急激な過渡を伴う気液二相流の数値解析

Numerical Analysis of Gas-Liquid Two-Phase Flow with Rapid Transition

○ 学 行正章典(阪大院) 学 仲角 稔(阪大院) 正 松本忠義(阪大)
正 大川富雄(阪大) 正 片岡 勲(阪大)

Akinori YUKIMASA Minoru NAKAZUMI Tadayoshi MATSUMOTO Tomio OKAWA Isao KATAOKA

Department of Mechanophysics Engineering, Osaka University

Accurate prediction of gas-liquid two-phase flow with rapid transition is of significant importance to design various industrial plants and to evaluate their safety. However, the one-dimensional two-fluid model that is often used for these purposes requires constitutive equations and most of them are based on the experimental data of two-phase flow in steady state. Thus, to confirm the applicability of the one-dimensional two-fluid model to the transient state, several two-phase parameters during rapid transition were measured and they were compared with the numerical solution of the one-dimensional two-fluid model. As a result, the agreement between the numerical solutions and the experimental data was not deteriorated during the transition. This would imply that the one-dimensional two-fluid model is applicable to the transient two-phase flow within the present experimental conditions.

Key Words: Gas-Liquid Two-Phase Flow, Rapid Transition, One-Dimensional Two-Fluid Model

1. 緒言

急激な過渡時における気液二相流の挙動を正確に予測することは、様々なエネルギー機器を安全かつ合理的に設計する上で極めて重要である。しかし、一次元二流体モデル等で使用される構成式の多くは定常状態で取得されたデータを基に開発されているため、特に事故時等に発生し得る急激な過渡変化を伴う気液二相流に対する適用性は十分に明らかではない。本研究では、過渡時における気液二相流の流動パラメータの変化を体系的に調べ、各種構成式の過渡状態に対する適用性を検討するための実験データベースを取得する。さらに、一次元二流体モデルに基づく数値解析を実施するとともに数値解と実験データの比較を行い、定常状態において取得された実験データに基づく構成式の過渡状態に対する適用性を検討する。

2. 実験装置と実験条件

実験装置の概略を図1に示す。実験に用いる供試管は内径 19.7 mm の透明アクリル製円管で、鉛直に設置される。液相および気相には、各々常温・常圧の水および空気を用いる。水はポンプにより循環し、空気はコンプレッサーより供給する。気液は円管下部のミキサーで混合された後、円管内を上昇する。ミキサー部には直径 3 mm の2本のアルミ管が水平かつ互いに垂直に設置されており、各アルミ管の側面にあけられた約 30 個の小孔(直径 0.25 mm)より空気が注入される。気液は測定部を通過した後に試験部上部で気水分離され、空気は大気中に開放される。

実験は、まず円管下部から水と空気を一定量注入して定常状態とする。その後、液体の質量流量 W_L を一定に保った状態で気相質量流量 W_G をステップ状に変化させて鉛直円管部に過渡状態を実現し、再び定常状態となった後に測定を終了する。気液の流量は、液流量は超音波流量計により、気相流量は熱式質量流量計により計測する。また、気液混合部(ミキサ)におけるゲージ圧力 P 、およびその上方 1051 mm–2354 mm の区間における差圧 ΔP を各々圧力変換器、差圧変換器を用いて計測する。

3. 界面せん断力の評価

過渡気液二相流の解析に先立って、定常状態では正確な予測を与える構成式を準備する必要がある。このため、 $J_G = 0.4\text{--}5.0$ m/s, $J_L = 0.08\text{--}5.0$ m/s の範囲で定常実験を実施した。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

まず、加速損失の影響は無視できるものとする、試験部の圧力損失 ∇P は次式で計算される。

$$\nabla P = M_w + (\alpha_G \rho_G + \alpha_L \rho_L) g \quad (1)$$

ここで、 M_w は摩擦損失、 α は体積率、 ρ は密度、 g は重力加速度、添字の G と L は各々気相と液相を表す。定常実験で計測された ∇P を用いるとともに、 M_w は Lockhart-Martinelli の方法により評価できるものとする、式(1)より試験部におけるボイド率 α_G を推算できる。一方、二流体モデルにおける界面せん断力 M_i は、ドリフトフラックスモデルにおけるドリフト速度 V_{GJ} および分布定数 C_0 を用いて以下のように表すことができる⁽¹⁾。

$$M_i = C_i [C_1 V_G - C_0 V_L] (C_1 V_G - C_0 V_L) \quad (2)$$

ここで

$$C_i = \alpha_G \alpha_L^3 (\rho_L - \rho_G) g / V_{GJ}^2 \quad (3)$$

$$C_1 = (1 - \alpha_G C_0) / \alpha_L \quad (4)$$

である。式(2)-(3)より、 V_{GJ} および C_0 の相関式を与えれば、 M_i が評価可能となることがわかる。式(1)より算出される α_G を用いて全体積流速 $J_T = J_G + J_L$ と気相平均速度 J_G / α_G の関係を調べた結果を図 2 に示す。図中の線は、以下に示す Nicklin の式⁽²⁾

$$V_{GJ} = 0.35 \sqrt{gD} \quad (5)$$

によりドリフト速度を評価し、 C_0 を 1.1, 1.2, 1.3 とした場合の予測値である。本実験では気泡流からチャーン流に至る様々な流動様式でデータを取得したため、 V_{GJ} および C_0 は一定値とはならない。しかしながら、各実験条件で計算される C_0 は、 J_L がきわめて小さい場合を除いて J_T の関数として概ね次式により相関できる (図 3 参照)。

$$C_0 = 0.09134(J_G + J_L) + 0.8273 \quad (6)$$

より広い流動条件に適用するためには、さらに流動様式等の考慮が不可欠であるが、本実験の範囲内においては、式(5)、(6)を式(2)-(4)に代入することにより定常時における M_i を妥当な精度で予測可能と考えられる。なお、管内上昇気泡流では、流速の増加に伴って気泡はより管中央部に存在しやすくなることが実験、解析的に示されている⁽³⁾⁽⁴⁾。この場合、 C_0 は管中央における気相の存在割合の増加に伴ってより大きい値をとるはずであり、図 3 に示される結果は管内における気相の分布を反映したものと解釈できる。

4. 支配方程式と数値解法

本相関式を用いて一次元二流体モデルに基づく気液二相流の非定常解析を実施し、定常データに基づく相関式の過渡状態に対する適用性を検討する。等温・非加熱で相変化はないため、解析に使用する基礎式は気相と液相に対する質量および運動量の保存式である。解析では、上界界面せん断力の他、構成式として壁面せん断力と仮想質量力を考慮する。また、一圧力二流体モデルの数学的不適切性の問題を回避するため、液相中における界面平均圧力と体積平均圧力の差の影響を考慮する。状態方程式では、液相は非圧縮、気相は理想気体と仮定する。以上の支配方程式を半陰解法に基づいて差分法し、Newton 法により求解する。圧力補正方程式の行列解法には TDMA 法を用いる⁽⁵⁾。

5. 計算結果

過渡気液二相流の解析の一例として、 $J_L = 1.02 \text{ m/s}$ で一定とし、 W_G を 0.605 g/s から 1.17 g/s までステップ状に変化させたときの計測値と解析値の比較を図 4 に示す。解析では、気液の入口流量を入力とし、このときの圧力 P および差圧 ΔP の変化を実験値と比較した。本図より、過渡時において解析値と実験値の差異が特に顕著となる傾向は見られず、過渡の前後の定常状態と同様に過渡時においても妥当な予測が行われていることが確認できる。

6. 結言

鉛直円管内における定常および過渡気液二相流の挙動を実験・解析的に調べた。今後より広範な条件での検討が不可欠であるが、本実験の範囲内において得られた主な結果を以下に要約する。

- (1) 圧力および差圧の観点では、定常状態において妥当な予測を与える構成式を使用することにより、過渡状態でも同等精度の予測が期待できる。
- (2) 分布定数は全体積流速とともに増加する傾向となった。これは、流路内のボイド分布を反映したものと推察される。

Fig. 2 Relation between $J_G + J_L$ and J_G / α_G

Fig. 3 Relation between $J_G + J_L$ and C_0

Fig. 4 Comparison of numerical solutions with experimental data in transient two-phase flow

参考文献：(1) D. D. Taylor et al., NUREG/CR-3633, EGG-2294 (1984). (2) 植田辰洋, 気液二相流, 養賢堂 (1981). (3) A. Serizawa, I. Kataoka, Transient phenomena in multiphase flow (N. H. Afgan, Ed.), Hemisphere, 179-224 (1988). (4) T. Okawa, et al., Nucl. Eng. Des., **213**, 183-197 (2002). (5) T. Okawa, et al., Int. J. Heat Mass Transfer, **45**, 87-98 (2002).