

Bubble Plumeの大規模渦構造に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation of Large-Eddy Structure in a Bubble Plume

二瓶 泰雄* 灘岡 和夫**

By Yasuo Nihei and Kazuo Nadaoka

A numerical simulation is performed on a bubble plume, a typical gas-liquid phase flow, for extending the applicability of GAL-LES model, which has been recently developed by the authors for multiphase turbulent flow. The GAL-LES model has succeeded in simulating the essential features of large-eddy structure, which is found to be appreciably affected by the bubble concentration at the inlet slot, giving quantitatively good agreements with the previous experimental results.

Keywords: GAL-LES model, bubble plume, gas-liquid phase flow, large-eddy structure, bubble concentration

1. はじめに

著者らは、最近、土石流やプラント内での粉体輸送などでよく見られる「大規模・高粒子濃度」領域の存在する固体-流体混相乱流場を対象にした、高精度で汎用性の高い数値モデルを開発している^{1)~7)}。そこでは、超多粒子系の運動を合理的に取り扱いつつ、物理的特性を踏まえた新たな固相モデル（以後、GALモデル：Grid-Averaged Lagrangian model）を開発し、それに基づく混相乱流モデルの基本的な枠組み（GAL-LESモデル）を構築している。このモデルは、固液粒子プルーム^{1)~4)}や高濃度水平流動層⁵⁾、⁶⁾、混相乱流変調問題⁷⁾といった幅広い混相乱流場にわたって適用され、GAL-LESモデルの基本的な有効性及び妥当性が検証されている。このGAL-LESモデルの計算対象としては、これまで固体-流体混相乱流場に限定していたが、もともとこのモデルは、固体粒子のみならず気泡や液滴などの分散相系混相流も取り扱うことが原理的に可能な数値モデルとなっている。したがって、今後、このGAL-LESモデルの汎用性・応用性を高めていくためには、より幅広い分野を対象にして数値解析を行っていく必要がある。

分散相粒子を含む気液二相流場の一例として、気泡群の浮力を駆動力とする bubble plume が挙げられる。この bubble plume は、ダムや貯水池の富栄養化防止対策としてのエアレーションや原子炉冷却装置、オイルフェンスなど様々な工業・環境プロセスで見受けられ、これらの流動構造を解明することは極めて重要

* 正会員 修士（工） 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

** 正会員 博士 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

な課題となっている。

そこで本研究では、GAL-LESモデルの適用性・汎用性を拡張するために、GAL-LESモデルを用いて大規模渦構造が流れ場の重要な支配要素になっている **bubble plume** を対象にして数値シミュレーションを行った。具体的には、気泡混入濃度を変化させて、大規模渦構造や気泡濃度分布などの流動パターンがどのように変化するかを検討するとともに、気泡プルームの乱流構造に関して詳細な検討を行っているAlam & Arakeri⁸⁾の実験結果との比較を通して、本モデルの気液二相流への適用性・有効性を検証した。

2. 計算概要

(1) GAL-LESモデルの概要

著者らが開発したGAL-LESモデルに関する基本的な考え方について以下に示す。まず、流体相に関しては、通常のLESの考え方を適用して、流体運動をGS(Grid Scale)とSGS(Sub-Grid Scale)にスケール分離し、GS運動に関しては直接数値計算し、SGS運動に関しては乱れエネルギーという形でモデル化する。それに対して、GALモデルを適用する分散相運動に関しては、ラグランジュ型の運動方程式を基礎式とする分散相粒子に対して、格子内空間平均操作を施し、「分散相運動を格子平均量と分散で記述する」という形で取り扱う。このGALモデルの持つ大きな特長としては、

- ① 格子内空間平均操作による**計算機負荷の軽減**、
 - ② ラグランジュ型の運動方程式を基礎式とすることによる**粒子運動の素過程の取り込みが容易**、
 - ③ 格子内の粒子変動運動を粒子速度分散を通して取り込むことによる**汎用的な混相乱流のLES化の実現**、
- の3点が挙げられる。したがって、このGALモデルをベースとして構成される新たな混相乱流LESモデル（GAL-LESモデル）は、高粒子・大規模領域を含む一般的な混相乱流場に対して、高精度で汎用的な数値モデルになり得るものと考えられる。なお、本研究で用いる基礎方程式系の詳細に関しては灘岡ら^{1)～4)}を参照されたい。

(2) 計算条件

本研究での計算条件は、表－1に示すとおりである。ここでの気泡径と気泡混入濃度は、Alam & Arakeri⁸⁾の実験と同じに設定している。また、ここでは、気泡混入濃度が **bubble plume** の流動状況に及ぼす影響に着目していることから、気泡混入濃度のみを変化させ、その他の条件を一定にして計算を行っている。初期条件としては、静止状態、すなわち全ての未知変量を0に設定している。境界条件としては、下方境界に位置する気泡混入口において表－1に示す気泡混入濃度 C_0 と単一気泡上昇速度 V_∞ を与えて気泡混入フラックスが一定になるように設定し、上端境界では開放条件を、その他の境界では壁面条件を与える。なお、主流の流出境界となる上端部では、境界部での数値誤差が上流に過大な擾乱を与えないような流出境界条件が幾つか提案されているが^{9)・10)}、本研究では開放条件を適用して計算しても、ほぼ安定に計算を持続できることが確認されている。

また、本計算モデルでの気泡の取り扱いには、以下の仮定を設けている。

- 1) 気泡の変形と体積変化は無視する。すなわち気泡は非圧縮性で常に球形を保つ。
- 2) 気泡の合体及び分裂は起こらない。

表－1 計算条件

計算領域	40cm×30cm
計算格子数	40×60
計算時間刻み	0.005s
気泡混入口幅 h	1.0cm
液体密度	1.0g/cm ³
気体密度	1.0×10 ⁻³ g/cm ³
気泡径 d	0.012cm
単一気泡上昇速度 V_∞	0.784cm/s
気泡混入濃度 $C_0(\times 10^{-3})$	0.5, 2.0, 8.0

3) 気泡－周囲液体の界面を介する物質の移動は無い。

4) 流れ場全体での熱的な非平衡は存在しない。

したがって、ここでは気泡粒子に働く外力として、抗力、Saffman揚力、圧力勾配、付加質量力、重力のみを取り扱い、気泡界面での表面張力などは無視しており、さらにバセット項も省略している。また、本論文では、全てのケースにおいて2次元で計算を行っている。

3. bubble plume に関する数値計算結果

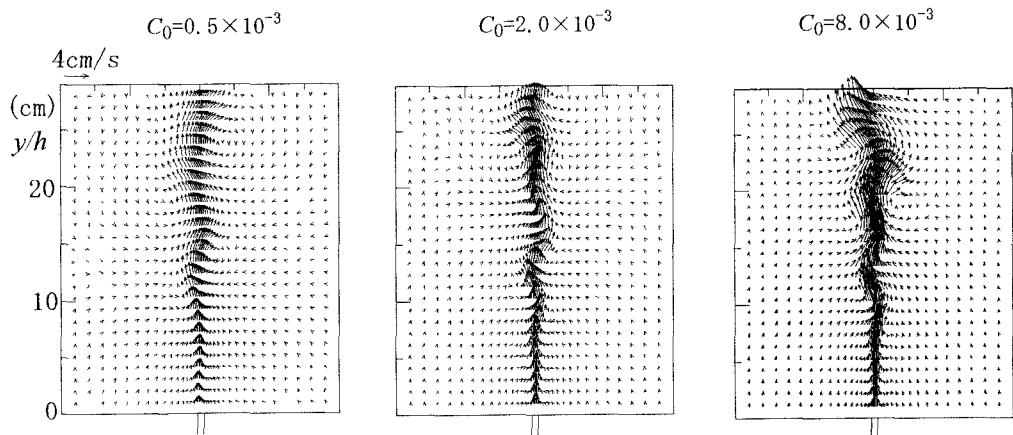
図－1は、気泡混入濃度の変化に伴う基本的な流動状況の違いを見るために、各ケースにおいて流動状況がほぼ変わらなくなった時点での流体相速度ベクトルと気泡体積濃度、渦度コンターを示したものである。これらを見ると、気泡混入濃度の大きさに関わらず、濃度や渦度コンターが中心軸に対して非対称に分布していることがわかる。これは、通常のjetやplumeで観察される揺らぎ現象¹¹⁾と同一の流動構造が再現されていることを示すものである。しかしながら、その揺らぎの様子は、各ケースにより大きく異なっている。気泡混入口の近傍では、どのケースも鉛直上方へ向かってほぼ直線的に上昇し、その後揺らぎ現象を引き起こす乱流へ遷移しているが、その遷移するまでの距離は、気泡混入濃度が小さいほど長くなっている。また、渦度コンターから明らかなように、流れ場に発生する大規模渦の波長は気泡混入濃度が小さいほど大きくなる傾向がうかがえる。このような大規模渦の波長が気泡混入濃度とともに大きくなるという計算結果は、Alam & Arakeri⁸⁾の実験結果と定性的に一致している。

また、図－1(b)に示されている気泡濃度分布の広がり方に着目すると、気泡混入濃度が小さい場合には、その広がり方は鉛直方向に対してほぼ連続的に変化しているのに対して、気泡混入濃度が大きい場合には、ある断面において急激に広がっていることがわかる。この部分での渦度コンターも同様に横断方向へ急激に広がっていることから、このような気泡濃度分布の急激な変化と大規模渦構造は、互いに密接に関連していることが分かる。これは、気泡混入濃度を大きくすると、気泡とその周りの流体との相互作用力が増加し、そのうえ、慣性力の小さい気泡の場合にはその周りの流体運動への追従性が高いため、流体相の渦運動がより発達することによるものと考えられる。

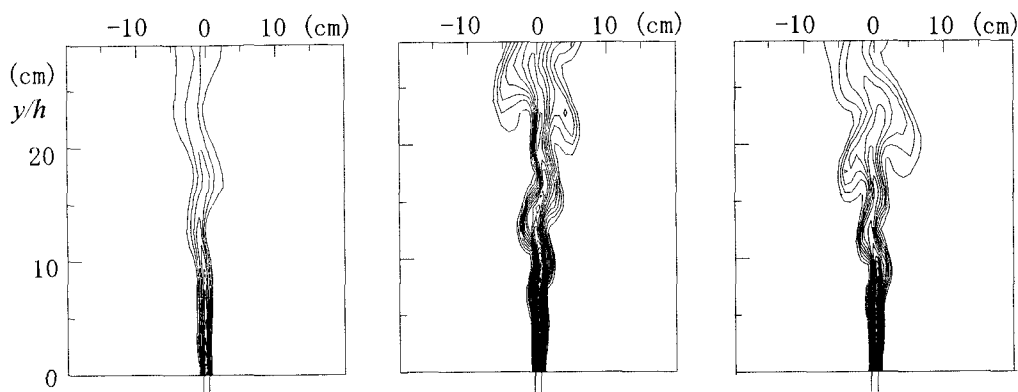
図－2は、Alam & Arakeri⁸⁾によって行われた気泡プルームの可視化写真であり、気泡混入量の違いに伴う気泡プルームの流動パターンの変化に関する典型的な例を示している。この気泡混入量に関しては、小さい場合は $C_0=0.5 \times 10^{-3}$ の計算ケースに、大きい場合は $C_0=2.0 \times 10^{-3}$ の計算ケースに対応している。これらを見ると、両ケースとも気泡群が中心軸に対して大きく揺動して分布していることがわかるが、気泡混入量が大きい方が、その広がり幅が大きく、その揺動の波長が短くなっていることがうかがえる。また、気泡混入量が大きい場合には、気泡分布が急激に広がっている部分が存在しており、これらのことは上記の計算結果で得られたことと定性的に一致している。

次に、各計算ケースの流動構造の違いを定量的に見るために、中心軸上での流体相鉛直方向平均速度 V_c や各横断面内での乱れ強度の最大値 V_{max} 、および、気泡体積濃度の半値幅に関する時間平均データの鉛直分布を図－3に示す。まず、流体相の軸上鉛直方向速度に関しては、気泡混入量が大きくなるとともに大きくなっていることが分かる。この流体相速度を気泡混入フラックスの1/3乗で無次元化すると、各ケースともほぼ同じ値になるが、このことは既存のbubble plumeの実験結果^{12), 13)}と一致している。また、図－3(b), (c)を見てみると、気泡混入量が多くなるとともに大規模渦が発達し気泡濃度の広がり幅が大きくなるという先の図－1に関する議論に整合する形で、気泡混入濃度が大きいほど鉛直方向乱れ強度や気泡濃度の半値幅が大きくなっていることが分かる。

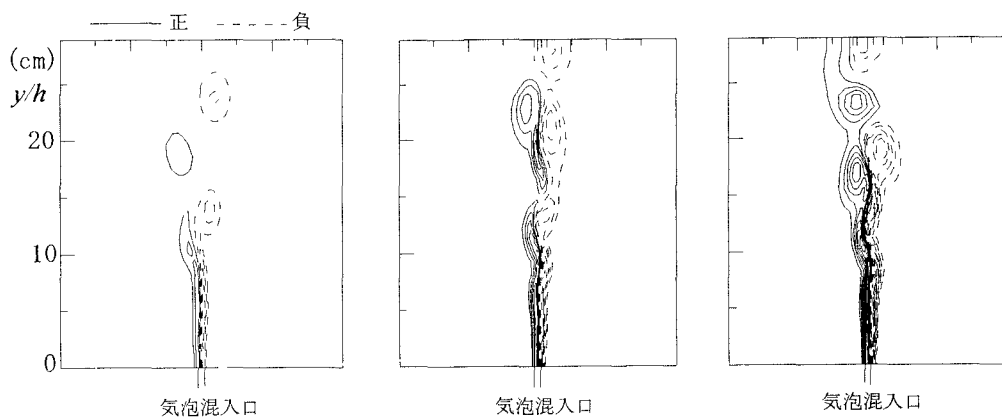
図－4(a)は、気泡混入口から上方5cmの断面内の中心軸上での鉛直方向平均流速 U とプルームの波速 U_w に関して、計算値と実験値の比較を行ったものである。ここでプルームの波速 U_w とは、流れ場に発生す



(a) 流体相速度ベクトル



(b) 気泡体積濃度コンター (コンター間隔: 10^{-4})

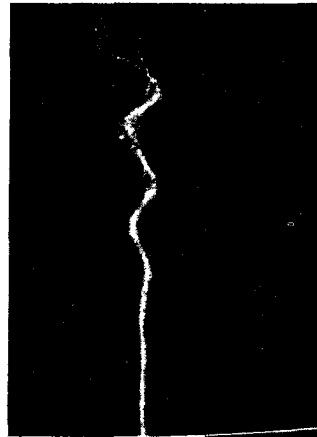


(c) 流体相温度コンター (コンター間隔: $3 (1/s)$)

図-1 bubble plume の流動パターン

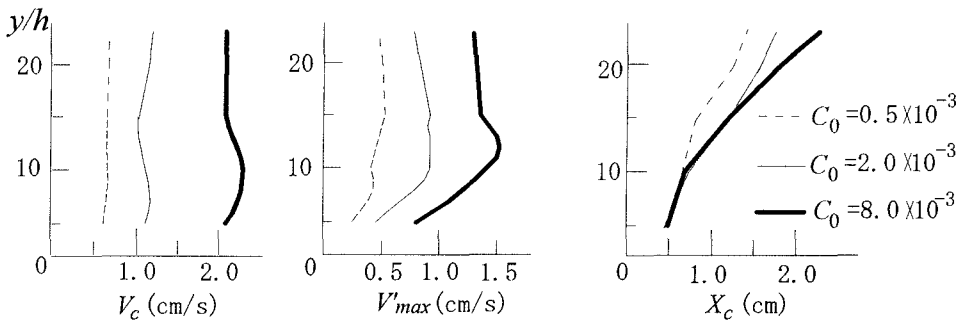


(a) 気泡混入量が大きい場合



(b) 気泡混入量が小さい場合

図-2 bubble plumeの可視化写真⁸⁾



(a) 流体相の中心軸上流速 (b) 流体相鉛直方向乱れ強度 (c) 気泡濃度の半値幅
(GS成分のみ)

図-3 各計算ケースにおける時間平均データの比較

る気泡濃度などの空間的な揺動の波速を意味している。なお、図中の横軸は気泡混入量 $Q (=V_{\infty}C_0h)$ である。これを見ると、気泡混入濃度が最も大きい場合には実験データが欠損しているため直接的な比較を行うことはできないが、他のケースに関しては実験値と計算値は良好な一致を示していることがわかる。

図-4 (b) は、気泡混入口からの揺動の始まる距離 Y_l に関して、計算値と実験値の比較を行ったものである。Alam & Arakeri⁸⁾では、3次元的な乱流への遷移点までの、気泡混入口からの距離を求めていることから、2次元計算にとどめている本研究の計算結果と直接比較することはできない。そこで、ここでは、2次元的な揺動現象の始まる距離を彼らの可視化写真から読み取り、計算結果との比較を行っている。これを見ると、実験結果に見られる気泡混入量 Q によって遷移距離 Y_l が大きく減少する様子を、計算結果は定量的によく再現していることがわかる。このことは、GAL-LESモデルの気液二相乱流計算に対する基本的な有効性および妥当性を示すものである。

4. おわりに

著者らが最近開発した新しい混相乱流モデル (GAL-LESモデル) を用いて、基本的な気液二相流場の一

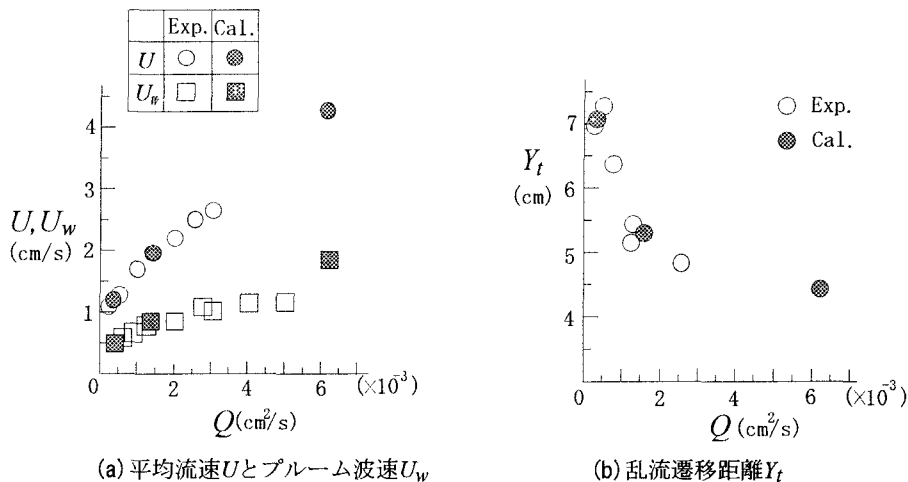


図-4 計算結果と実験結果の比較

つである bubble plume に関する数値計算を行った。その結果、気泡混入量の違いによる大規模渦構造の変化の基本的な特徴を十分再現するのに成功するとともに、計算結果が既存の実験結果と良好に一致することが示されたことから、本モデルの気液二相乱流計算への適用性に関する基本的な有効性が確認され、本モデルの適用性を拡張することができたと考えられる。

気液二相流場への適用性をさらに向上させるためには、本計算では取り扱わなかった気泡同士の合体・分裂や気泡の圧縮性、形状の変化などを合理的に GAL-LES モデルに取り込む必要がある。特に、気泡粒子が数多く存在するような流れ場において従来取り扱いが困難であった気泡同士の合体については、著者らが既に開発している固体粒子間衝突モデル^{5)・6)}を気泡粒子に適用すれば、モデル中に取り込むことが可能になるので、気泡合体の効果が気液二相乱流場にどのような影響を及ぼすかを、近々検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 灘岡和夫・八木 宏・二瓶泰雄：水工学論文集、第38巻、pp.577-584、1994.
- 2) 灘岡和夫・八木 宏・二瓶泰雄：混相流シンポジウム、第13回、pp.337-340、1994.
- 3) 灘岡和夫・二瓶泰雄・八木 宏：土木学会論文集、1996（投稿中）.
- 4) Nadaoka, K. Nihei, Y. and Yagi, H.: Proceedings of The Second International Conference on Multiphase Flow '95-KYOTO, Vol.2, pp.71-74, 1995.
- 5) 二瓶泰雄・灘岡和夫・八木 宏：混相流シンポジウム、第14回、pp.168-171、1995.
- 6) 二瓶泰雄・灘岡和夫・八木 宏：海岸工学論文集、第42巻、pp.526-530、1995.
- 7) 二瓶泰雄・灘岡和夫：混相流シンポジウム、第14回、pp.120-123、1995.
- 8) Alam, M. and Arakeri, V.H.: J. Fluid Mech., pp.363-374, 1993.
- 9) 数値流体力学編：乱流解析、東京大学出版会、1995.
- 10) 村井祐一・松本洋一郎：混相流シンポジウム、第13回、pp.169-172、1994.
- 11) 室田 明・中辻啓二：土木学会論文集、No.429、pp.1-15、1991.
- 12) 北野・粟谷：水理講演会、第31回、pp.623-628、1987.
- 13) 浅枝・Imberger：土木学会論文集、No.412、pp.55-62、1989.