D111 ベンチュリ管式微細気泡発生装置のボイド率特性 (定電流法を用いたボイド率計測)

Measurement of void fraction in a microbubble generator with a Venturi tube (Measurement by Constant Electric Current Method)

○学 上澤 伸一郎 (筑波院)
学 野村 康通 (筑波大)

正 金子 暁子 (筑波大)
正 阿部 豊 (筑波大)

Shinichiro UESAWA, Akiko KANEKO, Yasumichi NOMURA and Yutaka ABE
Tsukuba University, 1-1-1, Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573

Recently, microbubbles are utilized in various engineering fields. We focus on one of the microbubble generator which is shaped a Venturi tube. Microbubbles are generated with breakup of bubbles due to the rapid pressure recovery in it even under the high void fraction conditions. In order to clarify the mechanism of the bubble breakup and to optimize the generator to apply in various fields, changing of void fraction through a Venturi tube and the generated bubbly are necessary. We applied an electro-void fraction meter proposed in nuclear power engineering field to measure void fraction of microbubbles. The principle of the meter is that electrical resistance of air-water two-phase flow changes with the void fraction. In this study, we discussed possibility of measurement of bubbly flow with microbubbles by Constant-Electric-Current-Method (CECM) and effectiveness of Maxwell's theory. As a result, it was confirmed that the void fraction measurement of microbubbles with the present method was possible with Maxwell's theory which is used for estimation of the correlation between void fraction and resistance.

Key Words: Void fraction measurement, CECM, Two-phase flow, Microbubbles

1. 緒言

マイクロバブル (以下, MB) は船舶の抵抗低減技術や水質浄化技術等の工業的応用に加え, 超音波診断用の造影剤などの医療的応用も進んでいる。また近年では超音波速度分布流速計のトレーサー粒子にも応用されつつある⁽¹⁾。そのためMBを少ないエネルギーかつ簡単に発生させる手法が求められる。MB発生手法として多孔質板法, 加圧溶解法, せん断流法などが考えられている。本研究ではベンチュリ管を用いた気泡崩壊を利用した方法を採用している。このシステムは構造が単純であり, 高ボイド率条件においても200 μm 以下のMBの発生が可能であるという特徴を有する。Fig. 1のように管の喉部より下流で急激な圧力回復が発生することで, 流入してきた気泡が碎かれ, MBが発生すると考えられている⁽²⁾。ゆえに気泡微細化メカニズムの解明がベンチュリ管式微細気泡発生装置のMB発生高効率化にとって重要となる。現象を解明するためには既知の理論との比較が必要であり, ベンチュリ管内やその近傍での物理量が計測可能な装置の開発が望まれる。特に, ベンチュリ管内におけるボイド率 α の変化は管内の流動構造を明らかにする上で重要な物理量となる。これまでのベンチュリ管式微細気泡発生装置を扱った研究では, 液相と気相の流量比をパラメータとして用いた実験が行われてきた⁽³⁾。気泡崩壊挙動におけるボイド率の変化については管内の可視化観測のみ行われており, 定量的評価には至っていない。

一方, ボイド率計測法として締切法や画像処理法, X線CTスキャナ法や中性子ラジオグラフィ法, 電気式計測法などがある。ボイド率が炉心の核分裂反応に直接影響を及ぼすことから, これらのボイド率計測法は原子力工学において研究されてきた⁽⁴⁾。そのなかでも電気式計測法は炉心内の断面平均ボイド率をリアルタイムで把握できると期待され研究が進められている。電気式計測法は液相と気相の電

Fig. 1 Snapshot of bubbles fission in a Venturi tube (upper).
Schematic of bubble collapse and pressure distribution (lower).

気伝導度や誘電率の違いから生じる電気抵抗や静電容量の変化を利用して計測を行う。計測区間に常に電気を掛けることで, ボイド率の変化と共に電気抵抗や静電容量の変化をリアルタイムで計測できる。電気式計測法にはコンダクタンス型, キャパシタンス型がある。コンダクタンス型は液相と気相の電気伝導率の違いを利用してボイド率計測を行う。直流電源より計測部へ定電圧もしくは定電流を印加し, 計測部の電流値もしくは電圧値を読み取ることで計測部の電気抵抗を得ることができる。この電気抵抗は管内ボ

Fig. 2 Measurement apparatus

イド率に依存し変化する。キャパシタンス型は液相と気相の誘電率の違いを利用して静電容量を読み取り、ボイド率を求める。キャパシタンス型では交流電源が用いられる。特徴として、電気伝導性のパスが途切れるような高ボイド率や電気伝導率が低い純水などでも計測が可能となる⁽⁴⁾。

電気式ボイド率計に関する研究は沸騰水型原子炉での利用を目指したものが中心であった。しかし、これらは気泡流や環状流に関して研究されているものの、 μm オーダーの微細気泡流れに対しては言及していない。そこで本研究ではMBが含まれた気液二相流に対し、ボイド率計測の可能性について、原理や装置の構造が比較的簡単な定電流法 (Constant Electric Current Method, CECM) を用いて検証する。従来の定電流法の原理に従った電圧比 - 気液断面積比によるボイド率計測は、流れ断面が比較的定常である環状流などにのみ適用されてきた。一方、マイクロバブルが含まれるような分散気泡流では気泡が空間に3次的に分布しているため、流れ断面が非定常で従来の方法ではそのまま適用できない。そこで本研究では3次的構造を持つ分散気泡流の電気抵抗の評価をMaxwellの理論を用いて行う。Maxwellは異なる電気抵抗を持つ2つの媒質が混じった場合の全体の電気抵抗について論じており、これを気液二相流に応用することで、気泡流の電気抵抗が得られると考えられる。このMaxwellの式を用いて算出されたボイド率と断面積比によるボイド率を比較し、ボイド率や流動構造に対するMaxwellの理論式の有効性について議論する。

2. 定電流法とボイド率の見積もり

本研究では電気式計測法の中でも比較的原理や装置構造の簡単な定電流法を用いた。この方法では Fig. 2 に示すテスト部 (B) のように一定電流が最上流部と最下流部にあり一対の電極に供給される。この電極を印加電極と呼ぶ。この印加電極に挟まれる形でさらに一対の電極が配置される。この電極を計測電極と呼ぶ。気相と液相の電気伝導率の違いから生じる計測電極間の電圧変化を電圧降下法で読み取ることで電圧比を計測し、ボイド率を算出する。

電気抵抗 R と液相断面積 A_L 、計測電極間距離 L には次のような相関があると考えられる。

$$R = \rho_L \frac{L}{A_L} \quad (1)$$

Fig. 3 Electric void fraction meter (left) and Venturi tube (right).

気液二相流で考えると、断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ は、

$$1 - \bar{\alpha} = \frac{R_L}{R} = \frac{I_0 R_L}{I_0 R} = \frac{V_L}{V} = \frac{1}{v} \quad (2)$$

となり、気液二相流時の計測電圧 V を液相のみの計測電圧 V_L で規格化した値を表す電圧比 v により示すことができる。このように断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ は通電しない気相と通電する液相の断面積比より求められる。そのため、主に気液断面積比が流れ方向に一定と考えられる環状流で用いられてきた。

一方、低ボイド率では気泡流になる場合があり、気泡流は気液断面積比が流れ方向に一定ではないため、上の計算からでは求めることはできない。そこでMaxwellによって論じられた異なる電気抵抗を持つ2種の媒質の混合物における電気抵抗に関する理論を応用する。ここでは2種の異なる電気抵抗を持つ媒質を液相と気相として考える。気泡を仮想的に電気双極子と考えることで、以下のように3次元構造を持つ気泡流の体積ボイド率 α が得られる。

$$\alpha = \frac{v-1}{v+0.5} \quad (3)$$

$v \geq 1$ なので、同じ電圧比でもMaxwellの理論式のほうが断面積比で求められたボイド率よりも小さく見積もられる。

3. 実験装置と実験条件

本実験装置は気液二相流のボイド率計測を行うため Fig. 2 のように構成されている。液相にはフィルターを通した水道水を用い、気相には空気を用いた。水を一度タンクにため、このタンクよりポンプを用いて液相流量計、ベンチュリ管、ボイド率計測器の順に水を流し循環させている。気相はコンプレッサーより、レギュレーター、気相流量計を通り、ニードルを介して液相流路内に送られる。これによって気液二相流を作り出している。本研究では微細気泡を含む流動場を得るため、ベンチュリ管式微細気泡発生装置を用いており、この下流にボイド率計測器を設置している。

本研究で用いるボイド率計測器には定電流法を採用し、定電流直流電源を用いて流路内に $100 \mu\text{A}$ の一定電流を流す。液相 (水 $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$) と気相 (空気 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$) の電気抵抗率の違いを利用してボイド率計測を行う。電気式ボイド率計測器は Fig. 3 左のようになっており、流路に4つの10 mm厚のリング電極が設置されている。電極の材質は錆の発生を極力抑えるためステンレスとなっている。4

Fig. 4 High speed camera images between two measuring electrodes in flow ratios of 0.5 %, 4.5 %, 6.5 %, 8.5 %, 10.5 %, 15 %, 20 %, 30 %, 35 % and 50 %.

つの電極の内、外側2つの電極（印加電極）を定電流直流電源と接続し、内側2つの電極（計測電極）をログと接続する。2つの計測電極間の電圧を電圧降下法で取得することでボイド率を見積る。また印加電極と計測電極を分離することで印加電極間の電流密度をできる限り一様に行っている。計測電極間は100 mm、印加電極と計測電極間は70 mmとなっている。計測電極間の可視化部では流動構造の詳細観察を行う。計測電極間は可視化計測を行うため、アクリルで作られており、このパイプの周りにウォータージャケットを装着することで屈折の影響を抑えている。可視化計測にはハイスピードカメラを用いる。光源としてメタルハライドランプを用い、バックライト法で観察を行っている。

Fig. 3 右図に示すように、今回用いたベンチュリ管の構造は、ベンチュリ管入口直径と出口直径が16 mm、のど部直径6 mm、面積比14 %となっており、開き角は最も圧力損失が少ないと考えられる6度としている。

本実験ではボイド率計測器の位置を変えることで二種類の実験を行っている。Fig. 2の(A)にボイド率計測器を置くケースと(B)に置くケースである。(A)の場合はベンチュリ管なしでの実験となり、ニードルから出た気泡を直接計測する。一方、(B)に置くケースではベンチュリ管によって砕かれた微細気泡を含む流れを計測している。よってMBの計測が行えると考えられる。

実験は液相流量を20, 25, 30 L/minに固定して気相流量を変えることで流量比をコントロールした。ベンチュリ管を用いない場合の実験(A)では3つの液相流量に対し、それぞれ0から50 %までの流量比に対し実験を行った。一方、ベンチュリ管を用いた実験(B)では3つの液相流量に対し、0から12 %までの流量比で実験した。このとき実験(A)の場合の温度は 15.7 ± 0.6 °Cの範囲で行い、実験(B)の場合には 13.5 ± 1.3 °Cの範囲で実験を行った。

4. ベンチュリ管を用いない場合のボイド率計測

ベンチュリ管を用いない場合でのボイド率計測結果について示す。Fig. 4はハイスピードカメラで撮影した各流量比に対する計測電極間の流動の様子である。撮影速度8000 fps、露光時間1/20000 sで撮影している。流量比0.5 %のときはベンチュリ管がなくてもMBが発生していることがわかる。流量比の増加と共に気泡は大きくなり、8.5 %ではスラグ流

Fig. 5 Correlation between the volume flow rate β and the voltage ratio V/V_0 .

Fig. 6 Correlation between the volume flow rate β and void fraction α calculated by cross-section ratio.

Fig. 7 Correlation between the volume flow rate β and void fraction α calculated by Maxwell's theory.

になり始めている。さらに流量比を増していくと、チャン流を経て、50 %では環状流になることを確認した。

Fig. 5には流量比に対する電圧比の変化を示した。横軸が流量比、縦軸が電圧比を表す。電圧比は液相単相流での電圧で規格化している。電圧の計測はサンプリング周波数10 kHzに対し5秒間の計測を行い、その平均値を示した。丸いプロットが液相流量20 L/min、三角が25 L/min、クロスが30 L/minを表している。Fig. 5からわかるように流量比と電圧比にはほぼ線形に増加する相関があることが確認できる。この電圧比の結果を元に、面積比によるボイド率算出法とMaxwellの理論式より求めたボイド率をFig. 6と7に示す。横軸を流量比、縦軸を電圧比より見積もったボイド率としている。比較のためスリップ比 $S=1$ 、すなわち一様流に基づく均質流モデルでの流量比-ボイド率相関を実線で引いた。Fig. 6と7により、断面面積比で求めたボイド率よりもMaxwellの理論式から求めたボイド率のほうが流量比に対する傾きを小さく見積もっていることが確認できる。また断面面積比による結果では約10 %まで $S=1$ の直線上にプロットがあるものの、Maxwellの結果では約5 %以上で外れる傾向に

Fig. 8 High speed camera images between two measuring electrodes for flow ratio of 0.5%, 4%, 12%.

ある。Fig. 4 の可視化計測より 4.5 % から 8.5 % にかけて気泡流からスラグ流に変化していることから、この結果の原因のひとつとして、Maxwell の理論式が微細気泡からスラグ流への流動構造の変化を反映していることが考えられる。

5. ベンチュリ管を用いた場合のボイド率計測

次にベンチュリ管を Fig. 2 の (A) に取り付け、電気式ボイド率計測器を (B) に取り付けした場合の結果について考察する。ベンチュリ管を取り付けることで Fig. 8 の可視化計測結果のように計測電極間の流動構造は μm から mm サイズの微細気泡を含んだ気泡流となることが確認できる。また、12 % の流量比においても Fig. 4 で見られたスラグ構造は確認されなかった。

Fig. 9 にベンチュリ管を用いた場合の、液相流量 20, 25, 30 L/min に対する流量比-電圧比相関を表す。Fig. 5 と同様に横軸が流量比、縦軸が電圧比を表す。電圧の計測はサンプリング周波数 10 kHz に対し 5 秒間の計測を行い、その平均値を求めている。いずれの液相流量においても流量比と電圧比に比例関係があり、似た傾きを有することが確認できる。このことからマイクロバブルでも流量比と電圧比に相関があることを確認した。

次に断面積比より求めたボイド率と Maxwell の式を用いて算出したボイド率を Fig. 10 と 11 に示す。Fig. 6 と同様に横軸を流量比、縦軸を電圧比より見積もったボイド率としている。比較のためスリップ比 $S=1$ での相関を直線で表している。断面積比から求めた流量比とボイド率の相関は、一様流に基づく均質流モデルに対して過大評価する傾向を示した。Maxwell の式より見積もったボイド率では一様流に基づく均質流モデルと 55 % 範囲において整合性を示した。

6. 結言

本研究ではベンチュリ管式微細気泡発生装置のボイド率特性を調べるために電気式ボイド率計測法のひとつである定電流法を応用し、微細気泡のボイド率計測の可能性について検討を行った。また、断面積比によるボイド率の見積もりと比較することで Maxwell の理論の有効性について検証を行い、以下の知見を得た。

- (1) 断面積比によるボイド率の見積もりと比較し、Maxwell の理論式によるボイド率見積もりのほうが流量比に対する勾配が小さくなる傾向が得られた。
- (2) 可視化計測の結果と合わせ、Maxwell の理論式が気泡流からスラグ流への変化を反映している可能性が示唆された。
- (3) MB を含む気泡流において流量比と電圧比には比例相関が見られた。このことから MB の電気式ボイド率計測が示唆された。

Fig. 9 Correlation between volume flow rate β and voltage ratio V/V_0 with microbubbles.

Fig. 10 Correlation between the volume flow rate β and void fraction α calculated by cross section ratio with microbubbles.

Fig. 11 Correlation between the volume flow rate β and void fraction α Maxwell's theory with microbubbles.

- (4) MB を含む気泡流において、断面積比より求めたボイド率よりも Maxwell の理論式から求めたボイド率のほうが一様流に基づく均質流モデル ($S=1$) により近い分布を示した。

今回の研究では、気泡流において Maxwell の理論が有効である可能性と、定電流法を用いたボイド率計測がマイクロバブルでも有効であることを定性的に確認できた。

参考文献

- (1) 南川, 他 2 名, 機論 (B 編), 75-750 (2009), 235.
- (2) Wang, Y. and Chen, E., PHYSICS OF FLUID, 14, (2002), 3215.
- (3) Fujiwara, A. et al., 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, (2007), FEDSM2007-37234.
- (4) 渡辺ら, 第 12 回動力・エネルギー技術シンポジウム, (2007), 77.
- (5) Maxwell, J. C., DOVER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK (1954).