

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04941

研究課題名（和文）試験研究炉の燃料板間における気液二相流の流動特性と界面輸送機構の解明

研究課題名（英文）Study on flow characteristics and interfacial transport mechanism in gas-liquid two-phase flow between fuel plates in research reactor

研究代表者

沈 秀中（Shen, Xiuzhong）

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号：20362410

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、研究炉燃料要素の模擬矩形形状と円弧状狭隘流路内複雑な気液二相流に対して、先進フォーセンサー・プローブ法と高速度カメラを併用した画像処理法等を用いて局所計測を行い、流動様式及び二群気泡のボイド率・界面積濃度・気泡径等の流動特性データベースを構築した。取得したボイド率実験データと既存他の研究者の実験データを利用し、全流動範囲に適用できる新ドリフトフラックス相関式を開発・検証した。更に、取得した界面積濃度実験データを利用して、Sun et al. (2004)が提案した二群気泡界面積濃度輸送方程式と関連の気泡合体・分裂モデルを評価し、研究炉の安全解析・評価コードに適用できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、研究炉燃料要素実寸大の複数の模擬流路を製作し、その中に上昇する気液二相流を研究対象とし、三年間に渡って実験的研究とモデリング研究を行った。構築した高精度実験データベースは研究炉熱流動シミュレーションの質量、運動量、エネルギー保存則を閉じるための構成方程式の高度化とそのシミュレーション結果の妥当性検討（V&V）に重要である。開発した全流動範囲に適用できる新ドリフトフラックス相関式と検証した二群気泡界面積濃度輸送方程式と気泡合体・分裂モデルは、研究炉の安全解析・評価の予測精度向上に貢献できるため、研究炉の効率化及び経済性、安全性と使用済み燃料低減の問題解決に寄与することである。

研究成果の概要（英文）：In this study, local measurements using advanced four-sensor probe method and image processing technique combining a high-speed camera were performed to investigate complex gas-liquid two-phase flows in narrow rectangular and arc-shaped channels simulating a research reactor fuel element, and a database of flow characteristics including the flow pattern and the void fraction, interfacial area concentration, and bubble diameter of two groups bubbles was constructed. Using the measured void fraction data and existing experimental data from other researchers, a new drift flux correlation equation applicable to the full flow range was developed and verified. Furthermore, using the measured interfacial area concentration data, the two-group bubble interfacial area transport equation and its related bubble coalescence and breakup models, proposed by Sun et al. (2004), were evaluated, and it was confirmed that they can be applied to safety analysis and evaluation codes for research reactors.

研究分野：工学

キーワード：研究炉 熱流動 狭隘流路 気液二相流 界面積濃度輸送方程式 ドリフトフラックスモデル 気液二相流計測 データベース構築

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

試験研究炉は、発電用原子炉の発電利用とは異なり、核分裂連鎖反応で発生した中性子を基礎から応用までの広い分野にわたって実験・研究等に利用することを目的とした原子炉である。試験研究炉において高中性子束を得るため、高出力密度(即ち高い単位体積あたりの出力)の特性と優れた除熱性能を持つ板状燃料要素の使用が要求される。板状燃料要素はウラン燃料を挟むアルミニウム又はステンレスの平行燃料板で構成されている。既存の燃料板の形状は多種多様であるが、フラット燃料板の形状と燃料板の座屈に対する強度を高めるために湾曲している円弧状燃料板の形状が一般的な研究炉燃料板に採用されている。これら燃料板の平行配列と両側の側板からなる幅約数ミリの複数の矩形状又は円弧状の隙間は冷却材の垂直上昇流路である。事故時の研究炉炉心では冷却材である水が沸騰し気液二相流となるため、その特性を支配する非均質・間欠的流動挙動の把握、モデリング及びシミュレーションは、研究炉安全性評価の要である。更に垂直狭隘流路内上昇気液二相流の特性は、通常垂直通常円管内上昇気液二相流の特性と異なり、その気液界面構造が表面張力の影響を大きく受けている。然し、現状の研究炉用安全解析・評価コード EUREKA-2/RR、COOLOD-N2 と THYDE-W は数十年前に整備されたもので、試験研究炉の冷却水が沸騰しない单相流の熱水力現象をしか精度良く再現できない。最近高速炉「もんじゅ」の敷地に作る予定の新試験研究炉の設計・安全評価への対応のため、既存の安全解析・評価コードが沸騰しない設計基準事象(DBA)だけではなく、沸騰が発生し、DBA事象を超える事象(BDBA)も解析・評価できることが要求されている。これらのコードの開発・改良には、質量、運動量、エネルギー保存則を閉じるための構成方程式の高度化と安全解析・評価結果の妥当性検討(V&V)を行うための高精度データベースの構築が必要である。特に重要な構成方程式としての界面積濃度輸送方程式を保存則基礎方程式へ導入することは、気液二相流の入口効果、未発達流れ、気泡の合一、分裂、壁面沸騰等が界面積濃度輸送に及ぼす効果を系統的に表現することを可能とし、熱流動解析に飛躍的な進歩をもたらすものと期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究は試験研究炉の燃料板間の垂直狭隘流路内上昇気液二相流の局所流動特性を高速度カメラと先進フォーセンサー・プローブ等を用いて測定し、気液二相流の流動様式、二群気泡のボイド率、界面積濃度及び気泡径等の局所流動パラメーターのデータベースの構築を行い、燃料板間の気液二相流の複雑相間相互作用と界面輸送機構を解明し、ボイド率特性の高精度予測を可能とするドリフトフラックスモデルの開発と界面積濃度のダイナミックな変化の予測を可能とする二群気泡の界面積濃度輸送方程式の検討を行うことを目的とする。開発されたモデルは試験研究炉の安全解析・評価コードへの組み込みが可能であり、得られたデータベースも含め、安全解析・評価精度の向上に必要な不可欠であるため、その社会的意義は大であると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究では、試験研究炉燃料要素の模擬矩形状と円弧状狭隘流路の試験部と実験ループを製作・設置し、三年間に渡って実験研究と理論解析研究を行う。試験研究炉燃料要素実寸大をベースに製作した複数の模擬流路の間隔  $s$  は 1-3mm で、幅  $w$  は 40-100mm で、円弧半径  $R$  は 60-mm である。実験研究では、狭隘流路内気液二相流において、高速度カメラと先進フォーセンサー・プローブを用いて、流動様式と大小二群気泡のボイド率、界面積濃度(IAC)、気泡ザウター平均径等の局所流動パラメーターを測定し、データベースを構築する。理論解析研究では、データ解析により気液二相流の流動特性と界面輸送機構を明らかにした上で、狭隘流路内気液二相流のドリフトフラックスモデルの開発と気泡合体・分裂モデルを含む二群気泡の界面積濃度輸送方程式の検討を行う。

### 4. 研究成果

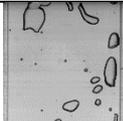
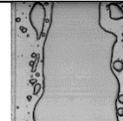
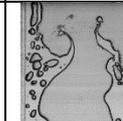
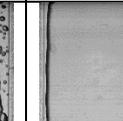
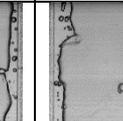
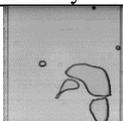
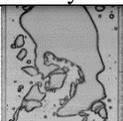
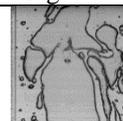
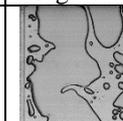
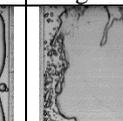
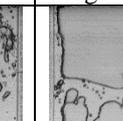
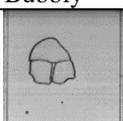
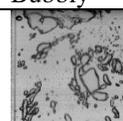
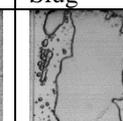
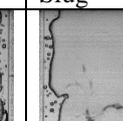
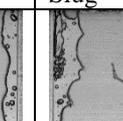
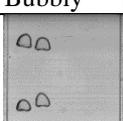
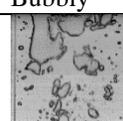
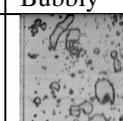
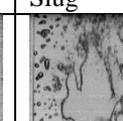
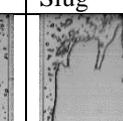
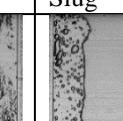
#### 4.1 気泡挙動と流動様式の観察測定

研究炉燃料要素の模擬流路内気液二相流に対して、高速度カメラを利用して流れ方向の撮影を行い、実験ループの駆動ポンプ能力とコンプレッサー供給能力の範囲内で選定した流動条件(液相見かけ速度 $\langle j_l \rangle$ と気相見かけ速度 $\langle j_g \rangle$ の組合で表示する)のデータベースを取得した。これらの流動条件の代表結果(隙間  $s$  3mm、幅  $w$  65.88mm、円弧半径  $R$  60mm の模擬流路で)は表 1 に示す。観察測定による特定した流動様式は Bubbly flow と Slug flow である。

#### 4.2 気液二相流の局所計測とデータベースの構築

本研究では、研究炉燃料要素の模擬流路内気液二相流の流動特性を測定可能な先進フォーセンサー・プローブ法と高速度カメラを併用した画像処理計測法等の局所計測系統を開発・整備・検証した。更に、模擬流路の試験部において、空気-水気液二相流の計測実験を行い、流れ方向( $z/D_h$ )のボイド率、界面積濃度、気相速度と気泡径など実験データを取得し、データベースを構築した。代表的な二群気泡のボイド率、界面積濃度及び気泡径は次のように報告する。

表1 観察した一部の気泡挙動と流動様式

$\langle j_g \rangle$	0.176 m/s	0.527 m/s	1.05 m/s	1.76 m/s	2.81 m/s	3.51 m/s	4.39 m/s
0 m/s	 Bubbly	 Bubbly	 Slug	 Slug	 Slug	 Slug	 Slug
0.176 m/s	 Bubbly	 Bubbly	 Bubbly	 Slug	 Slug	 Slug	 Slug
0.439 m/s	 Bubbly	 Bubbly	 Bubbly	 Bubbly	 Slug	 Slug	 Slug
0.852 m/s	 Bubbly	 Bubbly	 Bubbly	 Bubbly	 Bubbly	 Slug	 Slug

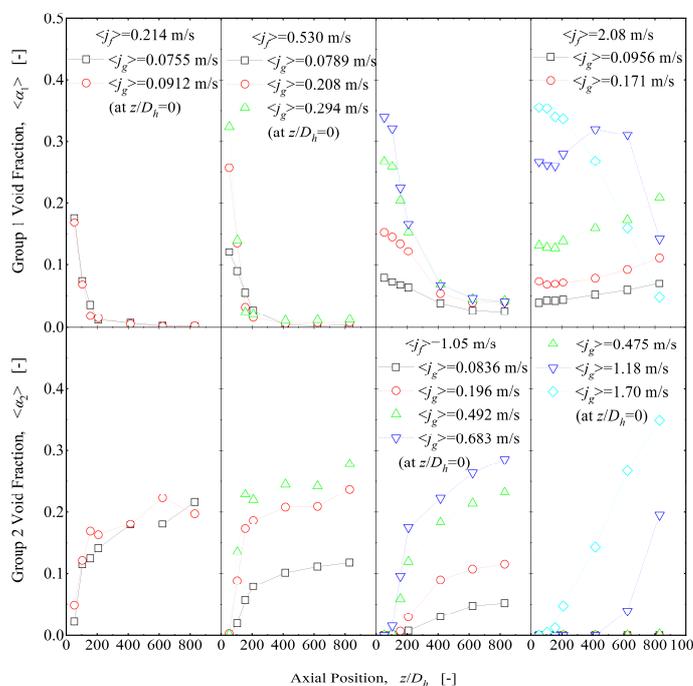


図1 流れ方向一群気泡と二群気泡のボイド率

流れ方向 ( $z/D_h$ ) の局所計測により取得した一群気泡と二群気泡のボイド率 ( $\langle \alpha_1 \rangle$  と  $\langle \alpha_2 \rangle$ )、界面面積濃度 ( $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$ ) 及び気泡径 ( $\langle D_{Sm1} \rangle$  と  $\langle D_{Sm2} \rangle$ ) の流動特性値データの一部はそれぞれ図1、2と3に示す。気液二相流の上昇方向に沿って流れが発達し、流動様式が Bubbly flow から slug flow に変化すると、一群気泡のボイド率と界面面積濃度は急激に低下し、二群気泡のボイド率と界面面積濃度は急激に上昇する。気泡径は急激に変化しないが、流れの方向に沿って増加する。この変化の原因は、多数の小さな一群気泡が合体して大きな二群気泡になるメカニズムによって引き起こされるものである。

#### 4.3 ドリフトフラックスモデルの開発

Zuber & Findlay (1965) によって提案されたドリフトフラックスモデルは、単純かつ厳密であり、さまざまな気液二相流におけるボイド率の予測に広く採用されている。一次元ドリフトフラックスモデルは次式に示す。

$$\langle \langle v_g \rangle \rangle = \frac{\langle j_g \rangle}{\langle \alpha \rangle} = C_0 \langle j \rangle + \langle \langle v_{gj} \rangle \rangle, \quad (2)$$

気液二相流の二相間の相互作用は、界面抵抗と密接に関連している。大小気泡はそれぞれの抵抗特性を有するので、気泡移動挙動が異なる。本研究で、気泡はその抵抗特性に基づいて二群に分類する。一群気泡は、小さな球状気泡と変形気泡として定義される。二群気泡は、より大きなキャップ状、スラグ状とチャーターピュラント気泡である。群内の気泡は互いに比較的類似した抵抗特性と挙動を示す。この二群気泡を明確に区別するため、本研究は Sun et al. (2004) が提案した次の最大変形気泡の体積相当直径  $D_{c1}$  を境界線として採用する。

$$D_{c1} = 1.7 \left[ \frac{\sigma s}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ 、 $g$ 、 $\rho_g$ 、 $\rho_f$  と  $s$  はそれぞれ表面張力、重力加速度、気相密度、液相密度と流路の間隔である。本研究の模擬流路の

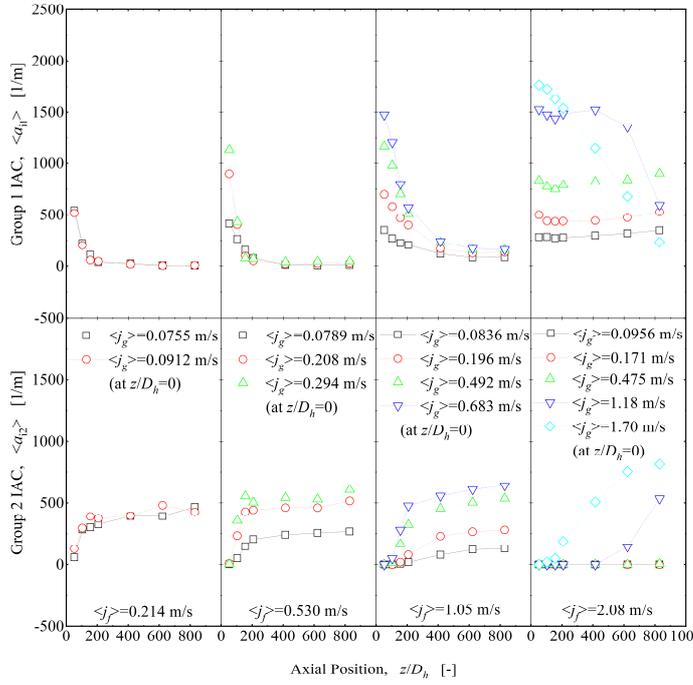


図2 流れ方向一群気泡と二群気泡の界面積濃度

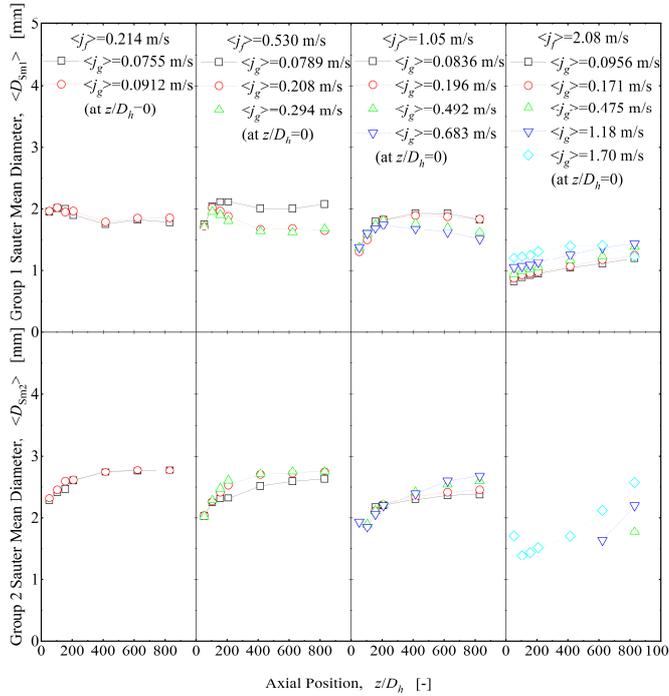


図3 流れ方向一群気泡と二群気泡の気泡径

$$C_0 = \left( 1 + \frac{\langle j_g^+ \rangle^{3.45}}{3.21 \langle j_g^+ \rangle^{3.52} + 0.0000514 \langle j_f^+ \rangle^{6.27}} \right) \left( 1 + \frac{1}{0.179s^* + 5.76w^*} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{4.75} \right] + \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{4.75}, \quad (3)$$

$$\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle = \frac{\langle j_g^+ \rangle^{4.30}}{1.97 \langle j_g^+ \rangle^{4.32} + 0.200 \langle j_f^+ \rangle^{3.04}} \sqrt{\frac{g}{s} + \frac{0.778}{w}} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1.59} \right]. \quad (4)$$

ここで、 $\langle j_g^+ \rangle$ 、 $\langle j_f^+ \rangle$ 、 $s^*$ と $w^*$ は、それぞれ無次元気相見かけ速度、無次元液相見かけ速度、無次元狭隘流路の間隔と無次元狭隘流路の幅を示している。それらのパラメーターは次のように定義する。

ここで、 $\langle \cdot \rangle$ 、 $C_0$ 、 $\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle$ 、 $\langle j \rangle$ と $\langle \langle v_g \rangle \rangle$ はそれぞれ断面面積平均ボイド率、分布パラメーター、ボイド率加重平均ドリフト速度、二相混合体積流束と平均気相流速である。二相混合体積流束 $\langle j \rangle$ は気相見かけ速度 $\langle j_g \rangle$ と液相見かけ速度 $\langle j_l \rangle$ の合計である。分布パラメーター $C_0$ は、二相混合物の不均一性の程度を、ボイド率加重平均ドリフト速度 $\langle \langle v_g \rangle \rangle$ は、気相と二相混合物体積の中心との速度差を反映している。

本研究で試験研究炉の燃料板間の垂直狭隘流路における広範囲の空気-水上昇気液二相流のボイド率実験データを取得したが、水蒸気-水気液二相流のボイド率実験データは取得していない。この不足を補うために、他の研究者の水蒸気-水気液二相流の実験データを収集した。この方法で合計1758点ボイド率データで構成する広範囲なデータベースを構築した。このデータベースに対して、Zuber-Findlayプロットのデータ分析手法によって、 $C_0$ と $\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle$ に関する変化特徴が得られた。更に、燃料板間の垂直狭隘流路のために開発された既存7つのドリフトフラックス相関式をレビューし、構築したデータベースによりその妥当性を検討した。この7つのドリフトフラックス相関式が燃料板間の垂直狭隘流路内の気液二相流のボイド率特性を十分に予測することを提供できないことが判明した。この状況を踏まえて、本研究では、 $C_0$ と $\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle$ の二相密度比、燃料板間の狭隘流路の形状とサイズ及び局所的な流動条件への依存性を分析し、 $C_0$ と $\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle$ の新しい相関式を次のように開発した。

$$\langle v_g^+ \rangle = \langle v_g \rangle / \left[ \frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{0.25}, \quad (5)$$

$$\langle v_f^+ \rangle = \langle v_f \rangle / \left[ \frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{0.25}, \quad (6)$$

$$S^* = \frac{s}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}}}, \quad W^* = \frac{w}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}}}. \quad (7)$$

ここ  $w$  は流路の幅である。新  $C_0$  と  $\langle v_{gj} \rangle$  相関式の係数は収集した 1758 点データによって決定された。新  $C_0$  と  $\langle v_{gj} \rangle$  の相関式で構成するドリフトフラックスモデルは、収集した 1758 点のボイド率実験データに対して、 $\pm 13.1\%$  の相対誤差で予測できる。

#### 4.4 二群気泡の実験データによる二群気泡界面積濃度輸送方程式の妥当性検討

気液二相流の二流体モデルへの二群気泡の界面積濃度輸送方程式の導入は、従来の界面積濃度相関式に依存した熱流動現象シミュレーションコードの予測能力を飛躍的に高めるものと期待されており、関連分野において最先端研究として位置づけられている。Sun et al. (2004) は、狭隘流路のための以下の気液二相流の二群気泡界面積濃度輸送方程式と関連する二群気泡ボイド率輸送方程式及び 16 種類気泡分裂と気泡合併モデル ( $\phi_{j,1}$  と  $\phi_{j,2}$ ) を開発した。

$$\frac{\partial a_{i1}}{\partial t} + \nabla \cdot (a_{i1} \vec{v}_{i1}) = \left( \frac{2}{3} - CD_{c1}^* \right) \frac{a_{i1}}{\alpha_1} \left[ \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \vec{v}_{g1}) - \eta_{ph1} \right] + \sum_j \phi_{j,1} + \phi_{ph1}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial a_{i2}}{\partial t} + \nabla \cdot (a_{i2} \vec{v}_{i2}) = \frac{2}{3} \frac{a_{i2}}{\alpha_2} \left[ \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2 \vec{v}_{g2}) - \eta_{ph2} \right] + C(D_{c1}^*)^2 \frac{a_{i1}}{\alpha_1} \left[ \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \vec{v}_{g1}) - \eta_{ph1} \right] + \sum_j \phi_{j,2} + \phi_{ph2}. \quad (9)$$

$\sum_j \phi_{j,2} + \phi_{ph2}$ .

気液二相流の二相の速度、ボイド率、界面積濃度及び圧力を算出するためには、二群気泡界面積濃度輸送方程式は計算コードを利用して二流体モデルの保存方程式と一緒に解く必要がある。計算プロセスを簡略化するために、本研究では、気液二相流の運動量保存方程式から切り離し、二群気泡界面積濃度輸送方程式と二群気泡ボイド率輸送方程式のみを使用して計算を実施する。これは、模擬流路で測定した圧力、全気泡の気相速度、一群と二群気泡のボイド率分布を入力データとすることによって行われる。二群気泡界面積濃度輸送方程式と二群気泡ボイド率輸送方程式から二群気泡の界面積濃度  $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$  と二群気泡の速度  $\langle v_{g1} \rangle$  と  $\langle v_{g2} \rangle$  を解くため、本研究では試験部最上流測定位置で測定した二群気泡の界面積濃度  $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$  を入力境界条件として設定している。陽的オイラー法を用いた有限差分法を使用して垂直狭隘流路内気液二相流

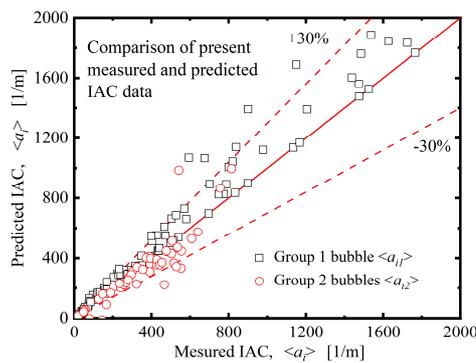


図4 界面積濃度の予測値と実測値の比較

に対して数値計算を実施した。すべての流れ条件に対して、二群気泡界面積濃度輸送方程式と二群気泡ボイド率輸送方程式から二群界面積濃度  $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$  及び二群気泡上昇速度  $\langle v_{g1} \rangle$  と  $\langle v_{g2} \rangle$  を算出した。二群界面積濃度輸送方程式で予測した二群気泡界面積濃度  $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$  と実測値との比較は図4に示す。比較結果は良好で、一群気泡と二群気泡に対する相対誤差はそれぞれ  $\pm 22.1\%$  と  $\pm 33.4\%$  である。これらの結果から、Sun et al. (2004) が提案した二群気泡界面積濃度輸送方程式と関連する構成モデルが本研究で取得した広範囲の実験データを精度良く予測できることが分かった。これより、この二群気泡界面積濃度輸送方程式の今後の試験研究炉の安全解析・評価コードへの導入が可能であることが確認できる。

#### <引用文献>

- 1) Zuber, N., Findlay, J.A., 1965. Average volumetric concentration in two-phase flow systems, Journal of Heat Transfer, 87(4), 453-468.
- 2) Sun, X., Kim, S., Ishii, M., Beus, S.G., 2004. Modeling of bubble coalescence and disintegration in confined upward two-phase flow. Nuclear Engineering and Design, 230 (1-3), 3-26.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shen Xiuzhong, Yamamoto Toshihiro, Nakajima Ken, Hibiki Takashi	4. 巻 202
2. 論文標題 A full-flow-range drift-flux model for adiabatic and boiling two-phase flows in vertical narrow rectangular flow channels	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Thermal Sciences	6. 最初と最後の頁 109086 ~ 109086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chalgeri Vikrant Siddharudh, Shen Xiuzhong, Yamamoto Toshihiro	4. 巻 201
2. 論文標題 Evaluation of existing correlations and development of a new correlation for single-phase friction factor in rod bundle assembly	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 110456 ~ 110456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.anucene.2024.110456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sun Haomin, Kunugi Tomoaki, Yokomine Takehiko, Shen Xiuzhong, Hibiki Takashi	4. 巻 154
2. 論文標題 Experimental investigation on local flow structures of upward cap-bubbly flows in a vertical large-size square channel	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Experimental Thermal and Fluid Science	6. 最初と最後の頁 111171 ~ 111171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.expthermflusci.2024.111171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sun Haomin, Kunugi Tomoaki, Yokomine Takehiko, Shen Xiuzhong, Hibiki Takashi	4. 巻 211
2. 論文標題 Multi-dimensional characteristics of upward bubbly flows in a vertical large-size square channel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 124214 ~ 124214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Toshihiro, Shen Xiuzhong, Sakamoto Hiroki	4. 巻 175
2. 論文標題 Dynamic mode decomposition application to dominance ratio assessment in Monte Carlo k-eigenvalue calculation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 109205 ~ 109205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.anucene.2022.109205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shen Xiuzhong, Yamamoto Toshihiro, Han Xu, Hibiki Takashi	4. 巻 5
2. 論文標題 Interfacial area concentration in gas-liquid metal two-phase flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental and Computational Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 84 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42757-021-0110-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shen Xiuzhong, Hibiki Takashi	4. 巻 191
2. 論文標題 Two-phase interfacial structure development in vertical narrow rectangular channels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122832 ~ 122832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hibiki Takashi, Ju Peng, Rassame Somboon, Miwa Shuichiro, Shen Xiuzhong, Ozaki Tetsuhiro	4. 巻 185
2. 論文標題 Channel size effect on drift-flux parameters for adiabatic and boiling two-phase flows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122410 ~ 122410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hibiki Takashi, Katono Kenichi, Shen Xiuzhong	4. 巻 384
2. 論文標題 Thermal-hydraulic characteristics of upward two-phase flows in vertical large size square channels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111490 ~ 111490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2021.111490	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Han Xu, Shen Xiuzhong, Yamamoto Toshihiro, Nakajima Ken, Sun Haomin, Hibiki Takashi	4. 巻 178
2. 論文標題 Flow regime and void fraction predictions in vertical rod bundle flow channels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 121637 ~ 121637
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Toshihiro, Shen Xiuzhong, Sakamoto Hiroki	4. 巻 138
2. 論文標題 Advances in time-dependent Monte Carlo simulations for void velocity determination using neutron noise techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 103840 ~ 103840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnucene.2021.103840	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Chalgeri Vikrant Siddharudh, Shen Xiuzhong, Yamamoto Toshihiro
2. 発表標題 Experimental study on local interfacial parameters in gas-liquid two-phase flow within a plate-type fuel element
3. 学会等名 58回京都大学複合原子力科学研究所学術講演会, 論文番号: P21
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Zuo Jiayu, Shen Xiuzhong, Chalgeri Vikrant Siddharudh, Yamamoto Toshihiro
2. 発表標題 Void fraction and interfacial area concentration of two-phase flow in a rod bundle fuel assembly
3. 学会等名 第58回京都大学複合原子力科学研究所学術講演会, 論文番号: P22
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 沈秀中、山本俊弘、中島健、日引俊詞
2. 発表標題 板状燃料要素内気液二相流ポイド率の予測研究
3. 学会等名 第57回京都大学複合原子力科学研究所学術講演会, 論文番号: A-7
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kinoshita Ikuo, Hibiki Takashi, Shen Xiuzhong
2. 発表標題 Assessment of INSS drift-flux correlation for rod bundle at low-flow and low-pressure conditions
3. 学会等名 Proceedings of the 11th International Conference on Multiphase Flow (ICMF) 2023 at Kobe, Japan, Paper No.: ICMF2023-248 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沈秀中、山本俊弘、日引俊詞
2. 発表標題 MTR型燃料要素の冷却流路内気液二相流界面積濃度に関する研究
3. 学会等名 第56回京都大学複合原子力科学研究所学術講演会, 論文番号: D-7
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap 沈秀中ホームページ  
<https://researchmap.jp/read0096718>  
Google Scholar 沈秀中ホームページ  
<https://scholar.google.co.jp/citations?user=hTS4TYUAAAAJ&hl=ja>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------