

デジタル画像処理の二相流への適用

第2報—気泡の動的解析

Application of Digital Image Processing in Two-Phase Flow

2nd Report—Dynamic Analysis of Bubble Motion

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

前報では、沸騰気液二相流中の気泡を画像上から検出するための画像処理アルゴリズムの詳細を述べた。本報では、この画像処理アルゴリズムを沸騰気泡の過渡現象の解析に適用する。垂直円管の環状流路内で繰り返される、気泡の発生、消滅という非定常な気泡の沸騰サイクルを画像計測の特性を生かしながら定量化する。すなわち、過熱ヒーター上で沸騰により発生した気泡を画像上で検出し、その輪郭情報から気泡の成長時間、気泡消滅までの気泡寿命、あるいは気泡の移動軌跡、移動速度などを定量的に計測するものである。同時に、管内の気泡径の分布を計測し、管内のボイド率とその時間変化を計測した。

2. 沸騰ループ

図1は、本実験に用いた沸騰ループの概要である¹⁾。低圧型の沸騰ループは、主として供試流体の温度を電気ヒーターと水冷コイルによりコントロールする恒温水槽、送水ポンプ、予熱器そして垂直のプレキシガラス管の環状供試管路とその内部の円筒パイプに設置されたステンレスヒーターで構成されている。供試流体にはガス抜きされた蒸留水が用いられ、恒温槽内で温度設定されて送水ポンプによりロータメータと予熱器を通じてガラス製の供試管路の下部に送られる。供試管路は長さ約1.1mの鉛直管路で、内部を可視化するために内径 $\phi 25$ のガラス管が用いられている。このガラス管路の内部には外径 $\phi 12.7$ の円筒パイプが、ガラス管路と同心に置かれ、その高さの中央付近のテスト部に長さ306mmの加熱用のステンレス箔ヒーターが設置されている。環状流路の水力半径 d_H は6.15mmである。このヒーター部の上下には、ヒーターと同径の薄

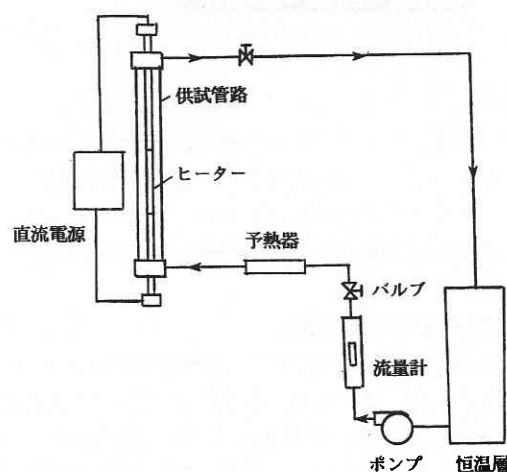


図1 沸騰ループ

い管壁の銅パイプが、長さ340mmと500mmで接続されている。ステンレス箔ヒーターは55KWの直流電源により一様加熱される。試験管路の下部から流入した供試流体は、加熱されていない環状流路を上方に向かって流れ、テスト部のヒーターで加熱され沸騰して気液二相流となる。気泡は、引き続き非加熱の環状流路部で急激に消滅する。管内の圧力と流量は供試管路の上流と下流に設置された2つのバルブおよび送水ポンプとにより制御される。本報で解析対象とするのは低圧のサブクール沸騰で、熱流束密度は $27.2\text{W}/\text{cm}^2$ 、圧力と流量はそれぞれ1.21barと384g/sで、サブクーリングは 10.4°C である。

3. 気泡の画像解析

図2に、テスト部で発生した気泡のある時刻における入力画像を示す。本画像解析における画像の時間間隔 Δt は0.5msで空間分解能は0.025mm/画素である。このような画像から前報の画像処理方法にしたがって気泡の輪郭が抽

*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



図2 管内の沸騰気液二相流

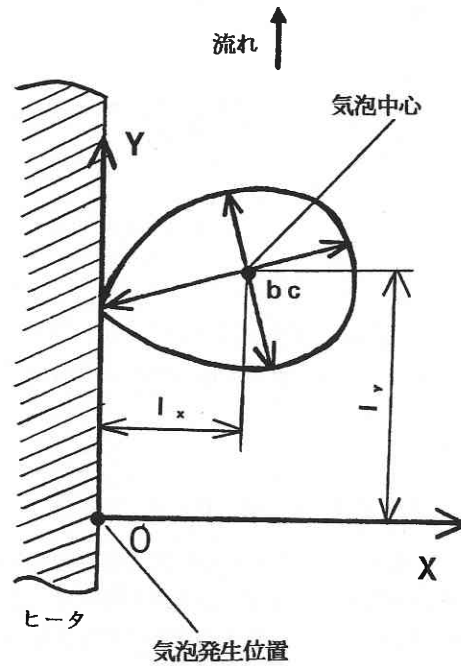


図3 画像解析される気泡のパラメータ

出される。テスト部の加熱壁まわりでは沸騰により、気泡の発生、成長、ヒーターからの離脱、凝縮そして消滅が繰り返されている。一連の画像から、気泡の移動軌跡、気泡の形状、サイズなどの時間的な変化、あるいは気泡の成長時間、寿命などの動的な気泡の沸騰サイクルが、以下のように画像解析される。

3.1 気泡の輪郭情報の抽出

図3はある時刻 t_n の瞬間の気泡輪郭の模式図である。気泡画像からは、まず気泡の輪郭で囲まれた気泡領域が楕円近似され、その重心位置 b_c (気泡の代表位置) と慣性の主軸 d_x, d_y が算出される。ここでは、気泡の代表寸法として、気泡の容積相当の等価半径 r_b を (1) 式のように算出している。

$$r_b = (3V_b/4\pi)^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 V_b は楕円近似した気泡画像の長軸、短軸から近似的に求めた気泡の容積である。

ヒーター上で検出された気泡はその代表位置 b_c の情報をもとに連続する画像上で、追跡プログラム²⁾によりその移動が経時的に追跡され、移動軌跡 B_T が同定される。気泡の移動軌跡の検出により、その気泡の沸騰サイクルが決定される。ついで、沸騰サイクルにおける各時刻毎の気泡の代表位置 b_c から、気泡の管軸と管径方向の移動距離 l_x, l_y が、2時刻間の気泡の移動距離と Δt とから気泡の移動速度 u, v がそれぞれに求められる。同時に、ヒーター上で成長する気泡の容積 V_b と等価半径 r_b の時間変化、気泡径が最大径に達するまでの成長時間 t_G 、成長した気泡がヒーターから離脱し、強制対流中に放出されて凝縮、消滅するまでの気泡の寿命 t_L などが画像解析される。なお、気泡の移動軌跡の検出においては、気泡同士が接触してい

ない、孤立気泡を選択して画像解析している。

3.2 気泡挙動の動的画像解析

一例として、図4に気泡の発生から消滅にいたるまでの沸騰サイクルを、気泡の輪郭画像を用いて示す。本実験では、画像の時間分解能がやや不足しているため、ヒーター上にはごく微細な気泡が突然に出現するが、ここでは、気泡がヒーター面で検出された時刻の1時刻前を気泡発生時刻 t_0 と定義して、この時刻を基準に気泡の動的解析を行うものとした。図には、ヒーター表面で発生した蒸気泡が

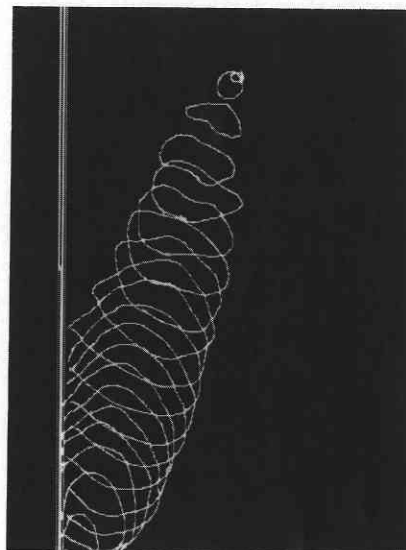


図4 気泡輪郭による気泡の発生、消滅の表示

その形状を変化させながら成長し、ある時点でヒーターから離脱して周辺の強制対流中へ放出され、凝縮しながら移動、消滅していく様子が示されている。気泡の発生は0と1コマ目の間で、気泡の離脱は20と21コマ目の間、消滅は36と37コマ目の間で起こっている。

3.3 沸騰サイクルと気液二相流の相特性

図5に、図4の気泡の気泡径 r_b と移動距離 l_x, l_y の時間変化を示す。図中、白丸は気泡がヒーター表面上に接触していることを、黒丸は気泡がヒーター表面から離脱して強制対流中に放出されていることを意味している。図6にこの気泡の移動速度 u, v を示す。これらの計測結果からは、ヒーター表面の気泡は発生後に急速に成長すること、気泡はヒーター表面上に付着して成長しながら管上方にスライドしていくこと、気泡がほぼ球形になり最大径付近に達した後に、ヒーター表面から離脱して強制対流中に放出されることなどがわかる。放出された気泡は流れの中で急速に凝縮しながら、またその移動速度を変化させながら消滅していくことが定量的に計測されている。この気泡の成長時間 t_G と寿命 t_L はそれぞれ8.0msと18.5msである。

図7にいくつかの気泡の移動軌跡を示す。流体力と熱、浮力などとのバランスにより決定される気泡の軌跡は、上述の実験条件下では図に示すように類似の軌跡をとる気泡が多いようにみえる。しかし、発生した気泡がほとんど

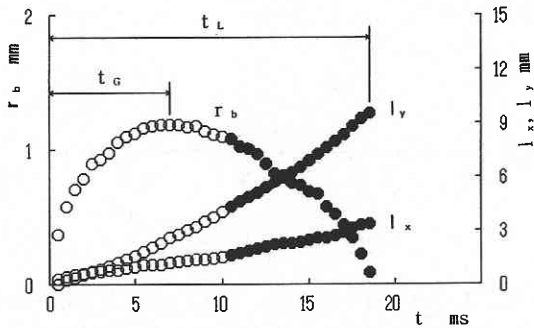


図5 気泡サイズの変化と気泡の移動量

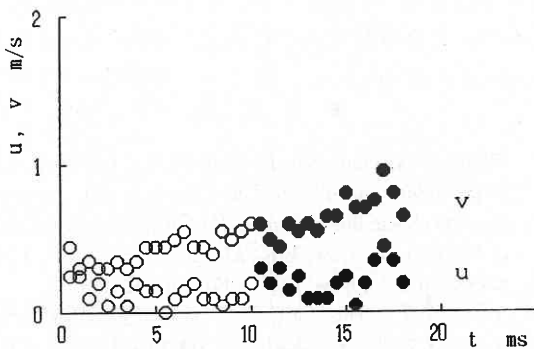


図6 気泡の移動軌跡

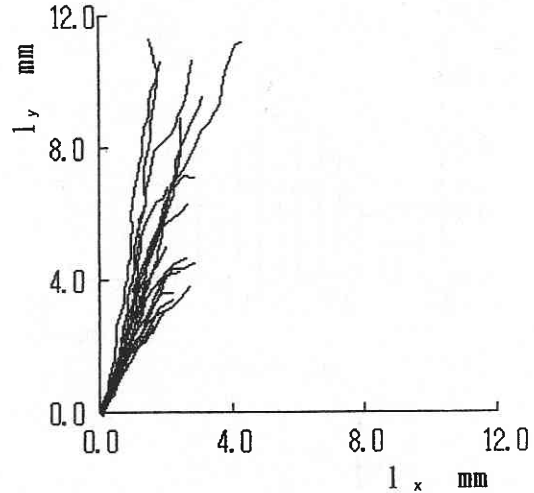


図7 気泡の移動速度

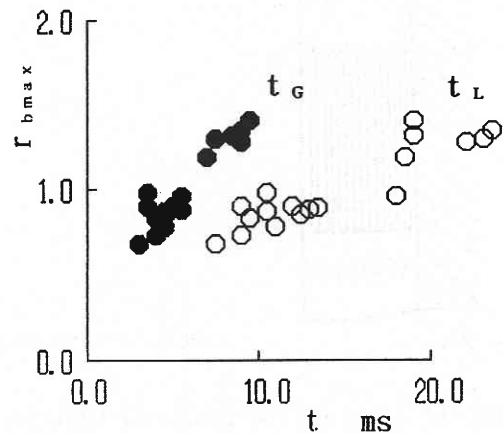


図8 最大気泡径と成長時間、気泡寿命との関係

ヒーター表面に沿って移動、成長を続け、離脱直後に消滅するケース、あるいは気泡が発生後すぐにヒーターから離脱して流れに放出されるような計測データなどが含まれている。気泡のヒーター上での成長の度合いに応じて、気泡の移動軌跡や気泡寿命が変化している。一例として、気泡の最大径とその成長時間、および寿命との関係を図8に示しておく。

したがって、例えば過熱壁近傍での半径方向の平均的な相分布特性を予測するような場合、大量の画像データの統計的な処理が必要となる。図9は本実験条件下でのテスト部における気泡径分布である。このような気泡径分布をもつ沸騰気液二相流の管内の相特性を以下のように調べた。図10に示すような検査面 S (5.625mm (x 方向) × 12mm (y 方向)) を管内に設定し、これを半径方向に15の小領域 (s₁ から s₁₅) に等分割して、各小領域で連続する200フレームの画像からボイド率分布の時間変化を調べた。ここ

研究速報

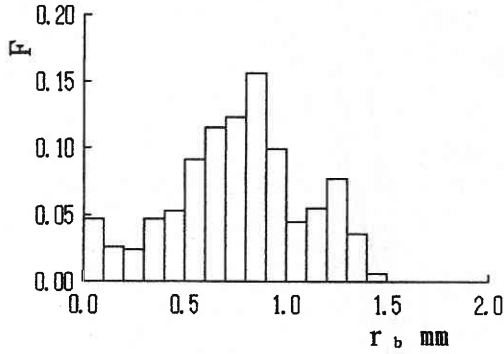


図9 気泡径分布

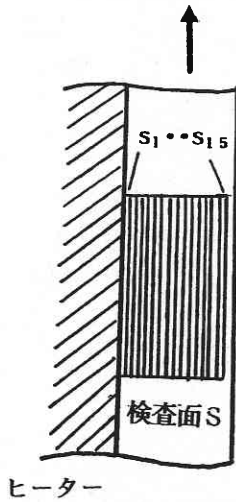


図10 ボイド率の計測

に、局所のボイド率 α は、各小領域 s 内の気相部 s_a と液相部 s_l の面積比、 $\alpha = (s_a/s_l + s_a)$ として求めている。図11に s_1 と s_7 におけるボイド率の時間変化を示す。気泡の発生、消滅あるいは気泡のサイズ変化によりボイド率が周期的に変動していることがわかる。同時に、管径方向のボイド率が異なっていることがわかる。そこで、 s_1 から s_{15} までの時間平均的な半径方向のボイド率分布を求めると図12のようになる。本サブクール沸騰においては、環状流路内の過熱壁から半径方向外側にむかいボイド率が急激に低下していることが分かる。

これらのデータは流量、熱流束、サブクール度などの実験条件に対して集積されることになる。本画像処理手法による動的な計測のデータベース構築とそれを用いた統計的な解析データは沸騰気液二相流のモデルリングに有効な情報を与えるものと期待される。

4. 結 論

沸騰を伴う気液二相流を実験解析するためのデジタル画像処理システムを構築した。気泡の発生から成長、消滅

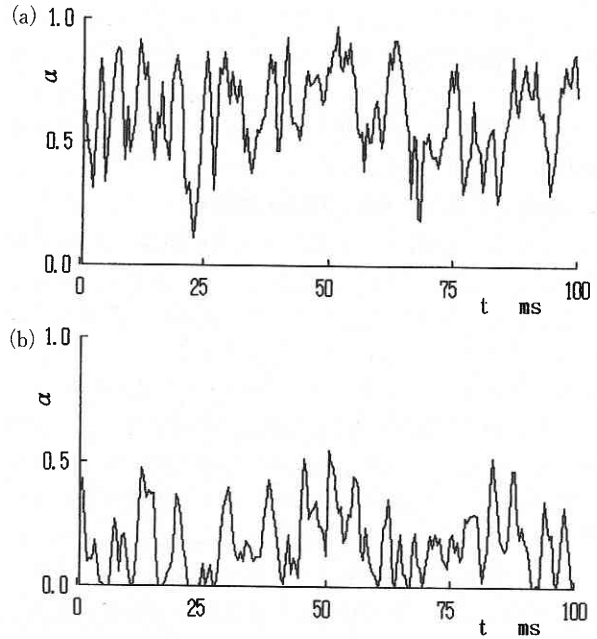


図11 ボイド率の時間変化 (a) s_1 , (b) s_7

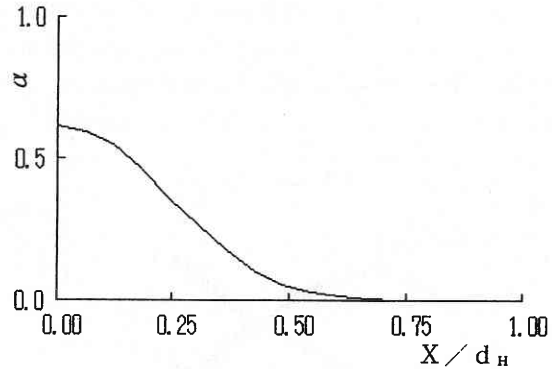


図12 平均ボイド率分布

にいたるまでの沸騰サイクル、あるいは管内の相分布特性などを動的に画像計測する技術を開発し、沸騰気液二相流における実験解析の一手法として提案した。今後、この画像処理手法を用いて低圧下でのサブクール沸騰におけるデータベースを構築するとともに、計測の3次元化をはかっていく予定である。(1996年3月19日受理)

参 考 文 献

- 1) Shoukri, M., Donevski, B, Judd, R and Dimmick, G. R., Experiments on subcooled flow boiling and condensation in vertical annular channels, Phase-Interface Phenomena in Multiphase Flow, Eds., Hewitt, G. F., et. al., Hemisphere Pub. Co., New York, 1991, pp. 413-422.
- 2) 小林, 佐賀, 瀬川, 神田, 二次元流れ場の実時間デジタル画像処理システムの開発, 日本機械学会論文集 (B編), 55-509 (1989), pp. 107-114.