

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14897

研究課題名（和文）流動場・電流密度分布連成解析手法を用いた気液二相流三次元構造の計測技術開発

研究課題名（英文）Development of measurement technique for three-dimensional structure of gas-liquid two-phase flow by using CFD and electric current density analysis

研究代表者

上澤 伸一郎（Uesawa, Shinichiro）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職

研究者番号：80737073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：気液二相流の重要な物理量であるボイド率を計測する手法として、定電流法やワイヤメッシュセンサ（WMS）がある。しかし、計測電極間の電流密度分布が明確でないことから、電気信号値からボイド率を換算する方法については計測の正確性に課題を残している。本研究では、定電流法とWMSに対する気液二相流解析と電流密度解析の連成解析手法を開発し、その連成解析手法を用いることで、計測電極間の不明確な電流密度に起因する計測の不確かさを明らかにした。また、上記の電流密度分布解析結果に基づいた補正を実施することにより、より正確な気泡形状の取得が可能であることが示され、気液の3次元構造の再構築が可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気液の存在割合を表すボイド率は気液二相流の重要な物理量であり、原子力発電所などのエネルギー関連、化学プラントや宇宙用動力装置などの様々な分野の機器設計や流動特性を理解する上で欠かせないパラメータであり、その計測は必要不可欠である。

比較的高価なボイド率計測装置を実装する前に、本研究で開発した解析手法を用いてその適用性を確認できることは、研究開発の時間的・費用的な削減に大きく貢献できる。また、計算機上で計測装置のシミュレーションができるだけでなく、計測の不確かさの要因を確認できたことは、今後の気液二相流構造のインライン・リアルタイム3次元計測技術の開発において重要な成果と考えられる。

研究成果の概要（英文）：A void fraction is one of important physical parameters in gas-liquid two-phase flow. As one of the measurement techniques, a constant electric current method (CECM) and a wire mesh sensor (WMS) has been developed by various researchers. However, the converting method to the void fraction from the electrical signal of the measurement remains an issue for the accuracy of the void fraction measurement because the current density distribution between the measurement electrodes is not clear. In this study, we developed a coupled analysis method of computational fluid dynamics (CFD) for gas-liquid two-phase flow and electric current density analysis, and clarified the measurement uncertainty of the CECM and the WMS based on the current density distribution by using the method. In addition, it was confirmed that more accurate bubble shape can be obtained and the three-dimensional structure can be reconstructed by performing correction based on the result of the current density analysis.

研究分野：熱流動

キーワード：ボイド率 定電流法 ワイヤメッシュセンサ 数値解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 気液の存在割合を表すボイド率は気液二相流の重要な物理量であり、原子力発電所などのエネルギー関連、化学プラントや宇宙用動力装置などの様々な分野の機器設計や流動特性を理解する上で欠かせないパラメータである。そのボイド率を計測する手法として、電気式ボイド率計測がある。電極間の気相と液相の導電率や誘電率の違いを利用することで、二相流のインピーダンスを計測し、ボイド率を得る手法であり、その代表的な手法として、定電流法、ワイヤメッシュセンサ（以下、WMS）がある。このボイド率計測手法はインラインかつリアルタイム計測が可能であり、取り扱いが容易であることから、様々な研究で用いられている。

(2) しかしながら、定電流法では、計測電極間の電流密度を一律と仮定しているため、分散気泡流など不規則に気泡が存在する流動に対して適用が困難と考えられている。また、WMSも気相-液相における ON-OFF 信号の検出は可能と考えられるが、送信と受信ワイヤ間が気泡で覆われない場合には、気泡を正確に捉えることは難しい。このように両計測には計測技術としての実績はあるものの、計測の不確かさが大きく増大する流動条件が存在する。

### 2. 研究の目的

(1) 上記問題は、全て、計測電極間の電流密度分布が不明瞭であることが原因である。そこで本研究では、広く一般的に使用されている電気式ボイド率計測手法である、定電流法、WMS に対する気液二相流計算と電流密度計算の連成解析手法を確立することを第一の目的とし、その連成解析手法を用いて、計測電極間の不明確な電流密度に起因する計測の不確かさを明らかにする。さらに、流体解析で得られた気泡形状や分布に対して、計測で得られるであろう電気信号を取得して、従来為し得なかった気液二相流の気液構造の三次元計測技術の可能性について検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 気液二相流計算と電流密度計算の連成解析手法を確立させるためには、計測対象となる流動場の再現と電流密度分布の再現が必要である。本研究では、気相と液相の過激な界面挙動を再現できる計算手法が必要となることから、研究代表者が所属する日本原子力研究開発機構が独自に開発した二相流詳細解析コード TPFIT (Two-Phase Flow simulation code with Interface Tracking) を用いて流動場の再現を実施した。TPFIT で取得した流動場に対する電流密度分布を再現するため、本研究では、有限要素法を用いた 3 次元電流密度分布解析ソフトウェアであるサイエンスソリューションズ社製 EMSolution を使用した。

(2) 上記連成解析手法の妥当性検証のため、本解析手法と実験との比較を実施した。解析では、実験データと同条件の気泡流の数値データを TPFIT で取得し、TPFIT で得られた流動場の結果を用いて、EMSolution による電流密度分布解析を実施し、定電流法で得られるであろうボイド率のデータを計算機上で取得した。WMS については、TPFIT で得られたボイド率分布を真値として、EMSolution の結果より得られたボイド率分布と比較した。

(3) 計測の不確かさについて、電流密度分布解析結果に基づいた検討した。様々な気泡形状に対して、どのような電流密度分布になっているかを検討することにより、計測の不確かさとなる要因について検討した。

(4) 本解析手法の応用として、TPFIT で得られた気泡形状や分布に対して、計測で得られるであろう電気信号を取得することにより、様々な体系における、気液二相流の気液構造の三次元計測技術の可能性について検討した。

### 4. 研究成果

(1) 電流密度の計算対象となる流動場の計算機内での再現が必要であることから、研究代表者が所属する日本原子力研究開発機構が独自に開発した二相流詳細解析コード TPFIT を用いて、定電流法と WMS の計測電極周りの気液二相流挙動を再現した。WMS においては電極となるワイヤにより気泡が分裂するなどの実験でも確認されていた挙動を確認した。電極密度分布の再現するために、TPFIT で取得した気液二相流の流動場に対する電場密度分布の計算を実施した。電流密度分布計算にはサイエンスソリューションズ社製 EMSolution を使用した。流動場解析より得られた気液二相流に応じた電極周りの電流密度分布計算を実施することにより、定電流法と WMS で得られる電気信号を再現した（図 1）。

(2) 上記連成解析手法の妥当性検証のため、実験データとの比較を実施した。定電流法の妥当性検証では既存の実験研究 (Uesawa et al., 2015) との比較を実施した。図 2 は実験で得られた

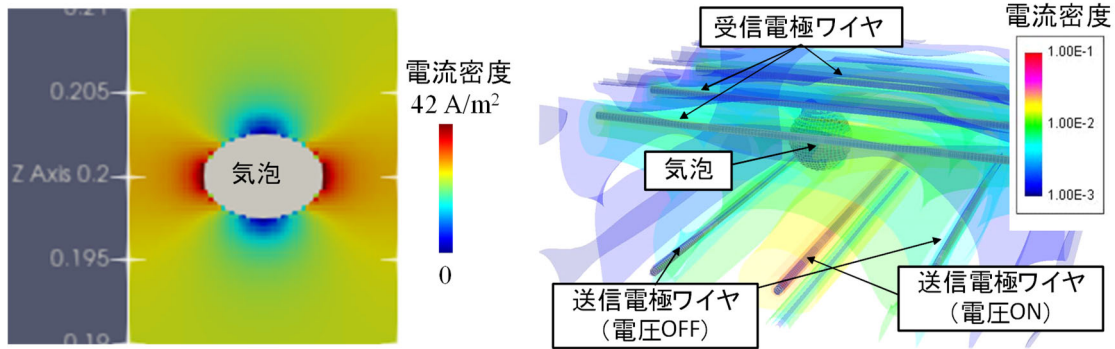


図1 定電流法（左図）とWMS（右図）の気液二相流計算と電流密度計算の連成解析結果の一例

計測電極間の電圧比 (= 気泡通過時の電圧/水だけのときの電圧) と解析で得られた電圧比の比較結果である。計測電極間の体積ボイド率として、0.002 - 0.965 [-]での結果となっている。合わせて、実験と解析の気泡の可視化結果ならびに解析結果については気泡形状と同時にカラーコンターで電流密度分布を示している。気泡形状について比較すると、概ね実験と一致していることが確認できる。カラーコンターに着目すると、管壁との隙間が小さくなるほど、電流密度が大きくなっていることが本結果からわかる。実験で得られた電圧比と解析で得られた電圧比の比較結果を見てみると、低ボイド率から高ボイド率に対して、両者が±20%の範囲で一致することが確認できた。以上より、定電流法において本予測手法が妥当であると

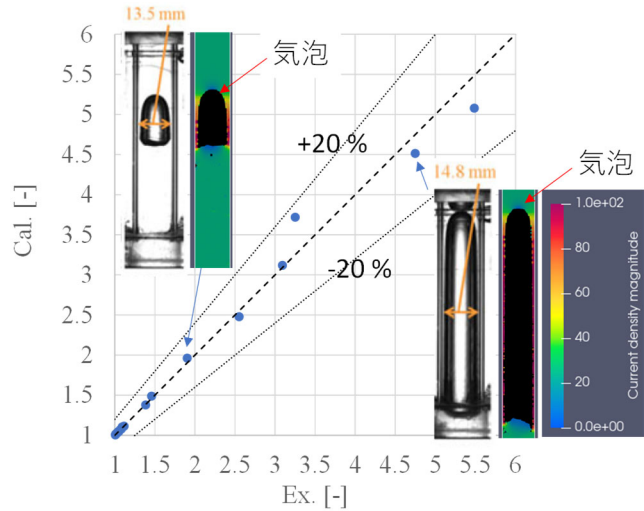


図2 実験で得られた計測電極間の電圧比と解析で得られたの電圧比の比較結果ならびに実験と解析の気泡の可視化結果

考えられる。図3は、WMSにおけるTPFITで得られたボイド率分布と、TPFITにより得られた流動場に対する電流密度解析で得られたボイド率分布との比較結果である。単一気泡のワイヤ間の通過前から通過後までの時系列結果となっている。上段のTPFITの結果からわかるように、16 msにおいて、気泡が電極ワイヤ間に流入し、80 msで電極ワイヤ間から流出している。その間、

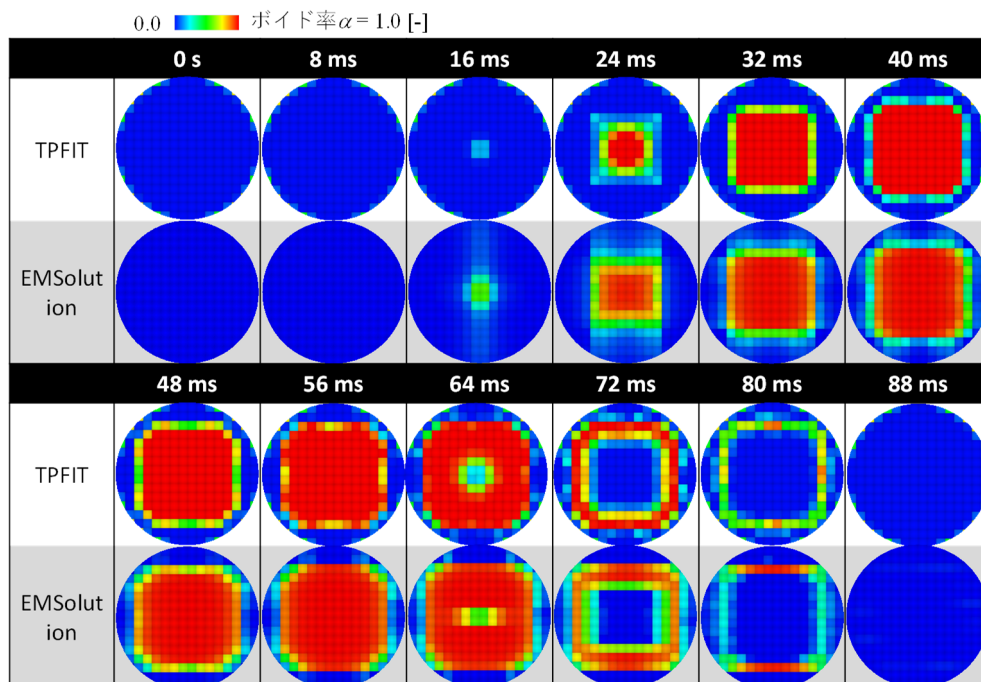


図3 WMSにおけるTPFITで得られたボイド率分布と、TPFITにより得られた流動場に対する電流密度解析で得られたボイド率分布との比較結果

円管壁面近傍以外の領域が高ボイド率となっており、円管断面のほぼすべてを覆うような大気泡が流入していることがこの結果からわかる。電流密度解析でも同様な時間変化をしていくことが本比較結果から確認できた。しかしながら、気泡が電極ワイヤ間に流入する 16 ms や流出する 80 ms においては TPFIT のボイド率よりも電流密度解析のボイド率の方が過大評価していることも確認された。

(3) 上記の WMS の結果からわかるように、計測領域に気泡が流入、流出する際に計測誤差が大きいことが確認された。そこで、定電流法においても電流密度分布解析結果に基づいた計測の不確かさの検討を行った。図 4 は、スラグ気泡周りの電流密度分布の解析結果と、TPFIT による流体解析結果から求めた計測電極間の気相断面の等価半径と電流密度解析から求めた気相断面の等価半径の比較結果である。スラグ気泡の腹 ( $z = 200$  mm から  $215$  mm) までは、両者はよく一致しているが、気泡前端 ( $190$  mm 辺り) と後端 ( $220$  mm 辺り) においては電流密度解析が過大評価しているのがわかる。この原因は、左図の電流密度分布の可視化結果から確認することができる。気泡前端と後端においては、電流密度が小さくなる領域が存在しており、気泡界面に沿って電流が流れていないことがわかる。つまり、気泡前端と後端においては気泡がないのにも関わらず、電気計測においては気泡があるように判定されてしまい、ボイド率の過大評価の要因になっている。

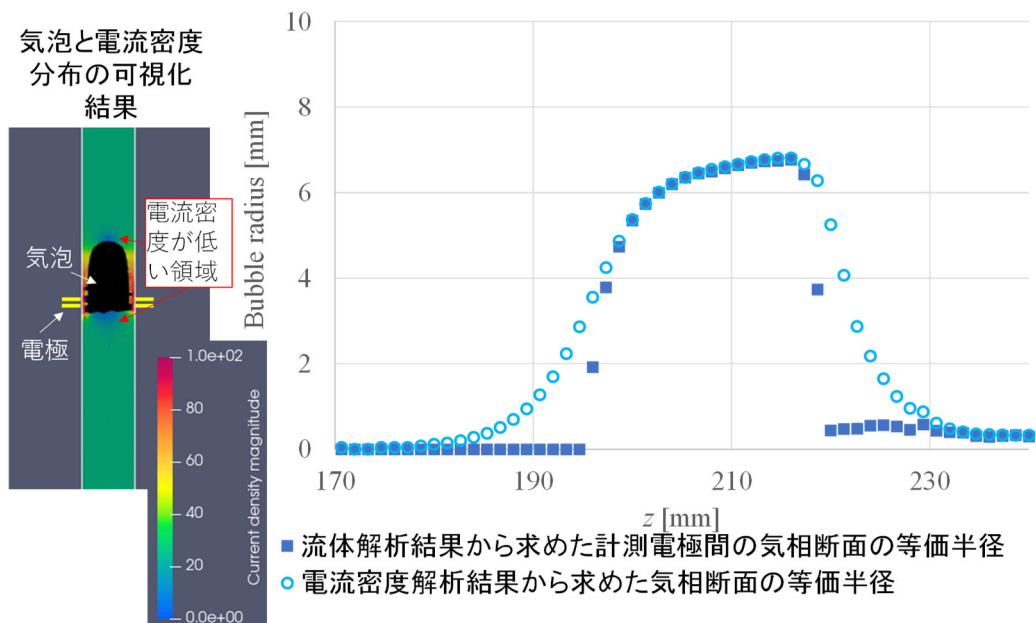


図 4 スラグ気泡周りの電流密度分布の解析結果と、流体解析結果 (TPFIT) から求めた計測電極間の気相断面の等価半径と電流密度解析結果から求めた気相断面の等価半径の比較結果

(4) 気泡の 3 次元構造の計測を行うには、上記の過大評価は気泡の形状が大きく変化してしまうことから無視できない。そのため、気泡前端と後端において補正が必要と考えられる。本研究では、気泡の曲率に着目し、曲率の大きさを閾値として、気泡前端は円で補正し、後端は気相データを除外する処理を行った。それらの補正を行うことにより、より正確な気泡形状の取得が可能となり、従来気泡の 3 次元構造の計測が困難であった定電流法でもスラグ気泡に対して 3 次元構造の再構築が可能であることを確認した (図 5)。また、原子炉の燃料集合体のような複雑な流路においても定電流法によるボイド率分布の計測が可能であることを本解析手法により確認することもできた。今後はこれらの解析結果に基づき、計測装置の開発を進めていく予定である。

#### <引用文献>

- ① Uesawa, S., et al. (2015). "Measurement of void fraction in bubbly-slug flow with a constant electric current method." Journal of Nuclear Science and Technology 53(1): 48-60.

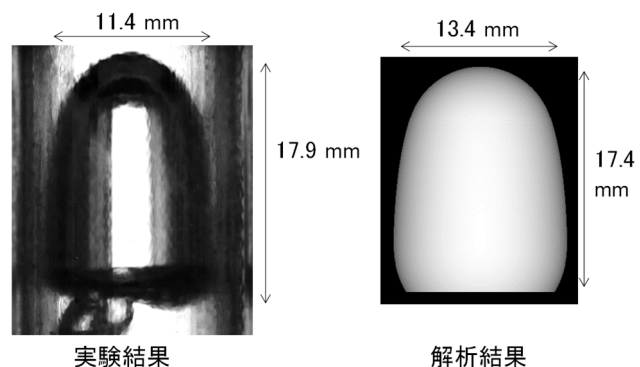


図 5 スラグ気泡の撮影画像 (左) と定電流法より得られたスラグ気泡の 3 次元構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------