

平成 21 年 5 月 23 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206021
 研究課題名（和文） ロッドバンドル内スペーサ近傍気泡流動の
 マルチスケール実験・計算融合評価技術の開発
 研究課題名（英文） Development of Hybrid Evaluation method for Multi-Scale Bubbly
 Flow in a Rod Bundle
 研究代表者
 富山 明男（TOMIYAMA AKIO）
 神戸大学大学院・工学研究科・教授
 研究者番号：30211402

研究成果の概要：

沸騰水型原子炉燃料集合体設計における実規模試験依存度低減に資する流動評価手法として、(a)ロッドバンドル及びロッド支持体（スペーサ）構造を適正に考慮し、かつ目的に応じた適正な空間分解能で気泡流動を評価できるハイブリッド計算技術、及び(b)ロッド間隙部形状及びスペーサ構造が気泡挙動と液相速度場に及ぼす影響を正確に測定し、ハイブリッド計算遂行に必要な実験相関式を構築するための複雑流路内気泡・液相流動実験技術を開発するとともに、(c)この2種の技術を融合統合化したロッドバンドル内スペーサ近傍気泡流動評価技術を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	21,900,000	6,570,000	28,470,000
2007年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	38,300,000	11,490,000	49,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流、原子力エネルギー、シミュレーション工学、流体工学、ロッドバンドル、スペーサ、気泡

1. 研究開始当初の背景

日本の原子力発電設備容量の約 40%を占める加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の燃料集合体熱水力設計開発環境は極めて危機的な状況に直面している。燃料集合体設計では燃料棒の熱的健全性を保障するため、燃料設計変更の度に実規模沸騰遷移(DNB: Departure from Nucleate Boiling)試験が多くのコストと時間をかけて実施されてきた。ところが、国内外の主要な DNB 試験装置(国内：原子力発電技術機構の最大熱負荷試験装置、米国：コロンビア大学の DNB 試験設備など)が近年次々と廃棄され、実規模

試験のみに依存した燃料設計を持続不可能な状態となっている。この極めて危機的な状況を打開するために、実規模試験への依存度を著しく低減させた燃料集合体熱水力設計手法の開発が喫緊の課題となっている。

DNB は加熱面が多数の小気泡によって覆われ、加熱面から液相への熱伝達が極端に低下し加熱面の健全性が損なわれる現象である。燃料集合体において DNB が生起するのは燃料棒を支持するスペーサの直下であること、スペーサ上部のミキシングペーンの設計変更により DNB 特性が著しく変化することなどが実規模試験により明らかとなって

いるが、これらの物理的機構は全く把握されていない。また、スぺーサ近傍を流動する多数の気泡の運動を数値的に正しく予測する技術も確立していなかった。これらが、DNBに多大な影響を及ぼすスぺーサ形状や燃料棒直径の決定に数多くの実規模試験が不可欠となっていた原因といえる。

2. 研究の目的

本研究では、沸騰水型原子炉燃料集合体設計における実規模試験依存度低減に資する流動評価手法として、(a)ロッドバンドル及びロッド支持体（スぺーサ）構造を適正に考慮し、かつ目的に応じた適正な空間分解能で気泡流動を評価できるハイブリッド計算技術、及び(b)ロッド間隙部形状及びロッド支持体構造が気泡挙動と液相速度場に及ぼす影響を正確に測定し、ハイブリッド計算遂行に必要な実験関連式を構築するための複雑流路内気泡・液相流動実験技術を開発する。さらに、(c)この2種の技術を融合統合化したロッドバンドル内スぺーサ近傍気泡流動評価技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1)ロッドバンドル体系用ハイブリッド計算技術の構築

ハイブリッド気泡流計算技術は、(a)実験関連式を用いずに気泡運動を詳細計算できる界面追跡法(ITM: Interface Tracking Method)、(b)多数の気泡をラグランジュ的に追跡する気泡追跡法(BTM: Bubble Tracking Method)、(c)気泡流を N 種の気泡相と液相からなる多流体として扱う多流体モデル(MFM: Multi Fluid Model)の3種の計算技術をハイブリッド統合する技術であり(図1参照)、本研究では既存のハイブリッド計算技術をサポート格子を含むロッドバンドル体系に拡張するため、(a)ロッドバンドル体系における乱流モデルの検討と組み込み、(b)ロッドバンドル体系における気液間相互作用力(抗力・揚力・仮想質量力)の検討・モデル化と BTM, MFM への組み込みを実施した。

(2)複雑流路内気泡・液相流動実験技術の構築

本研究では、①ロッドバンドル流路内可視化実験装置構築と②ロッドバンドル内気泡・液相流動計測技術を構築した。①の実現に当たっては、フッ化エチレンプロピレン樹脂製ロッドの導入により、従来困難であったサブチャンネル内流動の3次元計測を可能とした。②に関しては、申請者らが開発した①気泡画像処理法および②粒子画像計測法(PIV)を組み合わせた気泡・液相流動計測システムを構築した。また、高速流中において時系列データを取得できるよう改良を施した。

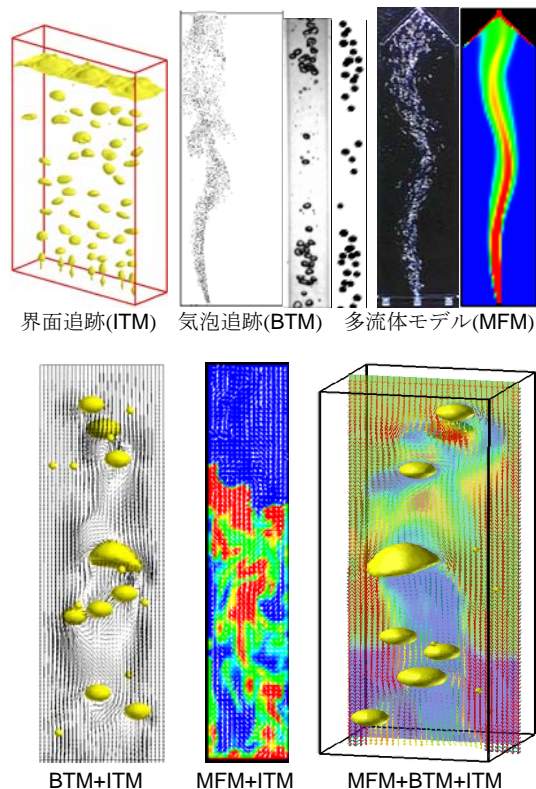


図1 ハイブリッド気泡流計算技術

(3)ロッドバンドル内スぺーサ近傍気泡流動評価技術

高度気泡流計算技術・実験技術を組み合わせたロッドバンドル内スぺーサ近傍気泡挙動評価技術は、燃料設計において重要となるロッドサイズ・ロッドピッチ・スぺーサ構造の良否を判断するための技術、すなわち原子炉熱水力設計の実務にも応用可能な技術である。与えられたロッドバンドル及びスぺーサのデザインを対象として、複雑流路内気泡・液相流動実験技術を用いてバンドル体系でスぺーサ近傍の気泡・液相流動場を評価し、ハイブリッド気泡流計算技術に必要なモデル定数を決定する。次に、ハイブリッド計算により、高圧条件ロッドバンドル内スぺーサ近傍の蒸気泡・液相流動計算を実施し、スぺーサデザインの良否を判断できるデータを設計者に提供することを可能とした。

4. 研究成果

(1)ロッドバンドル体系用ハイブリッド計算技術の構築

乱流場を計算できるように改良した3次元 two-way 気泡追跡法を用いて障害物を含む矩形ダクト内の障害物直上流側における小気泡運動の数値計算を実施し、液相速度分布および気泡軌跡の計算結果を実験データと比較した。また、揚力などの気泡に作用する力が気泡運動に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ①3次元 two-way 気泡追跡法に k-ε乱流モデルモデルを組み込むことにより、スペーサを含むロッドバンドル内乱流速度分布を精度良く計算できる。
- ②3次元 two-way 気泡追跡法は、ロッドバンドル内高速流中におけるスペーサ近傍の小気泡の運動を良好に予測できる。(図2参照)
- ③本体系では、気泡に働く揚力が気泡運動に及ぼす影響は小さい。(図3参照)
- ④3次元 two-way 気泡追跡法は、PWR 燃料集合体内 DNB 予測の基盤計算手法として利用できる。

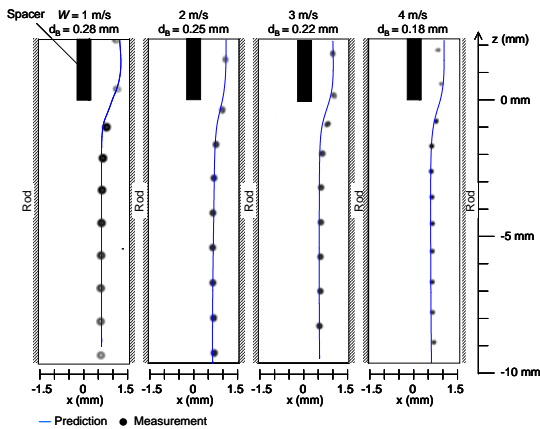


図2 ロッドバンドル内スペーサ近傍の高速流中気泡運動計算結果と実験結果の比較

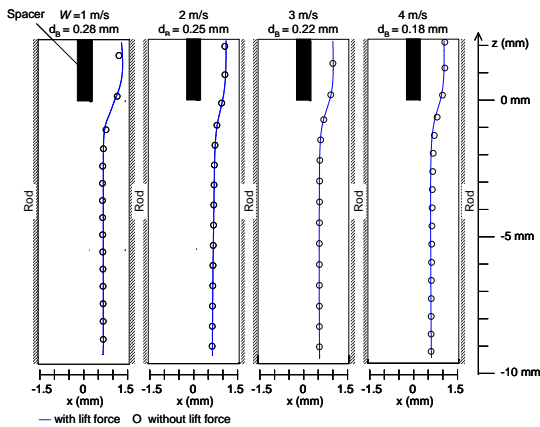


図3 揚力の有無による気泡運動の差異

(2)複雑流路内気泡・液相流動実験技術の構築
 2x3 ロッドバンドル体系におけるスペーサ直上流での小気泡運動と液相速度分布を実験的に調べられる実験・計測装置を開発した。フッ化エチレンプロピレン樹脂製ロッドを試験部に導入した実験装置を作成し、ロッドバンドル内における気泡径、ボイド率、気泡

速度、液相速度の光学的計測を可能とした。気泡流中における気泡径、気泡速度、ボイド率を測定できる画像処理法を開発した。液相速度分布はPIVをロッドバンドル体系に最適化した。その結果、以下の結論を得た。

- ⑤Sobel フィルターと法線ハフ変換を用いた画像処理法を開発した。本手法によりロッドバンドル体系における気泡流中の気泡径分布、気泡速度分布、ボイド率分布を計測できる。(図4参照)
- ⑥PIVにより精度良く乱れ強度を測定するために、相関処理に用いる2時刻の画像間の時間間隔を最適化した。本最適化によりPIVでもLDVと同程度の精度で液相平均速度と乱れ強度を測定可能とした。
- ⑦ロッドバンドル体系においても気泡はスペーサ直上流でロッド壁面側へ横方向移動し、ロッド壁面付近に密集する。
- ⑧気泡のロッド壁面への横方向移動量は、液相流線の横方向移動量に比べ大きい。(図5参照)
- ⑨PIVの最適化により、ロッドバンドル内乱流渦の高速時系列計測を実現した。(図6参照)

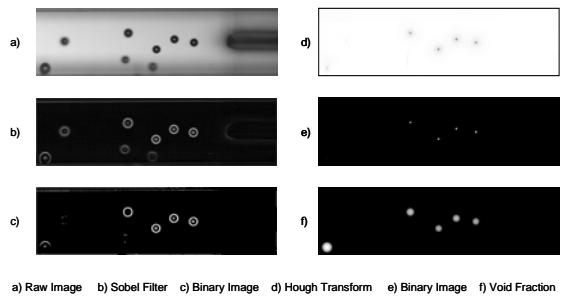


図4 Sobel フィルターと法線ハフ変換を用いた画像処理法による処理過程

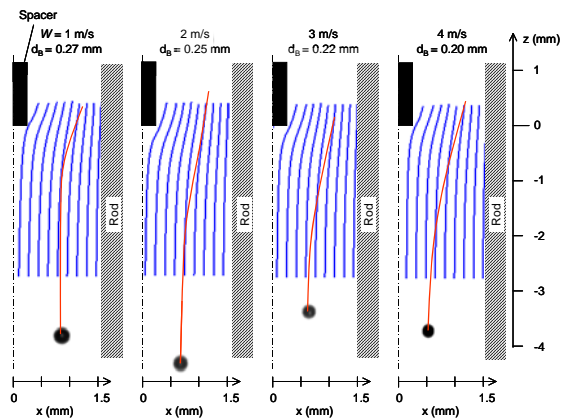


図5 スペーサ上流における流線(青線)と気泡軌跡(赤線)の比較

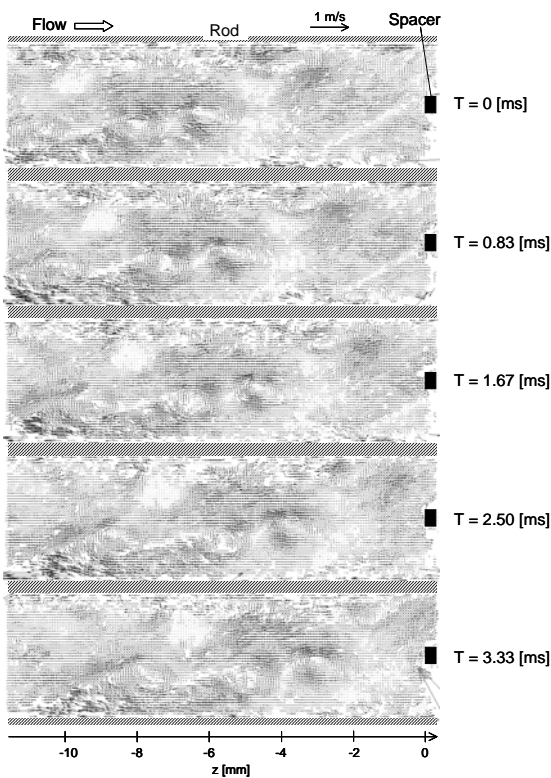


図6 スペーサ上流における乱流渦の時系列計測例（流動方向は左から右）

(3) ロッドバンドル内スペーサ近傍気泡流動評価技術

上記で開発した気泡流計算技術と実験技術を組み合わせ、ロッドバンドル内スペーサ近傍気泡挙動評価技術を構築した。本手法をロッド径 9.5mm, ロッドピッチ 12.6 mm の 2x3 ロッドバンドル体系にグリッドスペーサを設置した体系に適用した。具体的には、スペーサ近傍の気泡・液相流動場を実験的に測定し、ハイブリッド気泡流計算技術に必要なモデル定数を決定する。次に、ハイブリッド計算により、高圧条件ロッドバンドル内スペーサ近傍の蒸気泡・液相流動計算を実施し、スペーサデザインの良否を判断できるデータ取得した。その結果、以下の知見を得た。

- ⑩ 気泡がスペーサと対向するロッド壁面へ移動する原因は揚力ではなく、スペーサ前縁部の生じる高圧領域に起因する圧力勾配力である。（図7参照）
- ⑪ ロッドバンドル体系においても気泡はスペーサ直上流でロッド壁面側へ横方向移動し、ロッド壁面付近に密集する。（図8、9参照）
- ⑫ PWR 定格運転時の圧力条件における蒸気泡も常圧下の空気泡と同様にスペーサ上流部でロッド壁面近傍へと移動し、ロッド壁面付近に気泡が密集する。このようなロッド壁面近傍への気泡密集は、スペーサ上

流において DNB が発生しやすいことを示唆している。

- ⑬ したがって、ロッド壁面近傍への気泡密集を緩和し、DNB 発生を抑止するためには、スペーサ前縁で高圧領域が生じないようなスペーサ寸法形状の採用が有効である。
- ⑭ 以上より、本手法はロッドバンドル設計において重要となるロッドサイズ・ロッドピッチ・スペーサ構造の良否を判断するための技術、すなわち原子炉熱水力設計の実務に利用可能な基盤技術といえる。

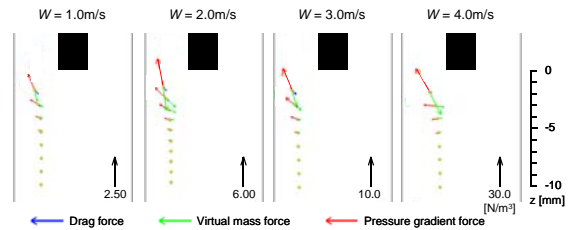


図7 スペーサ近傍で気泡に働く力

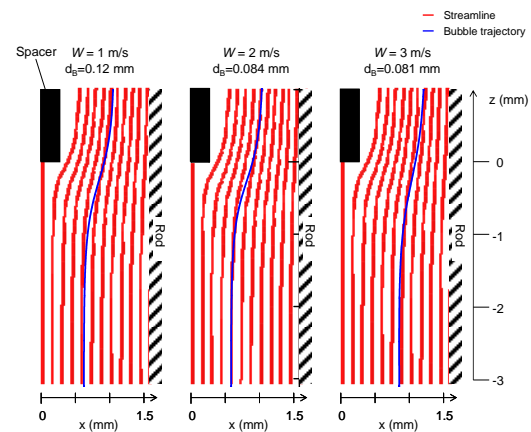


図8 PWR 定格条件における流線（青線）と気泡軌跡（赤線）の比較

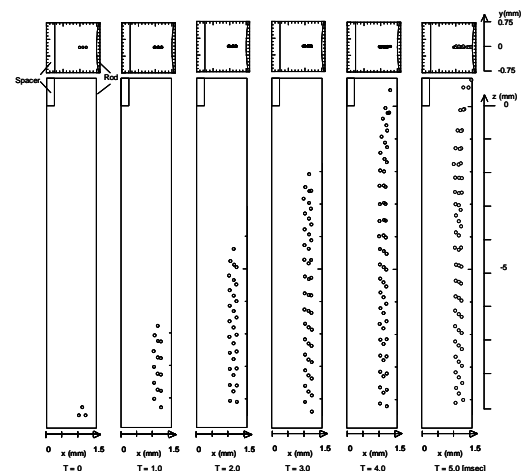


図9 PWR 定格条件における気泡流計算例

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ①前川宗則, 宋 明良, 細川茂雄, 富山明男, 高気相体積流束の気泡塔流れに及ぼす流入記泡径の影響, 日本機械学会論文集 B 編, 74 巻, 742 号, pp.1368-1375 (2008), 査読有.
- ② Zhang Zheng, Kana, Suzuki, Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, Motion of Single Bubbles near a Grid Spacer in a Two by Three Rod Bundle, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 172-182 (2008), 査読有.
- ③ Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, A Three-Dimensional PIV using Intensity Gradients of a Two-Color Laser Beam, Multiphase Science and Technology, Vol. 19, Issue 3, pp. 269-285 (2007), 査読有.
- ④ Win Myint, Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, Shapes of Single Drops Rising Through Stagnant Liquids, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 184-195 (2007), 査読有.
- ⑤小川耕平, Win Myint, 細川茂雄, 富山明男, 一樣せん断流中単一液滴に作用する揚力に関する研究, 混相流研究の進展, Vol. II, pp. 55-62. (2007), 査読有.
- ⑥張 政, 細川茂雄, 片岡宏庸, 牧野泰, 富山明男, 障害物を含む鉛直ダクト内高速流中における小気泡の運動, 日本機械学会論文集 B 編, 73 巻, 725 号, pp.162-168 (2007), 査読有.
- ⑦ Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, Effects of Bubble Wake on Coalescence Between Planar Bubbles, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 94-104 (2006), 査読有.
- ⑧ Win Myint, Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, Terminal Velocities of Single Drops in Stagnant Liquids, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 72-81 (2006), 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- ①Zhang Zheng, Kana Suzuki, Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, Motion of Small Bubbles Near a Grid Spacer in a Two by Three Rod Bundle, Proc. 16th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-16), CD-ROM, May 11-15, 2008, Orland, FL, USA 査読有.
- ② Win Myint, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Motion of Single Drops in Linear Shear Flows, Proc. 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, CD-ROM, Jul.

30-Aug. 2, 2007, San Diego, CA, USA, 査読有.

- ③Shigeo Hosokawa, Akira Sou, Akio Tomiyama, Multi-Fluid Simulation of Turbulent Bubbly Pipe Flows, Proc. 6th International Conference on Multiphase Flow 2007, Leipzig, Germany, Paper No. S6_Wed_C_40, July 9-17, 2007, 査読有.
- ④Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, A Three-Dimensional PIV using Intensity Gradients of a Two-Color Laser Beam, Proc. 5th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Vol. 1, pp. 518 – 525, Dec. 10-13, 2006, Macao, China, 査読有.
- ⑤Zhang Zheng, Kana Suzuki, Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, Motion of Small Bubbles Near an Obstacle Placed in a Square Duct, Proc. 5th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Vol. 1, pp. 45 – 50, Dec. 10-13, 2006, Macao, China, 査読有.
- ⑥Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama, A Three-Dimensional PIV using Intensity Gradients of a Two-Color Laser Beam, Proc. 4th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, CD-ROM, pp. 1-7, Sep. 24-28, 2006, Kyoto, 査読有.
- ⑦ Kosuke Hayashi and Akio Tomiyama, Interface Tracking Simulation of Bubbles and Drops in Complex Geometries, Proc. 4th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, CD-ROM, pp. 1-7, Sep. 24-28, 2006, Kyoto, 査読有.
- ⑧ Akiyoshi Maeda, Akira Sou and Akio Tomiyama, A Hybrid Method for Simulating Flows including Fluid Particles, Proc. ASME Fluid Engineering Summer Meeting, FEDSM2006-98156, CD-ROM, pp. 1-6, 査読有. July 17-20, 2006, Miami, FL, USA
- ⑨Akio Tomiyama, Effects of Inlet Bubble Size on Poly-Dispersed Bubbly Flow in a Bubble Column, Proc. 44th European Two-Phase Flow Group Meeting, CD-ROM, pp.1 - 8, 査読有. June 7-9, 2006 in Lausanne, Switzerland

6. 研究組織

(1)研究代表者

富山 明男 (TOMIYAMA AKIO)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 3 0 2 1 1 4 0 2

(2)研究分担者

細川 茂雄 (HOSOKAWA SHIGEO)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 1 0 2 5 2 7 9 3

宋 明良 (SOU AKIRA)
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授
研究者番号：20314502

(3)連携研究者
なし