

# デジタル画像処理の二相流への適用

## 第 1 報—気泡画像の抽出

### Application of Digital Image Processing in Two-Phase Flow 1st Report—Extraction of Bubble Image

ボージン ドネブスキー\*・佐賀徹雄\*\*・小林敏雄\*\*・瀬川茂樹\*\*  
Bozin DONEVSKI, Tetsuo SAGA, Toshio KOBAYASHI and Shigeki SEGAWA

#### 1. ま え が き

沸騰を伴う気液二相流は、広く工業プロセスに出現し、この流れ場の解明はきわめて重要な課題となっている<sup>1)</sup>。しかし、現象の複雑さから、数値シミュレーションによる解析はもとより実験的にも現象の解明は十分にされていない。そこで、本研究では、気液二相流の解析にデジタル画像処理技術を適用した、実験的な解析手法を提案する。鉛直二重円管内のサブクール沸騰を対象に、管内のヒーター部で発生した気泡の、発生—成長—離脱—凝縮—消滅にいたるまでの一連の過程を高速度撮影し、これを画像解析するシステムを構築した。

第 1 報では気液二相流中の気泡部を自動的に抽出する画像処理方法を、第 2 報では抽出した気泡の動的な挙動の解析について、それぞれの詳細を述べる。

#### 2. 流れの可視化と画像処理システム

本研究で対象とするのは、図 1 に示すような環状流路をもつ鉛直二重円管内での強制対流のサブクール沸騰である。供試二重円管の内側パイプ（外形  $d=12.7\text{mm}$ ）の一部に加熱源のヒーターが設置され、外側の管には管路内の流れを可視化するために透明なガラス管（内径  $D=25\text{mm}$ ）が用いられている。熱流束、管内流量、流体温度および圧力などは管路に連結された制御機構により設定される。この流れ場は、16mm 高速度カメラと水銀ランプの光源（200w）を供試管路を挟み正対させてトラバース装置上に設置して、撮影・記録される。管路内の気液二相流の流動を光源からの透過光により高速度撮影するものである。なお、光源からカメラへ入射される光強度分布のむらを減少させるため、コリメートレンズとすりガラスが、光源前部

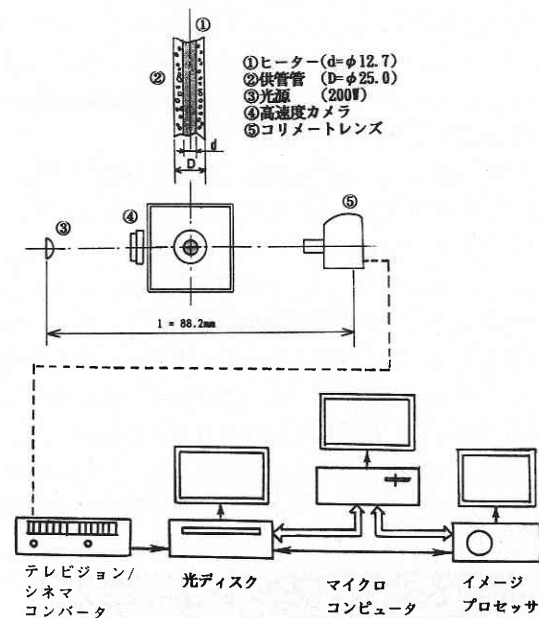


図 1 沸騰気液二相流の可視化と画像処理システム

と供試管路の間に設置されている。また、円管壁での屈折率の影響を低減させるため供試管路は矩形のガラス管の内部に配置されている。

16mm 高速度カメラで撮影（2000コマ/秒）された鉛直円管内の気液二相流は、テレビジョン/シネマコンバータにより 16mm フィルムから NTSC 方式のビデオ信号に 1 コマ毎に連続的に変換される。従って、ビデオ画像間の時間間隔は 0.5ms である。変換された NTSC ビデオ信号は一旦、S-VHS ビデオテープに記録され、解析対象となる画像が光ディスク上に記録される。画像処理システムはアナログ光ディスク（SONY LVS-5000, LVR-5000）、イメージプロセッサ（NEXUS 6410）およびマイクロコンピュータ（NEC PC9821AP）で構成されている。光ディ

\*セントクレメント オフリドスキー大学

\*\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研究速報

スク上から解析対象となる画像が選択され、順次に画像処理装置に A/D 変換されて 512×480 画素、8bit のデジタル画像として入力される。これらの画像は、独自に開発したソフトウェアにより自動的に解析される。

### 3. 気液二相流中の気泡の画像解析

図 2 に解析対象とする気泡画像  $F_b$  の一例を示す。画面左側の円筒ヒーター上で発生した気泡は次第に成長し、ヒーター上をスリップしながら上方に移動し、やがてヒーターから離脱する。強制対流中に放出された気泡は、上方に運ばれながら凝縮、消滅していく。管路内のヒーター上では、このような気泡の発生、消滅がつぎつぎと繰り返されている。本画像解析は、沸騰により発生する気泡の挙動をその輪郭を抽出し、気泡の成長や凝縮の過程、あるいは熱流体中の気泡の移動速度や移動軌跡などを自動的に解析することにより、サブクール沸騰における熱流動現象を定量化しようとするものである。

画像解析の第 1 ステップは画像上の気泡の抽出である。図 2 の気泡画像の例からもわかるように、気泡部には、照明光の気泡界面での光の屈折により高輝度スポットが出現している。しかもこのスポットの輝度や形状、位置などが気泡の変形に伴って不規則に変化している。同時に、照明光源の強度むら、および管内熱対流により生じる透過光の強度のむらなどが混在している。このような画像の濃度むらの問題の他にも、高速度撮影時のカメラの振動による画像間の相対的な座標ずれの問題が存在する。これらの問題に対処するため、以下に示すような手順で入力画像に前処理を施し、気泡画像を抽出することにした。

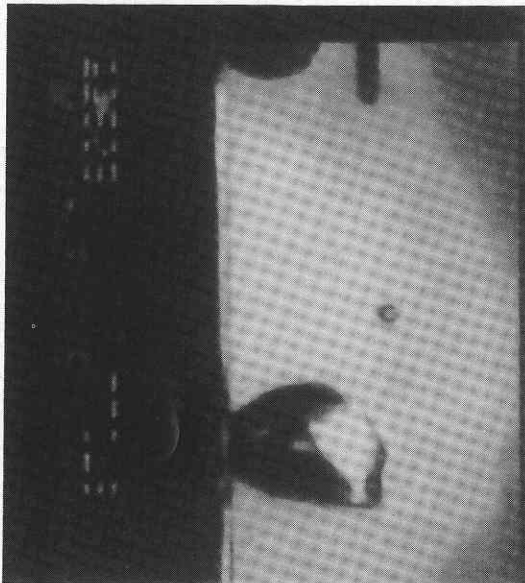


図 2 気泡画像の一例

### 3.1 背景画像の作成

本実験では画像の背景濃度分布に対応する画像データが存在していない。そこで、解析対象とする気泡画像  $F_b$  から背景画像  $F_0$  を作成し、平均的な背景の濃度分布を決定した。背景濃度の時間変化が比較的少ないことから、数フレーム分の気泡画像上で、 $M \times N$  画素のスリット状の画像マスクを画面下から上に気泡を含まないように移動させ、各スリット位置における画像の濃度分布から背景画像  $F_0$  を合成した。ここでは標準的には 64×480 画素のマスクを用いているが、気泡画像中の気泡の数やサイズに応じてマスク幅や計測位置を変化させている。この  $F_0$  に、(1)、(2) および (3) 式のフィルタリング処理を順次に施して、画像のノイズ除去と平滑化が行われる。図 3 にフィルタリング処理に用いた 3×3 画素の画像マスクを示す。

$$g = \min [f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8] \quad (1)$$

$$g = \max [f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8] \quad (2)$$

$$g = [f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8] / 9 \quad (3)$$

ここに  $f$  はフィルタリング処理前の画像の画素濃度値で、 $g$  はフィルタリング処理後のそれである。図 4 にノイズ処理後の背景画像  $G_0$  を示す。

$f_4$	$f_3$	$f_2$
$f_5$	$f_0$	$f_1$
$f_6$	$f_7$	$f_8$

図 3 3×3 画素の画像マスク

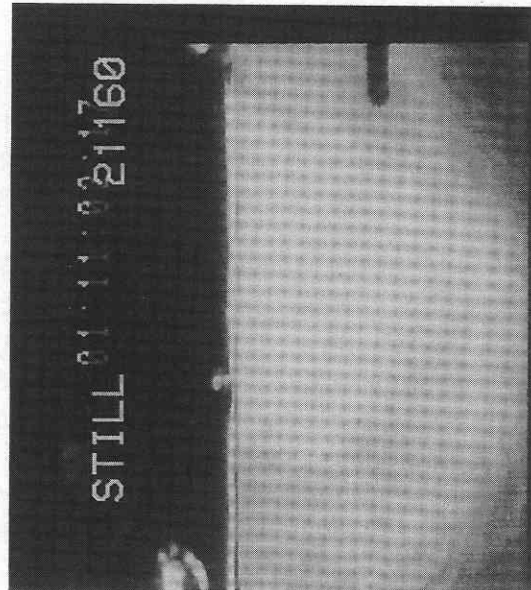


図 4 背景画像の作成

### 3.2 画像座標の基準化

高速度撮影時のカメラの振動により、画像間には相対的な座標位置のずれが生じている。そこで、位置が既知である基準ワイヤー（図2の画面右上部に撮影されている棒状のワイヤー、径： $\phi 0.5$ ）を管路内に設置し、この基準ワイヤーを用いて画像間の座標を基準化し、同時に画像と実長との変換係数を定めた。一連の処理対象画像中で基準時刻  $t_0$  を定め、これを基準画像  $F_{b0}$  とする。この  $F_{b0}$  に対して処理対象となる気泡画像  $F_{bn}$  の座標を、基準ワイヤー位置が一致するよう移動させ、画像間の相対的な位置を合わせる。位置合わせに先立ち、まず画像  $F_{b0}$  と  $F_{bn}$  のノイズ処理が行われる。ついで、ノイズ処理された基準画像  $G_{b0}$  と気泡画像  $G_{bn}$  との基準ワイヤーが最もよく一致する位置を、(4)式により、 $G_{bn}$  の基準ワイヤーまわりで探査して検出する。

$$C_R = \frac{\sum_{i,j=1}^{n^2} (d_{0i,j} - \overline{d_{0i,j}}) (d_{1i,j} - \overline{d_{1i,j}})}{\left\{ \sum_{i,j=1}^{n^2} (d_{0i,j} - \overline{d_{0i,j}})^2 \cdot \sum_{i,j=1}^{n^2} (d_{1i,j} - \overline{d_{1i,j}})^2 \right\}^{1/2}} \quad (4)$$

ここに、 $d_{0i,j}$  は基準画像  $G_{b0}$  の基準ワイヤーまわりに設置した基準マトリクス  $M_0$  ( $13 \times 13$ 画素) 内の画素の濃度値、 $d_{1i,j}$  は処理画像  $G_{bn}$  の基準ワイヤーまわりに設置した探査領域内 ( $33 \times 33$ 画素) の参照マトリクス  $M_{cn}$  ( $13 \times 13$ 画素) の画素の濃度値である。 $M_0$  に対する  $M_{cn}$  の濃度の相互相関係数  $C_R$  が最大値をとるとき、 $G_{b0}$  と  $G_{bn}$  の2画像間の基準ワイヤーの位置が最もよく一致する。 $C_{Rmax}$  における  $M_0$  と  $M_{cn}$  の中心位置座標  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_c, y_c)$  から、 $G_{bn}$  の  $G_{b0}$  に対する座標ずれ  $e = (x_0 - x_c, y_0 - y_c)$  を算出し、気泡画像  $G_{bn}$  の座標を  $e$  だけ座標変換して、2画像間の座標の位置を合わせている。

なお、背景画像  $F_0$  の作成時にも、基準時刻の気泡画像  $F_{b0}$  に対して、同様の画像間の位置合わせを背景画像の作成に用いる全ての気泡画像に対して行い、画像間の座標を統一している。

### 3.3 気泡輪郭の抽出

図5は気泡部の中心線付近の濃度分布の一例である。この濃度分布からわかるように、不均一な濃度の背景上に気泡が存在し、しかもこの気泡部には高輝度スポットが形成されている。気泡はフレーム毎にサイズ、位置、形状が不規則に変化し、それに伴って気泡部の濃度分布、高輝度スポットの出現する位置や大きさが複雑に変化している。単純な鮮鋭化処理やしきい値処理では、気泡部を画像の背景から正確に抽出することが困難である。そこで以下のような処理方法を考案し、気泡部を画像から自動的に抽出した。

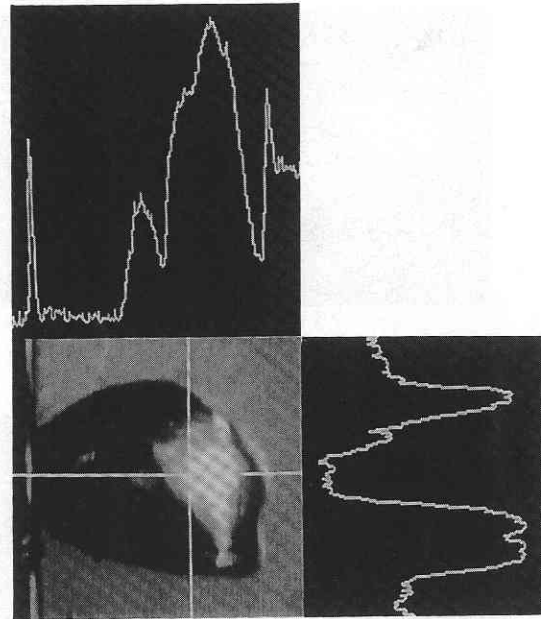


図5 気泡部中心線付近の画像の濃度分布

気泡の輪郭抽出における最初にステップは背景処理である。まず、気泡画像  $G_b$  と背景画像  $G_0$  を(5)式のように画像間演算して、背景濃度むらを補正した気泡画像  $G_B$  を作成する。

$$G_B = |G_b - G_0| \quad (5)$$

図6(a)に画像  $G_B$  を示す。背景の濃度むらは補正されているが、気泡部が微弱となり、しかも気泡の境界付近が高輝度スポットにより途切れかけている。そこで、画像  $G_B$  の気泡部を強調するため、(6)式の鮮鋭化処理を画像  $G_B$  に施して、図6(b)のような画像  $\nabla G_B$  を作成する。

$$g = \max[|f_1 - f_5|, |f_2 - f_6|, |f_3 - f_7|, |f_4 - f_8|] \quad (6)$$

ついで、この画像  $\nabla G_B$  を画像  $G_B$  に加算処理して、図6(c)のような気泡部を強化した画像  $G_{Bi}$  を作成する。

$$G_{Bi} = |G_B + \nabla G_B| \quad (7)$$

画像  $G_{Bi}$  に対してこの画像強化処理を、気泡境界付近の画像濃度に応じて数回繰り返す。気泡部境界付近の濃度が十分に強化されたと判断されたときこの処理を終了する。

この画像  $G_{Bi}$  にしきい値処理を施して2値画像を得る。2値画像では、気泡内部の高輝度スポット周辺にできた0の値をもつ領域を埋める穴埋め処理が行われる。ついで、拡大・収縮処理により気泡境界部の途切れの修復や平滑化がなされ、図7(a)のような気泡の2値画像を得る。この2値画像に輪郭追跡処理<sup>2)</sup>を施すと、図7(b)の気泡輪郭

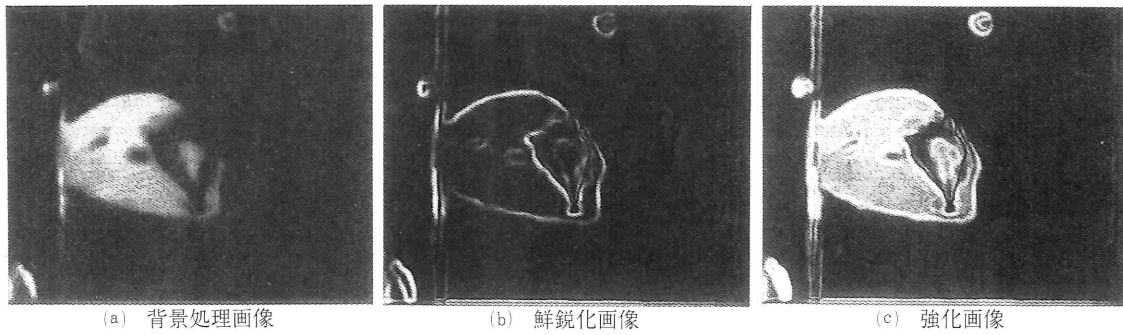


図6 気泡画像の改善

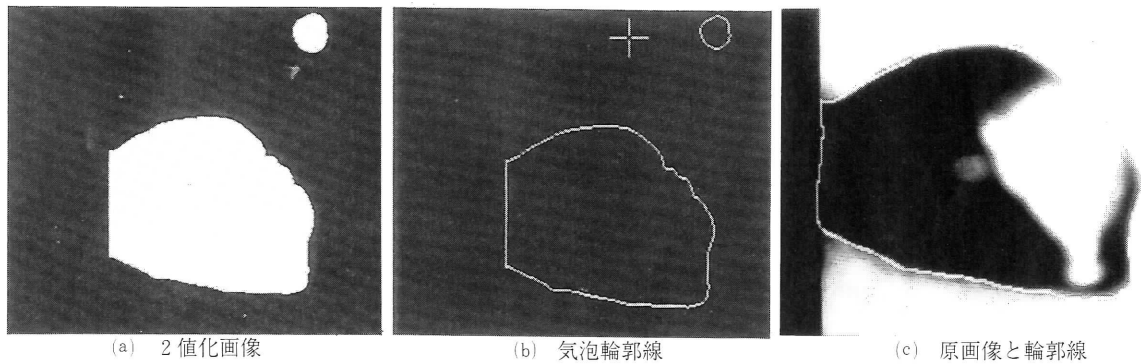


図7 気泡輪郭の検出

線が抽出され、これを原画像に重ね合わせると図7(c)のようになる。上述の一連の処理により気泡部が正確に検出されたことがわかる。この気泡輪郭の情報に基づいて、沸騰気液二相流の非定常解析が行われる。

#### 4. ま と め

沸騰を伴う気液二相流を解析するための画像処理システムを構築した。不規則な濃度分布をもつ気泡画像をその背景画像から自動的に抽出するためのアルゴリズムを開発し、気泡輪郭の抽出に適用できることを確認した。

(1996年3月19日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Donevski, B., Shoukri, M., and Mosher, D., Application of digital image processing for bubble dynamics in subcooled flow boiling, Research Report, Department of Mechanical Engineering, McMaster University (Canada), Report No. ME/89/TF/RI, 1989.
- 2) Eccles, M. J., Mcqueen, P. C., Rosen, D., Analysis of the digitized boundaries of planar objects, Pattern Recognition, Pergamon Press, 9 (1987), pp. 31-41.