液滴の流下現象のモデル化

中山 万希志*・井口 征士**

Dynamical Modeling for Drop Phenomenon

Makishi NAKAYAMA* and Seiji INOKUCHI**

In this paper, we discuss the first version dynamical modeling method for drop by using simple mathematical equations in order to create real time computer graphics in case that one operator want to communicate with the others about visual image or we construct a reference visual image for automatic control system and so on, for such kind of plant on the assumption that plant operators evaluate the process state for the plant based on the visual data inside plant through ccd camera and manipulate based on the rules constructed using operators language with experience. This model has following three blocks, first block is for the occurrence period which means that drop is formed at the end of a small pipe. Second block is for the growing period which means that drop is extended by gravity. The third block is for falling period which means that drop is falling after split. The feature for this model is that it is constructed using simple mathematical equations without repeat calculation and is able to represent several phenomenon according to different viscosity and surface tension for liquid by tuning some parameter and carry out real time visualization using computer graphics. We construct this model based on observation real phenomenon and confirmed that this model can simulate the phenomenon according to milk with 2 dimensional image by tuning some parameter for the equations within about 5% error ratio.

Key Words: model, drop, viscosity, liquid, computer graphics, process simulation

1. はじめに

旋回溶融炉やプラズマ溶融炉,あるいは熱分解溶融炉などでは溶融物の温度などが直接計測できず,そのプロセス運転の状態をカメラで捉え,これをオペレータがモニタリングしながら操業することがしばしばある。たとえばここで扱う例のように流体あるいは液滴が流下する画像をオペレータが目視で監視し,その物質自体の特性変化に伴う流下状態の変化を,粘性,色,発泡やガスの発生などのさまざまな画像の変化として捉える。粘性(ねばりけ)が最もよくこの状態変化を表わしている場合には,オペレータは粘性の度合いを,流れる物体のぶれや液滴がおちる時間周期など画像からある特徴量を経験的に評価し,“流れが途切れるようになったら燃料を増やせ”というような言語情報で経験的に培われた操業ルールに基づいて操作する。

このようなプロセスを自動化する第一ステップはまずオペレータの動作そのものを模範することにある。筆者らはこの

ような観点からファジィビジュアルフィードバック制御システムを開発し,汚泥旋回溶融炉に適用してきた。このプラントでは従来スラグと呼ばれる高温で直接温度計測が難しい生成物の流下状態をオペレータがモニタ画像により監視し,操業していた。そこでこのシステムではスラグの流量と流下位置のぶれを画像情報から自動検出し,オペレータの経験に基づくルールによりバーナの油量を修正するものである。本システムはすでに実機に適用され運用されている^{1)~4)}。

ところでこのようなシステムを将来的にさらに高度な制御系にしようとした場合やオペレータが提示する目的でコンピュータが仮想的にプロセス状態を示す画像を生成する場合には,ある種のモデルが必要となる。このモデルには画像情報として検出される物体の状態変化を記述でき,しかもオンラインでビジュアライズできることが望まれる。モデルが構築できることによる利点としては,以下のことが考えられる。

- ・オペレータの意思伝達手段として利用可能

オペレータ同士の操作ノウハウの共有は主に言語レベルで行われているが,モデルに基づく動的CGとして任意のプロセス状態を提示できれば,効果的な情報伝達や共有化につながる。

- ・物理ファクターのパラメータを変更してシミュレーションが可能

粘性や密度などの物理パラメータをモデルに組み込んでおくことにより,仮想的にパラメータを変更した場合の状態推

* (株)神戸製鋼所 生産技術研究所 神戸市西区高塚台 1-5-5

** 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町 1-3

* Kobe Steel, Ltd., Process Technology Research Lab., 5-5, 1 Chome, Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe

** Osaka University, Faculty of Engineering Science, 1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka

(Received October 21, 1998)

(Revised July 26, 1999)

移のシミュレーションや動的 CG によるビジュアライゼーションが可能となり、プロセス設計に役立たせることができる。

そこで筆者らはこのようなモデル構築の第 1 ステップとして、対象を熱分解溶融炉の溶融プロセスで観測できる液滴と考え、簡単化のためにここではガラス管の先端における液滴の生成から落下までの流下状態を形状的に簡単に表現でき、数個のパラメータでその状態変化を簡単に復元でき、2 次元化して高速に演算すれば動的 CG としても十分リアルタイムでビジュアライズすることが可能な現象モデルを新たに構築した。本モデルは液滴流下の物理現象をマクロに捉え、楕円体部、くびれ部などの部分的なモデルの合成として構築したもので、そのパラメータは実計測画像から求めている。従ってこのパラメータのみを変更することにより、たとえば粘性の高く、くびれ部が非常に長い流下状態等、さまざまな形態を表現することが可能である。

一方過去の研究を調査したところ、関連する基礎的な研究の中で、文献 5) では構造設計の分野において軟体という概念を利用してその形態決定を非線形連立方程式として定式化がなされている。文献 6) は 2 流体界面を通しての輸送現象の研究の立場から、ポテンシャルエネルギーの考え方をを用いて平板面の下方に生成する液滴の静的な形状に関して有限要素法に基づく議論がされている。文献 7) では文献 6) と同様に平板面の下方に生成された懸垂液滴の振動に関する議論がなされている。文献 8) では 3 次元の有限要素法に替わる新しい数値計算手法を提案し、その応用例として平板面上方に生成された静止液滴の形状に関して議論されている。

次に CG に関しては、文献 9) では板表面に生成される静止水滴をバネモデルで記述し、CG で表現する試みはされている。文献 10) では自由表面の解析も可能な矢部らによって提案された CIP (Cubic-Interpolated Propagation) 法という手法を用いて液滴が落下し水面に着水して飛び散る現象(ミルククラウン)をシミュレーションしている。文献 11) では有限要素法とマーカー表示法を併用し、自由表面問題に対する解析手法を提案し、液滴の落下問題と着水問題に対する応用例を示している。

一方工業応用の側面に関して、文献 12) ではインクジェットプリンタやスプレーのノズルからの噴射する流体の形状が安定するようなノズルの設計や電解強度の性質が議論されており、文献 13) では電場中のノズルからの電導性滴の毛管電気流体力学に関して議論されている。

上述したように過去の研究では、概して厳密なモデルと複雑な繰返し計算により、液滴の静的な形状を議論しており、動的な CG を前提として比較的簡単で、数個のパラメータを変更するだけで液滴が管の先端に生成され成長し、やがて切断されるまでのすべての形状表現が可能なモデルに関する論文は発表されていない。

本論では身近な流体物質として牛乳を選び、これがガラス管の先端から落下するまでの流下する現象の新しいモデル化

方法について記述した。流下現象は鉛直軸に対して軸対象であるため、記述を簡単化するために、2 次元的な表現でモデル化を説明しているが、これらの記述は簡単に 3 次元情報として再構成することができる。また将来的に均一でない物質へのモデルの拡張により、工業応用としてもより有用なモデルとして機能することができるものと考えている。

以下 2 章では液滴の流下現象の物理的計測、3 章では液滴の現象モデル、4 章ではモデルのビジュアライゼーションと評価、最後に 5 章にまとめを述べることにする。

2. 液滴の流下現象の物理的計測

液滴の流下現象のモデル化を行うために、まず液滴の流下現象の物理的計測を行った。Fig. 1 に実験システムを示す。ここでは撮影を容易にするために背景を黒にし、流体物質の一例として牛乳を材料に選び、これを貯え流し落とす容器として分液ロートを用いた。分液ロートの先端は直径約 2 mm 程度に絞り、液滴が生じやすいように加工している。流量調整つまみを調整し数秒間隔で液滴が流下するようにした。流下する現象は水平方向に設置した高速度 CCD カメラで 1/240 秒のレートで捉えるようにしている。ある液滴が流下した直後から次の液滴が流下するまでの間を上述のカメラで計測した。

結果を Photo. 1 に示す。T はフレーム番号を示す。また照明条件等の関係で液滴下部が若干いびつな形をしているが、撮影画面を日視で観察する限りではほぼ楕円形の形状と思われる。

写真からは以下の様子が観測できる。

- (1) 発生の発端では球の一部で形成されているように見える。
- (2) 管から液体が流入されてくるにつれ球が大きくなりやがて先端部と液滴部の間にくびれが生じてくる。
- (3) くびれた部分は時間とともに急激に細くなりやがて

Fig. 1 Experimental system

切断される。

- (4) 切断された後は液滴部はほぼ球形になり、くびれの切り口形状は球状部に吸収されてしまう。
- (5) 切断される時に液滴と管の先端の間に小さい液滴が生じる。

Photo. 1 Observation for drop phenomenon

生じる。

これらのうち、(5)については、さらに高速度のカメラを用いて生成過程を観測する必要があるため、このモデル化に関しては、照明条件等の改善も含めて今後の課題としたい。一方各フレームごとの液滴形状の輪郭線を画像処理によって求め、体積相当量を演算し、時間との関係を求めた。結果をFig. 2に示す。体積相当量は、画素を単位に液滴を微小な円柱の合成体として考え、液滴の鉛直軸方向中心線の各画素点において中心線から輪郭までを半径としてこれを2乗したものを軸方向に加算して演算した。グラフより体積相当量は時間に対してほぼ比例の関係があることが分かった。若干時間軸に対する液滴部の体積相当量に変動が認められるが、管の先端部が真円ではないために、撮影方向や陰など撮影環境の変化と画像処理上の誤差等と考え、本論文の主旨からして液滴の体積相当量は時間と比例するとして問題がないと考える。そこで議論を簡単化するために、以下では管から流れだす流量は時間あたり一定とし、時間を変数とした形状変化のモデル化として扱う。次章ではこの撮影画像を近似表現する液滴の2次元モデルについて述べる。

3. 液滴の2次元モデル

上述の液滴連続写真で初期状態から中央部にくびれがで始めるところまでを発生期、くびれができてから中央部が切断されるまでを成長期、切断されてから落下部が所定の完全な球になり、上部が初期状態にもどるまでを落下期と定義し、これらの3つの状態ごとにモデル化を行った。モデル化においてはFig. 3に示すように容器先端の口径を $2r$ とし、口径の中央を原点とし、鉛直下向きを x 軸の方向、右向きを y 軸の方向とした。また形状は左右対称と考え右側部分について定式化する。また液滴の大きさは流体物質と管の大きさによってきまると考え半径 R とする。以下それぞれについて述べる。

3.1 発生期のモデル化

写真を観測すると初期状態は大きな円の円弧が表面張力により容器の先端部から突出されている。時間とともにこの円弧の曲率半径が小さくなり先端部の半径に近くなっている。また半球形になった後は容器先端部の幅より大きくなりながら面積を増加させている。この部分は厳密には楕円体と考え

Fig. 2 Trend of volume

Fig. 3 Definition for axis

られるが、ここでは表記および説明の簡単化のために球形として説明するが、容易に楕円体としてもモデル化可能である。上記の観測結果から発生期では容器先端部を円の弦とし、この弦の垂直二等分線上を容器の内側から鉛直下向きに円の中心が移動していく。今この弦を形成する円の中心を $(x_o, 0)$ とすると円の半径 r' は

$$r' = \sqrt{r^2 + x_o^2} \quad (1)$$

となる。従って弦は

$$y = \sqrt{r'^2 - (x - x_o)^2} \quad (2)$$

ただし $|x - x_o| < r'$

となる。 r' は x_o が負の場合は単調減少し、 x_o が原点の場合に最小値を取り、正の場合は単調増加する。そこで流下初期のモデルは負の数 x_o がある初期状態 x_s から時間と共に増加し原点を経て、さらに正の値をとりながらやがて弦を形成する円が流下する液滴と同じ円の半径 R を持つまで増加しつづける。また演算は計測システムと同じ離散時間間隔 ΔT (ここでは物理観測で用いた高速度カメラのサンプリング間隔である $1/240 \text{ sec}$ とした) および x 軸の離散位置間隔 Δx により行い、それぞれ離散時間変数(フレーム数)として T 、 x 軸の位置変数として x_i を用い、最終的に以下の式でモデル化を行った (Fig. 4)。

$$\begin{aligned} x_o(T) &= f(T) \\ (x_o(T) : x_s \rightarrow x_e) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし

$$x_o = \sqrt{R^2 - r'^2} \quad (4)$$

$$r'(T) = \sqrt{r^2 - x_o(T)^2} \quad (5)$$

$$y_i(T) = \sqrt{r'^2 - (x_i(T) - x_o(T))^2} \quad (6)$$

Fig. 4 Modeling for drop occurrence period

ただし

$$x_i(T) - x_o(T) \leq r'(T) \quad (7)$$

粘性等の変化によってはこの半径 R を変更したり、円近似を楕円近似としたりすることにより適応できる。また関数 f は管への液体の流入量から近似できる関数であり、ここでは x_o の実測結果を基に、時間の一次関数として近似した。

3.2 成長期のモデル化

成長期にはいと表面張力が重力にたえきれず球の形状を保てなくなり、中間部分がくびれる現象がおこる。そこで以下では成長期のある時刻での形状モデルとそのモデルが時間を変数とした場合にどのように変化するかについて分けて説明する。

3.2.1 ある時刻の形状モデル

成長期の形状を観測データを元に解析してみると、先端部は丸みを帯び、中央部ではくびれが生じ管先端部ではまた広がりを見せてたれさがっていることがわかる。これらの現象を物理的に解釈してみると (Fig. 5)。

- (1) 先端部は表面張力によりまず球形になろうとするが、管先端部が固定されているために、球形のどこかで変形がおこる。
- (2) 変形の起こる場所は、厳密には球形部のすべての部分において管先端部の束縛の影響をうけていると考えられるが、マクロにみてある水平面で切断して、下方は完全な球形(楕円体)、上方は変形がおこっている部分と考える。
- (3) そこでこの境界面を2次元的には一種の固定端と考えて、くびれ部は管先端の固定端とこの固定端がひっぱりあって形成されるものとする。

くびれる説明は境界面をピンセットで上方にひっぱったと

Fig. 5 Modeling concept for drop growing period

考えた時の部分と管先端を固定端とみてこの束縛をうけながらやはりピンセットで下方にひっぱったと考えた部分の合成とした。ここでひっぱった時の現象は、物体の粘性や表面張力で決まる比率で幅方向に小さくなるものが合成されてできているとした。

(4) 形状を2次元的に考えて、このくびれ部と楕円部の境界線では接線の連続性が成り立つ。

一方切断の現象はくびれている最小幅の部分がそれ以下の重量に絶えうるかどうかで決まるものとした。くびれる部分の幅のしきい値は材料の粘性に関連した値として設定した。

そこでまず先端の楕円体部についてモデル化を行う。先端の楕円体部は、最大幅 R となる中心座標 x_0 を境に上部と下部で2つの楕円体から構成されると考えた。そこで2次元的には上部および下部の楕円はその偏平率から定まる係数を K_a, K_b とするとそれぞれ次式により記述できる。

上部楕円

$$y_i = \sqrt{R^2 - K_a(x_i - x_0)^2} \quad (8)$$

ただし

$$R^2 - K_a(x_i - x_0)^2 \geq 0$$

$$x_i < x_0$$

下部楕円

$$y_i = \sqrt{R^2 - K_b(x_i - x_0)^2} \quad (9)$$

ただし

$$R^2 - K_b(x_i - x_0)^2 \geq 0$$

$$x_i \geq x_0$$

次に楕円体の部分と容器先端の部分をつなぐ部分について定式化を行う (Fig. 6)。容器先端部の右半面は幅 a の固定端として、 x 軸の方向に Δx 進むことに対し、くびれ部では

Fig. 6 Modeling for drop growing period

Fig. 5 に示す考え方でひっぱり方向に円錐半径が減少すると考え、その比率は実験および経験的に一定値 $\alpha (< 1)$ と仮定した場合、その形状は

$$y_i = \alpha^{x_i} a \quad (10)$$

で記述される。また逆に流下する液滴の方も一定の幅 b の固定端が x_p の位置にあると仮定し、これも x 軸の負の方向に原点まで Δx 進むことに対しある一定比率 $\beta (< 1)$ で減少するとした場合、その形状は

$$y_i = \beta^{x_p - x_i} b \quad (11)$$

で記述される。また上記の固定端 x_p は次式のように先端の楕円体部の中心座標に比例するとし、次式で与える。

$$x_p = K_p x_0 \quad (12)$$

そこでここではこれらの2つの現象が組み合わさって起こっていると考え、2式を加算したものをモデルとして採用した。即ち

$$y_i = \alpha^{x_i} a + \beta^{x_p - x_i} b \quad (13)$$

$$(x_i < x_p)$$

で記述できるとした。今 y_p を固定端の y 座標とすると、それぞれの固定端では次式が成り立つ。

$$r = a + \beta^{x_p} b \quad (x_i = 0) \quad (14)$$

$$y_p = \alpha^{x_p} a + b \quad (x_i = x_p) \quad (15)$$

ここで y_p は固定端の y 座標であるが、同時に上部楕円体上の点でもあるため、次式が成立する。

$$y_p = \sqrt{R^2 - K_a(x_p - x_0)^2} \quad (16)$$

従って上記(14)~(16)の3式から a, b を求めることができる。また観測データを解析したところ α と β はほぼ等しいこ

とがわかった。よって最終的なモデルは

$$y_i = \alpha^{x_i} a + \alpha^{x_p - x_i} b \quad (17)$$

でモデル化される。切断する過程はくびれの幅の大きさに対してあるしきい値 TH を実測に基づき設定し、これにより切断の評価を行った。以上の考えで観測データはほとんどすべてこのモデルで形状は復元できた。そこで次に、任意の時間に形状を復元できるかが問題となる。つまり、ある体積相等量が V の時から ΔV 増加した場合に形状はどのように変化するかである。これに関しては、次節において述べることにする。

3.2.2 形状変化モデル

前章に記述したように、以下のモデル化の議論では採取したデータの何フレーム目かを変数 T として表現することにする。1 サンプルごとに体積が ΔV 増加したとして、どう形状が変化するかについて、次のように考えた。

まず先端部は時間とともにどんどん球形に近くなっていくので、楕円体部の体積増加量とくびれ部の体積増加量の合計が ΔV と等しくなる。

上記の楕円体部の体積増加量とくびれ部の増加量の比率を γ および $1-\gamma$ とし、今先端部の球形部の重心が $x_o(T-1)$ から $x_o(T)$ に変化したとすると、球形部の増加分が $\Delta V \cdot \gamma$ に等しいことから、楕円体部の中心から境界線の位置が求められる。すなわち

$$\gamma \Delta V = \pi \sum_{i=x_p(T-1)-x_o(T-1)}^{x_p(T)-x_o(T)} (R^2 - K_a i^2) \quad (18)$$

が成り立つ。次にこの境界線ではくびれ部と楕円体部が接線を持続的に保ちながら連結することから、

$$r = a(T) + \alpha(T)^{x_p(T)} b(T) \quad (19)$$

(管先端の固定端での制約条件)

$$y_p(T) = a(T) \alpha(T)^{x_p(T)} a(T) + b(T) \quad (20)$$

((x_p, y_p) 点がくびれ部上である条件)

$$y_p(T) = \sqrt{R^2 - K_a(x_p(T) - x_o(T))^2} \quad (21)$$

((x_p, y_p) 点が上部楕円体上である条件)

$$\left[\frac{d}{dx} (a(T)^x a(T) + b(T)) \right]_{x=x_p} = \left[\frac{d}{dx} (R^2 - K_a(x - x_o(T))^2) \right]_{x=x_p} \quad (22)$$

(x_p 点でのなめらかな接続条件)

が成り立つ。またくびれ部の体積増加から

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{x_p(T)} (a(T) \alpha(T)^i + b(T) \alpha(T)^{x_p(T)-i}) \\ & - \sum_{i=0}^{x_p(T-1)} (a(T-1) \alpha(T-1)^i \\ & + b(T-1) \alpha(T-1)^{x_p(T-1)-i}) \\ & = \sqrt{\Delta V(1-\gamma)/\pi} \end{aligned} \quad (23)$$

(18)~(23)において $x_o(T-1)$, $x_p(T-1)$, $a(T-1)$, $a(T-1)$, $b(T-1)$ を既知とすると、変数は $x_o(T)$, $x_p(T)$, $y_p(T)$, $a(T)$, $\alpha(T)$, $b(T)$ なので γ を仮定すると唯一解は求められる。ところが、これを解くには高い次数の式を解く必要があり、繰り返し計算となるため、ここでは、 x_o , α の変

化をデータから実測しこれを基にモデル化した。その結果、基本的には

$$\begin{aligned} a &= g(T) \\ &= e^{(A_1(T-B_1)+C_1)/D_1+E_1} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} x_o &= h(T) \\ &= e^{(A_2(T-B_2)+TC_2-D_2)/E_2} \end{aligned} \quad (25)$$

という形で近似できることがわかった。ただし $A_{1,2} \sim E_{1,2}$ は実験データに基づく定数で $g(T) > 0$ とする。このモデルによる予測値と実績値をそれぞれ Fig. 7 および Fig. 8 に示す。グラフよりほぼ正確に近似できていることがわかる。また x_p と x_o の比率は時間変化が大きくないことから、時間によらずに固定した前節と同じ K_p を用いて

$$x_p(T) = K_p x_o(T) \quad (26)$$

で近似した。従って最終的な時間関数としての形状変化モデルは、次式で記述できる。

$$\begin{aligned} (0 \leq x_i(T) < x_p(T)) \\ y_i(T) &= g(T)^{x_i(T)} a(T) + g(T)^{x_p(T)-x_i(T)} b(T) \end{aligned} \quad (27)$$

$$r = a(T) + g(T)^{x_p(T)} b(T) \quad (28)$$

$$y_p(T) = g(T)^{x_p(T)} a(T) + b(T) \quad (29)$$

$$y_p(T) = \sqrt{R^2 - K_a(x_p(T) - x_o(T))^2} \quad (30)$$

$$(x_p(T) \leq x_i(T) < x_o(T))$$

$$y_i(T) = \sqrt{R^2 - K_a(x_i(T) - x_o(T))^2} \quad (31)$$

ただし

$$R^2 - K_a(x_i(T) - x_o(T))^2 \geq 0$$

$$(x_o(T) \leq x_i(T))$$

$$y_i(T) = \sqrt{R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2} \quad (32)$$

ただし

$$R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2 \geq 0$$

3.3 落下期のモデル化

切断された直後はまだくびれの部分がのこっているが、表面張力の作用できりやなされた下部楕円体部はやがて球形に、また上部は初期状態にもどっている。これをモデル化するために、ここでは上述の比率 α がやがて 0 になるような時間関数を定義し、これによりくびれ部がやがて消失していく様子をモデル化した。ここでは上述のモデルにおいて切断される時の時刻を $T = T_n$ とし、比率 α の累乗としきい値により時間関数を定義し、くびれの部分を以下の式によりモデル化した。

まず中心座標は、自由落下するとして、次式で記述できる。

$$x_o(T) = \frac{1}{2} g(T - T_n)^2 + x_o(T_n) \quad (33)$$

ただし g は重力加速度

次に x_p が上部楕円体内に存在する場合 (i) と、存在しない場合 (ii) について分けて記述する。

(i) $x_o(T) - x_p(T) \leq R/\sqrt{K_b}$ の場合

$$(0 \leq x_i(T) < x_p(T))$$

$$\begin{aligned} y_i(T) &= (g(T)^{x_i(T) - \alpha_0}) a(T) \\ &+ (g(T)^{x_p(T) - x_i(T) - \alpha_0}) b(T) \end{aligned} \quad (34)$$

$$r = a(T) + (g(T)^{x_p(T) - \alpha_0}) b(T) \quad (35)$$

Fig. 7 Trend of x_o Fig. 8 Trend of α

Fig. 9 Modeling for drop falling period

$$y_p(T) = (g(T)^{x_p(T)} - \alpha_0) \alpha(T) + b(T) \quad (36)$$

$$y_p(T) = \sqrt{R^2 - K_b(x_p(T) - x_o(T))^2} \quad (37)$$

ただし

$$y_i(T) = 0 \quad (y_i(T) < 0) \quad (38)$$

$$(x_p(T) \leq x_i(T))$$

$$y_i(T) = \sqrt{R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2} \quad (39)$$

ただし

$$R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2 \geq 0$$

(ii) $x_o(T) - x_p(T) > R/\sqrt{K_b}$ の場合

$$x_p(T) = x_o(T) - R/\sqrt{K_b}$$

$$(0 \leq x_i(T) < x_p(T))$$

$$y_i(T) = (g(T)^{x_i(T)} - \alpha_0) r \quad (40)$$

$$y_i(T) = 0 \quad (y_i(T) < 0) \quad (41)$$

$$(x_p(T) \leq x_i(T))$$

$$y_i(T) = \sqrt{R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2}$$

ただし

$$R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2 \geq 0 \quad (42)$$

$$R^2 - K_b(x_i(T) - x_o(T))^2 \geq 0 \quad (43)$$

以上により切断後のモデル化ができる (Fig. 9).

4. モデルのビジュアライゼーションと評価

上述したモデルの妥当性を検証するためにパソコン上でビジュアライゼーションを行った。ここではまず牛乳の液滴の流下現象を基に上述の関数 $g(T)$ や K_b 等のパラメータをチューニングして対応するモデルを構築した。このモデルを基に主に成長期の現象をモデルにより生成した。この結果を

Fig. 10 Visualization results (milk)

Table 1 Evaluation for the Visualization

Frame No.	error ratio(%)
1	1.2436
100	0.1844
200	0.0704
300	0.0691
400	0.7137
410	0.4648
420	0.8839
430	0.7922
440	1.3873
450	1.6111
460	0.9878
470	0.4366
480	0.5656
490	4.6820
491	4.1069
492	4.6465
493	2.9597
494	1.9618
495	0.8931
496	2.2793
497	13.6737

Fig. 10 に示す。またモデル化誤差 Er を x 軸の離散化した各点 i に対するモデルによる出力 ym_i と実測値の ya_i を用いて

$$Er(\%) = \frac{\sum (ym_i - ya_i)^2}{\sum (ya_i)^2} \times 100 \quad (44)$$

で求め、これを Table 1 に示す。さらに上述した物質以外に、食品用のオイルでも本手法によりモデル化を行い、2 割程度のモデル化誤差でモデル化可能なことを確認した (Fig. 11 参照)。これらの結果より、本手法により第 1 次近似としては十分にモデルが構築されていることが確認できた。

Fig. 11 Visualization results (oil)

5. ま と め

本論ではオペレータが熱分解溶融炉のようにプロセスの状態を画像情報により判断し操作を行うようなプラントを想定し、オペレータの意思伝達や操業ノウハウの共有化等のための動画の生成やパラメータを変更させてさまざまな流下状態をシミュレーションする目的で流体、特に液滴の2次元表現モデルを構築した。本モデルは比較的少ないパラメータで液滴の流下する様子を高速に2次元的に表現できることに特徴がある。本手法の妥当性を物理計測画像と対比することにより確認した。今後はこのモデルを用いてリアルタイムのCG画像を生成することと、モデルの第2次近似を行い、さらに実際の物理現象に近づくように精度向上を行っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 中山, 前田, 岡崎: 画像データに基づく旋回溶融炉の燃焼状態評価手法, 第37回自動制御連合講演会, 287/288(1994)
- 2) 中山, 前田, 岡崎: 画像データに基づく旋回溶融炉の燃焼制御, SICE '95, 377/378(1995)
- 3) 馬野, ほか: ID3に基づくファジィ決定木の油中ガス分析診

断への適用について, Proceedings of the Fourth Intelligent FA Symposium, 201/204 (1993)

- 4) 中山, 前田, 北辻, 馬野, 井口: 旋回溶融炉のファジィビジュアルフィードバック制御システム, 計測自動制御学会論文集, 34-10, 1448/1456 (1998)
- 5) 中桐 滋: 形態と設計, 第43回応用力学連合講演会予稿集, 41/46(1994)
- 6) 宝沢光紀: 輸送現象における界面形状の問題, 化学工学協会年会研究発表講演要旨集, 303/304(1988)
- 7) T. Tsukada, M. Sato, N. Imaishi, M. Honzawa and K. Fujinawa: A Theoretical and Experimental Study on The Oscillation of A Hanging Drop, Journal of Chemical Engineering of Japan, 89/93(1997)
- 8) S. D. Iliev: Iterative method for the shape of static drops, Computer methods in applied mechanics and engineering, 251/265(1995)
- 9) 中島, 新井, 安居院: CGによる水滴の表現, 電子情報通信学会講演論文集, 6-284(1991)
- 10) 張, 田嶋, 矢部: CIP法による固体, 液体の水面との衝撃現象のシミュレーション, 第11回数値流体力学シンポジウム, 403/404(1997)
- 11) 森, 中山: 有限要素法と流体のマーカー表示法を併用した自由表面問題の解析, 日本機械学会第6回計算力学講演会論文集, 326/327(1993)
- 12) M. T. Harris and O. A. Basaran: Capillary Electrohydrostatics of Conducting Drops Hanging from a Nozzle in an Electric Field, Journal of Colloid Interface Science, 389/413 (1993)
- 13) M. T. Harris and O. A. Basaran: Equilibrium Shapes and Stability of Nonconducting Pendant Drops Surrounded by a Conducting Fluid in an Electric Field, Journal of Colloid Interface Science, 308/319 (1995)

[著 者 紹 介]

中 山 万希志 (正会員)

1985年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻制御工学分野修了。同年(株)神戸製鋼所入社, 電子技術研究所に所属。90年3月から技術研究組合国際ファジィ工学研究所へ出向, 92年4月から(株)神戸製鋼所電子技術研究所に帰任, 現在生産技術研究所勤務。主として制御理論, システム理論, ファジィ理論, 画像認識などの研究開発に従事(工学博士)。日本ファジィ学会, システム制御情報学会の会員。

井 口 征 士 (正会員)

1940年生。62年大阪大学工学部電気工学科卒業。64年同大学院修士課程卒業。65年基礎工学部制御工学科助手。69年助教授。84年教授(現システム工学科)兼イメージ情報科学研究所グループリーダー。その間, 66~67年フランス・サクレ原子力研究所, 79~80年南カリフォルニア大画像処理研究所客員。専門はパターン計測, 画像処理, 音響信号処理。最近「感性情報」に興味をもつ。著書「三次元画像計測」「感性情報処理」など。電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, IEEE, ICMA 各会員。