



瞬時局所的基礎方程式に基づく気液二相気泡流に関する数値解析的研究

宋, 明良

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1995-03-31

(Date of Publication)

2007-08-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1426

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3105448>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001426>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	宋 明 良	（中華人民共和国）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）	
学位記番号	博い第83号	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の日付	平成7年3月31日	
学位論文題目	瞬時局所的基礎方程式に基づく気液二相気泡流に関する 数値解析的研究	
審査委員	主査 教授 坂口 忠 司	
	教授 中 島 健	教授 富 田 佳 宏
	助教授 富 山 明 男	

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、気液二相気泡流の瞬時局所的な基礎方程式に基づく数値解析を実現すること、および数値解析によって得られた気泡周囲の液相速度分布に基づいて気泡の揺動機構や横運動機構について調べ、気泡流のボイド率分布を支配する気泡に働く横方向力のモデルを作成することを目的としており、以下に示す7章より構成されている。

第1章は緒言であり、本研究の背景、目的、方法を述べた。

気液二相気泡流はボイラ、原子炉、気泡塔など各種の工業装置で見られ、その流動現象の把握と流動予測手法の確立は安全で効率の良い装置の設計、開発に不可欠な工業上の重要課題である。そのため、長年にわたって数多くの研究がなされ、気泡流の流動現象に関して多くのことが明らかにされてきた。近年では、流れの詳細で多次的な特性に関する研究が気泡流研究の主課題となっている。特に鉛直管内気泡流に関して、流路壁付近を気泡が多く流れる場合や、逆に流路断面の中央部に気泡が多く存在する場合があることが知られている。前者の場合、流路断面内のボイド率分布はカルデラ型と呼ばれ、後者はベル型と呼ばれている。この流路断面内ボイド率分布は気泡流の平均ボイド率、圧力損失、伝熱などの特性を左右するために、ボイド率分布を精度良く予測することは重要である。その実現のためには、ボイド率分布を決定する個々の気泡の横運動の物理的機構を把握することが重要であり、多くの研究が行なわれている。しかし、気泡流中の気泡に影響を及ぼす因子は多種多様であり、かつそれらが相互に作用し合うこと、および気泡周囲の液相速度分布などの詳細な情報が不足していることなどから、気泡の横運動に関する物理的機構は明かにされていない。それらの因子には、気液各相の物性、表面張力、気泡径、外力などの無限静止液中の単一気泡にも影響するもの以外に、他の気泡による影響、流路壁の影響、液相速度勾配による影響、気泡自身が気泡の下部に生成する渦の影響、液相固有の乱れの影響などがあり、これらの複雑さゆえに各々の因子について個別に調べる必要があると思われる。その結果、気泡の物理が理解できれば、二相流全般を理解するうえでも大きな貢献ができると思う。

一方、近年の計算機能力の急速な発達と数値計算手法の発展は、気液各相について瞬時局所的に成

立する質量と運動量の保存式を、気液界面における境界条件のもとで直接解く二相流の詳細解析の可能性を広げてきた。もし、気泡流の詳細解析が実現すれば、気泡流中の瞬時局所的な液相速度分布や圧力分布などの物理的情報を抽出することができ、気泡流の流動機構に関して有用な知見を提供できる可能性がある。しかし、気泡の運動に関する詳細解析は殆ど行なわれていないのが現状である。

また、水-空気あるいは水-蒸気系気泡流における気泡運動の物理が明らかにされていない原因の一つとして、乱流ゆえの現象の複雑さがある。気泡流の流動機構の理解に近づいていくためには、まず層流条件下での気泡運動を把握することが必要である。ところが、層流における気泡の運動機構でさえも明らかにされていない。

そこで本研究は、層流条件で様々な因子に影響を受ける気泡を対象として、瞬時局所的基礎方程式に基づく詳細解析を試みることを第一の目的としている。計算によって得られた気泡周囲の液相速度分布からボイド率分布を支配する気泡の横方向への運動機構などについて調べ、気泡に働く横方向力のモデルを提案することを第二の目的としている。

第2章では、まず本研究で作成した気泡流の詳細解析プログラムの概要について述べている。その特徴は、Hirtらによって開発された気液界面を扱える現状で最も有力な数値解法であろうVOF (Volume of Fluid)法、富山らによって提案された非圧縮性流れを効率良く求解できる改良SOLA法、および界面位置を表わす液相体積率の移流方程式を解く手法として数値拡散が小さいドナー・アクセプター法などの既存の数値解析手法を利用して作成されていることにあり、本論文ではまずこのような数値解法によって気泡流の精度の良い予測が可能か否かその可能性を検討している。

また、従来の気泡流研究は、気泡径や各相体積流速などの有次元量をパラメータとして整理されてきたが、本章では気泡流に関する基礎方程式の無次元化などによって気泡流中の気泡の運動を支配する無次元数としてエトベス数、モルトン数などを抽出し、それら無次元数を本研究でのパラメータに選定した。

第3章および第4章では、作成した二次元詳細解析プログラムによって、気液各相の物性、表面張力、気泡径、外力、気泡自身によって誘起される渦、流路壁、液相の速度勾配、他の気泡などによる影響などを妥当に評価できるかを検討している。なお、計算結果の妥当性を確認するための比較対象とする実験データベースがない場合には、随時実験を実施した。

まず、第3章では、二次元軸対称円筒座標系の計算体系を用いて、軸対称な気泡の妥当な詳細解析を実現した。そして、無限静止液中単一気泡の終端速度・形状・後流・気泡周囲の液相速度分布、無限静止液中直列二気泡の形状と接近速度、鉛直円管内静止液体中の単一大気泡の終端速度・形状・気液両相の速度分布などと、それらに及ぼすエトベス数とモルトン数の影響を、定量的に良好に予測できることを示している。

ついで、第4章では、気泡の揺動運動や横運動などの軸対称でない挙動を示す気泡を対象として、二次元($x-y$)座標系の計算体系による詳細解析を行なった。その結果、静止液中揺動気泡の揺動周波数、一様せん断流中単一気泡の形状とボイド率分布に強く関わるであろう気泡の横運動の向きと速さに及ぼすエトベス数、モルトン数および無次元液相速度勾配の影響を、定性的に良好に予測できることを示した。同時に、ボイド率分布を支配する気泡の横運動は、これらの無次元数によって支配されることを示した。また、計算によって得られた瞬時局所的な揺動気泡周囲の液相速度分布から、揺動気泡はカルマン渦列の周期的放出によって誘起されることを示した。最後に以上の結果に基づいて、鉛直流れ方向に周期的境界条件を設定する方法を新たに考案し、それを利用することによって鉛直平行平板間層流気泡流の詳細解析を初めて実現した。

第5章では二次元解析では考慮できない気泡形状や液相流れの三次元的効果を取り入れて、気泡流のボイド率分布に及ぼすエトベス数などの各種の無次元数の影響に関する定量的な検討を行なうために、二次元解析プログラムを三次元解析用に拡張した。そして、無限静止液中単一気泡の形状と終端速度を定量的に良好に予測できることを確認した。その上で、鉛直正方ダクト内上昇気泡流の三次元詳細解析を初めて実現した。その結果、エトベス数が小さい場合に気泡は球形を保ってカルデラ型のボイド率分布を形成すること、逆にエトベス数が大きい場合に冠球形に変形した気泡が流路中心方向へ横運動してベル型のボイド率分布を形成すること、無次元全体積流束の増加がその傾向を促進することを示した。すなわち、層流条件下でもエトベス数によって、上記二種類の典型的なボイド率分布は形成されることを数値実験によって示した。

第6章では、鉛直正方ダクト内上昇流中の気泡の運動軌跡と気泡周囲の液相速度分布に関する三次元詳細解析結果から、エトベス数が小さい球形気泡は後流を伴わず、気泡に対する液相の相対速度は壁側で流路中心側より大きくなることを示し、気泡はこの局所的な液相速度勾配に起因する横方向力を壁方向に受けることを示した。一方、エトベス数が大きい冠球形気泡は後流を伴い、周囲の液相速度分布はマグナス力が働く回転固体球周囲の流れと類似したものになり、その結果として気泡は流路中心方向へ横方向力を受けることを示した。また、壁の存在によって、静止液中の気泡周囲の液相速度も瞬間的には壁側で小さくなることから、気泡は壁から離される方向に横方向力を受けることを示した。本研究ではこの壁による横方向力を壁効果と呼んだ。

そして、上記二種類の横方向力に関して、詳細解析結果に基づいた経験的モデルを提案した。従来、気泡流に関する様々なモデルは、実験結果あるいは理論解析結果に基づいて提案されてきたが、気泡流の詳細解析に基づくモデルの提案は行なわれたことがなかった。壁効果についてAntalらのモデルの問題点を抽出し、改良することによってモデル化し、壁効果の係数はエトベス数などの無次元数の関数で表されることを示した。液相速度勾配に起因する横方向力については、Autonなどによる揚力モデルの揚力係数を、気泡形状と気泡周囲の流れ場を支配するエトベス数などによって正から負の値にもなり得る関数で表すことによってモデル化した。そして、これら二つのモデルを組み込んだ粒子追跡法による気泡の運動軌跡の数値計算を行ない、同時に行なった実験結果や詳細解析結果と比較検討することによって、これらのモデルの妥当性を確認した。

最後の第7章は総括である。

論文審査の結果の要旨

気液二相気泡流はボイラ、原子炉、気泡塔など各種の工業装置で見られ、その流動現象の把握と流動予測手法の確立は、安全で効率の良い装置の設計、開発に不可欠な工業上の重要課題である。本研究は、層流状態での気液二相気泡流を対象に、その瞬時局所的基礎方程式の数値解析を行い、層流状態での気泡流の流動状態の全体像を明らかにしている。

本論文は7章より構成されている。第1章は緒言であり、本研究の背景、目的、方法、従来の研究などが述べられている。

第2章では、本研究で作成した層流状態での気泡流の詳細解析プログラムについて述べている。その特徴は、Hirtらによって開発された気液界面を扱うVOF (Volume of Fluid)法、非圧縮性流れを効率良く求解するために富山らによって提案された改良SOLA法及び界面位置を表わす液相体積率の移流方程式を解くためのドナー・アクセプター法などの既存の数値解析手法を利用して作成され

ていることにある。

第3章、第4章では、作成した二次元詳細解析プログラムによって、気液各相の物性、表面張力、気泡径、外力、気泡自身の誘起する渦、流路壁、液相の速度勾配、他の気泡などによる影響を妥当に評価できることを示している。第3章では、二次元軸対称円筒座標系のもとで、軸対称な気泡の詳細解析を行い、無限静止液中単一気泡の終端速度・形状・後流・気泡周囲の液相速度分布、無限静止液中直列二気泡の形状・接近速度、鉛直円管内静止液体中の単一大気泡の終端速度・形状・気液両相の速度分布などを求め、それらとエトベス数とモルトン数の関係を、精度良く予測している。第4章では、気泡の揺動運動や横運動などの軸対称でない挙動を示す気泡を対象として、二次元直角座標系のもとで詳細解析を行なっている。その結果、静止液中揺動気泡の揺動周波数、一様せん断流中単一気泡の形状とボイド率分布に強く関わるであろう気泡の横運動の向きと速さに及ぼすエトベス数、モルトン数及び無次元液相速度勾配の影響を、定性的に良好に予測できることを示している。また、計算によって得られた瞬時局所的な揺動気泡周囲の液相速度分布から、揺動気泡はカルマン渦列の周期的放出によって誘起されることを示している。

第5章では二次元解析プログラムを三次元解析用に拡張し、鉛直正方ダクト内上昇気泡流の三次元詳細解析を初めて実現している。その結果、エトベス数が小さい場合に気泡は球形を保ってカルデラ型のボイド率分布を形成すること、逆にエトベス数が大きい場合に冠球形に変形した気泡が流路中心方向へ横運動してベル型のボイド率分布を形成すること、無次元全体積流束の増加がその傾向を促進することを示している。

第6章では、鉛直正方ダクト内上昇流中の気泡の運動軌跡と気泡周囲の液相速度分布に関する三次元詳細解析結果から、エトベス数が小さい球形気泡は後流を伴わず、気泡に対する液相の相対速度は壁側で流路中心側より大きくなることを示し、気泡はこの局所的な液相速度勾配に起因する横方向力を壁方向に受けることを示している。一方、エトベス数が大きい冠球形気泡は後流を伴い、周囲の液相速度分布はマグナス力が働く回転固体球周囲の流れと類似したものになり、その結果として気泡は流路中心方向へ横方向力を受けることを示している。また、壁の存在によって、静止液中の気泡周囲の液相速度も瞬間的には壁側で小さくなることから、気泡は壁から離される方向に横方向力を受けることを示している。ついで、この壁効果について、Antalらのモデルの問題点を抽出し、改良することによってモデル化し、壁効果の係数はエトベス数などの無次元数の関数で表されることを示している。液相速度勾配に起因する横方向力については、Autonなどによる揚力モデルの揚力係数を、気泡形状と気泡周囲の流れ場を支配するエトベス数などによって正から負の値にもなり得る関数で表すことによってモデル化している。そして、これら二つのモデルを組み込んだ粒子追跡法による気泡の運動軌跡の数値計算を行ない、同時に行なった実験結果や詳細解析結果と比較検討することによって、これらのモデルの妥当性を確認している。

第7章は総括であり、本研究で得られた知見をまとめて示している。

本研究は、気液二相気泡流の流動特性をこれまで行なわれていなかった瞬時局所的基礎方程式を数値的に解いて詳細に解明し、流れの中を横運動する気泡周囲の液相速度分布、気泡の横運動に関する物理的機構などについての多くの新知見を提示すると共に、気泡に働く横方向力のモデルを提案するなど、多くの貢献と重要な知見を得たもので、工学上寄与するところ大である。

よって、学位申請者 宋 明良 は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。