

宇宙空間における気液二相流界面積濃度輸送機構解明に関する研究

東京海洋大学 賞雅 寛而、波津久 達也、福原 豊、廣瀬 由典、安部 和也

パドュー大学 日引 俊

Study on Mechanism behind Interfacial Area Transport of Gas-liquid Two-phase Flow in Space

Tomoji Takamasa, Tatsuya Hazuku, Yutaka Fukuhara, Yoshinori Hirose and Kazuya Abe
Tokyo University of Marine Science and Technology, Koto, Tokyo 135-8533
E-Mail: takamasa@kaiyodai.ac.jp

Takashi Hibiki
Purdue University, IN 47907-2017, USA
E-Mail: hibiki@ecn.purdue.edu

Abstract: It is essential to develop gas-liquid two-phase flow (gas-liquid concurrent flow) modeling not only for improved heat transfer efficiency in territorial energy plants but also for the design of fuel pipe flows and heat control lines in spacecraft. Many experimental and theoretical efforts have been devoted to achieving a two-fluid model, which is one of the most popular models for industrial use. Such a model consists of individual mass, momentum, and energy conservation equations for two-phase flow, using an accurate description of the interfacial area transport or interfacial area concentration and the drive force acting on the gas-liquid interface. In this research, a basic database was obtained by measuring interfacial area transport under micro- and normal-gravity environments, using the drop-shaft in the Micro-Gravity Laboratory of Japan (MGLAB). The database showed the proposed model accurately predicted the relative velocity between bubble and liquid flow in the channel even in micro-gravity condition, and the estimated weight caused by the frictional pressure loss should be taken into account in the interfacial area transport and drift velocity.

Key words; Gas-liquid Two-phase Flow, Low Gravity Facilities, Interfacial Area Transport, Drift-flux Model

1. 研究の目的と実験方法

気体と液体の混合流れ(気液二相流)は、例えば水などの液体とその蒸気が流れるボイラー管・クーラーの蒸発管などの伝熱機器や沸騰している鍋など、我々のまわりで一般的に見られる流れである。その流動形態によって、伝熱機器の効率・性能が決まるために、そのメカニズムを解明するために多くの実験的・解析的研究がこれまで行われてきている。しかしながら気液二相流は、気液界面の時空間的变化が複雑であり、気体 - 液体間の物質、運動量及びエネルギー交換(輸送)を適切に表すことは難しく、気体もしくは液体のみが流れる単相流に比較して、流れの解析は非常に困難である。飛行機や自動車の周囲を流れる気体の様相など、単相流については現在のコンピューター技術及びプログラミングの発達によって、これらの機器の設計に十分用いられる模擬解析手法が得られているが、気液二相流についてはその流れの複雑さのために、コンピューターなどで模擬解析できるケースはごく限られている。

現在、気液二相流の流動を表すためには、気液相

それぞれに質量、運動量及びエネルギー保存則を当てはめる二流体モデルというモデルが通常用いられている[1]。二流体モデルには、気液両相の保存則を結びつける気液相間の輸送モデルが必要となるが、これまでは単純化されたいくつかの実験的モデルが使われてきた。現在一般的には、気液両相の平均速度に対する気相速度の差(ドリフト速度)を実験的に求めるドリフトフラックスモデルというモデルが使われている。しかしながら機器性能向上のために、気液二相流の流動形態をより正確に解析する必要から、気液の界面積の大きさ(界面積濃度)を持って、気液界面の流れ方向の発達をより適切に表す界面積濃度輸送方程式という輸送モデルがドリフトフラックスモデルなどの実験モデルに代わって導入されはじめています。

これらの輸送モデルを機器設計などに用いられるようにより一般的な形に完成させるためには、気液二相流にかかる力が正しく評価されていなければならない。気液二相流にかかる力としては、流体を動かす慣性力、気液界面の表面張力及び重力があ

げられるが、ここで管の中の流れについては、管壁で生じる摩擦のために管流れ方向に擬似重力が形成されるという新しい理論[2]が最近の研究によって提唱されている。地上で行われてきた通常の気液二相流実験では、地球の重力の影響が大きいためこの擬似重力が確認できず、従って細管や流れの速度が大きい場合、すなわち管摩擦が大きい場合には、これまでのドリフトフラックスモデルや界面積濃度輸送方程式を用いると大きな誤差を生じていた。

このような状況を踏まえて、この公募地上研究では、気泡が分散して流れる気泡流域の気液二相流のドリフト速度及び界面積濃度を、提供されたMGLAB落下施設を用いて計測し、この擬似重力項を評価した。気相の界面形状(界面輸送)の3次元計測は、Fig. 1に示されるように、管流れ方向に置かれた4台のビデオカメラによりステレオ画像撮影された気泡画像を解析して求められる。

2. 管軸方向の界面輸送

Fig. 2にテスト管各測定位置における通常重力および微小重力下のステレオ画像の代表例を示す。通常重力と微小重力における気泡の形状を比較すると、微小重力ではより球形に近い形状となっていることがわかる。これは低液流速条件では、液乱流による気泡の変形が少なく、かつ微小重力への移行に伴って気液の相対速度差が減少することで、気泡界

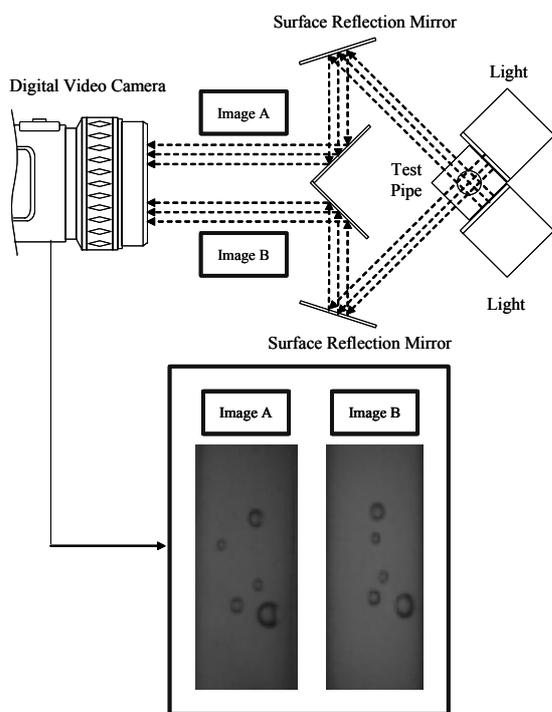


Fig. 1 Stereo image-processing method

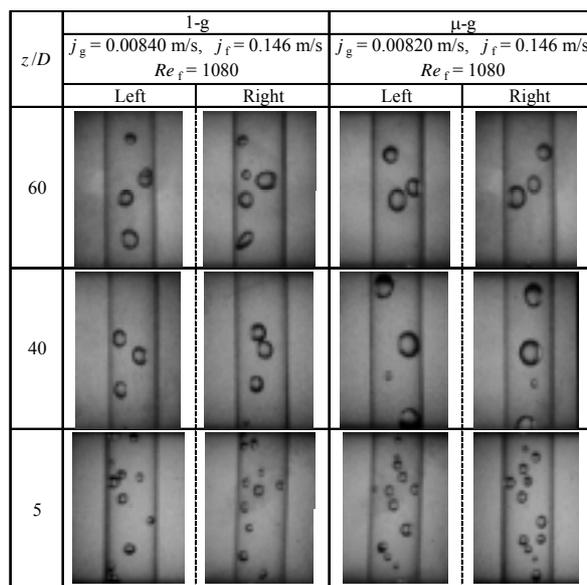


Fig. 2 Typical flow images of axial development of bubbly flow ($Re_f = 1080$)

面に働くせん断力が減じるためである。軸方向の変化に着目すると、通常重力と微小重力ともに助走距離の増加に伴って気泡径が増大し、気泡個数が減少していることがわかる。これは、管内を上昇する過程において、気泡の合体が生じていることを示している。なお、高速度ビデオによる観察結果より、本実験条件の範囲において気泡の分裂現象は確認されなかった。

Fig. 3およびFig. 4は、画像解析により測定された管軸方向流動パラメータの代表例である。Fig. 3は液相が層流条件($Re_f = 1610 - 1720$)の結果を、Fig. 4は液相が乱流条件($Re_f = 6520 - 6560$)の結果をそれぞれ示しており、各図のa、b、c、dは、平均ボイド率、気泡個数密度、ザウター平均気泡径、平均界面積濃度をそれぞれ示している。

層流および乱流条件ともに、平均ボイド率の管軸方向の大きな変化は見られないが、微小重力下では、低液流量(層流)条件において二相混合体の平均流速に対する気泡上昇速度の比率が、通常重力のそれと比較して大きく減少することから、管軸方向全域にわたり平均ボイド率が高くなっている(Fig. 3a)。

通常重力および微小重力条件ともに軸方向の発達に伴い気泡個数密度は減少し、気泡径は増大する結果を示している。各変化率は流量条件によって異なるが、本実験の全ての条件において気泡の合体が生じていること、また通常重力と微小重力でほぼ同比率の気泡個数密度の軸方向変化が生じていることを確認した。

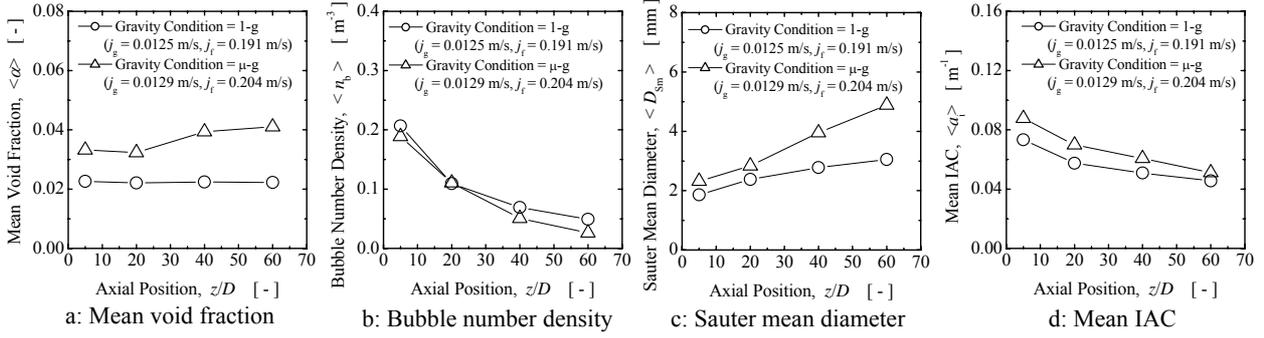


Fig. 3 Axial development of flow parameters ($Re_f = 1610 - 1720$)

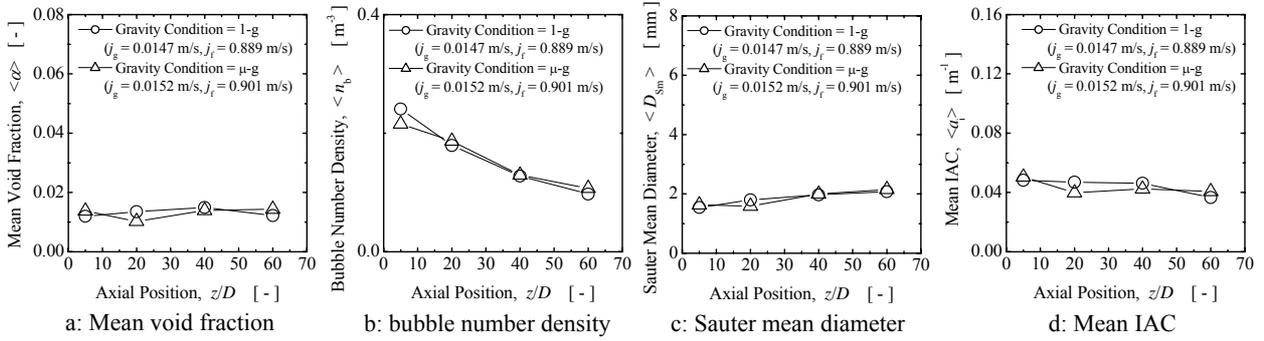


Fig. 4 Axial development of flow parameters ($Re_f = 6520 - 6560$)

3. ドリフトフラックス相関

Hibiki らは、式(1)に示す重力場の影響を考慮した分布パラメータおよび式(2)に示す壁面せん断力(摩擦損失)を考慮したドリフト速度相関式をそれぞれ開発している[3]。

$$C_0 = 2.0 \exp(-0.000584 Re_f) \left[\begin{array}{l} 1.2 \exp\{-5.55(g/g_N)^3\} \\ + 1.0 \left[1 - \exp\{-5.55(g/g_N)^3\} \right] \end{array} \right] \times \left\{ 1 - \exp(-0.000584 Re_f) \right\} \left[\begin{array}{l} 2.0 \exp(-0.000584 Re_f) \\ + \left[\begin{array}{l} 1.2 \exp\{-5.55(g/g_N)^3\} \\ + 1.0 \left[1 - \exp\{-5.55(g/g_N)^3\} \right] \end{array} \right] \end{array} \right] \times \left\{ 1 - \exp(-0.000584 Re_f) \right\} - 1.0 \right] \times \sqrt{\rho_g / \rho_f} \quad (1)$$

$$\langle \langle V_{sl} \rangle \rangle = \sqrt{2} \left\{ \frac{(\Delta \rho g + M_{F\infty}) \sigma}{\rho_f^2} \right\}^{1/4} \times \frac{18.67(1-\langle \alpha \rangle)^{5/2} \left\{ \frac{\Delta \rho g(1-\langle \alpha \rangle) + M_F}{\Delta \rho g + M_{F\infty}} \right\}^{1/2}}{1 + 17.67(1-\langle \alpha \rangle)^{6/7} \left\{ \frac{\Delta \rho g(1-\langle \alpha \rangle) + M_F}{\Delta \rho g + M_{F\infty}} \right\}^{3/7}} \quad (2)$$

ここで、 Re_f は液相レイノルズ数、 g_N は通常重力加速度(9.8 m/s)である。 M_F 、 $M_{F\infty}$ は、それぞれ次式で表される摩擦圧力勾配であり、気相の浮力に作用する擬似重力項となる。

$$M_{F\infty} \equiv \frac{f}{2D} \rho_f \langle v_f \rangle^2, \quad M_F \equiv \frac{4\tau_{fw}}{D} = \left(-\frac{dp}{dz} \right)_F \quad (3)$$

以上に示したドリフトフラックスモデルと本実験で得られた微小重力における測定結果を比較する。

Fig. 5 に、微小重力における平均気相速度と全体積流束の関係を示す。図中のプロットは実験値を、実線は Hibiki らのドリフトフラックスモデルの微小重力条件での計算値を、また点線は Colin らによ

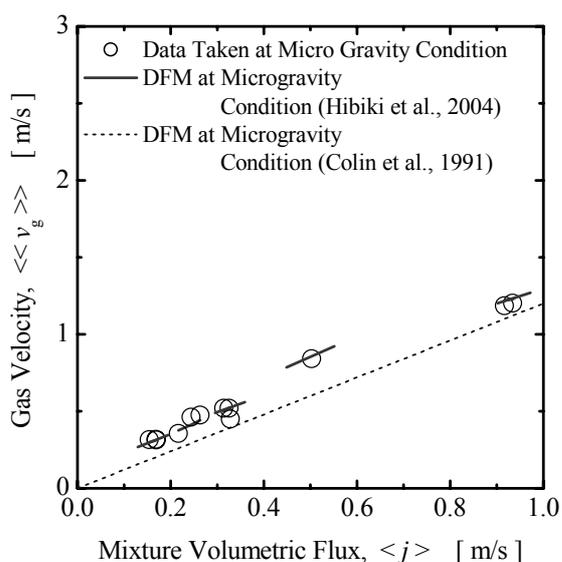


Fig. 5 Comparison of drift-flux models with present experimental data (μ -g)

って提案された式(4)で表される微小重力条件下におけるドリフトフラックスモデル[4]からの計算値をそれぞれ示している。

$$\langle\langle v_g \rangle\rangle = 1.2 \langle j \rangle \quad (4)$$

図からわかるように、Hibikiらのドリフトフラックスモデルによる計算値は、実験値と概ね一致する傾向を示している。一方、Colinらの式(4)による計算値は、微小重力下で得られた実験値を、特に低い全体積流束条件において過小評価している。これは、式(4)では「微小重力条件下ではドリフト速度が無視できる」とする仮定が用いられていることによると考えられる。本結果から、Hibikiらが開発したドリフトフラックスモデルは局所スリップの効果を適切に表現していること、摩擦損失勾配による擬似重力項の作用により、微小重力条件下におけるドリ

フト速度は零と仮定できないことが確認された。

4. まとめ

本研究では、種々の重力条件に適用可能な界面積濃度輸送方程式の開発を最終目的とし、その第一段階として、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界面輸送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相対速度差に与える重力の影響を評価した。その結果、微小重力環境においても管内摩擦による擬似重力が生じ、相対速度は0とならないことを確認し、界面輸送項および揚力のモデル化には管内摩擦による気液相間相対速度を考慮しなければならないことが示された。

謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Ishii, M. and Hibiki, T., *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, Springer (2005).
- [2] Tomiyama, A., Kataoka, I., Zun, I. and Sakaguchi, T., *Drag Coefficients of Single Bubble Under Normal and Micro Gravity Conditions*, *JSME Int. J. Series B*, **41-2**, 472-479 (1998).
- [3] Hibiki, T., Takamasa, T. and Ishii, M., *One-Dimensional Drift-Flux Model at Reduced Gravity Conditions*, *AIAA J.*, **44-7**, 1635-1642 (2006).
- [4] Colin, C., Fabre, J. and McQuillen, J., *Bubble and Slug Flow at Microgravity Conditions: State of Knowledge and Open Questions*, *Chem. Eng. Comm.*, **141-142**, 155-173 (1996).