

細管内二相流の数値計算における気泡形状の精度評価

Validation of bubble shapes in the two phase flow simulation in a capillary tube

- 齊藤 正士, 東大院, 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail:ma-saito@iis.u-tokyo.ac.jp
大西 順也, 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail:jonishi@iis.u-tokyo.ac.jp
鹿園 直毅, 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail:shika@iis.u-tokyo.ac.jp
Masashi Saito, Dept. Mechanical Engineering, the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Junya Onishi, IIS, the University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo
Naoki Shikazono, IIS, the University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo

A validation of a two phase flow simulation using a sharp interface model is conducted with a bubble shape in the steady two phase capillary flow. In comparison with a previous experimental study and numerical studies using a diffuse interface model in a square tube, the bubble length predicted by the sharp interface model used in this study is found to be smaller by 6 percent. Particularly, a difference is found in a curvature near the bubble head. The authors considered that an effect of fluid property distributions on the interface may cause the curvature difference between the interface models.

1. はじめに

加熱部と冷却部を持つ細管内に相変化する流体を封入すると、管内の液柱が圧力差により自励振動を生じることがある。この現象を利用したものとして、マイクロ蒸気エンジンや自励振動ヒートパイプなどの熱機器がある。マイクロ蒸気エンジンは、作動流体の加熱および冷却による液柱の自励振動を、ピストンクランクを介して仕事として取り出すものである。可動部と部品点数が少なく、低温の未利用熱を利用できることが特徴である。このため、低温排熱の有効活用などへの応用が期待される。自励振動ヒートパイプは、液中の自励振動により、従来型ヒートパイプの熱輸送限界を超える熱輸送性能が得られる可能性があり、高性能冷却機器としての応用が期待される。

マイクロ蒸気エンジンと自励振動ヒートパイプは、使用目的は異なるが、管内の相変化による自励振動現象を利用していることは共通している。しかしながら、この自励振動の作動原理は十分に解明されていない。著者らは自励振動の現象解明に向け、振動流の詳細な分析のため、実験に比べ詳細な流れ場の解析が可能な数値解析による振動流の再現を目指し、計算プログラムの開発を進めている。沸騰による自励振動流現象において、その駆動力は加熱部および冷却部での熱伝達である。加熱部での熱伝達を考えると、管内壁に形成される薄液膜からの蒸発が熱伝達において支配的であると考えられ、液膜の厚さは自励振動における重要なパラメータと考えられる。このため、数値解析を行う場合、気液二相の界面形状を正確に予測することが必要である。そこで本研究では、Sharp 界面モデルを用いて二相流の計算を行い、気液界面の予測精度について検証を行う。

2. 手法

本研究では直交等間隔格子を用い、界面形状追跡には Level-set 法を用いる。界面での表面張力のモデルとして、Ghost-fluid 法による Sharp 界面モデルを用いる。Sharp 界面モデルは界面での物性値の不連続変化を直接的に扱うモデルであり、本研究では気液界面において、数値的に Ghost-fluid 法により物性値を外挿することで界面の不連続性を維持している。これに対して、Diffuse 界面モデルでは物性値の変化を緩和するためにバッファ領域を設定して計算を行う。振動流でみられる薄液膜を直交等間隔格子で計算することを考えると、液膜が薄くなるのに伴い、液膜内の計算格子が減少する。流れ場を解像するのに十分な精度を保つためには全体の格子数を増やす必要が生じ、計算コストの増大が問題となる。そのため、薄液膜での流れ場の正確な見積もりと計算コストの低減の点において、Sharp 界面モ

デルは有用性が高いと考えられる。

3. 細管内気泡流の解析

3-1. 計算条件

本研究では、Marschall らの行った正方形管内を流れる定常気泡の実験および数値計算結果との比較を行う。計算条件は Marshall らの行った数値計算にならい、以下のように与えた。Figure 1 に解析領域の概略を示す。解析領域は辺長を $d_h = 1.98 \text{ mm}$ 、長さを $H = 6d_h$ の正方形柱とし、側面をすべりなしの固定壁、上面と底面を周期境界条件とした。解析の初期状態で気泡は円柱形とし、体積を $V_G = 17.5 \text{ mm}^3$ 、半径を $r_0 = 0.9 \text{ mm}$ として気泡中心を底面から $3d_h$ の位置に配置した。また、初期状態では解析領域全体で流れはないものとした。添え字 L および G は、それぞれ液相、気相を表す。

液相および気相はともに非圧縮性の粘性流体とした。物性値として、密度を $\rho_L = 1195.6 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_G = 1.3 \text{ kg/m}^3$ 粘性係数を $\mu_L = 2.854 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $\mu_G = 2.00 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、表面張力係数を $\sigma = 66.69 \text{ mN/m}^2$ とした。計算格子は直交等間隔格子を用い、格子幅は $\Delta x = d_h/100$ とした。駆動力として加速度 g をかけ、Marschall らの実験および数値計算での気泡速度 $v_b = 205.57 \text{ mm/s}$ と一致するように加速度 g を調整した。加速度を $g = 35.0 \text{ mm/s}^2$ としたとき、気泡速度が実験とほぼ等しくなった。

なお、Marschall らは 4 種の計算プログラムにより、数値計算を行っており、いずれも界面での表面張力の取り扱いには Diffuse 界面モデルを用いている。

3-2. 計算結果

Figure 2 に定常状態に達した気泡について、中心軸を通る面での界面の形状を Marschall らの行った実験の形状とともに示す。流れ方向は図の上向きであり、それぞれの形状は気泡の先端を 0 として、各軸の値は辺長 d_h で正規化している。気泡の流れ方向の長さは 6.78 mm となり、実験での気泡長さ 7.20 mm に対して 6% 程度短くなった。気泡半径は実験と比べ大きくなっている。また、気相体積は初期値に対して完全に保存されておらず、気相体積変化は初期値に比べて 2% 程度の増加であった。Figure 3 に気泡先端付近での、外壁面と平行に中心軸を通るように切った断面および正方形の対角線を通る面で切った断面での気泡形状を実験での形状とともに示す。

Figure 4 に気泡後端付近での形状を示す。ただし, Fig. 4 では気泡の後端部の位置を 0 としている。計算結果と実験との違いとして, 気泡先端の形状において曲率の違いや曲率の変化点に違いがみられる。また, 先端の形状の違いによって, 曲率を持たない, 薄液膜を形成する気泡中央部での液膜厚さに影響が及んでいる。

次に, Marschall らの行った数値解析との比較を Fig.5 と Fig.6 に示す。FS3D, Open-FOAM, TURVIT-VOF, DROPS はそれぞれ Marschall らの用いた計算プログラムの名称である。気泡先端部において, Marschall らによる 4 種の計算プログラムによる結果はおおむね一致しているが, 本計算プログラムによる結果は, 特に先端付近で曲率を大きく見積もっていることがわかる。Marschall らの用いた計算プログラムは界面での表面張力を Diffuse 界面モデルで取り扱っており, この違い等の影響があったことが考えられる。

これまで, 本計算プログラムにより, 壁面に付着する気泡形状を計算し, 気泡の界面に作用する力から理論的に気泡形状を求めた Fritz の理論により求められる形状と一致することを確認している。静止気泡の形状は sharp 界面モデルで十分精度良く計算できることから, 表面張力モデルは十分精度が良いと考えられる。これに対して, 本研究における計算は速度のある気泡での形状であるという点が異なる。運動している界面の形状は, 表面張力モデルのほか, 界面での密度や粘性係数の分布などの違いに影響を受けると考えられ, これらの影響等により形状に違いが見られたことが考えられる。

4. まとめ

正方形細管内を流れる気泡流について, Sharp 界面モデルを用いて数値解析を行い, Marschall らの実験および数値解析結果との比較を行った。その結果, 気泡先端および後端で気泡の曲率等に違いが見られた。これは界面のモデル化の影響が考えられ, Sharp 界面モデルで, 界面における物性値の分布の影響により界面形状に変化が生じる可能性があることが示されたと考えられる。今後, これらの物性値を Diffuse 界面モデルで与えた計算を行い, Sharp 界面モデルとの比較検証を行う予定である。

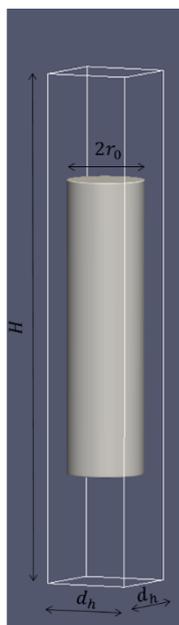


Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain and the initial bubble shape.

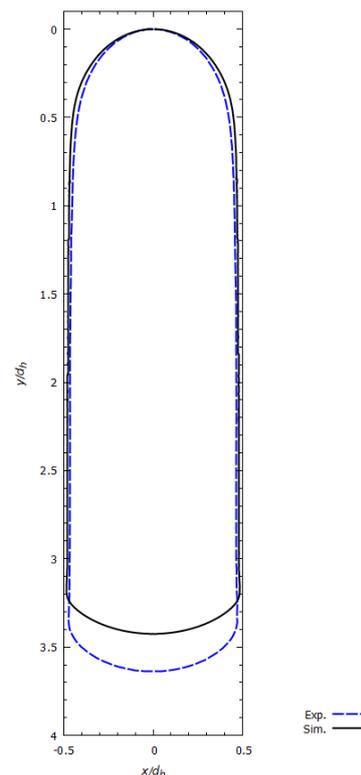


Fig.2 Bubble shapes in a lateral cut. Difference is found in the bubble length and radius between the present Sharp interface model and the experimental result by Marschall et al.

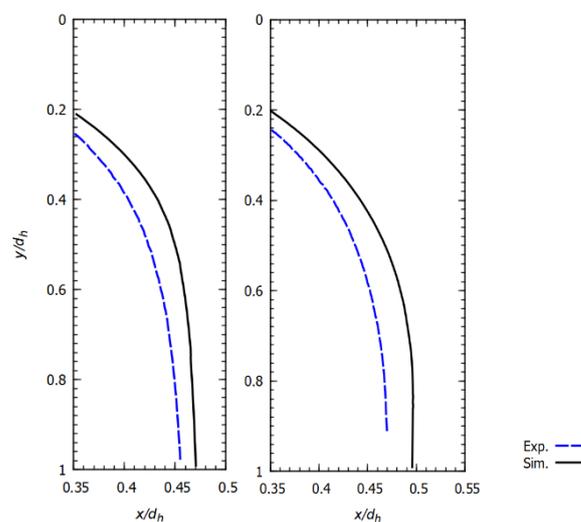


Fig. 3 Comparison of the bubble shape near the head in a lateral (left) and a diagonal (right) cut between the result of the present simulation and experimental result by Marschall et al.

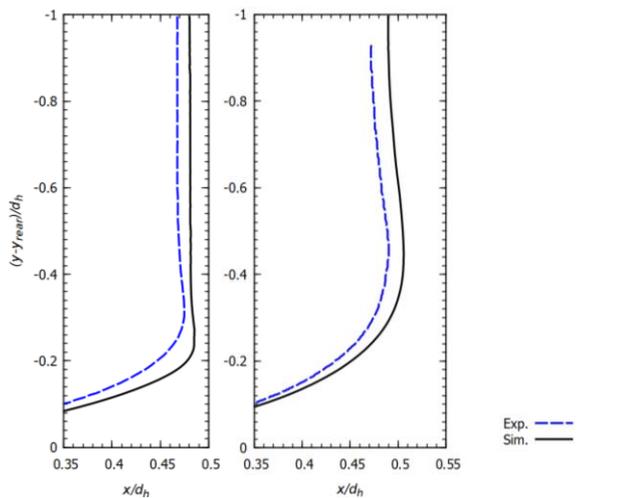


Fig. 4 Comparison of the shape near the tail of the bubble in a lateral (left) and a diagonal (right) cut between the result of the present simulation and experimental result by Marschall et al.

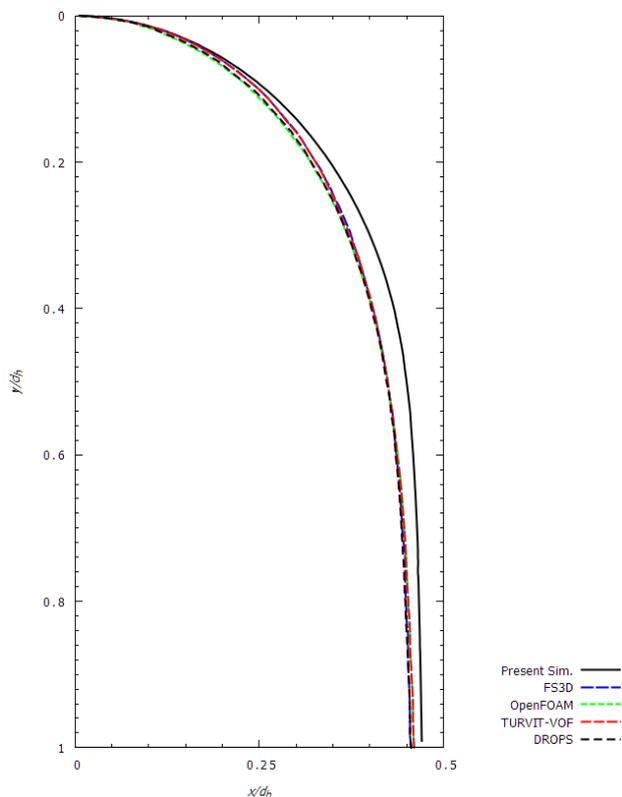


Fig. 5 Comparison of the bubble head shape between the result of the present simulation and the results of the simulation using diffuse interface model by Marschall et al. We found the difference in the curvature of the interface and the radius of the bubble.

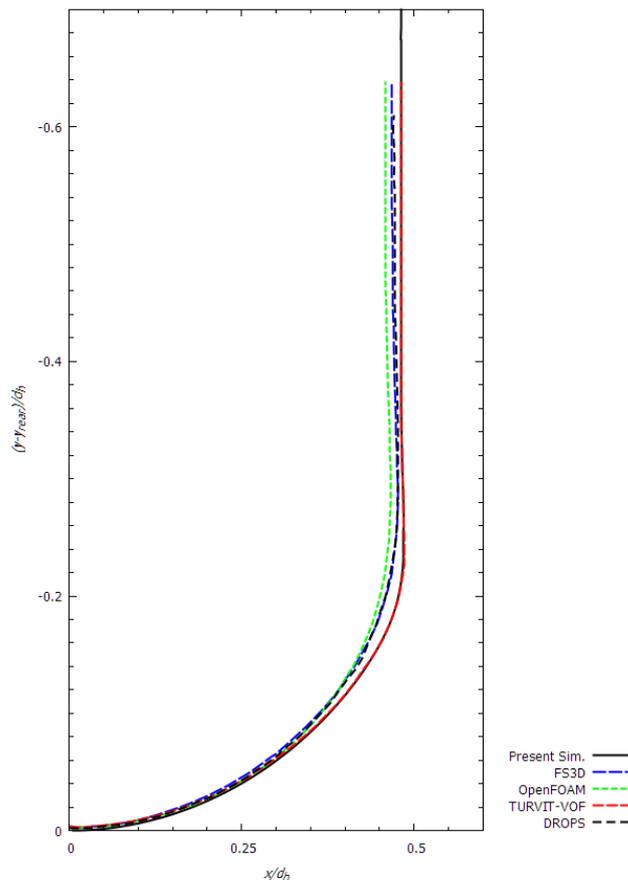


Fig. 6 Comparison of the bubble tail shape between the result of the present simulation and the results of the simulation using diffuse interface model by Marschall et al.

参考文献

- (1) H. Marschall, S. Boden, C. Lehrenfeld, C. Falconi, U. Hampel, A. Reusken, M. Womer, D. Bothe, "Validation of Interface Capturing and Tracking techniques with different surface tension treatments against a Taylor bubble benchmark problem", *Computers & Fluids*, 102 (2014), pp. 336-352.
- (2) 大西 順也, 小野 謙二, "Sharp 界面モデルを用いた気泡離脱挙動の解析", 日本混相流学会混相流シンポジウム 2015, USB メモリ.