

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 気液二相流の渦法シミュレーションに関する研究

氏 名 出川 智啓

論 文 内 容 の 要 旨

気体と液体が混在し、相互作用を及ぼし合いながら流れる気液二相流は、各相の流束などの流動条件の違いにより様々な流動状態をとる。とくに、気相流束が液相流束に比べて小さい場合には、液相中に微小な気泡が分散して流れる気泡流と呼ばれる状態をとる。気泡流は、沸騰水型原子炉や蒸気発生器などの熱交換器、気泡塔や発酵槽などの化学反応装置、湖沼の凍結防止や貯水池内の水質改善などを目的とした環境装置において観察される流れであり、その詳細の解明が重要な課題となっている。

一方、近年、様々な単相流れ場の解析に渦法が有効に利用されている。渦法は、流れ場の渦度分布を微小な渦要素により離散化し、各渦要素の移流や渦度変化を追跡することにより流れを解析する Lagrange 型解法である。渦法には、大規模渦の形成や変形など渦構造の発展過程を良好に計算できる特徴がある。

気泡流は、流れ場をおもに支配する時間・空間スケールと同程度のスケールをもつ大規模渦が支配的な流れであるため、大規模渦の形成や変形など、渦構造の発展過程を良好に計算できる渦法は極めて有用と考えられる。しかし、気泡流に対する渦法に関する研究は少数しか見当たらない。しかも、それらの渦法は気液間相互作用を考慮しておらず、また、各相体積率の保存則を完全に満たす解法ではない。したがって、気液間相互作用を考慮できる渦法は提案されていないのが現状である。

本研究では、気液間相互作用および各相体積率の保存を考慮できる渦法（以下、本渦法と称す）を提案した。渦度場を離散化する渦要素と気泡の運動を Lagrange 計算し、流れ場を分割する格子において気泡運動がもたらす渦度変化を計算する、Lagrange-Lagrange 型解法である。渦要素の移流速度の計算には、Vortex in Cell 法を援用する。Vortex in Cell 法は渦法に分類される解法であり、渦要素の移流速度を高速に計算できる特徴をもつ。

気泡流は“慣性支配系”と“浮力支配系”に大別できる。慣性支配系は、液相に主流が存在し、気泡の混入が流れ場に副次的な効果を与える系である。浮力支配系は、液相が主流を持たず、静止液相中を浮力により上昇する気泡が液相流れを誘起する、気泡混入の影響が支配的な系である。本渦法が慣性支配系および浮力支配系気泡流に適用できることを明らかにするため、慣性支配系気泡流である物体周りの気泡流と、浮力支配系気泡流である気泡プルームの数値解析に本渦法を適用した。

本論文は、以下の構成からなる。

第1章（緒論）では、本研究の背景と目的を述べるとともに、気泡流に関する実験的・数値解析的研究の現状および渦法による単相流・混相流解析に関する研究の現状をまとめた。

第2章では、本渦法の詳細を述べるとともに、その適用性を示すため、角柱周りの気泡流解析に適用した。単相流中に設置された物体後流にはカルマン渦が発生することが知られており、多くの知見が蓄積されている。気泡流中に設置された物体の後流にも、単相流時と同様にカルマン渦が発生することから、角柱周りの気泡流について、角柱からの渦放出周波数や角柱周囲の圧力分布などが測定されている。また、角柱はその幾何形状が単純であり、数値解法の適用が容易であることから、好適な解析対象といえる。本研究では、正方形角柱周りの気泡流（空気-水系）の解析に適用した。矩形管（幅90 mm，奥行き45 mm）に一辺の長さ s （=30 mm）の正方形角柱が置かれている。流れは鉛直上向きであり、角柱上流の液相速度 u_{l0} と s に基づく Reynolds 数は15000である。角柱上流の気相体積率 α_{g0} が $0 \leq \alpha_{g0} \leq 0.03$ の場合を解析した。その結果、気泡の密集により Kármán 渦の強度が減じ圧力勾配が緩和される現象が求められ、自由乱流における大規模渦と気泡運動に関する従来知見と一致することを確認できた。さらに、 α_{g0} の増加に伴い、Kármán 渦の発生周波数が増大するとともに、後面を除く角柱表面で圧力が低下することなど、実験結果と良く一致する結果が得られることも示した。以上の結果から、気泡流解析に対する本渦法の妥当性と物体周りの気泡流に対する適用性を明らかにした。

第3章では、本渦法を直列二角柱周りの気泡流の解析に適用した。熱交換器や蒸気発生器などでは、気泡流中に管群が密に配置される。この場合、上流に設置された管から後流に放出される渦が下流の管と干渉し、流れが複雑なものとなる。これまで、管群に作用する非定常流体力や管群周囲の気相体積率分布などが実験的に調べられている。このような複数物体周りの気泡流に対する本渦法の適用性を調査するため、本研究では、気泡流中に正方形角柱2本が直列に設置されている場合を数値解析した。流れは鉛直上向きであり、矩形管に一辺の長さ s （=30 mm）の正方形角柱2本が間隔 l で直列に設置されている。液相の Reynolds 数は10000であり、角柱間隔 l/s が2、気相体積率流量比 α_{g0} が0.03の場合を解析した。その結

果、上流側角柱が受ける抗力が単一角柱の場合よりも低下することなど、実験結果の傾向とよく一致する解析結果が得られ、直列二角柱周りの気泡流解析に対する本渦法の有用性および複数物体周りの気泡流解析に対する適用性を確認した。

第4章では、本渦法を複雑形状物体周りの気泡流解析へ適用することを目的として、単独翼周りの気泡流を数値解析した。ターボ型ポンプ内部における気泡流の挙動をより基本的視点から解明するため、単独翼周りの気泡流に関する研究が行われている。本研究では、気泡流（空気-水系）が流れる流路にNACA4412翼型（弦長100 mm）が迎角 θ で設置されている場合を数値解析した。液相のReynolds数は250000、気泡の直径は1 mm、全流量に対する気相体積流量の比は0.048である。迎角 θ が0と10 degの場合を解析した。その結果、気相体積率が翼近傍で極大値をとることや後流で不均一に分布することなど、実験で明らかにされている翼周りの気泡流の特徴が正確に捉えられることを示した。また、翼表面の圧力分布や気相体積率に及ぼす迎角の影響が良好に解析できることも確認し、翼周りの気泡流解析に対する本渦法の有用性および複雑形状物体周りの気泡流解析に対する適用性を明らかにした。

第5章では、浮力支配系気泡流の解析に対する本渦法の適用性を探るため、気泡プルームの数値解析に適用した。液相中に吹き込まれた気泡群が誘起する気泡プルームは、気液間の活発な接触や混合を実現できるため、気液反応、バイオプロセスおよび石炭液化を扱う工業機器で利用されている。また、湖沼の凍結防止や貯水池内の水質改善などを目的とした、環境装置にも活用されている。気泡プルームは、気泡が誘起する液相の渦運動が支配的な流れであることから、渦度場を直接解析する本渦法は有用な解法になり得るものと期待できる。本研究では、実験により揺動の振幅や波長が測定されている平面気泡プルームを二次元解析した。水が貯められた矩形タンクにおいて、底面中央に設置された直線電極（長さ $L=85$ mm、幅 $D=1.7$ mm）から、水の電気分解により水素気泡（直径0.12 mm）が放出され、上昇する気泡により液相流れが誘起される、ある高さまでは二次元性が保たれる平面気泡プルームである。電極の単位長さあたりの気泡放出流量 Q_g [$\text{mm}^3/(\text{s}\cdot\text{mm})$]が $0.0043 \leq Q_g \leq 0.04$ の場合を解析した。その結果、気泡の運動が生起する大規模な渦が液相と気泡の揺動運動を誘起する、気泡プルームが合理的に求められることを示した。また、気泡放出流量が気泡プルームに及ぼす影響を調べ、流れの二次元性が現れる条件における実験結果とほぼ一致することを示し、本渦法の気泡プルームに対する適用性および浮力支配系気泡流に対する適用性を確認した。

第6章では、本渦法を角柱周りの気泡プルームの数値解析に適用した。気泡プルームを取り扱う装置において、プルームと構造物の干渉により混合の効率化や制御が期待できる。しかし、プルームと構造物の干渉による流れ場の変化を統計的に調べた実験は見当たらない。また、従来提案されている二流体モデルなど、気

泡群を連続体として扱う数値解法では、構造物表面における気泡の過渡的応答を捉えることは不可能であり、構造物が流れ場に及ぼす影響は実験的にも数値解析的にも調べられていない。本研究では、従来の数値解法では調べられていない、角柱が気泡プルームに及ぼす影響を調べた。矩形タンクに水が貯められ、底面中央に設置されたノズル（幅 $D=16$ mm）から、空気泡が水中に吹込まれる。ノズル上方（ $x = 0, y = 64$ mm）には、一辺の長さ $s(= D)$ をもつ正方形断面の角柱が設置されている。解析の結果、角柱の下流では、角柱がない場合と比較して液相の速度と速度勾配が低下し、乱れ強さが増大することなどが求められた。この結果は、角柱と気泡プルームの干渉により混合が促進される可能性を示唆するものであり、本渦法により従来の数値解法では適用が困難であった流れ場への適用性を示した。

第7章（結論）では、本研究のまとめを行った。すなわち、2章から6章において行われた研究の要点をまとめ、本渦法の妥当性、適用性および有用性を示した。