

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560746

研究課題名(和文) 気液二相流界面積濃度輸送に及ぼす重力の影響

研究課題名(英文) Effect of gravity on interfacial area transport of gas-liquid two-phase flow

研究代表者

福原 豊 (FUKUHARA YUTAKA)

東京海洋大学・海洋工学部・助手

研究者番号：90361807

研究成果の概要(和文)：本研究は、動揺(重力の変化)を考慮しなければならない船舶ボイラー等の伝熱システム効率向上のため、先端的流動モデルである界面積濃度輸送方程式の開発を最終目的とし、通常重力および微小重力下において、内径9, 5, 3 mmの垂直管内を上昇する気泡流の局所流動パラメータに関するデータベースを整備するとともに、得られた実験結果から、気泡流の管軸方向発達過程および気泡の管断面分布に与える重力と壁面摩擦の影響を定量的に評価した。

研究成果の概要(英文)：In relation to the development of the interfacial area transport equation, axial developments of void fraction profile, interfacial area concentration and Sauter mean diameter of adiabatic nitrogen-water bubbly flows in 9 mm-, 5 mm- and 3 mm-diameter pipes were measured by using a stereo image-processing method under normal- and micro-gravity environment. The effect of gravity on radial distribution of bubbles and axial developments of two-phase flow parameter were discussed in detail based on the obtained data and the visual observation. These data can be used for the development of reliable constitutive relations which reflect the true transfer mechanisms in two-phase flow under normal and microgravity environments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：エネルギー工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：微小重力、船舶工学、流体工学、気液二相流

1. 研究開始当初の背景

気体(ガスもしくは蒸気)と液体が混在して流動する気液二相流は、気液界面張力、慣性力および重力により支配され、液相または気相が単独で流れる单相流よりもはるかに複雑な流れである。これらの解析手法を向上させることは、船用工学、造船工学、機械工

学、化学工学等、幅広い工学分野における伝熱効率及びプラント効率を向上する上で非常に重要である。

これら気液二相流の解析手法として一般的な二流体モデル(気液二相それぞれに定式化された質量、運動量、エネルギー保存式の計6式からなる方程式系)は、気液界面での

相間相互作用を取り扱うことができるため、最も厳密なモデルであるとされている。しかし、二流体モデルがその真価を発揮するには、気液の相互作用の強さを表す界面輸送項（＝界面積濃度 × 駆動力）の適切なモデル化が必要となる。ここで、界面輸送項は、定常完全発達条件下で得られた流動様式線図に基づき、流動様式毎に構成式の形で与えられるため、過渡的な流れ、未発達流れが適切に表現できないことや二流体モデルの数値的な不安定性を引き起こす可能性が問題点として指摘されていた。この問題を解決するために、二流体モデルへの新しい界面積濃度輸送方程式の導入が近年行われはじめ、従来の流動様式線図に依存した気液二相流解析コードの予測能力を飛躍的に高めている。従って、この界面積濃度輸送方程式の導入は、気液二相流解析において最先端研究として位置づけられ各国で精力的な研究が進められている。

一方、本研究の研究代表者及び研究分担者からなる研究グループは、これまでに落下塔を使用した多くの微小重力実験をおこなって、特に動揺の影響を考慮しなければならない船舶ボイラー等の伝熱システムにおける気液二相流界面輸送の実験的、解析的研究を実施し、またその検証を行ってきた。ここで、気液二相流の界面輸送項のモデル化の重要な特徴の一つは、後述のように管内摩擦損失によって、疑似重力が発生し、流れ方向への気液の速度差が生じることである。これらは、これまでに行われた気液二相流微小重力実験結果にも示されていることが代表者らによって確認されているが、再現性の確認と計測パラメータが不足しており、従って従来のモデルとこの仮説のどちらがモデルとして適当であるか未解明であった。よってこの事象を解明し、二相流解析コードに組み入れるモデル検証のためには、通常重力及び微小重力環境下における界面輸送の計測を、各気液流量条件において行った実験が必要である。

2. 研究の目的

これまでの界面積濃度輸送モデルを含む二相流解析モデルにおいては、気相の液相に対する相対速度（スリップ）は重力（浮力）によってのみ生成されるとされている。すなわち微小重力環境では重力が無視できることから、相対速度は0になることになる。一方、富山らは、気液二相流の運動方程式を展開し、気泡流などの分散流の場合、気相（気泡）の相対速度が摩擦損失によって(1)式のように生じることを示した(A. Tomiyama, et al., *JSME Int. J. B-41*, 472–479 (1998))。

$$v_{r\infty} |v_{r\infty}| = \frac{8}{3} \frac{r_b}{C_{D\infty} \rho_f} (\Delta \rho g_z + M_{F\infty}) \quad (1)$$

ここで、 v_r は相間相対速度（添え字 ∞ は終端速度）、 r_b は気泡半径、 C_D は抵抗係数、 ρ は密度（添え字 f は液相）、 $\Delta \rho$ は気液密度差、 g は重力加速度（添え字 z は流れ方向）、 M_F は摩擦圧力勾配である。

(1)式によれば、微小重力環境 ($g=0$) においても管内摩擦による疑似重力が生じ、相対速度は0とならない。代表者らは(1)式を基に界面積濃度輸送モデルを構築し、壁面摩擦の相間相対速度への影響を考慮に入れ、種々の流動様式で相対速度構成方程式の開発を行い、またこれを界面積濃度輸送モデルに組み込んでいる。

上記(1)式を基にした相対速度構成方程式及び界面積濃度輸送モデルの検証には、重力レベルの高いすなわち落下塔を用いて、上昇流の通常重力及び微小重力環境における、界面輸送パラメータ（ボイド率、界面積濃度、ザウター平均気泡径）を各気液流量条件で計測することが必要である。本研究では二相流モデルの高精度化に資する精度の高いデータベースの構築を目的として、垂直管内を上昇する気泡流の界面輸送パラメータを通常重力下と微小重力下において測定し、これら諸量に及ぼす重力と壁面摩擦の影響を定量的に評価した。

3. 研究の方法

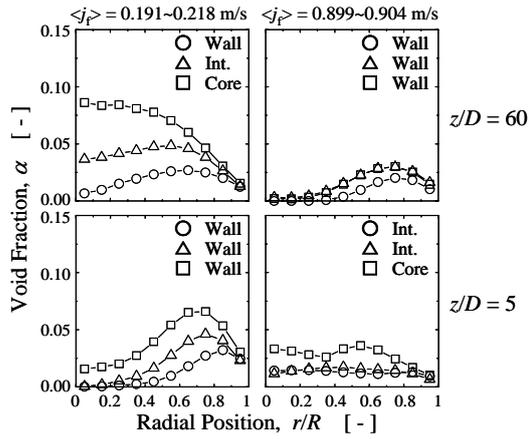
平成 20 年度は、窒素－水系二相流において、気泡上昇速度に対する気液相対速度比が大きくなる層流域（レイノルズ数 2000 以下）から、摩擦損失項の大きくなる乱流域（レイノルズ数 3000 以上）の実験を行い、界面輸送に及ぼす重力および疑似重力項の影響を評価した。

平成 21、22 年度は、二相流ループを東京海洋大学海洋工学部に設置し、重力環境下において実験を行い、データベースを構築するとともに界面積濃度輸送方程式に及ぼす管径の影響（9, 5, 3 mm 円管）を検討し、重力場支配から界面張力支配に遷移する領域での気泡流界面積濃度輸送とドリフト速度に及ぼす重力と壁面摩擦の影響を評価した。

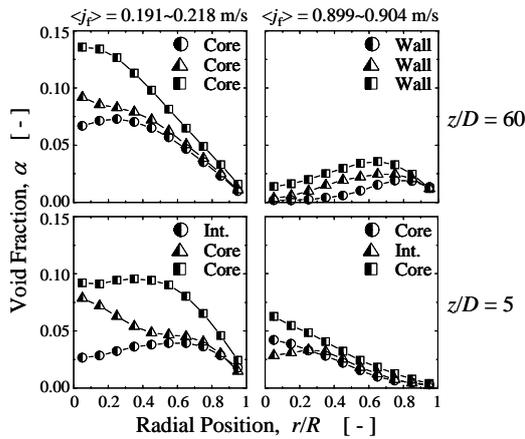
実験は、内径 9, 5, 3 mm のテスト管を用いて行われ、通常重力及び微小重力環境下における局所二相流動パラメータは、長さ方向の 4 箇所においてステレオ画像処理法により計測された。これらの二相流動パラメータは、気相見かけ速度 $\langle j_g \rangle = 0.00440 \sim 0.0482$ m/s、液相見かけ速度 $\langle j_l \rangle = 0.146 \sim 0.996$ m/s、液相レイノルズ数 $Re_f = 750 \sim 7740$ の広範な流動条件において取得された。

4. 研究成果

通常重力および微小重力下における垂直管上昇気泡流の局所流動パラメータに関するデータベースを整備するとともに（図 1）、



(a) Normal gravity



(b) Microgravity

図1 Typical results of axial development of void fraction distribution (9 mm-diameter pipe)

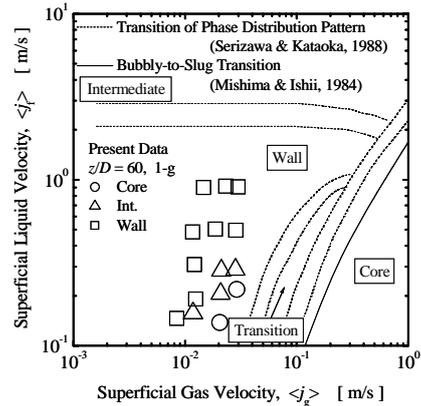
得られた実験結果から、気泡流の管軸方向発達過程および気泡の管断面分布に与える重力の影響を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 微小重力下の低液流速条件では、通常重力下と比較してボイド率が増加することで、気泡の合体とそれによる気泡径の増加が促進されて、 z/D がより短い区間においてコア型の分布を形成した。また、通常重力下の低液流速条件では、気相流量に応じた比較的弱いボイドピークを有する分布を形成するのにに対し、微小重力下では非常に強いピークを有するコア型の分布を形成した。

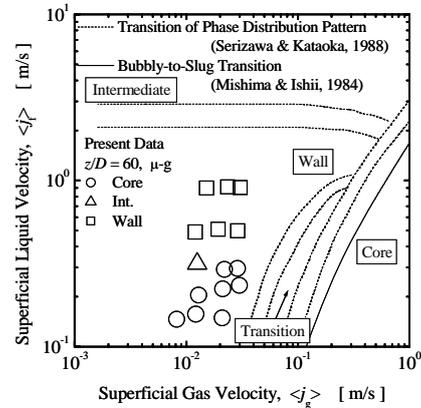
(2) 微小重力下の高液流速条件では、 z/D が 40 の下流域において、通常重力下と比較してやや緩やかな勾配を持つ壁面ピーク分布を形成し、また、通常重力下と比較して微小重力下の方が、壁面ピーク分布を形成するのにより長い助走距離を要することを確認した。微小重力下において気泡を壁面方向

へと移動させる揚力には、壁面摩擦損失勾配による局所スリップの生成が寄与している可能性がある。

(3) 垂直管上昇気泡流の相分布パターンを、管断面ボイド率分布の測定結果より算出されるボイドピーク指数およびボイドピーク強度の各数値指標を用いて、壁面ピーク分布、中間ピーク分布、コア型分布の3種類に分類し、また通常重力下と微小重力下におけるこれら相分布パターンの遷移を気液流量条件および助走距離に対して定量的に整理した(図2)。



(a) Normal gravity



(b) Microgravity

図2 Phase distribution pattern maps at $z/D = 60$ in 9 mm-diameter pipe

(4) z/D が 40 の下流域では、相分布パターンは平均ボイド率とザウター平均気泡径に強く依存し、重力条件によらず $\langle D_{sm} \rangle / D > 0.4$ を閾値として分布の形態がほぼ決定していることを確認した。また、通常重力から微小重力への移行に伴う相分布の変化は、主として気液の相間相対速度差の減少によって平均ボイド率とザウター平均気泡径が相対的に大きくなることに起因していることを確認した。

(5) ドリフトフラックスモデルにおける分布パラメータ (図 3、4) と気相ドリフト速度 (図 5) を実験的に整理し、それらに及ぼす重力と各種流動条件の影響を定量的に評価した。

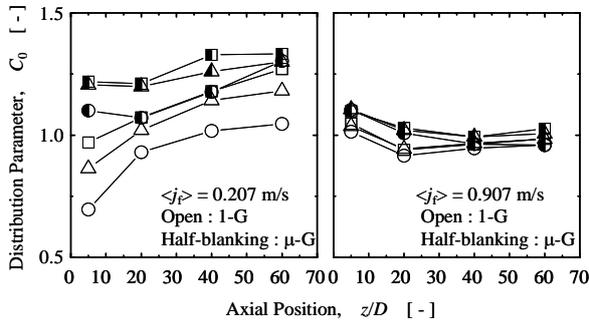


図 3 Axial changes of distribution parameter in 9 mm-diameter pipe

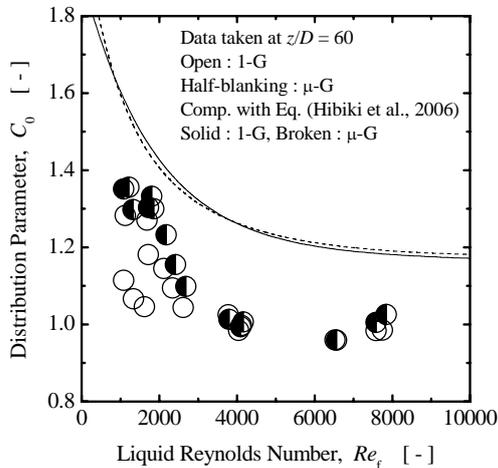


図 4 Dependence of Reynolds number on distribution parameter at $z/D = 60$ in 9 mm-diameter pipe

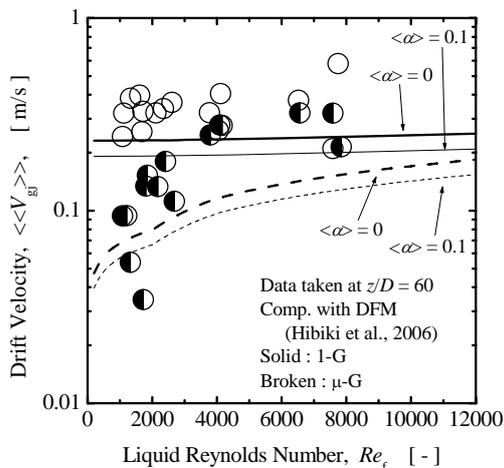


図 5 Dependence of Reynolds number on drift velocity at $z/D = 60$ in 9 mm-diameter pipe

(6) 通常重力下および微小重力下ともに、分布パラメータはザウター平均気泡径の増加に伴って増加する傾向を示した。本実験の範囲において、分布パラメータはザウター平均気泡径と強い相関があり、通常重力と微小重力における分布パラメータの差異は、主としてザウター平均気泡径の変化に起因していることが確認された。

(7) 通常重力下と微小重力下において取得された管断面ボイド率分布の測定結果に基づいて気相ドリフト速度を整理した。その結果、微小重力下においてもドリフト速度は零とならず、液相レイノルズ数の増加に対してドリフト速度は増加することが確認されたことから、壁面摩擦損失勾配による局所スリップの生成は無視できないといえる (図 5)。また、Hibiki らの式は気相ドリフト速度に及ぼす重力と壁面摩擦圧力損失の効果を適切に表すことが確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① Shunichi Watanabe, Yutaka Fukuhara, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Takashi Hibiki, Effect of Gravity on Phase Distribution Patterns of Bubbly Two-phase Flow in a Vertical Mini Pipe, Proc. 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18), 査読有, CD-ROM#29636, 2010.

② Takashi Nishioji, Taichi Kato, Yutaka Fukuhara, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Takashi Hibiki, Effect of Gravity on Axial Development of Phase Distribution Patterns in Bubbly Two-phase Flow, Proc. 17th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE17), 査読有, CD-ROM#75232, 2009.

③ Yutaka Takata, Dongchang Xing, Yutaka Fukuhara, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Takashi Hibiki, Axial Developments of Local Flow Parameters in Bubbly Two-phase Flow at Normal and Microgravity Conditions, Proc. 17th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE17), 査読有, CD-ROM#75231, 2009.

④ Takashi Hibiki, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Mamoru Ishii, Interfacial-Area Transport Equation at Reduced-Gravity Conditions, AIAA Journal, Volume 47, Issue 5, 査読有, pp. 1123-1131, 2009.

⑤ Xiaoran Yu, Dongchang Xing, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Takashi Ishimaru, Yuji Tanaka, Tatsuro Akiba, Measurement Technique for Solid-liquid Two-phase Flow Using a Normal-line Hough Transform Method, Proc. The 6th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 査読有, USB#F044, 2008.

⑥ Akihiko Kamura, Yutaka Fukuhara, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Measurement of Local Flow Parameters in Vertical upward Bubbly Flow at Normal- and Micro-gravity Conditions, Proc. 16th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE16), 査読有, CD-ROM#48821, 2008.

[学会発表] (計10件)

① 高田寛, ミニチャンネル内気泡流の界面積濃度輸送に及ぼす重力の影響, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 2010 年 9 月 15 日, 北海道大学.

② 高田寛, 通常重力下及び微小重力下における細管内気泡流のボイド率分布特性, 日本混相流学会年会講演会 2010, 2010 年 7 月 18 日, 静岡大学.

③ Yusuke Shimomura, Distribution Parameter and Drift Velocity of Vertical Upward Bubbly Two-Phase Flow Under Normal- and Micro-Gravity Conditions, 7th International Conference on Multiphase Flow 2010 (ICMF -2010), 2010 年 6 月 1 日, Tampa, Florida.

④ 高田寛, 垂直管内上昇気泡流のドリフト速度に及ぼす壁面摩擦の影響, 日本混相流学会年会講演会 2009, 2009 年 8 月 9 日, 熊本大学.

⑤ 西大路隆司, 細管内気泡流の管断面相分布に及ぼす重力と壁面摩擦の影響, 日本混相流学会年会講演会 2009, 2009 年 8 月 7 日, 熊本大学.

⑥ 波津久達也, 微小重力下の気泡流における局所流動パラメータの計測, 第 12 回オーガナイズド混相流フォーラム OMF-2008 招待講演, 2008 年 11 月 7 日, 奈良.

⑦ 嘉村明彦, 上昇気泡流の界面積濃度輸送に及ぼす重力と壁面せん断力の影響, 日本混相流学会年会講演会 2008, 2008 年 8 月 8 日, 会津大学.

⑧ 菊池貴好, 気泡流の分布パラメータとドリフト速度に及ぼす重力の影響, 日本混相流

学会年会講演会 2008, 2008 年 8 月 8 日, 会津大学.

⑨ 邢東昌, 微小重力下の気泡流動特性に及ぼす各種パラメータの影響, 日本混相流学会年会講演会 2008, 2008 年 8 月 8 日, 会津大学.

⑩ 嘉村明彦, 垂直管上昇気泡流の気泡合一に及ぼす重力と壁面摩擦の影響, 第 45 回日本伝熱シンポジウム, 2008 年 5 月 21 日, つくば国際会議場.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福原 豊 (FUKUHARA YUTAKA)
東京海洋大学・海洋工学部・助手
研究者番号: 90361807

(2) 研究分担者

賞雅 寛而 (TAKAMASA TOMOJI)
東京海洋大学・海洋工学部・教授
研究者番号: 20134851

(3) 連携研究者

芹澤 昭示 (SERIZAWA AKIMI)
京都大学名誉教授
研究者番号: 10027146