

円柱群流路内における気泡挙動の数値解析 Numerical Analysis of Bubble Behavior in a Channel with Cylinders

○ 笹木 俊男, 福井大・院, 〒910-8507 福井市文京 3-9-1, E-mail: toshio-s@fv.mech.fukui-u.ac.jp
村井 祐一, 福井大・工, 〒910-8507 福井市文京 3-9-1, E-mail: murai@fv.mech.fukui-u.ac.jp
山本 富士夫, 福井大・工, 〒910-8507 福井市文京 3-9-1, E-mail: yamamoto@fv.mech.fukui-u.ac.jp
Toshio SASAKI, Dept. of Mech. Eng., Fukui-Univ., 3-9-1 Bunkyo Fukui-shi, 910-8507, JAPAN
Yuichi MURAI, Dept. of Mech. Eng., Fukui-Univ., 3-9-1 Bunkyo Fukui-shi, 910-8507, JAPAN
Fujio YAMAMOTO, Dept. of Mech. Eng., Fukui-Univ., 3-9-1 Bunkyo Fukui-shi, 910-8507, JAPAN

Bubbly channel flows through densely arranged cylinders are associated with heat exchangers in nuclear power plants, and compact chemical reactors. Bubbles in such environment show complicated behavior due to cylinder-bubble direct interactions. This study aims at clarifying relationship between arrangement of cylinders and internal convection of two phases. This report shows a result of the three-phase simulation using Eulerian-Lagrangian model in which the cylinder-bubble interaction models are taken into account.

1. 緒言

液体中に多数の物体が配置されている流れ場に気泡を吹き込むと、加熱、冷却、混合、吸着などの熱・物質輸送特性に変化をきたす。この流動構造の変化に対する要因の一つに、多数の物体に対する気泡のバウンス挙動や気泡浮上速度の低下などが考えられる。このような流れ場の流動・伝熱特性の評価には、流路の幾何学的構造とその局所流動場をあわせて検討しておくことが必要である。

複数の物体で構成される流路での気液二相流は、例えば、固相の密度が密な場合、固定層反応塔や液体クロマトグラフィーで見受けられる。これらの装置に用いられる充填層は、固液間の接触面積が大きく層内に乱れを起こさせて化学反応特性を向上させるために広く使用されている。充填層に関する研究として、小川ら¹⁾は、不定形型充填層の三次元計測に MRI を適用し、低レイノルズ領域であっても平均流速に依存して変化する逆流域の形成を実験的に捉えた。しかし、このような充填層内の気液二相流の流れは、光が透過しないことから計測が困難であるのに加え、数多くの因子によって現象が支配されているため、流動特性の整理は非常に困難である。そのため、化学工学の分野において、主に装置の性能解析を基盤とした研究が数多くなされている²⁾。

一方、固相の密度が疎な場合には、沸騰水型原子炉の燃料棒周辺やバイオリアクター内でこのような流れ場を見ることができる。特に、熱交換器に関する設計では、管壁の液膜流によるドライアウト現象が問題とされており、その内部流動構造における気泡挙動の解明は特に重要となる。これに対して、加野ら³⁾は、2×3 ロッドバンドル流路におけるスラグ速度を電極プローブによって計測し、気液二相流の見掛けの速度とスラグ速度の関係を示した。また、著者の一部⁴⁾は、気泡流中に気泡サイズより大きな円柱を挿入した際に誘起される二相対流に着目し、ボイド率、気泡径などをパラメータとして、その流動メカニズムを明らかにしている。

本研究では、流れ場中に多数の物体が存在し、かつその密度が密な場合にも適用できるシミュレーションモデルの構築を試み、その有効性を調べる。そのあとで、解析対象を円柱群流路内の気液二相流として、円柱-気泡間相互干渉に着目して気泡流の上昇速度に及ぼす影響因子を明らかにすることを目的とする。解析ツールには、分散性混相流の数値解析モデルの一つである Eulerian-Lagrangian モデル(以下、E-L モデル)を用いた。

2. 計算手法

本研究では、円柱と気泡の相互干渉が支配的なマクロな流れ場を解析の対象としている。一般に、数値計算手法は、流れ場の空間解像度によっておおまかに分類されるが、マクロな流れ場を解析する場合、平均化方程式を用いたモデルがコンピュータの演算処理性能上からも有効である。この平均化方程式を扱うモデルの中で、E-L モデル⁵⁾は、運動方程式を解いてそれぞれの気泡の位置および速度をラグランジュ的に求めるため、オイラー的に解く他のモデルに比べ、精度よく気泡の運動を予測することができる。これは、気泡の挙動に着目した解析を行うのに適したツールである。このような理由から、本数値計算では E-L モデルを選択する。しかし、E-L モデルを含め従来のシミュレーションモデルでは、円柱と気泡の相互干渉が支配的な円柱群流路内の流れ場を解析することは不可能である。

そこで、ここでは新たに固体円柱を境界条件として扱わずに格子平均モデルで表現した固気液三相シミュレーションモデルの構築を試みる。まず、各相の運動量保存則を成立させるために、(1)固相(円柱)の運動量はゼロである。(2)固相は液相に対して界面抗力のみ影響を及ぼす。(3)円柱と気泡の衝突は完全弾性衝突⁶⁾であり、各相の運動量交換を一切伴わない。(4)流れは層流である。などの仮定を設け、三相から成る運動保存方程式を導出した。さらに、円柱-気泡間相互干渉をモデル化し、追跡される個々の気泡の運動に制約を与えた。具体的に、円柱と気泡の衝突(完全弾性衝突)モデル、気泡の形状を考慮した円柱間の気泡の通過モデルを円柱の気泡に対する境界条件として与えた。

支配方程式の詳細を以下に示す。添え字の L, G, S は、それぞれ液相、気相、固相を示している。

液相の質量保存方程式

$$\frac{\partial \alpha_L \rho_L}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_L \rho_L \mathbf{u}_L = 0 \quad (1)$$

三相の体積拘束条件

$$\alpha_L + \alpha_G + \alpha_S = 1 \quad (2)$$

分散相の体積率

$$\alpha = \frac{1}{V} \int_V \alpha_{local} dV \quad (3)$$

三相の運動量保存方程式

$$\frac{\partial \alpha_L \rho_L \mathbf{u}_L}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_L \rho_L \mathbf{u}_L \mathbf{u}_L + \frac{\partial \alpha_G \rho_G \mathbf{u}_G}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_G \rho_G \mathbf{u}_G \mathbf{u}_G = -(\alpha_L + \alpha_G) \nabla p - (\alpha_L \rho_L + \alpha_G \rho_G) \mathbf{g} + (\mathbf{F}_{LL} - \mathbf{F}_{SL} + \mathbf{F}_{WALL}) \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{LL} = \nabla \cdot \left(\left(1 + \alpha_G + \frac{5}{2} \alpha_s \right) \mu \left\{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} \right) \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{LS} = \frac{1}{8} a_{\text{m}} C_D \alpha_L \rho_L |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_L| (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_L) \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{WALL} = -12 \mu \frac{\mathbf{u}_L}{z^2} \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{0} \quad (8)$$

気泡の並進運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \{ (\rho_G + \beta \rho_L) V_G \mathbf{u}_G \} - \frac{D_L}{Dt} (\beta \rho_L V_G \mathbf{u}_L) = \\ V_G \left[-\nabla p + \mu_L \left\{ \nabla^2 \mathbf{u}_L + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_L) \right\} \right] \\ - \frac{1}{2} \rho_L \pi r_G^2 C_D |\mathbf{u}_s| \mathbf{u}_s - C_L \rho_L V_G \{ \mathbf{u}_s \times (\nabla \times \mathbf{u}_L) \} - \rho_G V_G \mathbf{g} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_G - \mathbf{u}_L \quad (10)$$

気泡の重心座標追跡式

$$\mathbf{X}_G(t) = \mathbf{X}_{G0} + \int_0^t \mathbf{u}_G(t) dt \quad (11)$$

これらの支配方程式の解法には HSMAC 法を用い、方程式の離散化には、対流項に CIP スキーム⁷⁾、他の空間微分項に 2 次精度中心差分法を用いる。また、分散相の体積率の計算手法は TD 法⁸⁾に従う。

3. 計算条件

シミュレーション条件の概略図を図 1 に示す。解析対象は、円柱群流路を模擬した容器内の二次元流れであり、初期条件として幅 300 mm、奥行き 4 mm の容器に水を高さ 400 mm まで静かに満たした状態を想定している。円柱は、容器内に決められた配列で固定されている。液相の境界条件は、容器の底面および側面の固体壁を Non-slip 条件とし、上面のみ自由流出条件とした。気泡は、底面に 50 mm 間隔で配置された 5 箇所から、一様に吹き込まれる。

シミュレーションの条件を表 1 にまとめる。今回検討したパラメータは、円柱の体積率および円柱の配置パターンである。なお、円柱の配置は、格子配列、千鳥配列、ランダム配列の三種類を扱った。

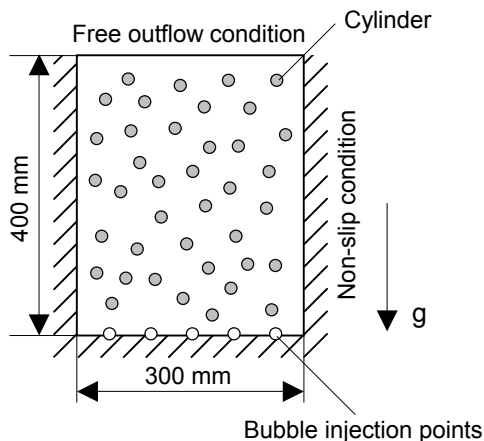


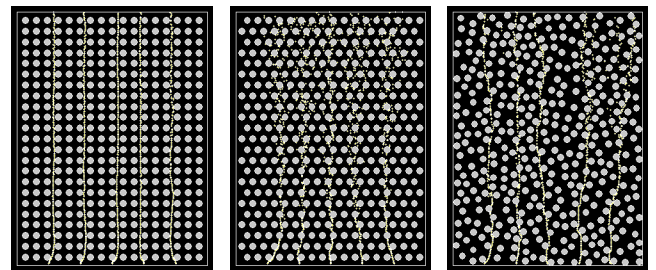
Fig.1 Boundary conditions of simulation domain

Table.1 Simulation conditions

Simulation domain	0.3 m×0.4 m
Grid division number	33×45
Time integration unit	0.001 s
Simulation period	10.000 s
Kinematic viscosity of liquid	10 ⁻⁶ m ² /s
Bubble diameter	2.0 mm
Gas flow rate	0.20 l/min
Cylinder diameter	10.0 mm
Volume fraction of cylinder	5-25.6 %
Arrangements of cylinders	
Regular arrangement	
Staggered arrangement	
Random arrangement	

4. 計算結果

図 2 には、円柱の体積率 25.6%でのシミュレーションの様子が示されており、それぞれの配置パターンについて円柱と気泡が表示されている。以下は、パラメータ別にシミュレーションの考察を行う。



(a) Regular arrangement (b) Staggered arrangement (c) Random arrangement

Fig.2 Typical samples of simulated results
(Volume fraction of cylinder = 25.6 %)

4.1 円柱の体積率の変化

図 3 には、円柱の体積率の変化に伴う気泡の平均上昇速度が示されている。ここで、気泡の平均上昇速度は、円柱群流路内を通過する気泡の平均上昇速度と単相流中を浮上する単一気泡の終端速度との比であり、低いほど円柱の気泡の運動に及ぼす干渉が大きいことを表している。図 3 中の記号◇、□、○は、それぞれ格子配列、千鳥配列、ランダム配列の結果である。図より、円柱の体積率の増加に伴って、気泡の平均上昇速度の明らかな低下が確認される。これは、円柱の個数が多くなるにつれて、円柱と気泡の相互干渉の効果が高くなるためである。この円柱と気泡の相互干渉とは、本シミュレーションで導入された円柱と気泡の衝突(完全弾性衝突)モデルと円柱に対する気泡の通過モデルを示している。そこで、気泡の平均上昇速度の低下に対する理由を、円柱と気泡の衝突頻度の側面から明らかにすることを試みる。

図 4 には、円柱の体積率の変化に対する個々の気泡の衝突頻度が示されている。図 3 と同様に、図中の記号◇、□、○は、格子配列、千鳥配列、ランダム配列の結果である。図から、円柱の体積率が高くなるにつれて、円柱と気泡の衝突回数が増加していることが確認された。ここで、図 3 および図 4 の円柱の体積率 25.6%に着目してみる。例えば、衝突頻度がおよそ 8%の時に気泡の平均上昇速度が 0.96 であることを考慮すれば、平均上昇速度が 0.67 の場合、線形的に見積もると衝突頻度は 66%となるが、実際はおよそ 45%である。このことから、気泡の上昇速度は衝突頻度に対して、必ずしも一

様に低下しているのではないようである。しかし、ここで注目すべきことは、衝突頻度の増加の傾向が先に示した平均上昇速度の低下の傾向と非常に似ていることである。何故なら、これは円柱と気泡の衝突が気泡の平均上昇速度の低下に対する直接的な要因であることを表しているからである。

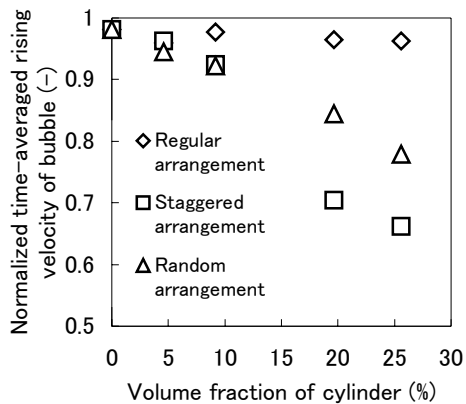


Fig.3 Normalized time-averaged rising velocity of bubble versus volume fraction of cylinder

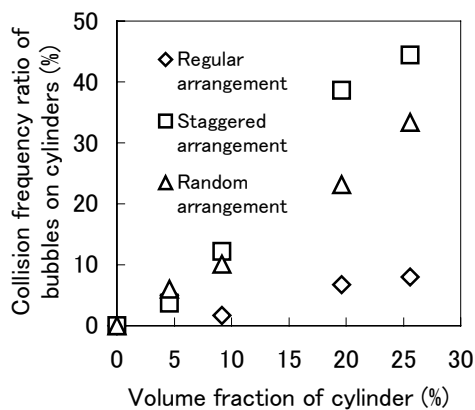


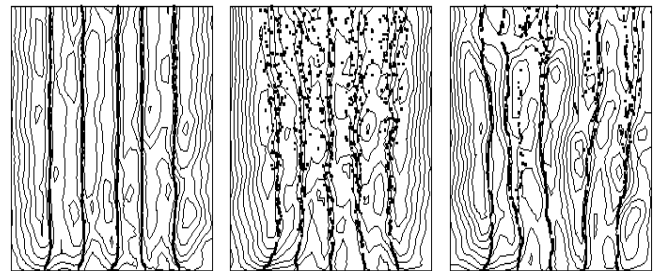
Fig.4 Collision frequency ratio of bubbles on cylinders versus volume fraction of cylinder

4.2 円柱の配置パターンの変化

図3より、格子配列では円柱の体積率が高い場合においても気泡との干渉がほとんど見受けられないのに対して、千鳥配列、ランダム配列では明らかな相互干渉の影響が示された。特に千鳥配列は他の配列に比べて気泡の運動に与える影響が大きく、円柱の体積率25.6%においては気泡の平均上昇速度は70%弱に抑制されることが確認された。これは前節により、円柱と気泡の衝突回数による影響が大きいことを確認している。

それでは、円柱の配置パターンによって、何故円柱と気泡の衝突回数に差が生じるのだろうか。その答えは、気泡によって誘起される液相の流れの中から見つけることができる。図5には、円柱の体積率25.6%での液相の流れと気泡の分布が表示されている。図から、容器側面において、円柱間距離の10倍以上に相当する液相の大規模な循環流を観察することができる。特に格子配列の場合では、それぞれの気泡群の間においても循環流の存在が確認される。この流れは、気泡によって誘起された液相の上向きの流れと、気泡を含まない

領域での下降流から構成される。ランダム配置では、このような循環流は局所に存在しているが、気泡が比較的分散している千鳥配列ではほとんど見られない。このように、気泡によって液相に強い伴流構造が形成されると、後続の気泡はその流れにエントレインされる。これらの気泡の運動は液相の流れに少なからず支配されるため、円柱との衝突頻度は減少する。これが気泡の衝突頻度を減少させるメカニズムである。なお、液相の流れに気泡がエントレインされることによって、気泡の上昇速度は単一気泡の上昇速度よりも高くなる。前節で触れた平均上昇速度が衝突頻度に対して一様に定まらない要因の一つは、このためであることが推測できる。また、気泡の分布形態に着目すると、千鳥配列では気泡が拡散的に分布しているが、格子配列では分散しない。ランダム配列では非対称な分散が発生している。これは、先ほど述べた伴流構造により説明される。



(a) Regular arrangement (b) Staggered arrangement (c) Random arrangement

Fig.5 Stream line and bubble distribution (Volume fraction of cylinder = 25.6 %)

5 結言

本研究では、円柱群流路内の気液二相流の解析を行うため、従来の E-L モデルに円柱-気泡相互干渉モデルを導入し、以下の知見を得た。

- (1) 本シミュレーションモデルによって、円柱群流路内の気液二相流を定性的にシミュレートすることに成功した。
- (2) 静止液体中に気泡を一様に吹き込んだ場合、気泡の平均上昇速度は円柱と気泡の衝突に支配的であることが分かった。
- (3) 気泡の平均上昇速度に対して、円柱の配置パターンによって形成される液相の伴流構造が重要な要因となることを明らかにした。
- (4) 今回計算された格子配列、千鳥配列、ランダム配列の中で、千鳥配列は最も大規模な循環流の形成を妨げる配置パターンであり、気泡の平均上昇速度を大きく低下させることが確認された。

参考文献

- (1) 小川邦康・松家剛・平井秀一郎・岡崎健, 機論, **65**-633, B(1999), 1680-1687.
- (2) 坂口浩範・ほか7名, 化学工学論文集, **24**-1, (1998), 37-41.
- (3) 加野敬子・川原顕磨呂・工野司・佐田富道雄, 日本混相流学会年会講演会 2001 講演論文集, (2001-7), 109-110.
- (4) 村井祐一・藤元宏一・石黒徹・山本富士夫, 機論, **66**-646, B(2000), 1273-1280.
- (5) 村井祐一・松本洋一郎・宋向群・山本富士夫, 機論, **64**-626, B(1998), 3257-3263.
- (6) 村井祐一・石黒徹・山本富士夫, 混相流シンポジウム'97(第16回)講演論文集, (1997-7), 23-26.

- (7) Takewaki, H., Yabe, T., 1987, *J. Comput. Phys.* 70, 355-372.
- (8) Kitagawa, A., Murai, Y., Yamamoto, F., 2001, *Int. J. Multiphase Flow* 27, 2129-2153.