

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560167  
 研究課題名 (和文) 気泡噴流に対する三次元渦法の開発と並列計算システムの構築  
 研究課題名 (英文) Development of 3-D vortex method for bubbly jet and construction of parallel computing system  
 研究代表者  
 内山 知実 (UCHIYAMA TOMOMI)  
 名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授  
 研究者番号：90193911

## 研究成果の概要：

液相噴流中に微小な気泡を含む気泡噴流に対する、三次元渦法を開発した。液相の渦度場を多数の渦要素で離散化し、渦要素の挙動と気泡の運動を追跡する Lagrange 型解法である。気泡運動が液相流れに及ぼす影響は、循環の強度変化として考慮する。すなわち、渦度場を計算格子に分割し、各格子において気泡による循環の時間変化を計算し、それを格子内の渦要素の強度変化として考慮する方法である。

気泡噴流の一形態である気泡ブルームの解析に本解法を適用した。その結果、従来の実験結果と一致する流れ場が得られ、本解法の妥当性を確認できた。

また、3台のパソコンを接続した並列計算システムを構築し、シミュレーションを実施した。その結果、同等の性能をもつパソコン1台を用いた場合の約半分の時間でシミュレーションできた。すなわち、計算の高速化を実現できた。

以上の研究により、気泡噴流に対する三次元渦法と高速計算システムがほぼ完成された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流, 数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

微小な気泡を含む液相噴流に対しては、数値解析に関する研究は意外に少なく、有効な解法が確立されていないのが現状であった。

一方、噴流は速度せん断層を伴う自由乱流であることから、気泡噴流の基礎研究として、気泡を含むせん断層に関する DNS が報告さ

れていた。しかし、計算時間の制約から、工学上の実務的な解析には不向きであった。

せん断層は大規模渦が支配的な流れであり、渦構造を良好に解析できる渦法が有効に適用されるものと期待できる。そこで、本研究では、渦法を用いた気泡噴流の解析方法の開発を目的とした。さらに、高速計算を実現

できる、並列計算システムの構築も目指した。

## 2. 研究の目的

### (1) 気泡噴流を解析できる三次元渦法の開発

Vortex in Cell 法に準拠した三次元渦法を開発する。ただし、液相の速度ベクトルをベクトルポテンシャルとスカラーポテンシャルで表現して解析し、気泡の運動は Lagrange 法で計算する。

### (2) 高速計算を実現できる並列計算システムの構築

12 台のパソコンを連結した並列計算システムを構築する。これには、分散メモリ型の並列処理に適した渦法アルゴリズムを開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 気泡噴流に対する三次元渦法の開発

#### ① 仮定 基礎式の導出にあたり、以下の仮定を用いる。

- ・流れは微小な気泡が分散した気泡流である。
- ・気相の質量および運動量は、液相に比べ十分小さく無視できる。
- ・液相は非圧縮である。
- ・熱的非平衡はない。
- ・気泡の分裂や合体はない。

#### ② 基礎式 二相流全体に対する質量および運動量の保存式を導く。その両辺の回転をとり、Lagrange 座標系で記述すれば、渦度に対する輸送方程式を得る。

任意のベクトルにはスカラーポテンシャル  $\phi$  とベクトルポテンシャル  $\psi$  が存在することが数学的に知られている。この場合、速度は  $\phi$  と  $\psi$  を用いた式で記述できる。この式の両辺の回転をとったのち、ベクトル解析により変形すると、 $\psi$  に関するポアソン方程式を得る。

$\phi$  と  $\psi$  で記述する速度に関する式を用いれば、質量保存式が  $\phi$  を用いた式に変形される。

一方、気泡に作用する力として、仮想質量力、抗力、重力、揚力を考慮すれば、その運動方程式が Lagrange 座標系において記述される。

#### ③ 解析方法 以下の時間進行法により気泡流の時間発展を計算する。

(1) 渦度をもつ渦要素により渦度場を離散化 (量子化) する。(2) 液相速度で移流する渦要素の挙動を Lagrange 解析して渦度の分布を求め、ポアソン方程式を解いて  $\psi$  を計算する。(3) 移流にともなう渦要素の渦度の変化は、渦度輸送方程式の Lagrange 解析から計算する。(4) 気泡の運動を Lagrange 解析し、気相体積率の分布を計算する。(5) 気相体積率を  $\phi$  で記述された質量保存式に代入し、 $\phi$  を計算する。(6)  $\phi$  と  $\psi$  を用いて液相速度を計算する。(7) 運動量保存方程式の発散をとって得られるポアソン方程式を解析

して圧力を計算する。

### (2) 並列計算システムの構築

上述の三次元渦法に対する並列計算システムを構築する。図 1 に示すような、12 台のワークステーションをスイッチングハブで連結した、分散メモリ型の並列計算機クラスターを構成する。各ワークステーションには切替器を介して 1 台のモニターを接続する。開発環境には Microsoft Visual C++ を用い、並列計算用ライブラリには Windows 版 MPICH を利用する。

本解法は、同類の計算を繰り返す、いわゆる DO ループを多数含む。そのなかには、繰返し計算が同一ループ内のほかの計算に影響を及ぼさない、互いに独立した計算から構成されるループがある。同一ループ内の繰返し計算を 12 分割して 12 台の計算機に割り当て、並列処理をする。

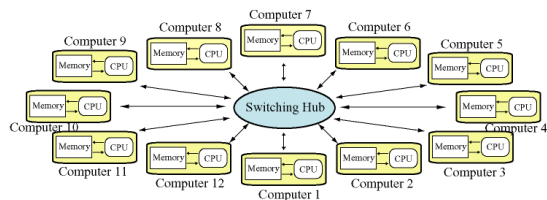


図 1 並列計算機クラスター

## 4. 研究成果

### (1) 気泡流に対する三次元渦法の開発

微小な気泡が液中を分散して流れる気泡流を対象とした三次元渦法を開発した。液相流れを微小な渦要素で離散化し、各渦要素の挙動と気泡の運動を Lagrange 解析する方法である。その際、気相の質量と運動量は液相に比べ十分小さく無視し得るものと仮定し、相変化および気泡の合体・分裂もないものとする。気泡運動が液相流れに及ぼす影響は、循環の強度変化として考慮する。すなわち、渦度場を計算格子に分割し、各格子内において気泡による循環の時間変化を計算し、それを格子内の渦要素の強度変化として考慮する方法である。

### (2) 開発した渦法による気泡プルームの解析

微小な気泡をタンク底面から放出した際に生起する、気泡プルームの解析に適用した。本現象は、気泡噴流の一形態である。

#### <解析条件>

Alam-Arakeri (1993) が実験の対象とした、平面気泡プルームの数値解析に適用した。図 2 に示すように、矩形タンクに水が貯められ、底面に設置した直線電極 (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

が放出され、上昇する気泡により液相流れが誘起される。

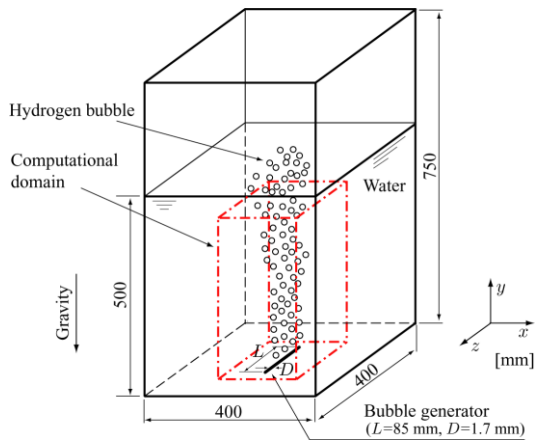


図2 気泡プルームと解析領域

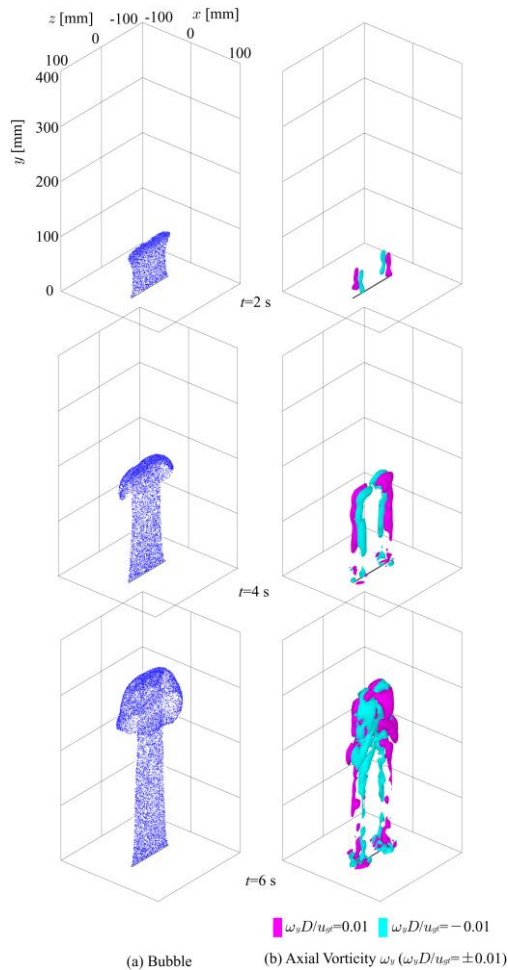


図3 気泡と渦度の分布の時間変化

解析領域は、電極上方の矩形領域 (200 mm x 400 mm x 200 mm) とし (図2 参照), 40x80x40 の六面体格子に分割した。電極の単位長さあたりの気泡放出流量が  $0.0043 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  の場合を解析した。気泡直径は実験値  $0.12 \text{ mm}$  とし、

放出時の気泡速度には、静止水中での終端速度 ( $=7.84 \text{ mm/s}$ ) を与えた。放出された気泡が流出境界に達するまで計算を行った。

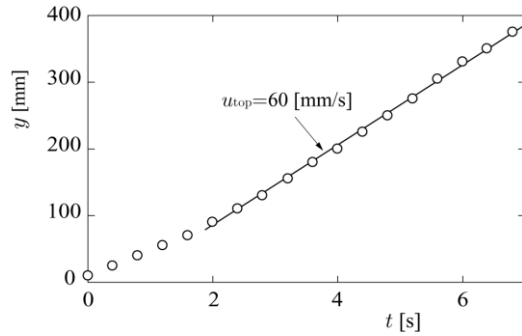


図4 気泡プルーム高さの時間変化

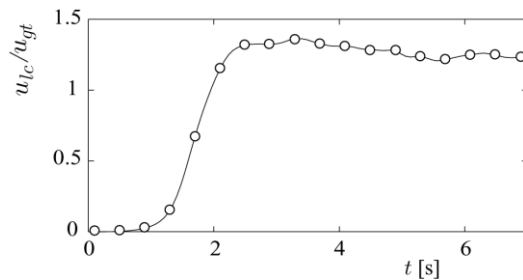


図5 気泡プルーム中心軸上の速度変化

#### <解析結果>

気泡分布の時間変化を図3 (a)に示す。気泡は、放出開始直後はほぼ垂直に上昇するが、その後はプルーム先端において傘状に分布する。プルーム始動時には、プルーム先端に始動渦とよばれる渦輪に類似した渦構造が現われることが明らかにされており、上述の傘状分布は始動渦への気泡の巻き込みによる。気泡の傘状分布はスターティングプルームとして知られており、他の解法を用いた二次元計算や三次元計算でも報告されている。

図3 (b)は、図3 (a)に対応する液相渦度の y 軸方向成分の時間変化である。ただし、気泡終端速度と電極の幅で無次元化されており、0.01の等値面が表示してある。気泡放出開始直後 ( $t=2 \text{ s}$ ) では、電極の四隅にわずかにみられる程度であり、上昇する気泡が誘起する液相流れは二次元的である。 $t=4 \text{ s}$ では、始動渦の上昇に伴い、分布領域が垂直 (y) 方向へ拡大する。しかし、プルーム中心軸付近では見受けられず、二次元性が保たれている。 $t=6 \text{ s}$ では、始動渦内部に正の渦度と負の渦度をもつ渦管が絡み合う三次元渦構造をもつ流れが確認できる。気泡の巻き込みに起因して、始動渦内部に流れの不安定な領域が現われていると考えられる。タンク底面からの高さが低い領域では、上昇流の二次元性がほぼ保たれている。

気泡の傘状分布の先端位置の時間変化を

図4に示す。傘状分布は  $y=100$  mm 以降、直線的に上昇する。図には近似直線を示してある。その傾きから求められる傘状分布の上昇速度は  $60$  mm/s であり、Caballinaら(2003)の次元解析による値と同程度のオーダーである。

ブルーム中心軸上 ( $x=0, z=0$ ) における液相速度の時間変化を示すと図5のようになる。ただし、タンク底面から  $5$  cm の高さにおける結果である。速度は始動渦の発達とともに増加し、始動渦の通過後は約  $1.2$  に漸近する。Alam-Arakeri (1993)による測定値は約  $1.1$  であり、本計算結果は実験結果とほぼ一致している。

以上の結果より、開発した渦法は、噴流の一形態である気泡ブルームを適切に解析できることが判明した。すなわち、気泡噴流に対する三次元渦法の開発に成功した。

### (3) 並列計算システムの構築

上述の気泡ブルームのシミュレーションに対する、並列計算システムを構築した。3台のパソコンを1台のハブを介して接続したシステムである。このシステムを利用した結果、同等の性能をもつパソコン1台のシミュレーションよりも、計算時間を約半分に低減でき、高速の高速化が達成された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

① Degawa, T. and Uchiyama, T., Numerical Simulation of Bubbly Flow around Two Tandem Square-Section Cylinders by Vortex Method, J. Mechanical Engineering Science, IMechE, Vol.222, 225-234, 2008, 査読有.

② Uchiyama, T. and Tomohiro Degawa, Numerical simulation of plane bubble plume by vortex method, J. Mechanical Engineering Science, IMechE, Vol.222, 1193-1201, 2008, 査読有.

〔学会発表〕(計6件)

① 内山知実・ほか2名, 三次元渦法による平面気泡ブルームの数値解析, 日本混相流学会年会講演会, 2008年8月10日, 会津.

② 出川智啓・内山知実, 渦法による翼周りの気泡流の数値シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2007年11月17日, 広島大学.

③ Degawa, T. and Uchiyama, T., Vortex Simulation of the Bubbly Flow around a Hydrofoil, 9th Int. Conf. Fluid Machinery, 2007年10月16日, Jeju.

④ Uchiyama, T. and Degawa, T., Numerical

Prediction for the Bubbly Flow around a Hydrofoil by Vortex Method, 5th Joint ASME/JSME Fluid Eng. Conf., 2007年8月2日, San Diego.

⑤ Degawa, T. and Uchiyama, T., Numerical Simulation of Bubbly Flow around a Pair of Tandem Square Cylinders by Vortex Method, 6th Int. Conf. Multiphase Flow, 2007年7月13日, Leipzig.

⑥ 出川智啓・内山知実, 翼まわりの気泡流の渦法シミュレーション, 日本混相流学会年会講演会, 2007年6月22日, 札幌.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.flow.cs.is.nagoya-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内山 知実 (UCHIYAMA TOMOMI)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号: 90193911