

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11911

研究課題名（和文）GPUスーパーコンピュータを用いた沸騰多相流挙動解析

研究課題名（英文）Boiling multiphase flow behavior analysis using GPU super computers

研究代表者

杉原 健太（Sugihara, Kenta）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職

研究者番号：80621929

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、Phase Field法を用いた気液二相流計算における界面幅の最適化と、新たなMulti-Phase Field法の導入を行った。まず、従来のPhase Field法のパラメータを最適化し、計算精度を向上させた。次に、最適化した手法を用いて5x5バンドル体系でボイド率分布を解析し、従来法の問題点を発見した。その後、Multi-Phase Field法を導入し、非物理的な気泡合体を防ぐことで解析精度を向上させた。これにより、多数の気泡を効率的に扱い、実験と良好な一致を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力工学において気液二相流解析精度向上は炉心設計や安全性評価などにおいて重要である。本研究では従来型の平均化モデルに変わる方法として界面移動を直接計算する手法の高度化を実施した。Phase Field法を用いた界面捕獲手法の最適化を実施し、燃料集合体を模擬したバンドル体系解析に適用した結果、GPUスパコンを用いることによって実験規模の界面捕獲型二相流解析が可能であることを実証した。また、Multi-Phase Field法を用いた界面モデルは気液二相流解析の更なる発展をもたらす技術である事が示された。以上の研究成果は、多数の気泡を含む冷却システム等の解析技術向上に応用可能である。

研究成果の概要（英文）：This study optimized the interfacial width in gas-liquid two-phase flow calculations using the Phase Field method and introduced a new Multi-Phase Field method. First, we optimized the parameter in the traditional Phase Field method, improving calculation accuracy. Then, using the optimized method, we analyzed the void fraction distribution in a 5x5 bundle system and identified issues with the conventional approach. Subsequently, we introduced the Multi-Phase Field method to prevent non-physical bubble coalescence, enhancing analysis accuracy. This allowed us to efficiently handle numerous bubbles and achieve good agreement with experimental results.

研究分野：高性能計算関連

キーワード：気液二相流体解析 GPU Phase Field Multi-Phase Field

## 1. 研究開始当初の背景

沸騰水内での沸騰や凝縮、熱流動挙動の解明は、沸騰水型原子炉の熱交換システムにおいて極めて重要である。特に沸騰初期における小さな気泡の形成から大きな気泡への成長過程では、燃料棒との伝熱挙動が変化するため、気液界面形状や気泡の圧縮性を考慮した解析が必要となる。しかし、複雑な気液界面を持つ二相流を直接計算することは計算資源的に難しいため、時間および空間的に平均化した二流体モデルが広く採用されてきた。このモデルは原子炉の安全性評価に成果を上げているが、実験データや経験的な補正に依存しており、気泡の運動を直接解析するには限界がある。この背景から、沸騰気泡流れの数値シミュレーションには二つの主要な課題がある。第一に、ボイド率に依存する物理モデルが気液界面形状を考慮できていない点である。気液界面を正確に識別するためには、十分な計算格子数が必要であり、計算資源や並列計算技術のハードルが高い。第二に、沸騰・凝縮といった相変化を考慮していない点である。これを再現するためには、熱力学的なエネルギー収支に基づく相変化モデルや、気相の圧縮性を考慮した物理モデルが必要となる。近年、高性能計算 (HPC) 分野では、GPU を搭載した大型計算機が注目されている。国内では TSUBAME3.0 や ABCI、米国では SUMMIT などの大型計算機が登場し、数値流体計算への適用例も増加している。これにより、沸騰気泡流れのより高度な解析が可能となりつつある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、GPU 型大型計算機を活用して、沸騰気泡流の熱流動現象を解析する最先端の計算モデルを開発し、原子力分野におけるバンドル内気液二相流の解析に適用可能であることを実証することである。特に、沸騰・凝縮などの相変化を考慮し、気液界面の追跡を行う高解像度の解析モデルを構築する。これにより、原子力分野だけでなく、液体冷却システムの解析が必要な他の産業分野への波及効果も期待される。

## 3. 研究の方法

本研究では GPU を搭載した大型計算機で動作する気液二相流解析コードを開発する。気液界面の計算には Phase Field 法の一つである conservative Allen-Cahn (CAC) 方程式という界面捕獲法を採用し、シャープな界面幅と滑らかな形状を両立させて高精度な界面計算を可能とする。流体計算の基礎方程式として圧縮性を考慮した Navier-Stokes 方程式をベースにして、流体の圧縮性を考慮した解析と非圧縮近似を考慮した解析の両方に対応した圧力 Poisson 解法を構築する。流体計算において計算コストの高い Poisson 解法には、マルチグリッド法を用いた高速化を施す。液体の沸騰現象については温度回復法をベースにした沸騰モデルを構築する。開発コードの検証問題として単一気泡上昇解析を実施して妥当性を確認する。そして最後に燃料棒を模擬したバンドル体系解析を実施し、本研究で開発した気液二相流解析の適用性を実証する。

## 4. 研究成果

気液二相流計算の界面捕獲法として採用した Phase Field 法は、界面幅やそれを補正する強度などのパラメータによって形状の精度が大きく変化する。本研究では、まず界面補正パラメータの最適化を実施した。次に、最適化した界面モデルを用いて燃料バンドルを模擬した 5x5 バンドル体系解析を実施してボイド率分布を実験結果と比較したが、界面モデルの新たな問題が明らかとなったため、Multi-Phase Field 法を用いた新たな界面モデルを導入して気泡流の解析精度改善を実施した。

### (1) 界面捕獲法の最適化

従来の Phase Field 法では、気液界面幅の修正強度に関するパラメータ  $\gamma$  を全計算領域に対して一様に設定されていた。 $\gamma$  の大きさは小さすぎると界面幅が広がってしまい、大きすぎると界面幅は一定になるが界面形状の精度が低下するため、適切な値は計算毎に調整する必要がある。値の設定方法として、経験的に  $\gamma = 0.7 |u_{max}|$  のように速度の最大値や代表速度などが用いられてきたが、一般的に流体計算において速度場は速い場所もあれば、遅い場所も存在するため、適切な  $\gamma$  は空間に依存すると考えられる。そこで、本研究では Phase Field 法を用いた界面捕獲計算において界面幅の拡散は、移流計算の数値粘性と変形速度場による引き伸ばしの 2 点に起因すると考え、 $\gamma(x) = M|u(x)| + B|S| \delta$  のように速度分布  $u(x)$  と変形速度テンソル  $S$  に比例するような空間分布を設定する手法 (Modified conservative Allen-Cahn (MCAC)) を考案した。本手法は 2 次元界面移流計算において、パラメータ最適化した従来手法よりも 31-37% 誤差を低減し、単一気泡上昇計算では同等以上の計算結果となる事が示された。本手法は CAC のような Phase Field 法だけでなく、その発展系である Multi-Phase Field 法にも応用可能である。

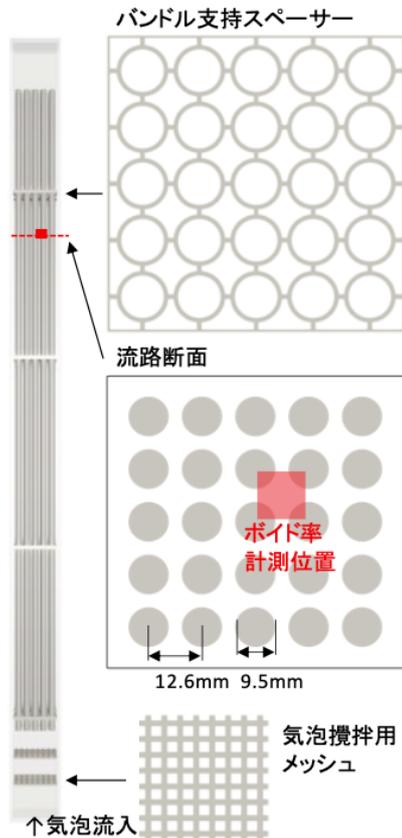


図1 5x5バンドル体系解析領域

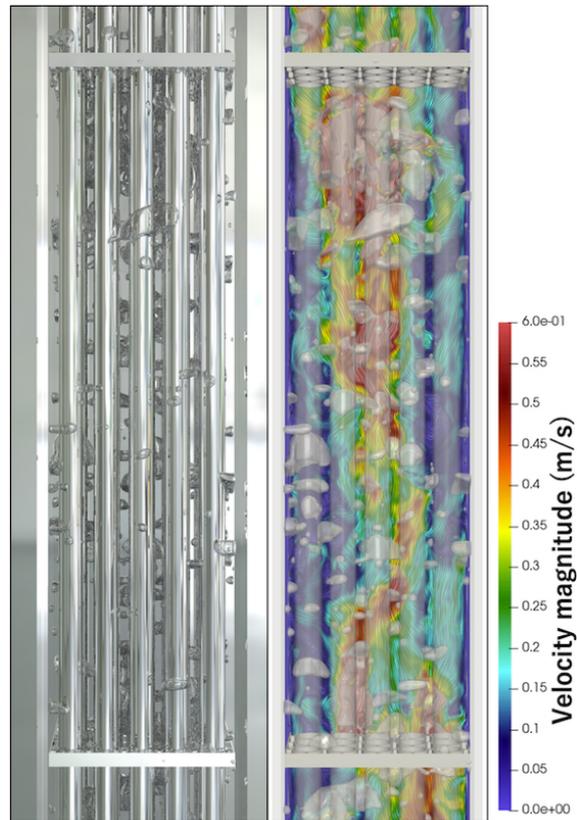


図2 解析結果 (気液界面と速度分布)

### (2) 5x5バンドル体系解析

本研究にて開発した MCAC 法を原子力工学分野の気液二相流体問題に適用し、複雑な流れ場においても界面捕獲が機能することを確認した。計算条件として図1のように 5x5 バンドル体系を設定した。燃料棒を模擬した直径  $D=9.5\text{mm}$  の円筒物体 12.6mm 間隔で 5x5 個設定し、バンドル支持スペーサーを高さ方向に 27.2D 間隔で4個設置した。計算領域下部の流入協会とバンドルの間には気泡の流れを攪拌するためのメッシュを設定した。流入境界には 11x11 のオリフィスを設定し、各オリフィスからは空気と水を交互に流入させる。流入条件として Bubbly flow の条件 ( $j_f=0.10\text{ m/s}$ ,  $j_g=0.034\text{ m/s}$ ) で計算を実施する。ここで  $j_f$ ,  $j_g$  は 5x5 バンドルの流路における水と空気の見かけ速度である。オリフィス境界条件の流体率は、流入する気液の割合が  $j_g:j_f$  となるように交互に時間変化させる。時間変化の間隔は、一つのオリフィスから1周期の間に流入する空気が指定サイズ (直径 2mm) の気泡となるように調整した。図2は時刻  $t=9\text{sec}$  における計算結果のスナップショットである。水の屈折率を考慮した気泡の可視化結果と、チャンネル間の断面における速度分布の様子を示している。気泡はサブチャンネル間を移動しながら上昇し、気泡の通過経路の流速が上昇していることが確認できる。Ren らの実験における気泡のスナップショットでは、気泡サイズはバンドル直径の 0.5 倍から1倍程度の楕円型気泡となっているが、本計算では接近した気泡同士が連鎖的に合体を繰り返して、バンドル直径を超えるサイズの気泡が発生してしまうという問題が明らかとなった。界面捕獲法を用いた気泡計算では、気泡界面同士が2~3格子程度まで接近すると数値的に合体してしまうという特性があり、気液二相流の流動様式を再現することが困難であることがわかった。接近した2つの気泡は合体せずに反発する様子は実験等では確認されているが、数値計算で再現するためには格子サイズを気泡直径に対して  $1/1600$  以下にする必要があるという Zhang らの報告がある。しかし、バンドル体系規模の計算でそのように極端に細かな計算格子を使用することは現実的ではないため、界面の計算手法の工夫で解決する必要がある。そこで、本研究では気泡合体を制限可能な界面捕獲手法である Multi-Phase Field 法の導入により気泡流の解析精度改善を実施した。

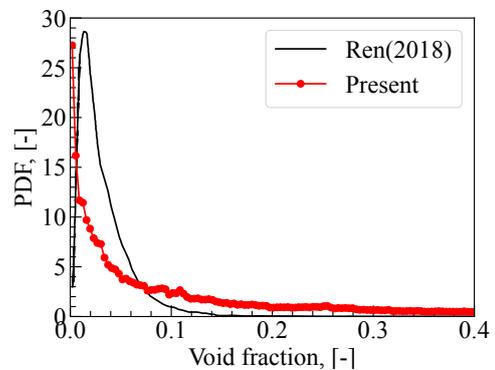


図3 サブチャンネル内のボイド率確率密度関数

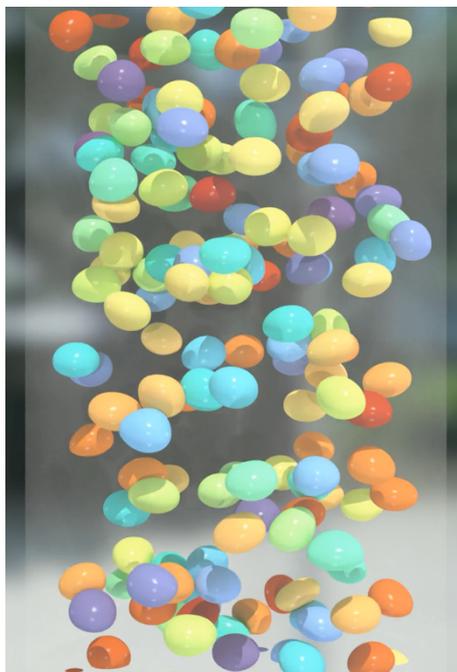


図4 円管内気泡流

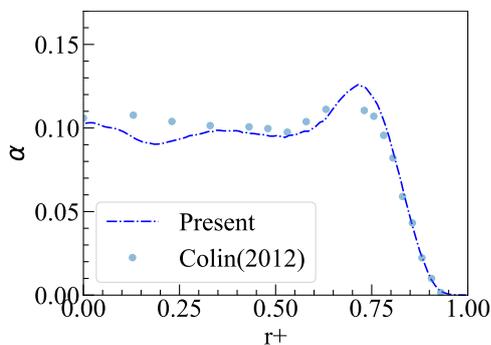


図5 半径方向のボイド率分布

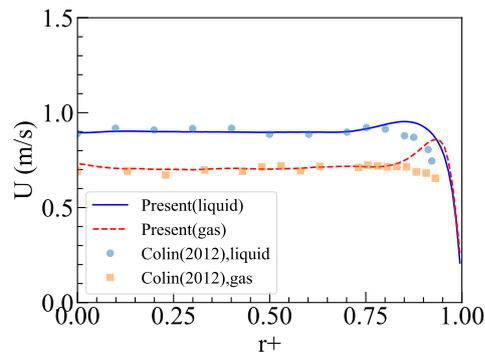


図6 半径方向の平均流速分布

### (3) Multi-Phase Field法を用いた気泡流解析

従来の界面捕獲法を用いたバンドル体系解析では気泡合体が連鎖的に発生して気泡径が過大評価された流動様式になってしまう問題があった。そこで、Multi-Phase Field法を用いて非物理的な気泡合体を防ぎ、流動様式やボイド率の解析精度向上を目指した。数百を超えるような多数の気泡を取り扱う場合、ナイーブな実装では気泡の数と同数の変数配列が必要となるため、省メモリ化手法の導入が必須となる。本研究ではGPUスパコン向けにコード開発を進めているため、従来手法と比べてステンシル計算におけるメモリアクセス効率を向上させた Ordered Active Parameter Tracking (OAPT)法を適用して省メモリ化を実現し、以下の計算においてナイーブな実装と比較してメモリサイズを7/153程度に削減することに成功した。

基礎検証問題として直径 $D=40\text{mm}$ の円管内の気泡流解析を実施した(図4)。Colinらの実験(2012)条件D3と同様に気液物性は空気と水を設定し、平均ボイド率7.5%、気泡直径4.2mmの気泡153個をランダムに配置し、圧力勾配 $dp/dz=8662\text{ Pa/m}$ を設定した。計算領域は $(L_x, L_y, L_z)=(D, D, \pi D)$ として $dx=D/192$ の直交等間隔格子を設定し $z$ 方向は周期境界条件とした。図4はPhase IDで色付けされた気泡界面の様子を示している。Multi-Phase Field法を用いることにより、このように密集した多数の気泡を計算することが可能となった。このような計算は従来型の界面捕獲法では難しく、マルチカラー型の手法が必要となる。図5はボイド率 $\alpha$ と平均流速 $U$ の半径分布を示す。ここで、 $r_+$ は規格化した半径であり、分布は同一の半径 $r_+$ において周方向および流路方向( $z$ )に対して平均処理している。下降流の場合、壁面剪断応力、圧力勾配、重力のバランスにより気泡は円管の中央に集まる傾向があることが知られている。今回の計算ではこの傾向が再現され、気泡分布は実験と定量的に良い一致が得られた。また、流速分布も妥当な一致を示しており(図6)浮力の影響による空気と水の流速差を再現できる事が明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kenta Sugihara, Naoyuki Onodera, Yasuhiro Idomura, Susumu Yamashita	4. 巻 6
2. 論文標題 Optimized Phase-field Modeling Using a Modified Conservative Allen-Cahn Equation for Two-phase Flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JAEA-Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11484/jaea-research-2023-006	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 杉原健太、小野寺直幸、井戸村泰宏、シトンプル ヨス、山下晋
2. 発表標題 Phase Field法を用いた気液二相流解析
3. 学会等名 日本原子力学会2024年春の年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉原健太、小野寺直幸、井戸村泰宏、山下晋
2. 発表標題 Multi-phase field法を用いた気泡流解析
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原健太、小野寺直幸、井戸村泰宏、山下晋
2. 発表標題 気泡上昇解析におけるPhase Field変数の最適化
3. 学会等名 第28回計算工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原健太、小野寺直幸、井戸村泰宏、山下晋
2. 発表標題 気液二相流問題におけるフェーズフィールド変数の最適化
3. 学会等名 27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sugihara, N. Onodera, Y. Idomura, S. Yamashita
2. 発表標題 A Study of Phase-Field Parameters in Gas-Liquid Two-Phase Flow Problems
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原健太、小野寺 直幸、井戸村 泰宏、山下晋
2. 発表標題 マルチフェーズフィールド法を用いた気液二相流解析
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原健太、小野寺直幸、井戸村泰宏、山下晋
2. 発表標題 気液二相流問題におけるフェーズ・フィールドパラメータの検討
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉原健太、小野寺直幸、井戸村泰宏、山下晋
2. 発表標題 気液二相流計算における適切なPhase-Field変数の検討
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小野寺 直幸 (Onodera Naoyuki)  (50614484)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職  (82110)	
研究分担者	山下 晋 (Yamashita Susumu)  (80586272)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職  (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------