三次元 One-Way 気泡追跡法に基づく未発達気泡・スラグ流の予測* (第2報, 実験結果と計算結果の比較)

玉井 秀定*¹, 富山 明男*²

Three-Dimensional One-Way Bubble Tracking Method for the Prediction of Developing Bubble-Slug Flows in a Vertical Pipe (2nd Report, Comparisons between Experiments and Calculations)

Hidesada TAMAI*³ and Akio TOMIYAMA

*³ Japan Atomic Energy Research Institute,
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Ibaraki, 319-1195 Japan

The verification of the three-dimensional one-way bubble tracking method (BTM) proposed in our previous report is carried out through the comparisons between measured and predicted developing bubble-slug flows in a vertical pipe. The approaching process of two large bubbles in various liquid flow conditions is well predicted by a wake field model implemented in BTM. Good predictions are also obtained for the spatial evolutions of flow patterns, mean void fractions, void fluctuations, radial void profiles, mean pressure drops and pressure drop fluctuations under stagnant, laminar and turbulent flow conditions, provided that the bubble coalescence probability between two small bubbles and the inlet distributions of bubble size and bubble position are appropriately given.

Key Words: Multi-Phase Flow, Bubble, Pipe Flow, Bubble Tracking, Developing Flow

1. 緒言

流れ場に存在する個々の気泡の速度・位置・大きさ等の局所量を直接得られ、各相体積率及び気液界面面積を計算する際に数値拡散を伴わない気泡追跡法は、各種工業装置内未発達気液二相流の有効な解析手法としてその発展が期待されている。Stuhmiller ら⁽¹⁾は三次元 one-way 気泡追跡法を提案し、鉛直管内未発達気液二相流における大気泡の大きさ・速度・合体頻度・通過頻度の空間発展を予測できることを示した。Zun ら⁽²⁾は二次元気泡追跡法を提案し、気泡後流により形成される気泡数珠構造、気泡の集合化や合体による気泡数密度の管軸方向疎密の増加、管半径方向体積率分布の時空間発展などを予測している。Kljenak⁽³⁾は鉛直管内沸騰二相流予測を目的とした三次元 one-way 法を提案し、沸騰二相流における管半径方向ボイド率分布と界面積濃度の管軸方向発展を予測している。しかしながら、これらの手法では未発達気液二相流の様々な支配因子に対するモデルの欠如・不十分さのため、予測

される流れ場は実際の流れとは大きく異なる。また、気泡追跡法の利点の一つであるボイド率及び圧力の変動量予測も行われていない。著者らは前報⁽⁴⁾において、鉛直管内未発達気泡・スラグ流の時空間発展をより実際の流れに即した形で予測するために、未発達流における各種支配因子(気泡形状・運動方程式・液相速度場・気泡合体等)を既存の知見及び筆者らが実施した実験結果を基にモデル化し、新たな三次元 one-way 気泡追跡法を構築した。本報では、前報で提示した気泡追跡手法の概要を述べた後、流動様式・ボイド率・差圧の時空間発展に関して実験結果と計算結果を比較し、構築した手法による未発達気泡・スラグ流の予測精度を検証する。

2. 使用記号

C	液相速度分布が大気泡上昇速度に及ぼす影響を考慮するための係数 ⁽⁵⁾ [-]
d	気泡球体積等価直径 [m]
D	管直径 [m]
Eu	エトベス数 ($= (\rho_L - \rho_G)gd^2/\sigma$) [-]
F_D	界面抗力 [N/m^3]
F_T	横方向力(揚力) [N/m^3]
F_w	壁力 [N/m^3]

* 原稿受付 2003年9月18日。

*¹ 正員, 日本原子力研究所(☎ 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)。

*² 正員, 神戸大学工学部(☎ 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)。

E-mail: tama@hfwing.tokai.jaeri.go.jp

F_{VM}	仮想質量力 $[N/m^3]$
g	重力加速度 $[m/s^2]$
k	体積平均ボイド率の測定区間 $[-]$
J	管断面平均体積流速 $[m/s]$
N	体積平均ボイド率の測定回数 $[-]$
N_B	計算領域に存在する気泡の数 $[-]$
P_C	気泡合体確率 $[-]$
r	管半径方向座標 $[m]$
R	管半径 $[m]$
Re_L	液相レイノルズ数 $(= \rho_L J_L D / \mu_L) [-]$
t	時刻 $[s]$
T_{CPU}	計算に要した時間 $[h]$
V_B	気泡速度 $[m/s]$
V_L	液相速度 $[m/s]$
V_T	気泡終端速度 $[m/s]$
V_W	先行大気泡後流速度 $[m/s]$
z	鉛直方向座標 $[m]$

ギリシャ文字

$\alpha_G(k)$	区間 k の体積平均ボイド率 $[-]$
$\bar{\alpha}_G$	測定区間の平均ボイド率 $[-]$
α_G	時間平均ボイド率 $[-]$
α_{Gi}	瞬時体積平均ボイド率の i 番目の測定値 $[-]$
$\delta\alpha_G$	ボイド率測定値の標準偏差 $[-]$
ΔP	差圧 $[Pa]$
μ	粘性係数 $[Pa \cdot s]$
ρ	密度 $[kg/m^3]$
σ	表面張力 $[N/m]$

下付添字

G	気相
L	液相

3. 気泡追跡法の概要

気泡追跡法の概略を図 1 に示す。気泡形状は、球体・積等価直径に応じて球形・回転楕円体・冠球形・砲弾形(テイラー形状)の 4 種に分類する。球形から回転楕円体形への遷移直径は無限静止液中単一気泡の抗力係数の支配因子が気泡レイノルズ数からエトベス数 Eo に移行する際の径⁽⁶⁾と仮定する。回転楕円体と冠球形気泡間の遷移径は $Eo = 40$ を満たす径⁽⁷⁾とする。また、回転楕円体形気泡の長軸長さが管径の 50%に到達した際にテイラー気泡への遷移が起こると仮定する。回転楕円体形気泡の形状は Weltek ら⁽⁸⁾による相関式、テイラー気泡の形状は中原ら⁽⁹⁾による大気泡形状関数を用いて与える。

大気泡(冠球形・テイラー形)と小気泡(球形・回転楕円体)では運動形態が大きく異なる。そこで、大気

- Bubble Shape
 - (a) Small (Sphere, Ellipsoid)
 - (b) Large (Spherical-Cap, Taylor)
- Equation of Bubble Motion
 - (c) $\rho_G \frac{dV_B}{dt} = F_D + F_T + F_W + F_{VM} + F_B$
- Liquid Velocity
 - (d) Liquid single phase + Wake model
- Turbulence
 - (e) Shear-Induced & Bubble-Induced
- Bubble Coalescence
 - (f) Small — Small, Probability, P_C
 - (g) Large — Large, $P_C = 1$
 - (h) Large — Small, Bubble cluster
- Pressure Loss
 - (i) 1D steady mixture momentum balance
Static Head + Friction
+ Acceleration + Local Loss

Fig. 1 Models for a three-dimensional one-way bubble tracking method

泡は常に管中央を鉛直上昇(すなわち一次元運動)すると仮定し、鉛直方向速度 V_B を液相流中大気泡上昇速度 $(CV_L + V_T)$ に先行大気泡後流速度 V_W を加算した次式で評価する。

$$V_B = CV_L + V_T + V_W \quad (1)$$

小気泡は以下の三次元運動方程式を用いて追跡する。

$$\rho_G \frac{dV_B}{dt} = F_D + F_T + F_W + F_{VM} + F_B \quad (2)$$

抗力 F_D には管壁が気泡速度に及ぼす影響を考慮したモデル⁽⁹⁾、揚力 F_T には気泡径増加に伴う揚力方向の変化を考慮したモデル⁽⁹⁾、壁力 F_W には細川ら⁽¹⁰⁾が提示した相関式、仮想質量力 F_{VM} 及び浮力 F_B には標準的な式を用いる。

大気泡周囲の液相速度場を大気泡の影響が及ばない領域・大気泡先端領域・大気泡周囲の液膜流領域・大気泡後流領域の 4 領域に分割し、各領域において大気泡サイズ及び液相レイノルズ数の影響を考慮した液相速度場モデルを用いる。大気泡の影響がない領域では小気泡の存在は時間平均液相速度分布に大きな影響を及ぼさないと仮定し液相速度分布を液单相流の標準的速度分布で与える。大気泡先端領域ではポテンシャル流れの解、大気泡周囲液膜流では液相に対する一次元質量保存から得られる液相速度を用いる。大気泡後流領域の液相速度分布には実験結果を基に構築した後流速度場モデル⁽¹¹⁾を用いる。

One-way 法の枠組み内で瞬時管軸方向圧力分布を計算するため、位置損失・摩擦損失・加速損失・大気泡

直下部の局所損失⁽¹¹⁾を考慮した気液混合体に対する定常一次元運動量保存式を用いる。また、小気泡誘起乱れ及びせん断誘起乱れが小気泡運動に及ぼす影響を考慮するため、既存の実験結果⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾を基に液相速度変動成分を与える。

気泡合体に関しても小気泡と大気泡では合体過程が大きく異なるため、(1) 小気泡同士、(2) 大気泡同士、(3) 小気泡と大気泡の各組み合わせに対し合体過程をモデル化する。(1) 小気泡間合体は確率的事象とみなし合体確率 P_C により接触した2気泡が合体するかどうかを判別する。合体確率 P_C は本来ならば気泡径・気泡間の相対速度・乱流速度・接触時間・接触面積等の関数としてモデル化すべきである^{(15),(16)}。しかしながら、現時点ではこれらの因子が気泡合体に及ぼす影響に関する定量的知見が不足しているため、本手法では P_C は実験係数とする。(2) 大気泡同士の合体に関しては、観察結果より $P_C = 1$ とし、接触すれば必ず合体させる。(3) 小気泡と大気泡の合体は大気泡直下部に形成される小気泡クラスター領域においてのみ発生すると仮定し、小気泡クラスター部の気相体積率が最密充填体積球形気泡の気相体積率 (74.1%)⁽¹⁷⁾を超えた際に、クラスター化している全小気泡を大気泡と合体させる。

4. 実験結果と計算結果の比較

4.1 実験及び計算条件 構築した三次元 one-way 気泡追跡法の予測精度を検証するため、鉛直円管内未発達気泡・スラグ流の時空間発展に関して実験結果と計算結果を比較する。図2に示す実験装置を用い、二つの大気泡の干渉過程及び気泡・スラグ流における流動様式の空間発展・ボイド率の平均値及び変動値・差圧の時間変化・管半径方向ボイド率分布を測定した。試験部には内径 $D = 25.0 \text{ mm}$ のアクリル樹脂製円管、流体には常温常圧の水と空気を用いた。実験及び計算の条件を表1に示す。実験は液相レイノルズ数 Re_L を変化させた Run 1-3 と平均ボイド率 $\bar{\alpha}_G$ を変化させた Run 4 の計4条件で行った。計算は、時間刻み幅 0.005 s 、管長 3 m の条件で、 $t = 110 \text{ s}$ まで行った。その際、追跡した気泡数は $1000\text{--}6000$ 個程度であり、標準的 PC (CPU: Pentium IV, 2GHz) による計算時間は $0.7\text{--}1.2$ 時間程度であった。計算の際には小気泡合体確率 P_C と入口境界条件(入口気泡径分布)を入力する必要がある。多数の気泡が干渉する実際の流れ場において、気泡合体の支配因子である気泡径・気泡間の相対速度・ボイド率・乱流速度・接触時間・接触面積等を詳細に考慮することは困難であるため、液相速度減少による合体確率増加のみを考慮し、 P_C を液相レイノルズ数 Re_L に

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Test conditions

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
$J_G \text{ [m/s]}$	0.120	0.069	0.060	0.210
$J_L \text{ [m/s]}$	0.283	0.057	0	0.283
$Re_L \text{ [-]}$	7000	1400	0	7000
	(Turbulent)	(Laminar)	(Stagnant)	(Turbulent)
$\bar{\alpha}_G \text{ [-]}$	0.213	0.213	0.212	0.293
$P_C \text{ [-]}$	0.0025	0.0035	0.005	0.0025
$N_B \text{ [-]}$	5000	4000	1000	6000
$T_{CPU} \text{ [h]}$	1	0.9	0.7	1.2

応じて変化させた。すなわち、乱流条件では $P_C = 0.0025$ 、層流条件では $P_C = 0.0035$ 、静止水条件下は $P_C = 0.005$ とし、 Re_L 減少に従い P_C を増加させた。なお、平均ボイド率増加による合体頻度増加は、2気泡の接触回数(すなわち合体判定回数)がボイド率増加に伴い自然に増加するため自動的に考慮される。小気泡間合体確率の定量的モデル化は今後の重要課題と位置付けている。計算の入口境界条件には実験画像から評価した入口気泡径分布実測値⁽¹⁸⁾を用いた。

4.2 大気泡間干渉過程の比較 本手法に組み込んだ大気泡後流速度場モデルの妥当性を検証するために、二つの大気泡の接近過程に関して計算値と実験値を比較した。実験では、高速度カメラで撮影した大気泡干渉過程画像より気泡位置を求めた。その測定精度は $\pm 0.5 \text{ mm}$ である。実験パラメータとして大気泡径 d を $0.8 < d/D < 2.0$ の範囲で変化させた。大気泡は一定量の

Fig. 3 Comparisons between measured and predicted approaching processes of two large bubbles

空気を二つの半球形容器にため、それらを順次回転させて生成した⁽⁵⁾。静止水・層流・乱流の各条件における後続大気泡接近過程の相違を調べるため、液相レイノルズ数 $Re_L = 0, 1400, 7000$ において実験した。事前実験により大気泡干渉過程は後続大気泡の大きさに依存しないことを確認したので、以下では先行及び後続大気泡の径が等しい場合の結果のみを示す。

図 3 に測定結果と計算結果の比較を示す。黒丸が先行気泡後端位置の測定値、白丸が後続気泡先端位置の測定値、実線が計算値を表している。静止水・層流・乱流の全流動条件及び全気泡径において、計算結果は実験結果と良好に一致しており、大気泡後流速度場モデル及び式(1)に基づく大気泡速度評価の妥当性を確認できた。

4.3 流動様式遷移過程の比較 流動様式の空間発展に関する実験結果と計算結果の比較例(Run 1, 4)を図 4 に示す。実験の撮影区間長さは約 170 mm である。計算結果は同一時刻の流れ場を 400 mm 毎に横方向に並べて表示している。なお、下方の管断面図は各区間の下部 15 mm の領域内に気泡重心が含まれている気泡を全て表示したものである。

実験結果と計算結果の比較より、(1) Run 1 では大気泡があまり形成されず管軸方向に疎密の少ない流れで

ある、(2) Run 4 では気相流量(平均ボイド率)が大きいため気泡合体頻度が高く、スラグ流への遷移が顕著である、(3) ひとたび形成された大気泡は後流域に巻き込んだ小気泡や他の大気泡と合体し急速に成長する、(4) 流れ場の空間発展に伴い管軸方向気泡分布に疎密が形成される、(5) 大気泡直下に小気泡クラスター、大気泡周囲液膜領域には流下小気泡が存在する、などの未発達気泡・スラグ流における流れの幾何学的構造や流動現象を良好に予測できていることがわかる。一方、管断面内気泡分布に関しては、(1) 入口部では気泡はほぼ一様に分布しているが、流れの空間発展に伴い小さな気泡は主に管壁方向に、小気泡の中でも比較的大きな気泡は主に管中央方向に移動する(Run 1 の $z = 0.8\text{ m}$ や Run 4 の $z = 1.6\text{ m}$ など)、(2) 大気泡後流領域では管中央部に存在する小気泡は後流により急上昇するため、管壁付近の液膜領域を流下してきた気泡が管壁付近に数多く存在する(Run 1 の $z = 2.0\text{ m}$)等の傾向を確認できる。なお、紙面の都合上省略するが、Run 2, 3 においても同様に流動様式遷移過程に関する実験結果と計算結果は良好に一致した。以上より、未発達気泡・スラグ流の流動様式及びその空間発展(遷移過程)を実際の幾何学的構造及び現象に即した形で模擬できることを確認した。

Fig. 4 Measured and predicted flow patterns (the axial position, $z = 0$ m, corresponds to 400 mm below the lowest quick closing valve.)

4.4 ボイド率の平均値及び分散値の比較 図5に各区間 ($k = 1-5$) における瞬時体積平均ボイド率の統計平均値及び分散値に関する実験結果と計算結果の比較を示す。黒丸が統計平均ボイド率の実験値, 白丸が統計平均ボイド率の予測値, 縦棒が標準偏差(ボイド率変動)を表す。なお, 計算値は実験値と重ならないように右側に位置を少しずらして表示している。実験では瞬時体積平均ボイド率を急閉弁締切法⁽¹⁹⁾で測定し, 各条件において 100 回の測定により各区間 k の統計平均値 $\alpha_G(k)$ と標準偏差 $\delta\alpha_G(k)$ を

$$\alpha_G(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{Gi}(k) \quad (3)$$

$$\delta\alpha_G(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_{Gi}(k) - \alpha_G(k))^2} \quad (4)$$

により求めた ($N = 100$). 100 回の測定によりボイド率

Fig.5 Comparison between measured and predicted void fractions

Fig.6 Measured and predicted time variations of pressure loss

の平均値及び標準偏差(ボイド率変動)が正しく求められることは確認済みである(本締切法の詳細に関しては文献(19)を参照されたい). 全条件において統計平均ボイド率の実験値と計算値は良好に一致している. すなわち, (1) 流れ場の空間発展に伴い大気泡後流域に巻き込まれる気泡の数が増加し平均ボイド率が流動方向に減少する場合がある, (2) 大気泡間合体が頻繁に起こる区間(Run 2 の区間 3, Run 4 の区間 2 など)では平均ボイド率が急減する, (3) 大気泡が形成されていない区間(Run 1 の区間 1, 2)や大気泡間距離が安定し大気泡同士の合体があまり起こらない区間 (Run 3 の区間 3~5) では, 気泡の減圧膨張により平均ボイド率が徐々に増加する等の傾向を定性的・定量的に予測できている. 一方, ボイド率変動 $\delta\alpha$ に関しても, (1) Run 1 では大気泡があまり形成されないため $\delta\alpha$ は小さい, (2) 大気泡の形成・成長により気泡分布の疎密が増加し流動方向に $\delta\alpha$ が徐々に増加する等の傾向を定性的・定量的に良好に予測できている.

以上より, 二流体モデル等の平均化モデルでは予測困難な未発達気泡・スラグ流条件におけるボイド率特性を本手法により評価できることを確認できた.

4.5 差圧変動及び平均値の比較 図6に差圧の時間変化の測定値と計算値の比較(Run 1, 4)を示す. なお, 差圧測定に用いた圧力変換器の測定レンジの制約により静止水・層流条件(Run 2, 3)での測定は実施していない. 測定値と計算値は共に測定区間幅 400 mm の差圧であり, サンプリング周波数は 100 Hz である. 気泡追跡法に基づく予測では, 気泡形状振動による圧力変動や気泡の圧縮性による圧力変動減衰などの実際の流れ

場に内在する微細な圧力変動特性までは予測できないことを注意しておく。Run 1 の上流 ($z < 0.6 \text{ m}$) では小気泡が流動方向にほぼ一様に分布する気泡流(図 4 参照)であるため、主に加速損失に起因する高周波数の小さな圧力振動のみが計測された。しかし、下流区間 ($z = 2.2 - 2.6 \text{ m}$) では、図 4(a)の $z = 2.0 \text{ m}$ にみられるようなテイラー気泡型気泡クラスター形成に伴い周期の大きい波形(低周波振動)が重畳しはじめている。計算ではテイラー気泡型気泡クラスターは同程度の体積を有するテイラー気泡として出現し(図 4(a)参照)、低周波変動の重畳をもたらしている。なお、前報⁽⁴⁾で述べたように、テイラー気泡とテイラー気泡型気泡クラスターはその大きさが同程度ならばほぼ同じ上昇速度を有するため⁽¹⁸⁾、本手法ではテイラー気泡型気泡クラスターはテイラー気泡として予測される。Run 1 におけ

Fig. 7 Comparison between measured and predicted pressure drops

る低周波圧力変動の重畳、テイラー気泡型気泡クラスターとほぼ同程度の体積を有するテイラー気泡の出現、及びボイド率空間発展を良好に予測できたことは、本手法において「テイラー気泡型気泡クラスターとテイラー気泡は体積が同じならば等価」とした仮定の妥当性を意味している。

Run 1 に比べ平均ボイド率の高い Run 4 では、気泡合体頻度増加により流れの間欠性が顕著となるため低周波差圧変動が流動方向に明確に増加している。測定結果・計算結果共にこの傾向を確認できる。

差圧の時間平均値及び標準偏差(差圧変動)に関する実験結果と計算結果の比較(Run 1, 4)を図 7 に示す。図 5 と同様に計算値(○)は右側に位置を少しずらして表示している。図より、差圧の平均値及び変動値(誤差棒で表示)を定量的に良好に予測できていることがわかる。

以上、本手法により小気泡分布の管軸方向粗密に起因する加速損失がもたらす高周波圧力変動や大気泡形成・成長に起因する低周波圧力変動の管軸方向発展、及び圧力損失の平均値を良好に予測できることを確認できた。

4.6 管半径方向ボイド率分布の比較 本項では、管断面内気泡分布の予測精度を検証するため、管半径方向ボイド率分布に関して実験結果と計算結果を比較する。ボイド率測定には局所時間平均ボイド率 α_G を測定できる点電極プローブ法⁽²⁰⁾を用いた。電極には、直径 0.1 mm の白金線先端部を $10 \mu\text{m}$ 程度に研磨し、先

Fig. 8 Measured and predicted radial distributions of time-averaged void fraction

端を除きエナメル被覆したものを用いた。各計測点においてサンプリング周波数 4000 Hz で 15 分間計測を行い、時間平均ボイド率を算出した。本測定法により時間平均ボイド率を $\pm 1.5\%$ 以内の誤差で求められることを確認している。

図 8 に測定結果と計算結果の比較を示す。測定結果より、(1) 気泡-クラスター流遷移の Run 1 では管中央 ($r = 0$) で最大値をとるコアピーク分布である、(2) 未発達スラグ流の Run 2, 4 では大気泡の成長に伴い管中央にピークがある分布から $0 \leq r/R \leq 0.5$ においてほぼ平坦な分布に推移する、(3) Run3 では下方で既に大気泡が形成されているため、全測定断面で $0 \leq r/R \leq 0.5$ においてほぼ平坦な分布である等の傾向を確認できる。一方、計算結果は下方測定断面で実験結果とやや異なる分布となっている。これは、下方におけるボイド率分布が入口における管断面内気泡位置に依存するためと考えられる。入口部における個々の気泡の管断面内位置を測定することは困難であったため、計算では管断面内気泡投入位置をランダムに与えた。この影響が大気泡形成により流れ場が大きく攪乱されるまで持続したため、管下方部で誤差が生じたと推察される。大気泡が形成された管上方部では実験結果と計算結果は良好に一致している。気泡流からスラグ流への遷移過程におけるボイド率分布の空間発展を予測した例は過去になく、この意味でも本手法は未発達気泡・スラグ流の一予測手法として有効といえる。

以上、様々な物理量に関する実験と計算の比較検討より、管入口における気泡径分布・気泡管断面内位置及び小気泡合体確率のモデル化等の今後克服していくべき課題はあるが、未発達気泡・スラグ流における様々な現象を良好に予測できる 潜在的能力を本手法が有することを検証できた。

5. 結 言

前報で提示した三次元 one-way 気泡追跡法の予測精度を検証するため、鉛直管内静止水及び流水中における二つの大気泡の干渉過程、及び鉛直円管内未発達気泡・スラグ流における流動様式遷移過程・ボイド率の平均値及び変動・差圧の平均値及び変動・管半径方向ボイド率分布に関して実験結果と計算結果を比較した。その結果、

(1) 構築した大気泡後流速度場モデルにより、広範囲の気泡径・液相流動条件における二つの大気泡の接近過程を良好に予測できることを確認した。

また、管入口における気泡径分布・気泡管断面内位置及び小気泡合体確率に適切な値を用いれば、

(2) 未発達気泡・スラグ流の流動様式及びその空間発展 (遷移過程) を実際の幾何学的構造及び現象に即した形で模擬できる、

(3) 大気泡の形成・成長に起因する平均ボイド率減少や分散の増加などの気泡-スラグ流遷移過程におけるボイド率特性を定性的かつ定量的に良好に予測できる、

(4) 小気泡分布の管軸方向粗密に起因する加速損失がもたらす高周波圧力変動や大気泡形成・成長に起因する低周波圧力変動の管軸方向発展、及び圧力損失の平均値を良好に予測できる、

(5) 未発達気泡・スラグ流条件における管半径方向ボイド率分布を良好に予測できる

ことを確認した。これらの結果より構築した one-way 気泡追跡法が未発達気泡・スラグ流における種々の現象を良好に予測できる潜在的能力を有することを検証できた。

文 献

- (1) Stuhmiller, J. H., Ferguson, R. E. and Meister, C. A., *Tech. Rep. EPRI NP-6557*, (1989).
- (2) Zun, I., Kljenak, I. and Moze, S., *Int. J. Multiphase Flow*, **19**-1(1993), 151-172.
- (3) Kljenak, I., *on CD-ROM of 3rd ICMF'98, Lyon*, (1998).
- (4) 玉井秀定・富山明男, 機論, **70**-692, B(2004), 880-887.
- (5) 中原裕介・富山明男, 機論, **69**-685, B(2003), 2002-2009.
- (6) Tomiyama, A., Kataoka, I., Zun, I. and Sakaguchi, T., *JSME Int. J., Ser. B*, **41**-2(1997), 472-479.
- (7) Grace, J. R., *Trans. Chem. Eng.*, **51**(1973), 116.
- (8) Wellek, R. M., Agrawal, A. K. and Skelland, A. H. P., *AIChE J.*, **12**(1966), 854-862.
- (9) Tomiyama, A., Tamai, H., Zun, I. and Hosokawa, S., *Chem. Eng. Sci.*, **57**(2002), 1849-1858.
- (10) 細川茂雄・富山明男, 機論, **69**-686, B(2003), 2214-2220.
- (11) Tomiyama, A., Tamai, H. and Hosokawa, S., *on CD-ROM of 4th ICMF-2001, New Orleans*, (2001).
- (12) Nikuradse, J., *Forsh. Arb. Ing. Wes.*, No. 356, (1932).
- (13) Sato, Y. and Sekoguchi, K., *Int. J. Multiphase Flow*, **2**-1(1975), 79-95.
- (14) Laufer, J., *NACA Repor*, 1174-1(1954).
- (15) Otake, T., Tone, S., Nakano, K. and Mitsuhashi, Y., *Chem. Eng. Sci.*, **32**(1977), 377-383.
- (16) Tsuchiya, K., Miyahara, T. and Fan, L. S., *Int. J. Multiphase Flow*, **15**-1(1989), 35-49.
- (17) Moore, W. J., *Physical Chemistry*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1972).
- (18) Tomiyama, A., Tamai, H., Shimomura, H. and Hosokawa, S., *2nd Int. Symp. on Two-Phase Flow Modelling & Experimentation*, (1999), 1027-1034.
- (19) 玉井秀定・富山明男, 混相流計測法, (2003), 97-103, 日本原子力学会編, 森北出版.
- (20) 森幸治, 気液二相流の実験・計測技術の基礎, 第 25 回混相流学会レクチャーシリーズ「混相流の実験・計測技術の基礎 (試作試験・検証実験の技術)」, (2001).
- (21) Launder, B. E. and Spalding, D. B., *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **3**(1974), 269-289.