

[共同研究成果]

Level set 法による相変化解析手法の構築・検証と

円管内気泡への適用

平井克樹、川本裕樹
東海大学

行光実桜、佐々木大輔
大阪公立大学

高橋俊、福家英之
宇宙航空研究開発機構

ヒートパイプ内部の相変化を伴う気液二相流の流動メカニズムの把握と熱輸送性能向上に向け、等間隔直交格子および Level set 法に基づく数値解析手法を構築した。三次元重力下における上昇気泡解析により手法の妥当性を検証した結果、気泡形状、過熱度分布および上昇挙動について先行研究と良好な一致が得られた。また円管内の単一気泡解析から、気泡成長に伴う形状遷移およびテイラーバブル形成過程と、それに伴う熱輸送特性の変化を明らかにした。

1. 序論

ヒートパイプは、密閉容器内に封入した作動流体の蒸発・凝縮による相変化を利用し、小さな温度差でも効率よく熱を輸送するデバイスである。この高い熱輸送性能から、宇宙機器をはじめとする様々な分野で利用されている。一方、ヒートパイプは密閉構造であるため内部流動の直接観察や詳細な物理量の計測が困難であり、内部の流動および熱輸送メカニズムの詳細の把握には数値流体力学 (CFD) が有効であると考えられる。しかし、ヒートパイプ内部では作動流体の蒸発・凝縮を伴う気液二相流が生じるため、界面移動や界面近傍の温度場を高精度に扱う必要があり、解析は容易ではない。これまで、Sharp interface model や Ghost fluid 法などを用いた相変化解析手法が提案され、その有効性が示されている^[1, 2]。その一方で、これらの手法を用いて実際の熱輸送機器内部における流れを詳細に解析した研究は限られている。

本研究の目的は、CFD を用いてヒートパイプ内部における相変化を伴う気液二相流の流動および熱輸送メカニズムの詳細を明らかにし、高効率な熱輸送の実現に資する知見を得ることである。特に円管の直径は、気泡界面形状や壁面液膜厚さを通じて熱伝達特性に影響を及ぼす重要な因子である。本報では、等間隔直交格子および Level set 法を用いた数値解析の検証と、円管内における単一気泡の成長挙動と熱伝達特性の管径依存性を調査した結果について報告する。

2. 数値計算法

本研究では等間隔直交格子上において、気液二相流と熱輸送を取り扱う。支配方程式は相変化を考慮した連続の式、非圧縮性 Navier–Stokes 方程式、エネルギー方程式である。また気液界面の追跡には符号付き距離関数を用いる Level set 法を適用し、密度および粘度は Level set 関数から計算される Heaviside 関数を用いて界面近傍で平滑化する。また、表面張力は CSF (Continuum Surface Force) モデルにより Navier–Stokes 方程式の外力項として与える。ここで連続の式および非圧縮性 Navier–Stokes 方程式をそれぞれ式(1)と式(2)に示す。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{m} \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \{\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)\} + \frac{\sigma \kappa \nabla H}{\rho} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{u} は流速、 ρ_v および ρ_l はそれぞれ気相および液相の密度、 \dot{m} はセル内の相変化量、 p は圧力、 μ は粘度、 σ は表面張力、 κ は曲率、 H は Heaviside 関数、 \mathbf{g} は重力加速度である。また温度場の計算には、式(3)に示すエネルギー方程式を用いた。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T \quad (3)$$

ここで、 C_p は定圧比熱、 T は温度、 k は熱伝導率である。なお、界面近傍の拡散項は気液界面を飽和温度として扱うため、不等間隔差分に基づく 2 次精度中心差分法により評価した。さらに、気液界面の追跡には Level set 法を用い、Level set 関数 ϕ の移流方程式を式(4)に示す。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \left(\mathbf{u} - \frac{\dot{M}}{\rho_v} \mathbf{n} \right) \cdot \nabla \phi = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\phi = 0$ は気液界面、 $\phi > 0$ は気相、 $\phi < 0$ は液相、 \mathbf{n} は界面の単位法線ベクトルである。界面を通過する質量流束 \dot{M} は、液相側の熱流束に基づき式(5)より算出した。

$$\dot{M} = -\frac{k_l \nabla T_l \cdot \mathbf{n}}{L} \quad (5)$$

ここで、 k_l は液相の熱伝導率、 T_l は液相温度、 L は潜熱である。なお、連続の式における相変化量 \dot{m} は、界面での質量流束 \dot{M} を界面の面積に基づいてセル内の体積生成項へ換算した値である。

時間発展には Fractional Step 法を用いた。流動計算における移流項には 5 次精度 WENO 法、粘性項には 2 次精度中心差分法、時間積分には 3 次精度 TVD Runge–Kutta 法を適用した。圧力 Poisson 方程式の解法には Bi–CGSTAB 法を用いた。温度場については、移流項に 3 次精度風上差分法、拡散項に 2 次精度中心差分法、時間積分に Crank–Nicolson 法を適用した。また円管形状の定義にも Level set 法を用い、境界条件は Image point を用いる埋め込み境界法^[3]により与えた。

3. 結果および考察

3.1 検証解析

解析手法の妥当性を確認するため、先行研究^[1]に基づき三次元において重力下の過熱液相内を上昇する気泡の解析を実施した^[4]。作動流体はエタノールとし、計算領域は $X=Y=8$ mm、 $Z=15$ mm とした。気泡の初期半径は $R=210$ μm 、初期位置は底面から 1 mm の中心とし、重力加速度は 9.81 m/s^2 とした。また、格子幅の影響を確認するため、Coarse、Medium、Fine の 3 種類の格子を設定した。格子幅 Δx はそれぞれ 40、20、16 μm であり、対応する格子数は $201 \times 201 \times 376$ 、 $401 \times 401 \times 751$ 、 $501 \times 501 \times 939$ である。ここで図 1 に各格子解像度における過熱度分布を示す。気泡の上昇に伴い、気泡下部には尾を引くような過熱度分布が形成され、気泡形状は球形から楕円球状へと変化した。また、速度場には気泡端部を中心とした循環流れが確認された。Medium および Fine では、これらの気泡形状、過熱度分布および流れ場の特徴が先行研究と同様の傾向を示し、定性的に良好な一致が得られた。一方、Coarse では他の条件と比較して気泡径が小さく、過熱度分布にも差異が見られた。これは、本解析では界面厚さを格子幅 4 点で与えているため、格子幅が大きい条件ほど人工的な界面厚さの影響が相対的に大きくなり、界面近傍の物理量勾配に差が

生じたためと考えられる。さらに、気泡上昇速度および正規化気泡半径の時刻歴についても、格子幅を細かくすることで先行研究に近い傾向が得られた。以上より、本解析手法は重力下における上昇気泡の相変化挙動を妥当に再現できていると考えられる。

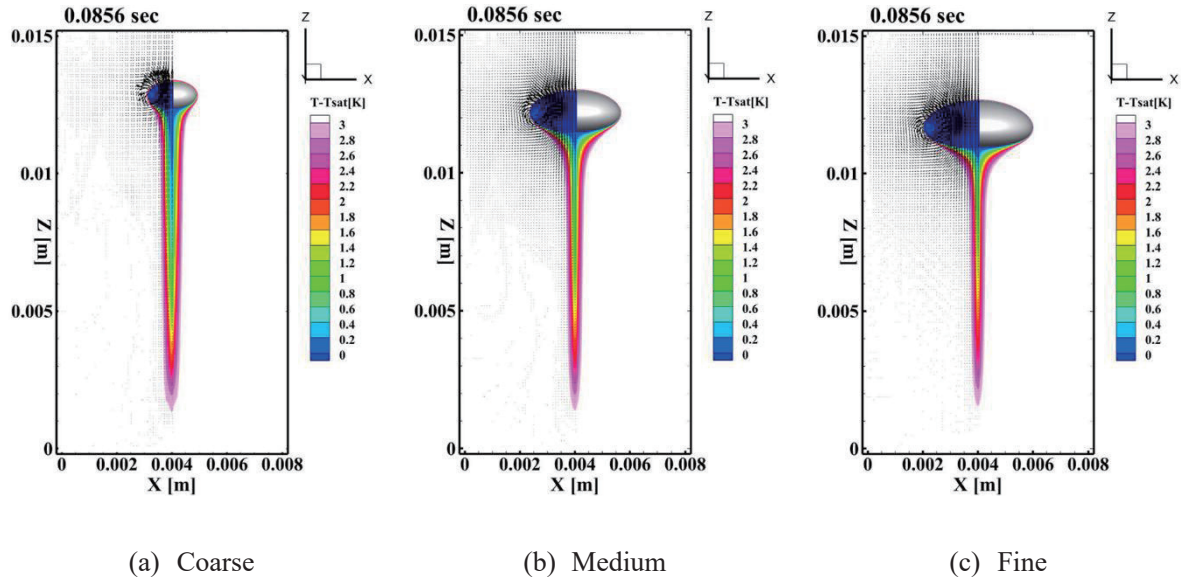


図 1 0.0856 s における各格子解像度での過熱度分布と速度ベクトル

3.2 円管内の単一気泡解析

本節では、3.1 節の検証解析に円管を適用し、ヒートパイプに近い条件を想定した三次元円管内における単一気泡の成長挙動を解析した。解析対象の円管は管径 $D=2$ mm、高さ $H=20$ mm とした。計算格子には完全等間隔の直交格子を用い、作動流体にはエタノールを採用した。初期条件として、気液は静止状態から開始し、気泡は管軸中心上の底面から 1 mm の位置に配置した。気泡の初期直径は約 $0.10D$ とした。また、流入流速は 0.05 m/s に設定し、重力加速度は 9.8 m/s² とした。温度条件として、液相温度は作動流体の大気圧下における飽和温度 T_{sat} に過熱度 3.1 K を加えた値とし、気泡温度は T_{sat} とした。さらに、壁面温度は液相温度よりも高くなるよう設定し、液体との温度差が 10.1 K となる条件とした。

図 2 に加熱度分布の時間変化を示す。気泡は上昇しながら成長しており、気泡直径が管径より小さい段階では、高さ方向および半径方向の両方に成長する様子が確認できる。一方、気泡直径が管径と同程度になると、成長は主に高さ方向に限定され、気泡はテイラーバブルへと変形しながら上昇する挙動を示した。図 3 に 0.080 s における壁面近傍の局所ヌセルト数を示す。気泡領域におけるヌセルト数は液体領域の約 3 倍に達しており、気泡の存在が熱伝達の向上に寄与していることが確認された。

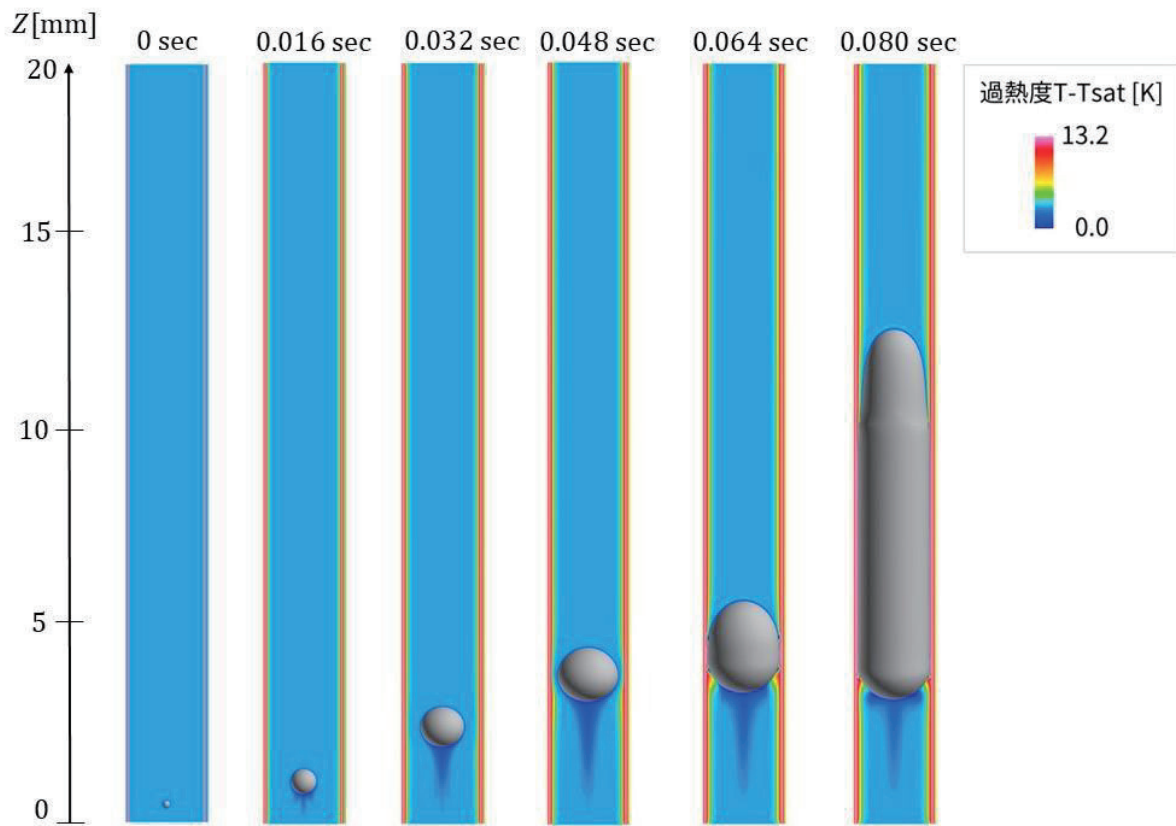


図2 管径 $D=2\text{mm}$ 、高さ $H=20\text{mm}$ における過熱度分布の時刻歴

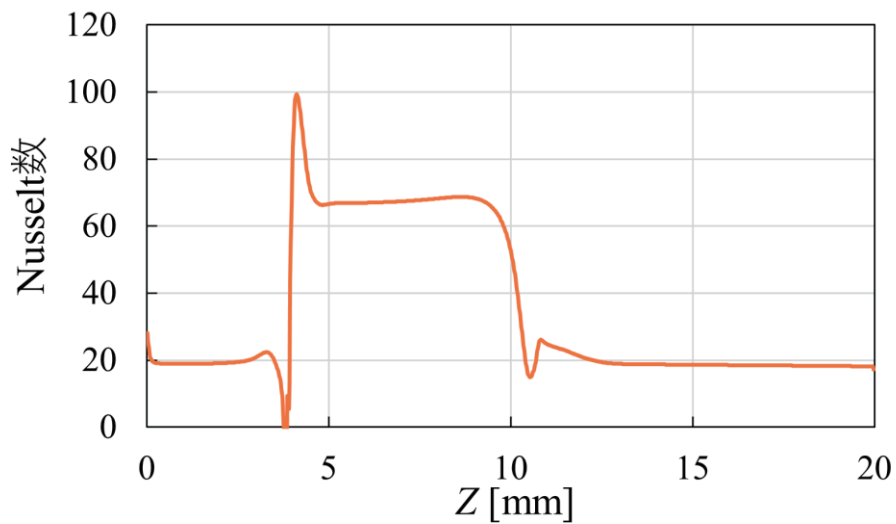


図3 0.080sec における壁面近傍の局所ヌセルト数

4. 結言

ヒートパイプ内部の相変化を伴う気液二相流解析に向けて、Level set 法を用いた数値解析手法を構築した。さらに、重力下における上昇気泡の三次元解析を通じて、提案手法の妥当性を検証した。その結果、気泡形状、過熱度分布および上昇挙動について先行研究と良好な一致が得られ、本手法が相変化を伴う気液二相流の解析に有効であることを確認した。円管内の単一気泡解析においては、気泡径の増大に伴い球状気泡からテイラーバブルへと遷移し、流動様式が変化することを確認した。また、気泡の存在により壁面近傍の熱伝達が促進され、ヌセルト数が増加することを明らかにした。今後は、大規模解析に向けた新たな手法を適用し、より実機条件に近い複雑な流動場の解析や、熱輸送性能の定量評価を通じて、ヒートパイプの高性能化に向けた設計指針の構築に展開する予定である。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。

参考文献

- [1] Sato, Y., and Ničeno, B., “A sharp-interface phase change model for a mass-conservative interface tracking method,” *Journal of Computational Physics*, 249 (2013), pp. 127–161.
- [2] Tanguy, S., Sagan, M., Lalanne, B., Couderc, F., and Colin, C., “Benchmarks and numerical methods for the simulation of boiling flows,” *Journal of Computational Physics*, 264 (2014), pp. 1–22.
- [3] Takahashi, S., Nonomura, T., and Fukuda, K., “A numerical scheme based on an immersed boundary method for compressible turbulent flows with shocks: Application to two-dimensional flows around cylinders,” *Journal of Applied Mathematics*, 2014 (2014), Article ID 252478.
- [4] Hirai, K., Kawamoto, Y., Nara, S., Takahashi, S., Kawachi, A., Okazaki, S., and Fuke, H., “Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow with Phase Change for Engineering Applications”, *Proceedings of the 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics*, (2024).