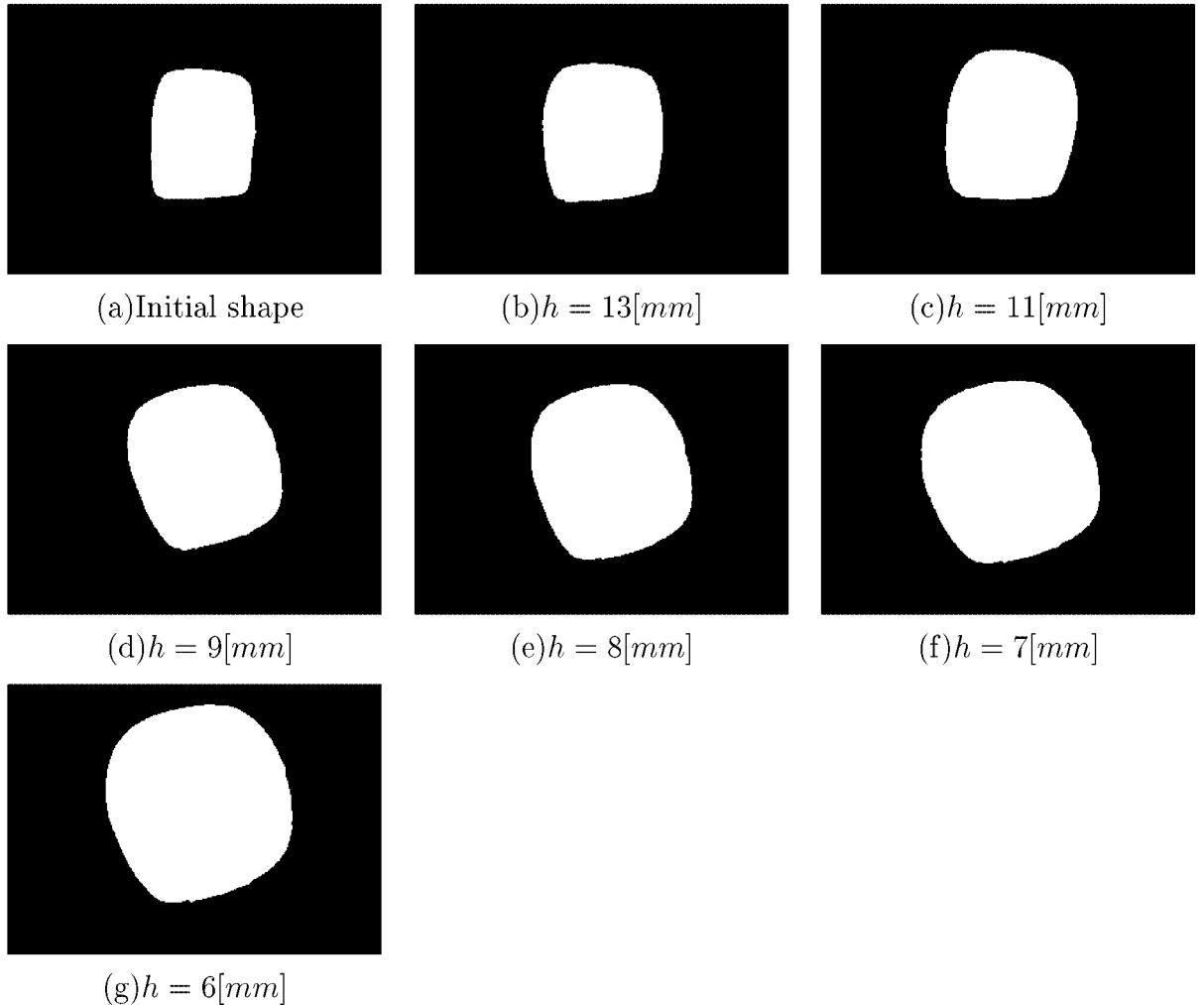


Fig. 5.10. Fromed shapes in Trial 1

5.4 成形形状の推定

本節では、成形形状の推定法を提案する。Fig. 5.2から、物体の伸びは主にローラ方向に沿って伸びていることがわかる。同時にローラ方向と垂直な方向にも物体は伸びている。しかしながら、ローラ高さが低くなるにつれて、ローラ方向の伸びの割合は、垂直方向の伸びの割合よりも大きくなっていく。これらから、物体はローラ方向とその垂直方向では異なる倍率で伸びていることがわかり、物体の変形は、ローラ方向の伸びと垂直方向の伸びの足し合わせと考えることができる。そこでFig. 5.12に示すように、ローラの並進運動方向を x 軸、垂直方向を y 軸と定義する。ただし、ローラが x 軸負の向きに並進運動するように、 x 軸の向きを定める。成形により物体は x 軸方向に K_x 倍、 y 軸方向に K_y 倍の大きさで伸長すると表せる。この部分を、定数倍伸長部と呼ぶ。しかしながら、定数

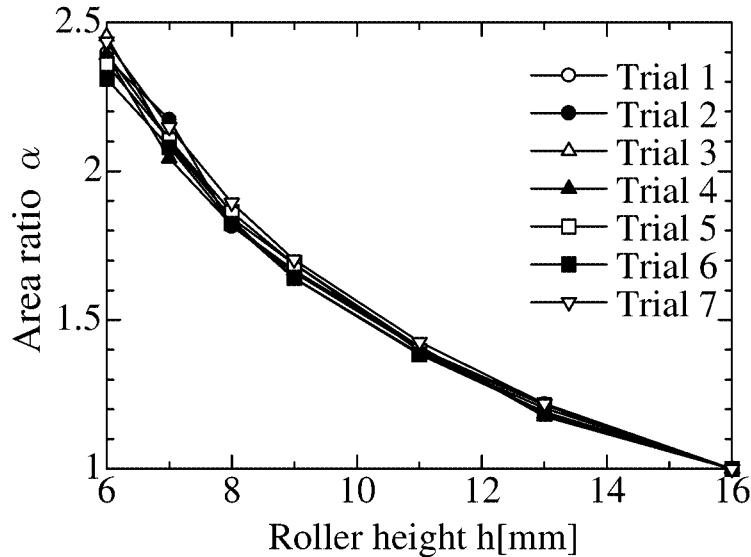


Fig. 5.11. Transition of area ratio

倍伸長部だけでは物体の変形を表すには不充分である。たとえばFig. 5.4-(o)に示す成形動作において、変形前の形状の上部は、直線に近い輪郭を持つ。この形状を x , y 方向に定数倍して得られる形状においても、上部は直線に近い輪郭を持つ。しかしながら、変形後の形状の上部は、丸みを帯びている。このように、 x , y 方向に定数倍伸長した推定形状では、表現できない部分が存在する。この部分を、定数倍伸長部と区別する。定数倍伸長した推定形状で表せない部分を、余剩伸長部とする。余剩伸長部は、主にローラの離脱側に存在する。定数倍伸長部の輪郭関数を $f_{exp}(\theta)$ 、余剩伸長部の長さを $g(\theta)$ とすれば、両方の部分を含めた推定形状の輪郭関数 $f_{est}(\theta)$ は、

$$f_{est}(\theta) = \begin{cases} f_{exp}(\theta) + g(\theta) & \text{ローラ離脱側} \\ f_{exp}(\theta) & \text{ローラ突入側} \end{cases} \quad (5.2)$$

で表すことができる。

5.5 定数倍伸長部と余剩伸長部の推定

本節では、実際の変形データから定数倍伸長部と余剩伸長部を推定する。式(5.2)に示すように、ローラ突入側は定数倍伸長による変形である。そこで、パラメータ K_x , K_y は、ローラ突入側で推定する。Fig. 5.12に示すように、成形動作前の形状の輪郭関数を $f_{bef}(\theta)$

とするとき、定数倍伸長部の輪郭関数 $f_{exp}(\phi)$ の直交座標の値 $[x_{exp}(\phi), y_{exp}(\phi)]^T$ は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{exp}(\phi) \\ y_{exp}(\phi) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_{exp}(\phi)\cos(\phi) \\ f_{exp}(\phi)\sin(\phi) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K_x f_{bef}(\theta)\cos(\theta) \\ K_y f_{bef}(\theta)\sin(\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.3)$$

となる。式(5.3)より

$$\begin{aligned} \phi &= atan2(K_y \sin\theta, K_x \cos\theta) \\ f_{exp}(\phi) &= \sqrt{(K_x \cos\theta)^2 + (K_y \sin\theta)^2} f_{bef}(\theta) \end{aligned} \quad (5.4)$$

が求まる。実際の成形後の輪郭関数を $f_{def}(\theta)$ としたとき、ローラ突入側で $f_{exp}(\phi)$ と $f_{def}(\theta)$ が一致する K_x , K_y を推定する。推定結果を Fig. 5.13 に示す。Fig. 5.13-(a) は K_x と面積比 α の関係を、Fig. 5.13-(b) は K_y と面積比 α の関係を示す。この結果から、 α が等しい場合、 K_x , K_y はそれぞれほぼ同じ値を持つことがわかる。したがって、 K_x , K_y は α の関数とみなせる。Fig. 5.13 に示す例では、次式により近似できる。

$$\begin{aligned} K_x(\alpha) &= \begin{cases} 0.4545 \cdot (\alpha - 1) + 1 & (\alpha < 1.2) \\ 0.4483 \cdot (\alpha - 1.2) + 1.0909 & (\alpha \geq 1.2) \end{cases} \\ K_y(\alpha) &= \begin{cases} 0.3182 \cdot (\alpha - 1) + 1 & (\alpha < 1.2) \\ 0.1862 \cdot (\alpha - 1.2) + 1.0636 & (\alpha \geq 1.2) \end{cases} \end{aligned} \quad (5.5)$$

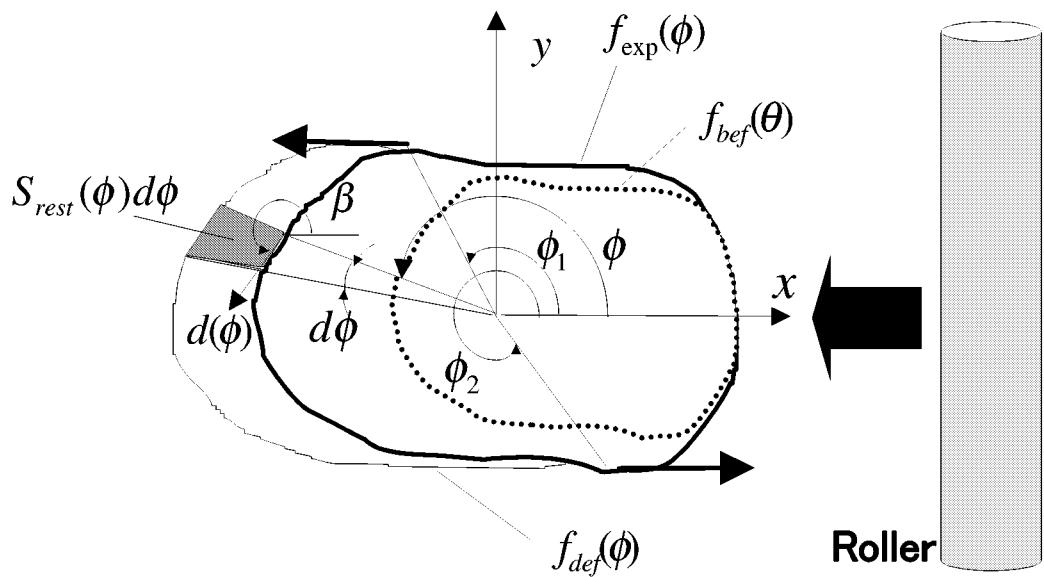


Fig. 5.12. Estimation of deformed shape

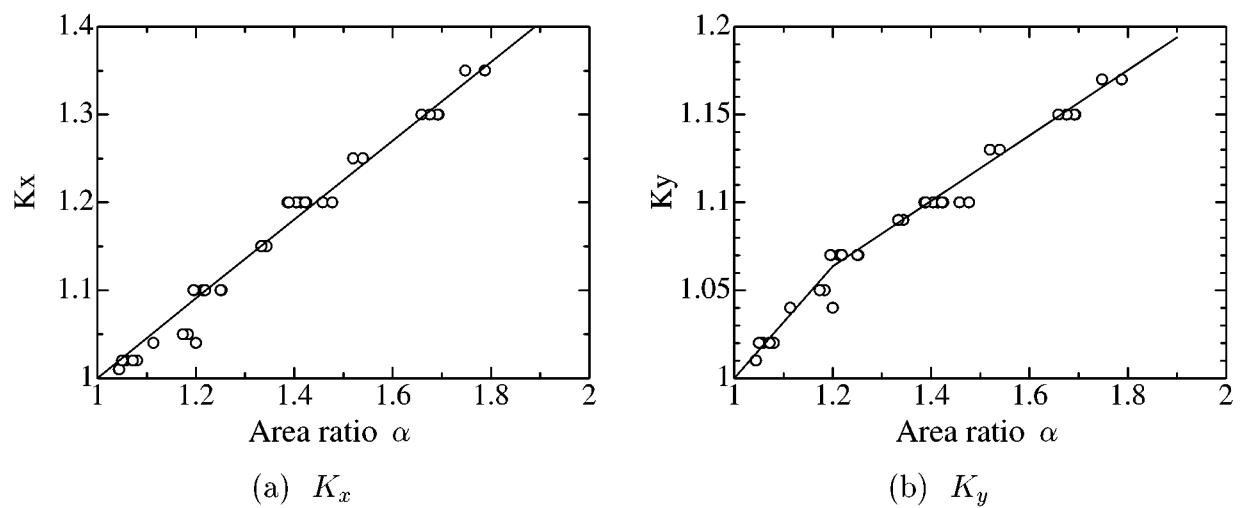


Fig. 5.13. Forming parameters of expansions

Fig. 5.4-(o)に示す成形動作に対して、定数倍伸長部を求める。Fig. 5.14-(a)に成形前の形状、Fig. 5.14-(b)に変形形状、Fig. 5.14-(c)に定数倍伸長部を示す。Fig. 5.14-(b), (c)から、図上部であるローラ離脱側に輪郭の差が存在することがわかる。この部分が余剩伸長部である。ここで、余剩伸長部が存在する範囲を決定する。Fig. 5.12に示すよう

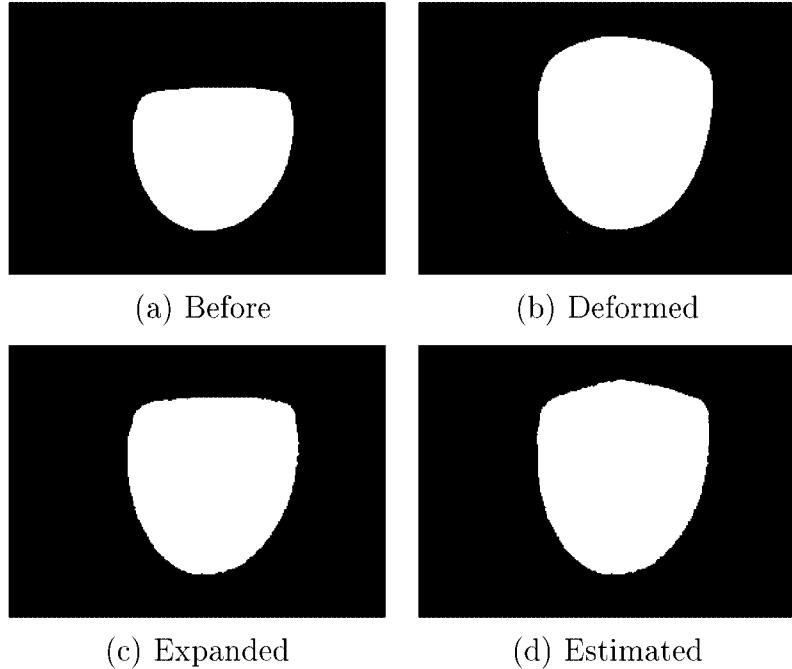


Fig. 5.14. Estimated shapes

に、定数倍伸長形状の輪郭関数 $f_{exp}(\phi)$ の接線ベクトル $d(\phi)$ と x 軸が成す角度を β と定義する。Fig. 5.2, Fig. 5.4, Fig. 5.6に示すように、余剩部分は x 軸に対して π 方向が最も大きく伸長している。したがって、余剩伸長部は、 $\pi \leq \beta \leq 2\pi$ の範囲で存在していると仮定できる。接線ベクトルは

$$d(\phi) = \begin{bmatrix} f_{exp}(\phi)\cos(\phi) - f'_{exp}(\phi)\sin(\phi) \\ f_{exp}(\phi)\sin(\phi) + f'_{exp}(\phi)\cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

で求まる。Fig. 5.12に示すように、 $\beta = \pi$ となる輪郭角度を ϕ_1 、 $\beta = 2\pi$ となる輪郭角度を ϕ_2 とする。角度 ϕ_1 において接線ベクトル $d(\phi)$ は、 $[-1, 0]^T$ の正の定数倍に一致する。角度 ϕ_2 において接線ベクトル $d(\phi)$ は、 $[1, 0]^T$ の正の定数倍に一致する。次に、余剩伸長部の特性を調べる。角度 ϕ における余剩伸長部の面積密度を $S_{rest}(\phi)$ で表す。このとき Fig. 5.12に示すように、角度 ϕ と $\phi + d\phi$ で挟まれる余剩伸長部の面積は、 $S_{rest}(\phi)d\phi$ で与えられる。面積密度 $S_{rest}(\phi)$ は、 $f_{exp}(\phi)$ と実際の変形形状の輪郭関数 $f_{def}(\phi)$ より、次のように求められる。

$$S_{rest}(\phi) = \frac{1}{2}[f_{def}^2(\phi) - f_{exp}^2(\phi)] \quad (5.7)$$

Fig. 5.14-(b) に示す変形後の形状と, Fig. 5.14-(c) に示す定数倍伸長部から, $S_{rest}(\phi)$ を計算した結果を, Fig. 5.15 の点線に示す. 面積密度 $S_{rest}(\phi)$ を, 実線に示す面積密度 $A_{rest}(\phi)$ で近似する. すなわち,

$$A_{rest}(\phi) = \begin{cases} \frac{\phi - \phi_1}{\pi - \phi_1} A_{rest}(\pi) & \phi_1 \leq \phi \leq \pi \\ \frac{\phi - \phi_1}{\pi - \phi_1} A_{rest}(\pi) & \pi \leq \phi \leq \phi_2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5.8)$$

面積密度 $A_{rest}(\phi)$ を, 推定余剰部の面積密度とよぶ. 面積密度 $A_{rest}(\phi)$ は, 角度 ϕ_1, ϕ_2 と $A_{rest}(\pi)$ の値から定められる. 5.5節に示したように, ϕ_1 と ϕ_2 の値は, 定数倍伸長部の形状とローラが転がる方向から計算できる. 成形動作前の形状面積を A_{bef} とすると, 成形動作後の面積は αA_{bef} , 定数倍伸長部の面積は, $K_x K_y A_{bef}$ で与えられる. したがって, 余剰部の面積は $(\alpha - K_x K_y) A_{bef}$ に等しい. この値が, 推定余剰部の面積密度 $A_{rest}(\phi)$ から求められる面積に等しいので, 次式が得られる.

$$A_{rest}(\pi) = \frac{2(\alpha - K_x K_y)}{\phi_2 - \phi_1} A_{bef} \quad (5.9)$$

以上のように, 角度 ϕ_1, ϕ_2 と $A_{rest}(\pi)$ の値が求められるので, 面積密度 $A_{rest}(\phi)$ を定めることができる. 次に, 推定余剰部の面積密度 $A_{rest}(\phi)$ より, 余剰伸長部の長さ $g(\phi)$ を計算する. 角度 ϕ と $\phi + d\phi$ に挟まれる推定余剰部の面積は, $A_{rest}(\phi)d\phi$ に等しい. また, この部分の面積は,

$$\frac{1}{2} \{f_{exp}(\phi) + g(\phi)\}^2 d\phi - \frac{1}{2} \{f_{exp}(\phi)\}^2 d\phi \quad (5.10)$$

と表すことができる. したがって,

$$g(\phi)^2 + 2f_{exp}(\phi)g(\phi) = 2A_{rest}(\phi) \quad (5.11)$$

が得られる. この二次方程式を解くことで, $g(\phi)$ を計算することができる.

変形形状を推定する手順を示す. 初期形状の面積 A_{init} , 高さ h_{init} , ローラの高さ h より, 面積比 α を求める. 面積比 α より, K_x, K_y を計算する. パラメータ K_x, K_y とテーブルの回転角度 ψ より, 定数倍伸長部を求める. 定数倍伸長部の輪郭関数 $f_{exp}(\phi)$, ϕ_1, ϕ_2 , $A_{rest}(\pi)$ の値を計算し, $A_{rest}(\phi)$ から $g(\phi)$ を求める. 結局, 推定形状の輪郭関数 $f_{est}(\phi)$ は, $A_{init}, h_{init}, h, \psi$ より求めることができ,

$$f_{est}(\phi) = \begin{cases} f_{exp}(\phi) + g(\phi) & \phi_1 \leq \phi \leq \phi_2 \\ f_{exp}(\phi) & otherwise \end{cases} \quad (5.12)$$

で与えられる. 以上の推定のフローを Fig. 5.16 にまとめる.

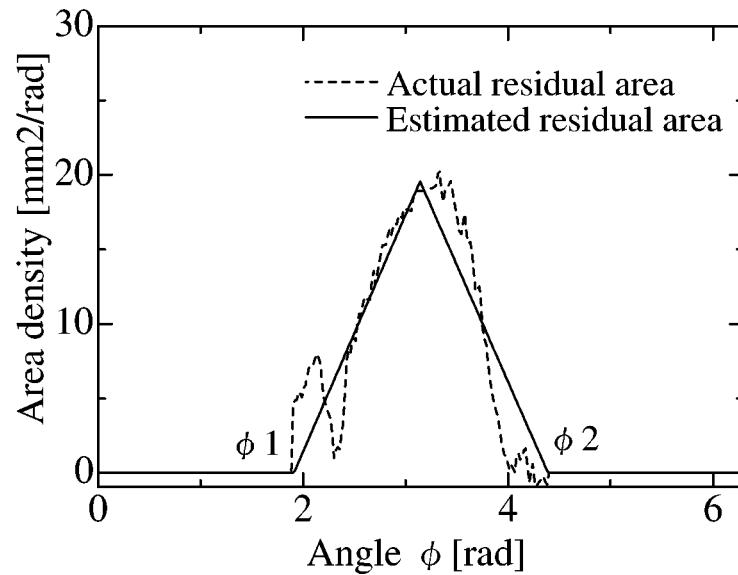


Fig. 5.15. Residual area

Fig. 5.14-(a)に示す形状に対して、変形を推定した結果をFig. 5.14-(d)に示す。Fig. 5.14-(c)に示す定数倍伸長部のみの推定より、良好な結果を得ていることがわかる。

Fig. 5.2-(j), (k), (l)に示す初期形状に対して、変形を推定した結果をFig. 5.17に示す。白が推定形状、灰色が実際の形状を示す。また、Fig. 5.18に輪郭関数を示す。一点鎖線が初期形状の輪郭関数、破線が変形形状の輪郭関数、実線が推定輪郭関数を示す。Fig. 5.17, Fig. 5.18に示すように、変形が十分に推定できていることがわかる。

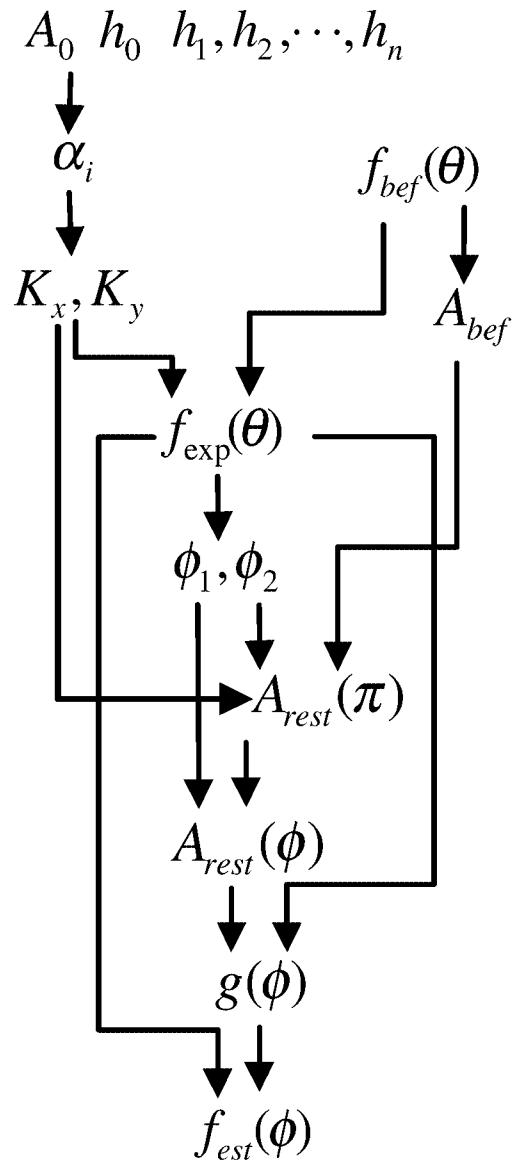


Fig. 5.16. Flow chart of estimation

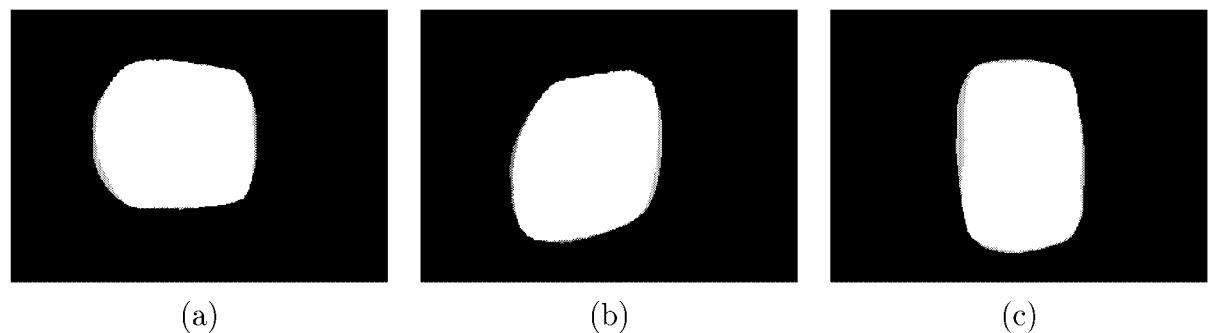


Fig. 5.17. Estimated shapes

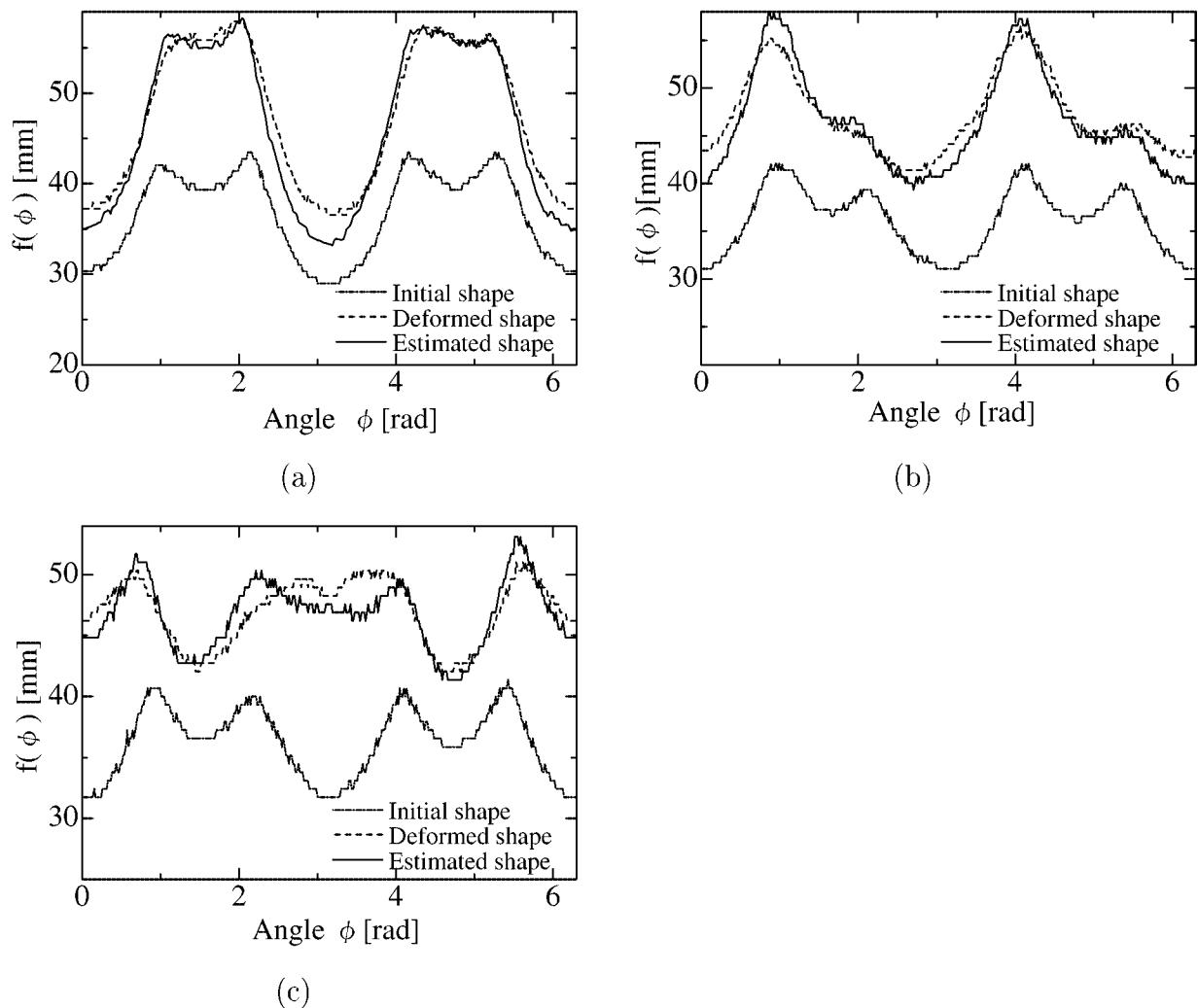


Fig. 5.18. Estimated outline functions

5.6 結言

本章では、レオロジー物体の成形過程モデリング法を提案した。変形実験の結果、レオロジー物体の初期面積、初期高さ、ローラ高さの推移より、成形過程を推定できることが判明した。次章では、本章で提案した成形過程モデリングを用いた成形制御則の提案を行い、その制御則を用いて成形を行う。

第6章

成形過程モデルを用いたレオロジー物体の成形

6.1 緒言

本章では、第5章で提案した成形過程モデリング法を用いた成形制御則を提案する。まず、6.2節において、物体成形のための作業戦略を考察し、成形過程モデルを用いた成形制御則を提案する。そして、提案する制御則を用いて、2種類の目標形状に対してレオロジー物体の成形制御を行い、制御則の有効性を検討する。

6.2 成形過程モデルを用いたレオロジー物体の成形制御則

本節では、第5章で提案した成形過程モデルを用いた成形制御則を提案する。成形過程モデルを用いることにより、さまざまな成形動作の結果を推定することができる。したがって、推定結果を評価することにより、適切な成形動作を決定することができる。

成形過程の推定においては、レオロジー物体の初期面積、初期高さ、ローラ高さの推移が必要である。そこで、レオロジー物体が高さ h_0 を有するように、あらかじめ決められたローラ高さ h_0 で数回成形する。このときの形状を S_0 で表す。初期形状 S_0 の面積を、撮影画像から計算し、その値を A_0 とする。Fig. 6.1に示すように、初期形状 S_0 を、 n 回の成形動作 a_1, a_2, \dots, a_n で成形する。各成形動作 a_k におけるローラ高さ h_k の値は、あらかじめ定めておく。成形動作 a_k 後の形状を S_k とする。ローラ高さの推移 h_1, h_2, \dots, h_n より、各成形動作における面積比 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ が求められる。このとき成形動作 a_k におけるテーブル回転角度 ψ_k の値は、次の手順で決定できる。(1) 形状 S_{k-1} に対して、ローラ高さ h_k 、テーブル回転角度 $\psi_k = 0, \Delta\psi, 2\Delta\psi, \dots, (M-1)\Delta\psi$ により、成形を行った形状を推定する。ここで、 $\Delta\psi = 2\pi/M$ である。形状の推定において、 h_0, A_0, α_k の値を用いる。(2) 成形動作の推定結果を、評価関数を用いて評価し、最良の評価値を有する ψ_k の値を決定する。(3) ローラ高さ h_k と決定した ψ_k の値にしたがって、成形動作を実行する。

6.3 成形制御実験

本節では、レオロジー物体の成形制御実験結果を示す。まず、初期物体高さ $h_0 = 16[\text{mm}]$ 、ローラ高さを $h_1 = 13[\text{mm}]$, $h_2 = 11[\text{mm}]$, $h_3 = 9[\text{mm}]$, $h_4 = 8[\text{mm}]$, $h_5 = 7[\text{mm}]$, $h_6 = 6[\text{mm}]$ と設定する。各ローラ高さにおける面積比 α_k をあらかじめ決定する。Fig.

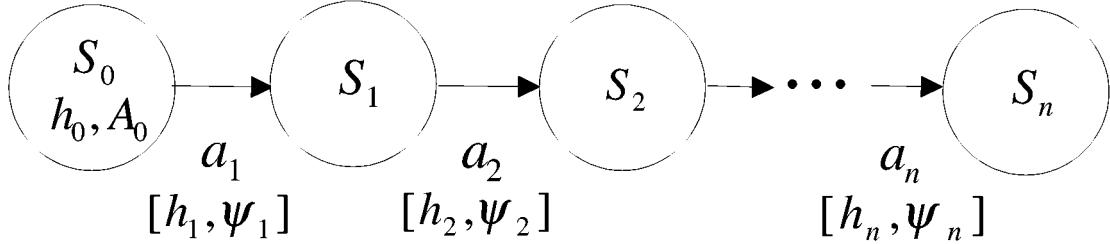


Fig. 6.1. Forming process parameters

5.11に示す6回の成形過程から、各ローラ高さにおける面積比の平均値を計算し、ローラ高さ \$h_k\$ における面積比 \$\alpha_k\$ とする。

本章では、1)円形、2)細長形状を目標形状として成形を行う。テーブル回転角度 \$\psi_k\$ を決定するための評価関数は、目標形状によって異なる。

[円形に成形] 成形動作 \$a_k\$ 後の目標形状を \$\hat{S}_k\$ で表す。目標形状 \$\hat{S}_k\$ は円であり、その面積は \$\alpha_k A_0\$ で与えられる。これより、目標形状 \$\hat{S}_k\$ の輪郭関数 \$\hat{f}_k(\phi)\$ が求められる。このとき輪郭関数が \$f_{est}(\phi)\$ で与えられる推定形状の評価関数は

$$E_k = \int_0^{2\pi} \{f_{est}(\phi) - \hat{f}_k(\phi)\}^2 d\phi \quad (6.1)$$

である。推定形状が目標形状に近いほど、評価関数の値は小さくなる。そこで、評価関数が最小になるテーブル回転角 \$\psi_k\$ で成形を行う。Fig. 6.2-(a)~(g)に成形制御の結果を示す。Fig. 6.3に示す輪郭関数より、成形動作ごとに円形に近づいていくことが確認できる。Fig. 6.4に、推定における評価関数の変化を示す。この図からも、物体が目標形状に収束していくことがわかる。Fig. 6.5-(a)~(g)に、別の初期形状における成形制御の結果を示す。Fig. 6.5-(a)~(g)に対応する輪郭関数をFig. 6.6に示す。この場合も、成形動作ごとに円形に近づいていくことが確認できる。Fig. 6.7に、推定における評価関数の変化を示す。この図からも、物体が目標形状に収束していくことがわかる。

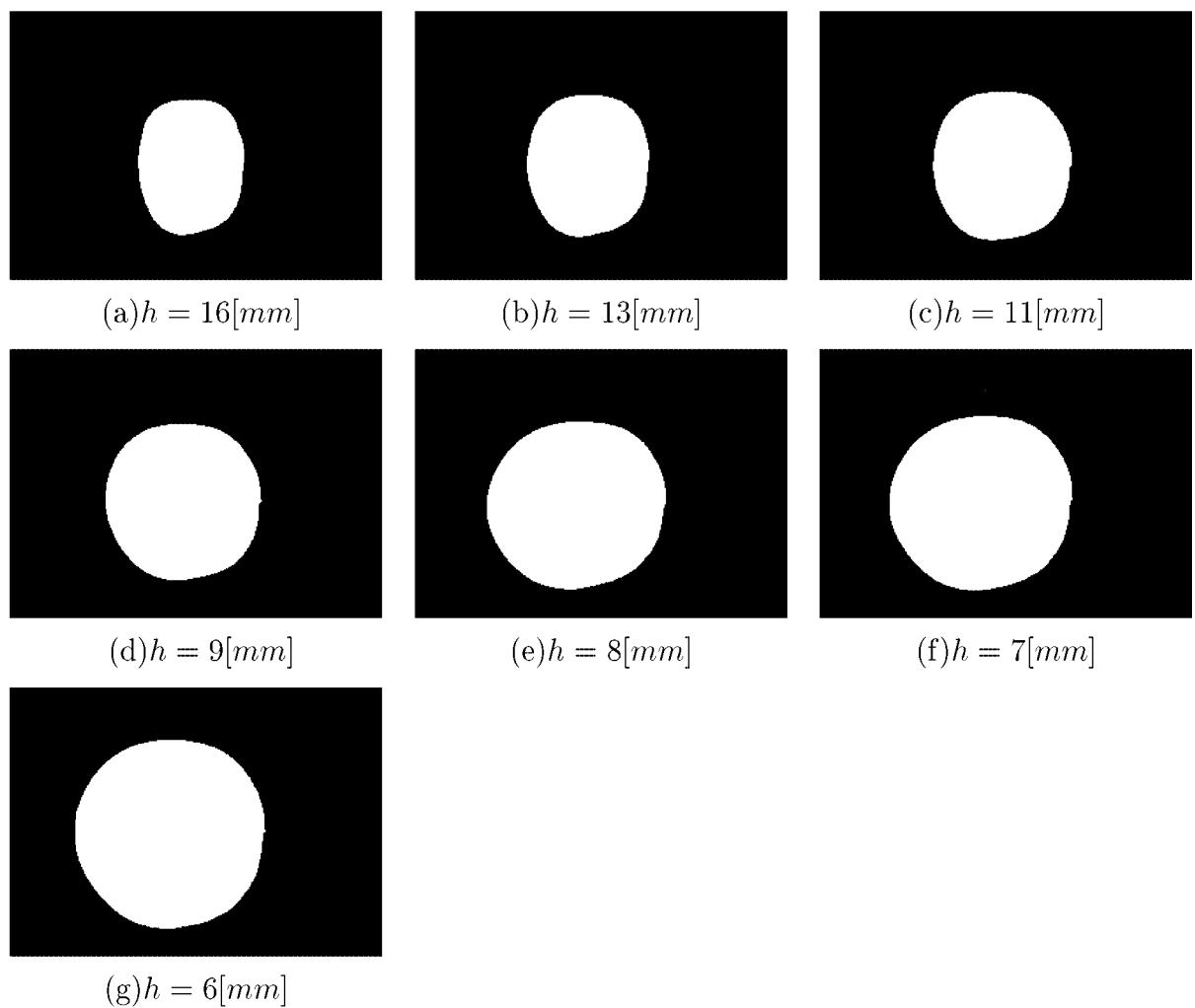


Fig. 6.2. Formed shapes by automatic forming control to circuler shape (Trial 1)

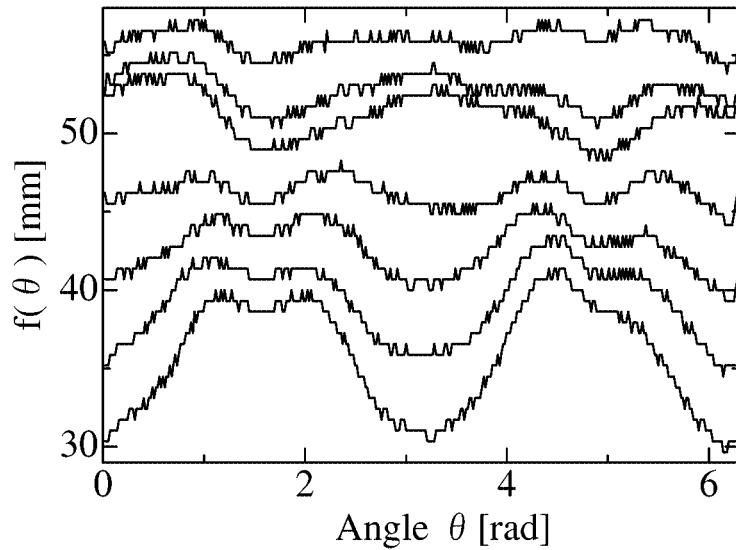


Fig. 6.3. Outline functions of formed shapes by automatic forming control to circular shape (Trial 1)

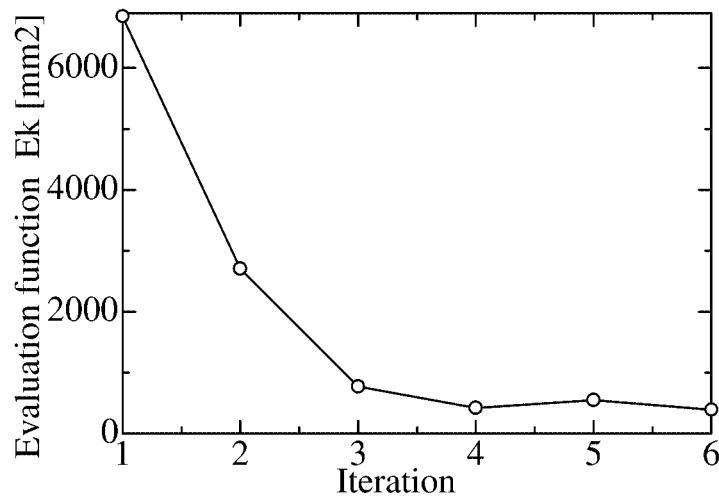


Fig. 6.4. Transition of evaluation function during automatic forming control to circular shape (Trial 1)

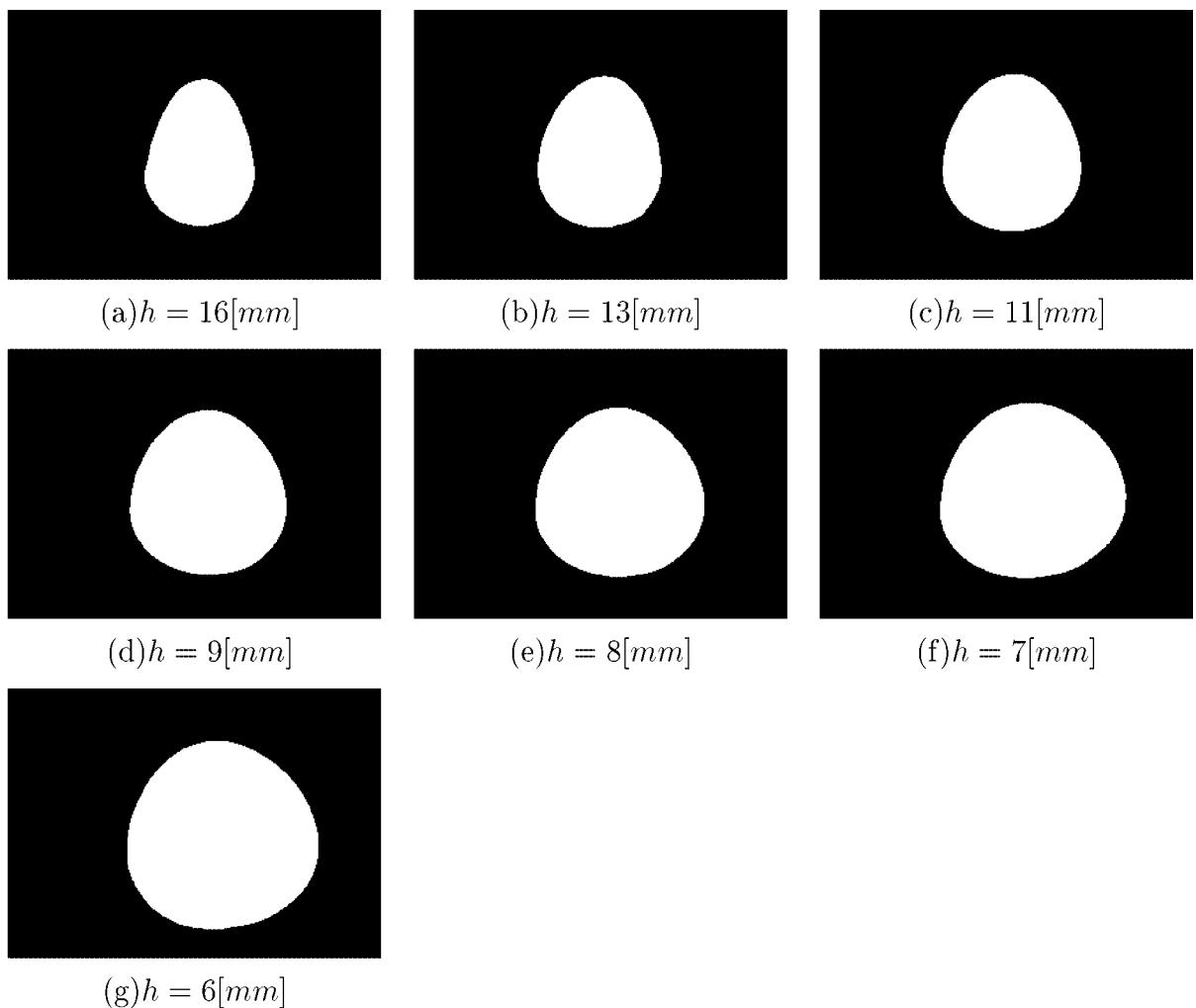


Fig. 6.5. Formed shapes by automatic forming control to circuler shape (Trial 2)

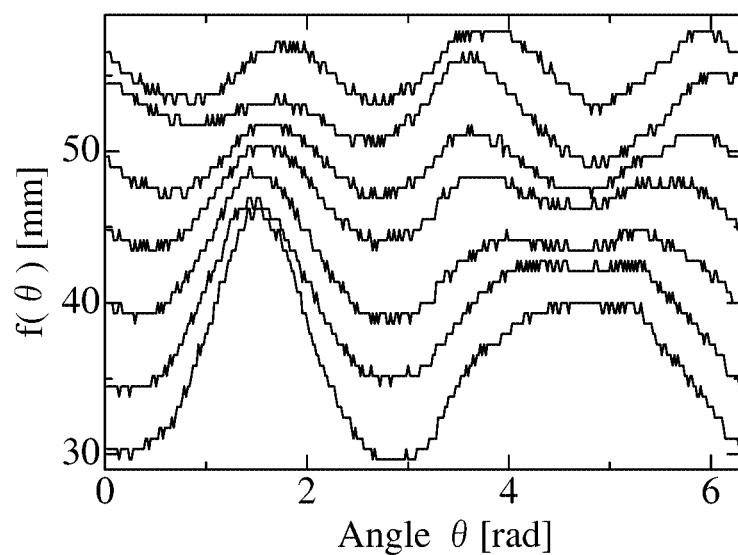


Fig. 6.6. Outline functions of formed shapes by automatic forming control to circular shape (Trial 2)

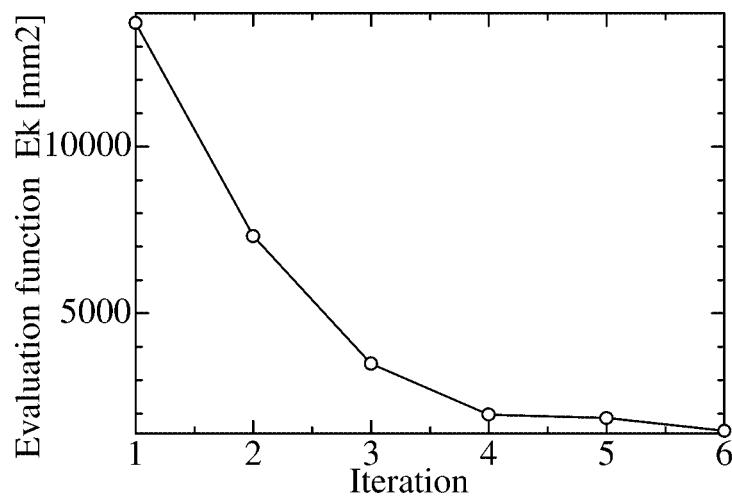


Fig. 6.7. Transition of evaluation function during automatic forming control to circular shape (Trial 2)

[細長形状に成形]

目標形状を細長形状とした場合、輪郭関数が $f_{est}(\phi)$ で与えられる推定形状に対して、 x 軸方向の最長長さ L_k と、 y 軸方向の最長長さ S_k を求め、評価関数を、

$$E_k = S_k / L_k \quad (6.2)$$

と設定する。式(6.2)が小さくなるほど、形状は細長くなる。そこで、評価関数が最小となるテーブル回転角度 ψ_k で成形を行う。Fig. 6.8-(a)～(g)に成形制御の結果を示す。Fig. 6.9から、成形動作ごとに長手方向が伸ばされていることがわかる。Fig. 6.10に、推定における評価関数の変化を示す。この図からも、物体が目標形状に収束していくことがわかる。Fig. 6.11-(a)～(g)に、別の初期形状における成形制御の結果を示す。Fig. 6.11-(a)～(g)に対応する輪郭関数を Fig. 6.12に示す。この結果からも、成形動作ごとに長手方向が伸ばされていることがわかる。また、Fig. 6.13に、推定における評価関数の変化を示す。この図からも、物体が目標形状に収束していくことがわかる。

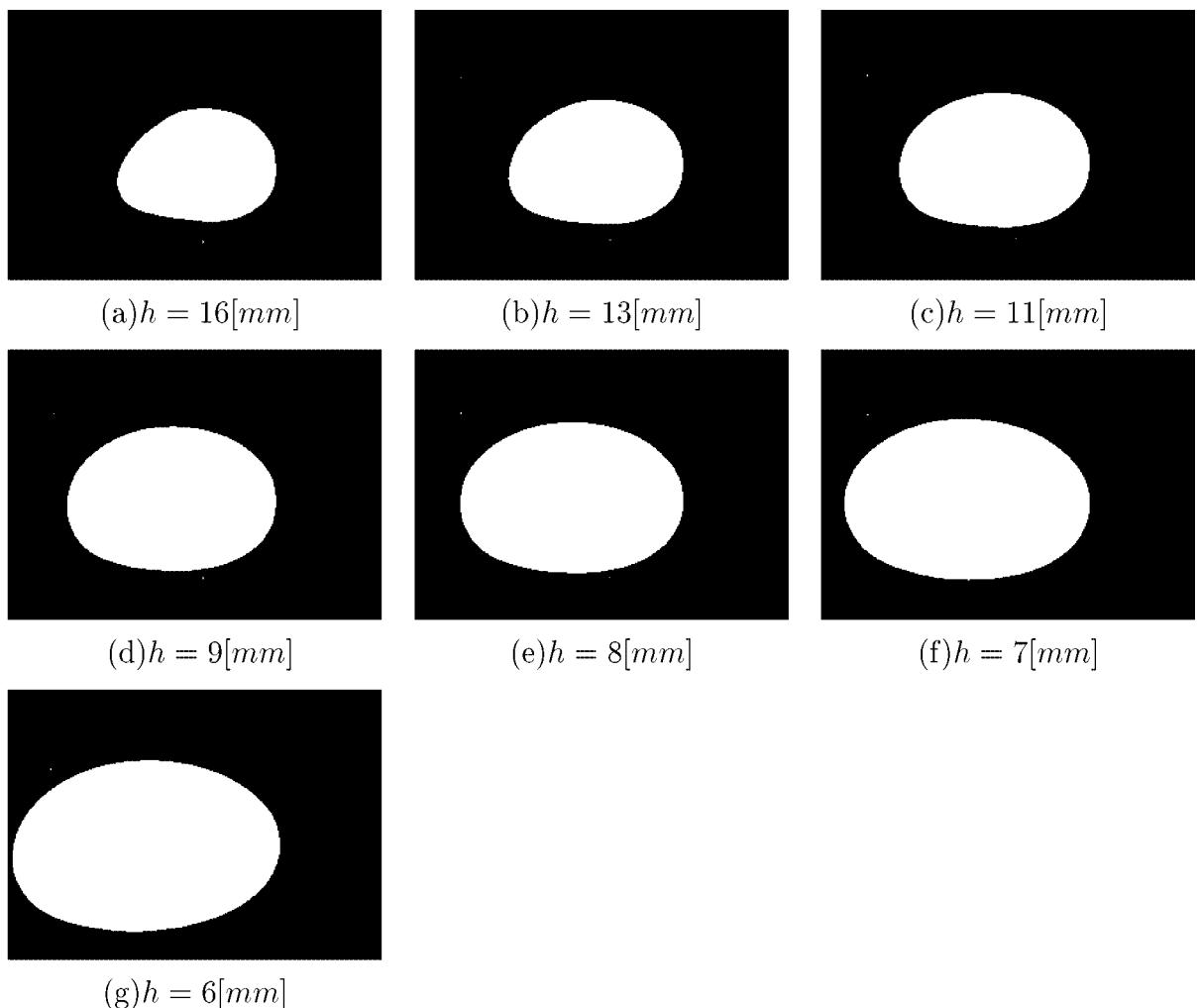


Fig. 6.8. Formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 1)

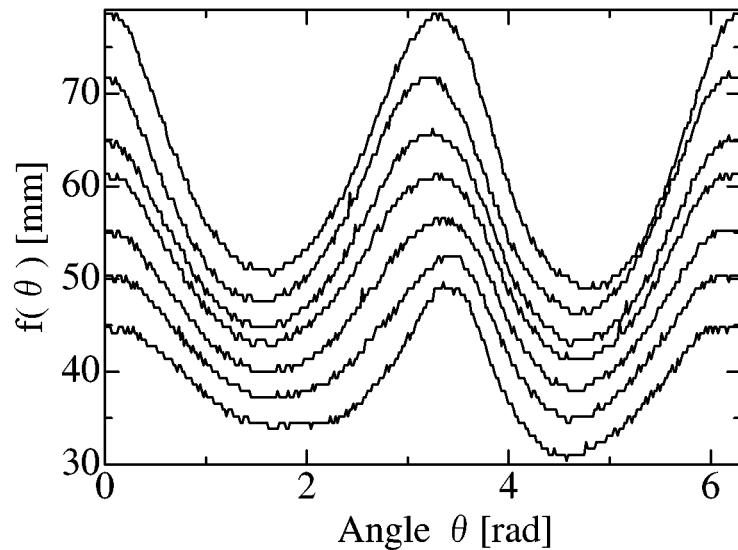


Fig. 6.9. Outline functions of formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 1)

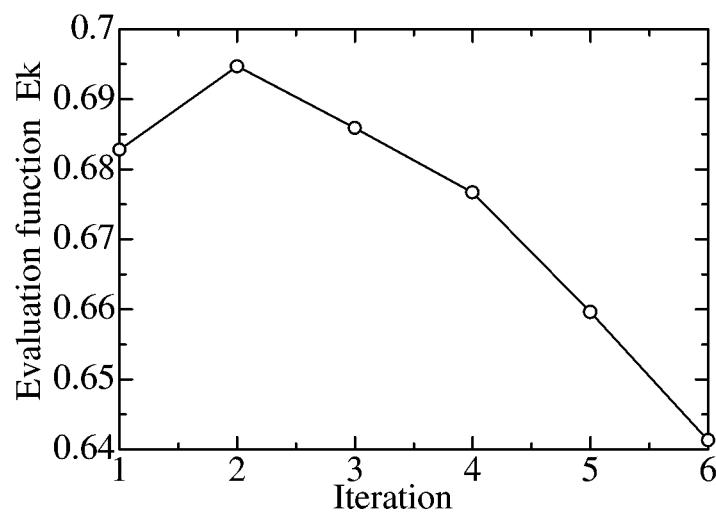


Fig. 6.10. Transition of evaluation function during automatic forming control to long and narrow shape (Trial 1)

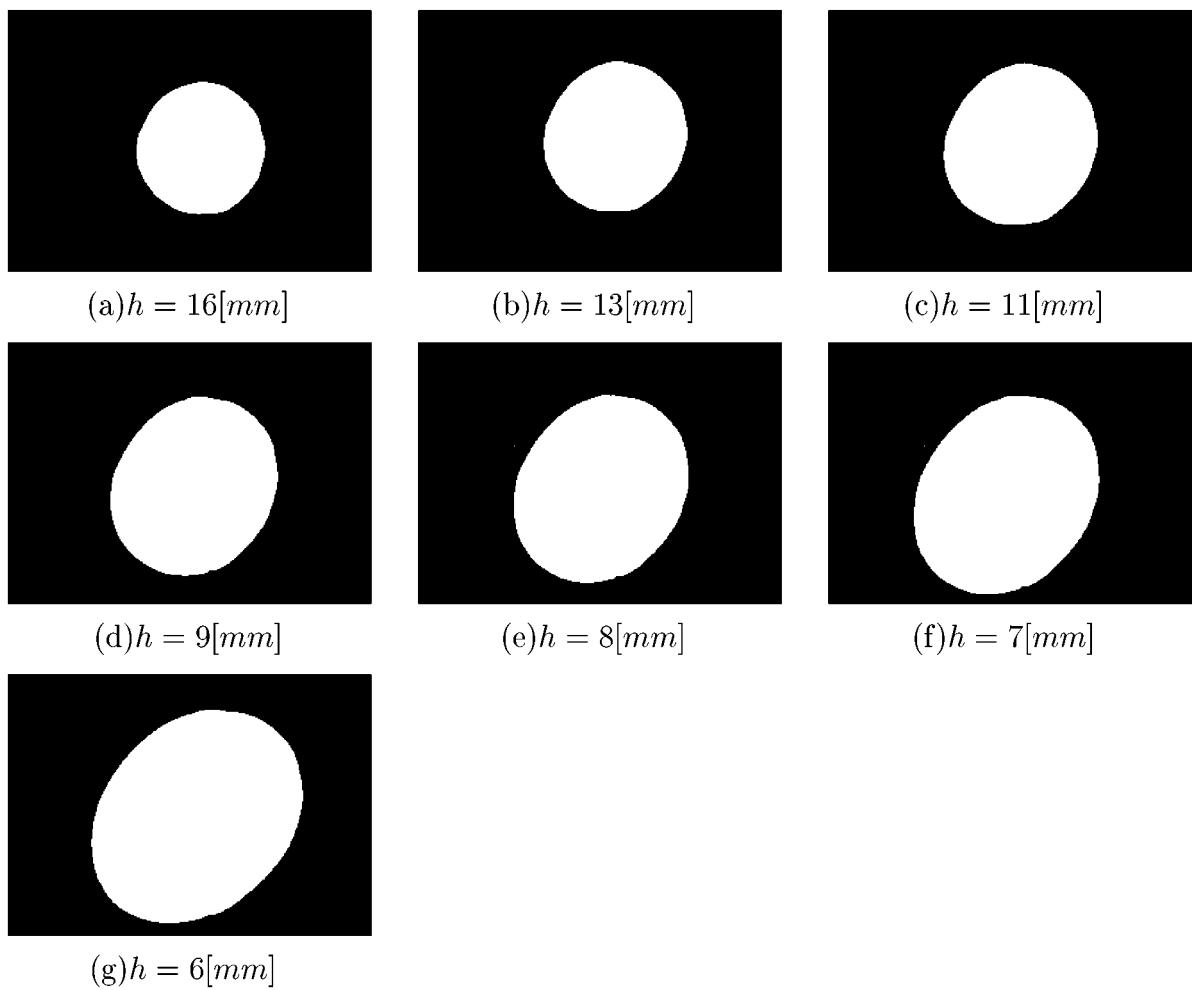


Fig. 6.11. Formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 2)

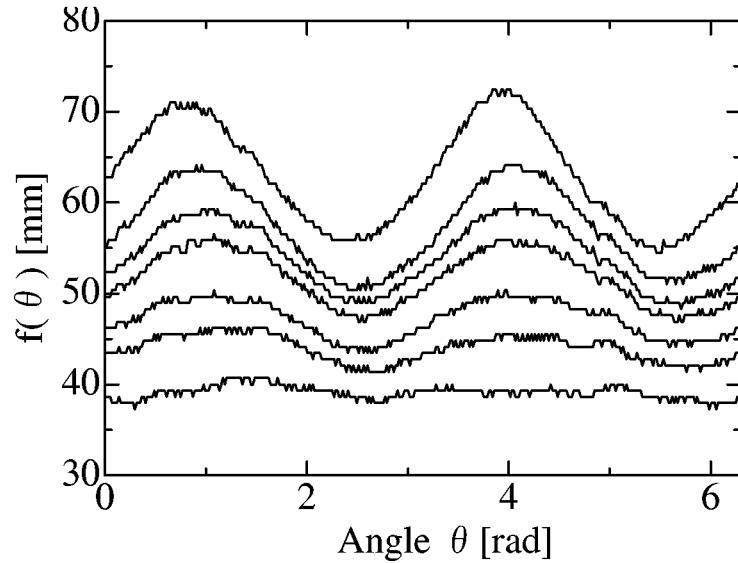


Fig. 6.12. Outline functions of formed shapes by automatic forming control to long and narrow shape (Trial 2)

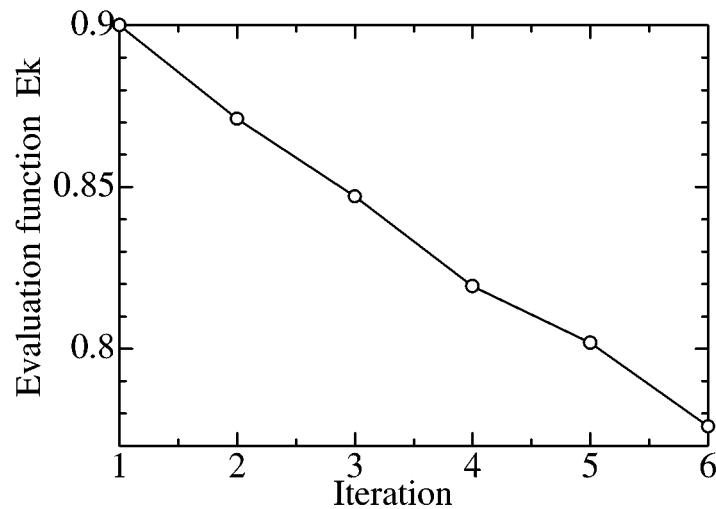


Fig. 6.13. Transition of evaluation function during automatic forming control to long and narrow shape (Trial 2)

6.4 結言

本章では、まず、レオロジー物体の成形過程モデルに基づく成形制御則を提案した。そして、その制御則を用いた物体の成形を行い、その有効性を示した。本成形制御則は、5章で示した成形過程モデリング法を用いることにより、求める形状に成形するための作業方策を導くことができる。

今後の課題としては、1) 本成形機で成形できる形状の限界を調査する。2) ローラ高さを決定する手法を確立することが挙げられる。

第7章

結論

本論文では、食品生地を対象とする、レオロジー物体の成形作業の機械システム化を目指とし、物体のモデリング、成形機の開発、成形制御を行った。

以下において、本研究で得られた具体的な結果を記す。

- ① レオロジー物体の変形挙動を表すモデルの提案を行った。まず、レオロジー物体の力学特性をあらわす粘弾性要素を分析した。その結果、3要素モデルがモデルとして適切であることがわかった。次に、モデルの挙動を実際のレオロジー物体に近づけるために、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わかった。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。
- ② 人の実演による成形から伸長成形制御則を構築し、円形への伸長成形を実現した。まず、人間が行っている伸長成形作業を分析した。その結果、一度の成形過程では円形に成形することはできず、複数回の成形によって円形に成形していることがわかった。また、人間はレオロジー物体の凹部と反対側の方向からローラを転がして円形に近づけようとしていることがわかった。次に、開発した機械システムに、人間による伸長成形に基く成形アルゴリズムを実装した。その結果、レオロジー物体を円形に伸長成形することができる事を示した。
- ③ 円形以外の形状へ成形するための成形制御則を提案した。まず、レオロジー物体の成形過程モデリング法を提案した。変形実験の結果、レオロジー物体の初期面積、初期高さ、ローラ高さの推移より、成形過程を推定できることが判明した。つぎに、そのモデルを用いた、成形制御則を提案した。提案した制御則を用いた物体の成形を行い、その有効性を示した。

①で示したモデリング法は、成形制御を導く上では使われていない。しかし、モデルの構造が、非線形粘弾性要素を格子状に結合したシンプルなものであり、数値シミュレーションにおいて、たとえばバーチャルリアリティーにおける、仮想物体のモデルなどのように、様々な分野で適用することができるを考える。

本論文では、レオロジー物体のモデリング、成形のための専用機、成形過程のモデリング、成形制御の提案を行った。その結果、作業にあった専用機とモデリング、さらに作業戦略を構築することによって、作業の機械システムによる自動化が実現できることがわ

かった。この研究が、他のレオロジー物体を扱う作業の機械システム化における、一つの指標になることを望む。

謝　辞

本研究を完成するにあたって、多くの方々のお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

はじめに、立命館大学理工学部 平井慎一助教授には、御指導、励ましのお言葉を賜りました。研究において、論理の組み立て方、論文の書き方など研究者としての基本をご指導いただきました。ここに、深甚なる敬意と感謝の意を表します。誠に有り難うございました。また、前田浩一教授には、ゼミにおいて様々な御助言と励ましの言葉を賜りました。心より感謝いたします。

また、本研究を進めるにあたって、平井研究室の学生の方々に、多大な御協力を賜りました。当時修士院生の藤田欣晃さん、齋藤拓哉さん、当時学部生の阪本進一郎さん、奥井智史さん、松下洋さん、内田浩二さんには、研究において大きな御協力を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。さらに、豊田工業大学の森園哲也博士には、博士課程に進む際にいろいろなアドバイスをいただきました。また、本学研究員の韓鉉庸博士、香川大学の和田隆広博士、滋賀医科大学の木野仁博士には、日頃より貴重な御助言をいただきました。心より御礼申し上げます。また、私生活において数え切れないほどの御助力をいただきました。ここに深く感謝致します。

最後に、暖かく見守っていただいた家族に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 小川: “レオロジー概論” 山海堂, 1991.
- [2] 村上: “レオロジー基礎論” 産業図書, 1991.
- [3] 通商産業省機械情報産業局: “機械情報産業総覧” 通産省資料調査会, 1999.
- [4] 富田: “三次元シミュレーションの現状と将来” 塑性と加工, Vol.31, No.350, pp.284–291, 1990.
- [5] 渡部., 原田: “Green形構成式を用いた平面ブロックの弾性大変形シミュレーション” 日本機械学会論文集A編, Vol.57, No.540, pp.1808–1814, 1991.
- [6] 森: “圧延加工の三次元変形のシミュレーション” 塑性と加工, Vol.31, No.350, pp.304–310, 1990.
- [7] 谷本., 福岡., 藤田: “引張り弾・塑性・粘塑性構成式” 日本機械学会論文集A編, Vol.57, No.544, pp.2957–2964, 1991.
- [8] 西谷., 才本., 飛田., 須藤: “体積力法による面外せん断問題に関する汎用解析法” 日本機械学会論文集A編, Vol.57, No.543, pp.2836–2842, 1991.
- [9] D, Terzopoulos., J, Platt., A, Barr and K, Fleisher: “Elastically Deformable Models” Computer Graphics, vol.21, no.4, pp.205–214, 1987.
- [10] D, Terzopoulos and K, Fleisher: “Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture” Computer Graphics, vol.22, no.4, pp.269–278, 1988.
- [11] 広田., 金子: “仮想物体の弾性モデルに関する検討” 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.3, pp.232–238, 1998.
- [12] 宮崎., 安田., 横井., 鳥脇: “仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現” 電子情報通信学会論文誌A, Vol.J79-A, No.11, pp.1919–1926, 1996.
- [13] S, Miyazaki., J, Ueno., T, Yasuda., S, Yokoi and J, Toriwaki: “A Study of Virtual Manipulation of Elastic Objects with Destruction” Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.26–31, 1996.
- [14] 宮崎., 吉田., 安田., 横井: “局所形状保持に基づく仮想弾性物体モデルの提案” 電子情報通信学会論文誌A, Vol.J82-A, No.7, pp.1148–1155, 1999.

- [15] Y, Chai., G, R, Luecke and J, C, Edwards: "Virtual Clay Modeling Using the ISU Exoskeleton" Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp.76–80, 1998.
- [16] 水野., 岡田., 鳥脇., 横井: "仮想彫刻－仮想空間における対話型形状生成の一手法" 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.12, pp.2509–2515, 1997.
- [17] 荒田., 高井., 高井., 山本: "能動的ボクセル空間における仮想粘土モデリング" 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.11, pp.2008–2016, 1999.
- [18] 高井., 斎藤., 高井: "局所的しきい値操作による仮想粘土の微細形状加工" 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.6, pp.1556–1558, 2000.
- [19] G, Wyvill., D, Mcrobie and M, Gigante: "Modeling with features" Proc. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.17, No.5, pp.40–46, 1997.
- [20] 加藤., 坂本., 高橋: "変形操作を目的としたボリュームデータに基づく仮想物体モデルの生成・再構成法" 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.12, pp.2822–2829, 2000.
- [21] 山崎., 坂本., 巧: "境界要素法による三次元弾性接触問題の解析" 日本機械学会論文集A編, Vol.57, No.540, pp.1858–1864, 1991.
- [22] 木内., 元木: "ロール成形" 塑性と加工, Vol.31, No.350, pp.317–324, 1990.
- [23] 古元., 林., 西崎., 森本., 小坂田: "左右非対称圧延における板厚差および板曲がりのシミュレーション－剛塑性有限要素法による左右非対称圧延の解析 I－" 塑性と加工, Vol.38, No.442, pp.996–1000, 1997.
- [24] 古元., 林., 西崎., 森本., 小坂田: "左右非対称圧延における蛇行シミュレーション－剛塑性有限要素法による左右非対称圧延の解析 II－" 塑性と加工, Vol.38, No.442, pp.1001–1006, 1997.
- [25] 奥名., 西垣戸., 椎名: "用紙ガイドの摩擦抵抗を考慮した用紙挙動解析" 日本機械学会論文集C編, Vol.60, No.575, pp.2279–2284, 1994.
- [26] 西垣戸., 奥名., 石井: "レーザプリンタにおける転写画像ずれの防止のための用紙挙動解析手法" 日本機械学会論文集C編, Vol.60, No.577, pp.3164–3169, 1994.
- [27] 末岡., 劉., 安田., 近藤., 片山: "抄紙機ゴム巻きロールのパターン形成現象とその防止対策の検討" 日本機械学会論文集C編, Vol.61, No.591, pp.4160–4167, 1995.
- [28] 楊., 小島., 真鍋., 西村: "データベースとファジイ推論を用いた知能化V曲げ加工システムの開発" 塑性と加工, Vol.39, No.449, pp.585–590, 1997.

- [29] 楊., 真鍋., 相川., 小川: “数値シミュレーションデータベースを用いた知的V曲げ加工システム” 塑性と加工, Vol.39, No.449, pp.603–607, 1997.
- [30] 藤村., 小野: “スキューロール紙送り機構における紙の運動解析” 日本機械学会論文集C編, Vol.62, No.596, pp.1354–1360, 1996.
- [31] 今江., 山本: “3ロール式マンドレルミルの圧延特性” 塑性と加工, Vol.36, No.408, pp.23–28, 1995.
- [32] 今江., 山本: “4ロール式マンドレルミルの圧延特性” 塑性と加工, Vol.36, No.408, pp.29–34, 1995.
- [33] 高田., 山崎: “切削状態予測のためのモデルベース切削加工シミュレーションシステム” 日本機械学会論文集C編, Vol.61, No.581, pp.266–272, 1995.
- [34] 柳本., 木内., 柴田., 井上: “形材非対称圧延のFEM解析手法とアングル材圧延への適応—形材圧延の汎用シミュレータの開発Ⅰ—” 塑性と加工, Vol.36, No.408, pp.41–46, 1995.
- [35] 柳本., 木内., 柴田: “多パス形材圧延のFEM解析およびプラスチシン実験・熱間鋼実験との比較—形材圧延の汎用シミュレータの開発Ⅱ—” 塑性と加工, Vol.36, No.414, pp.713–718, 1995.
- [36] Kosuge K., et al: “Manipulation of a Flexible Object by Dual Manipulators” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.318–323, 1995.
- [37] Kosuge K., Hashimoto, S., Yoshida, H: “Human-Robots Collaboration System for Flexible Object Handling” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1841–1846, Leuven, Belgium, May, 1998.
- [38] Hirai, S., et al: “Transplantation of Human Skilful Motion to Manipulators in Insertion of Deformable Tubes” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1900-1905, 1995.
- [39] 平井 他, “変形しやすい管状物体の挿入作業における人間の運動と作業状態識別則のロボットマニピュレータへの移植” 日本ロボット学会誌, vol.15, No.8, pp.1172–1179, 1997.
- [40] Y, F, Zheng., R, Pei and C, Chen: “Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2598-2603, 1991.

- [41] Al-Jarrah, O., Zheng, Y. F., Yi, K-Y., "Efficient Trajectory Planning for Two Manipulators to Deform Flexible Materials with Experiments" Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 312–317, 1995.
- [42] T, Wada., S, Hirai and S, Kawamura: "Indirect Simultaneous Positioning Operations of Extensionally Deformable Objects" Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.1333–1338, Victoria, Canada, October, 1998.
- [43] 和田., 平井., 川村: “伸縮柔軟物体上の複数点の間接同時位置決め作業の実現” 日本ロボット学会誌, vol.17, No.2, pp.282–290, 1999.
- [44] T, Wada., S, Hirai and S, Kawamura: "Planninig and Control of Indirect Simultaneous Positioning Operations for Deformable Objects" Proc. IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, pp.2572–2577, 1999.
- [45] 楊., 森., 小坂田: “制御FEMシミュレーションによる不均一曲率分布を持つ板材の三本ロール曲げ加工のロール移動軌跡の決定” 日本機械学会論文集C編, Vol.61, No.583, pp.1198–1203, 1995.
- [46] 福田., 木下., 新井., 松浦., 小菅: “シールをめくるロボットの機構と制御に関する基礎的研究（シールをめくる作業の分析とロボットの設計および動作実験）” 日本機械学会論文集C編, Vol.57, No.544, pp.3882–3889, 1991.
- [47] A, Joukhader., A, Deguet and C, Laugie: "A Collision Model for Rigid and Deformable Bodies" Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.982–988, 1998.
- [48] P, M, Taylor., et al: "Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials" Springer-Verlag, 1990.
- [49] 向井., 古川., 木村., 佐田., 小尾: “凸多面体の類似判定について” 精密工学会誌, Vol.58, No.6, pp.987–992, 1992.
- [50] 向井., 古川., 小尾., 木村., 佐田: “凸多面体の類似判定について－頂点数の異なる場合－” 精密工学会誌, Vol.59, No.6, pp.963–968, 1993.

関連研究 論文

1. Tokumoto, S., Fujita, Y., Hirai, S.: "Deformation Modeling of Viscoelastic Objects for Their Shape Control", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.767 – 772, Detroit, USA., May, 1999
2. 徳本真一, 平井慎一: “形状制御のためのレオロジー物体の変形モデリング”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp.1141 – 1148, 2000
3. Tokumoto, S., Fujita, Y., Hirai, S.: "Deformation Transition Graphs in Forming Operations of Rheological Objects", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.3071–3076, San Francisco, USA, May., 2000
4. 徳本真一, 平井慎一: “形状制御のためのレオロジー物体の変形推移グラフ”, 日本ロボット学会誌 (掲載予定), Vol.19, No.3, 2001
5. Tokumoto, S., Hirai, S.: "Vision-based Automatic Forming of Rheological Objects Using Deformation Transition Graphs", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, KOREA., May, 2001
6. 徳本真一, 平井慎一: “成形過程モデルを用いたレオロジー物体の成形制御”, 日本ロボット学会誌 (投稿中)
7. 斎藤拓哉, 徳本真一, 平井慎一: “視覚を用いたレオロジー物体の自動伸長成形”, 日本ロボット学会誌 (投稿中)

口頭発表

1. 徳本真一, 藤田 欣晃, 平井慎一: “形状制御のための粘弹性物体の変形モデリング”, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1545–1546, 北海道, 1998
2. 徳本真一, 藤田 欣晃, 平井慎一: “形状制御のための粘弹性物体の変形モデリング”, 第4回ロボティクス・シンポジア予稿集, pp.224–229, 仙台, 1999
3. 徳本真一, 藤田 欣晃, 平井慎一: “格子モデルを用いた粘弹性物体のモデリングとその成形作業過程の解析” ロボティクス・メカトロニクス'99講演会予稿集, CD-ROM, 東京, 1999
4. 藤田 欣晃, 徳本真一, 平井慎一: “レオロジー物体の変形推移グラフ”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.77-78, 東京, 1999

5. 平井慎一, 德本真一: “レオロジー物体の形状変形モデリング”, 日本機械学会 第9回 設計工学・システム部門講演会予稿集, pp.251–254, 大阪, 1999
6. 德本真一, 藤田 欣晃, 平井慎一: “成形制御のためのレオロジー物体の変形推移グラフ”, 第5回ロボティクス・シンポジア予稿集, pp.176–181, 神戸, 2000
7. 德本真一, 斎藤拓哉, 平井慎一: “変形推移グラフを用いたレオロジー物体の成形”, ロボティクス・メカトロニクス'00講演会予稿集, CD-ROM, 熊本, 2000
8. 德本真一, 斎藤拓哉, 平井慎一: “変形推移グラフを用いたレオロジー物体の成形制御”, アカデミックプラザ2000 研究発表要旨集, Vol.7, pp.122–127, 東京, 2000
9. 德本真一, 斎藤拓哉, 平井慎一: “レオロジー物体の変形実験による変形推移グラフの生成”, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.135–136, 草津, 2000
10. 斎藤拓哉, 德本真一, 平井慎一: “レオロジー物体伸長成形のための成形機械システム”, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.133–134, 草津, 2000
11. 平井慎一, 德本真一, 田中弘美: “仮想レオロジー物体の構築”, 計測自動制御学会SI部門シンポジウム, 2000

その他の研究 論文

1. Li, Z., Akishita, S., Tokumoto, S: “Failure Diagnosis System by Sound Signal for Automobile Engine”, Japan/USA Sympasium on flexible Automation, Vol.1, pp.427–432, 1996
2. Wada, T., B, J, McCarragher., Wakamatu, H., Hirai, S., Tokumoto, S: “Modeling of Hysteresis in Deformation of Rodlike Objects toward Their Manipulation”, Proc. Int.Conf.on Intelligent Robots and Systems 2000, October, 2000.

口頭発表

1. 黎子椰, 德本真一, 秋下貞夫: “エンジンの異常診断のための特徴抽出アルゴリズムについて”, 第73回日本機械学会通常総会学術講演会予稿集, pp.558–559, 東京, April, 1996
2. 德本真一, 秋下貞夫: “レールの振動伝達の能動制御(設計と実験)”, 第74回日本機械学会全国総会学術講演会予稿集, pp.451–452, 田辺, September, 1996

