

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560774

研究課題名（和文） 気液二相流の気泡集積流動現象に関する研究

研究課題名（英文） A study on the bubble accumulation and coalescence phenomena in liquid and gas two-phase flow

研究代表者

沈 秀中 (SHEN XIUZHONG)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：20362410

研究成果の概要（和文）：

本研究では気泡集積流動現象発生時の気液二相流に対して多センサー・プローブとホットフィルムプローブを用いた局所計測を行い、その流れのボイド率、界面積濃度、気泡径、気相速度、液相速度及び乱流強度のデータベースを構築した。実験結果から流路内大気泡の形成と発達はその現象の原因と判明した。また、気泡流からスラグ流までの遷移に対応するドリフトフラックスモデルとそのモデルに基づいた界面抗力モデルを新たに提案した。それらのモデルを取り込んだ二流体モデル数値解析により、気泡集積流動現象の予測ができることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, local measurements for the bubble accumulation and coalescence phenomena in a liquid-gas two-phase flow in a large diameter pipe were performed on flow parameters, such as void fraction, interfacial area concentration, bubble size, gas velocity, liquid velocity and turbulence intensity by using the local sensor techniques such as optical multi-sensor probes and hot-film probes and a database for the local flow parameters has been established. The experiment results show that the phenomenon can be attributed to the formation and development of large bubbles of pipe size. Based on the database, a drift flux model was newly developed for the flow evolving from bubbly to slug flows. The bubble accumulation and coalescence phenomena were numerically analyzed by using the one-dimensional two-fluid model with its interfacial drag model modified by including the present newly developed drift flux model. The numerical calculation predicted well the bubble accumulation and coalescence phenomena observed in the present experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：熱流動・構造、気液二相流の流動現象

1. 研究開始当初の背景

混相流においては各相が時間的空間的に一様に流れることはむしろ少なく、各相で分

布をもつことが一般的である。近年、新型原子炉の受動的安全系の作動に伴う瞬時的熱流動現象を把握するために、気液二相流の気

相分布と流動特性の研究が注目されている。研究代表者らは自分開発した多次元気液二相流の界面面積濃度、ボイドなどの流れ方向の特性変化を計測できる多センサー・プローブ方法を用いて、大気圧用大口径垂直管試験装置（直径 200mm、垂直高さ 26m）において気液二相流実験を行い、特別な気液二相流の流れ方向の流動特性変化現象を観察した。低ボイド率の流動範囲では、流れ方向に沿って、ボイド率と差圧の変化が安定するが、ボイド率が大きくなると、気液二相流の上流部分では単位距離の差圧が著しく低減され、ボイド率も急増し、大小気泡と液相により構成する高ボイド率の気泡集積区域を生じることを見出した。これは気液二相流の気泡集積流動現象だと考えられる。この現象の特徴は流れによる気泡集積区域を生じることで、ボイド率が急上昇し、差圧が著しく低減することである。

気液二相流により生じた気泡の集積流動現象は軽水型動力炉をはじめとして蓄熱・冷凍・冷蔵システム、電子回路冷却システムや化学工業分野における気泡反応塔など、多種多様な工業装置の機器・システムの運転特性や効率、経済性・安全性に深く関わっている。例えば、軽水型動力炉においては、事故時の炉心出力変化と炉心冷却の支配的要因となり、沸騰型軽水炉（BWR）においては事故時のみならず通常運転時においても BWR 不安定のように炉心特性に大きな影響を及ぼす原因となっている。また、新型炉においては、受動的安全系の作動に伴う熱流動現象の把握が設計性能を決める重要課題となっている。ランキンサイクルを利用する他の原子力・火力発電システムにおいても、気液二相流の気泡集積流動現象は、蒸気発生器やボイラー、蒸気タービンなどの作動特性とエネルギー効率に関与する重要な因子となっている。

過去研究代表者らが行った気液二相流の気相分布研究は、流路内において流れの垂直断面内に形成した気相分布（中央ピークと壁ピーク分布など）に関する研究であるが、気泡集積流動現象を持つ気液二相流の三次元気相分布の詳細な研究は気液二相流の局所計測（局所界面速度、気泡径及び界面面積濃度など）の困難さからまだ行っていない状況である。

2. 研究の目的

本研究は3年計画で、原子炉の運転特性、事故特性、効率、経済性・安全性に深く関わっている気液二相流の気泡集積流動現象を多センサー・プローブとホットフィルムプローブを用いた局所計測によって系統的に調べ、気液二相流の三次元瞬時局所界面速度、瞬時気泡直径、時間平均ボイド率、時間平均

界面面積濃度及び液相速度のデータベースを構築することにより、この気泡集積流動現象の発生原因を根本的に解明し、界面輸送特性のモデル化を行い、また、気液二相流の気泡集積流動現象の予測モデルの構築に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は3年計画で大小様々な流路形状の気液二相流において(1) 光学式多センサー・プローブを用いて気液界面（即ち気相）の局所計測、(2) ホットフィルムプローブを用いて液相流速の局所計測を実施し、データベースを構築した。光学式多センサープローブは気液二相流の界面面積濃度、界面速度、気泡サイズ、ボイド率と気泡頻度を測定し、ホットフィルムプローブは気液二相流の液相速度と液相乱流強度を測定した。本研究の実験は(1)垂直普通管（内径 50mm×高さ 3m）内実験、(2)垂直大口径管（φ200mm×24m）内実験、(3)矩形流路（断面 100mm×100mm×高さ 3m）内の実験及び障害物を挿入した 100×100mm 矩形流路内の実験で構成した。100×100mm 矩形流路は BWR の燃料集合体のチャンネルボックスを、内挿した障害物はウオーターロッドと燃料棒を模擬している。このように大小様々な垂直流路内の低液相流速の気液二相流において、局所界面特性と局所液相特性の測定を行うことにより気液二相流の気泡集積流動現象の特性を把握すること、データベースを構築すること、その現象の形成機構を明らかにすること、その現象発生時の界面輸送特性をモデリングすること及びこの現象の予測モデルを構築することを行った。

4. 研究成果

(1) 多センサー・プローブとホットフィルムプローブを用いて気泡の集積流動現象が発生する垂直大口径管内と垂直矩形流路内の上昇気液二相流における相分布、界面面積濃度分布、気泡サイズ分布、気相流速分布、液相流速分布及び乱流強度分布を計測し、それらの局所パラメーターのデータベースを構築した。

(2) これらのデータベースから、以下のような流動特性結論を得た。

- ① 流れ方向に沿って、ボイド率分布は壁ピークからコアピークの形に変化し、流速分布は平坦な分布からコアピークの形に変化する。
- ② ボイド率の増加に伴って、ボイド率分布は壁ピークからコアピークの形に変化し、流速分布のコアピークは次第に高くなる。
- ③ 乱流強度はボイド率の増加、流れ方向及び半径方向に伴って増している。
- ④ 気泡の集積流動現象は気液二相流の流れと気泡合併により長い流動時間と流れ方向

の広い流動範囲にわたって発生した大気泡の形成と発達現象である。この大気泡が形成と発達している気泡集積流動区域では相間相対流速の増大によって流路断面平均ボイド率が減少するため、流れ方向全体の流路断面平均ボイド率が「増加→減少→再増加」のN字型に変化することとなった。

(3) 本研究の実験結果を既存の気泡流乱流モデルの予測値と比較し、既存の乱流モデルを大口径管内気液二相流の剪断応力分布ならびに液相流速分布の予測に適用する時の課題を明らかにした。

(4) 本研究で取得した気液二相流の流路半径方向の相分布、液相流速分布及び気相流速分布の実験データを使用して、ドリフトフラックスモデルの分布パラメータとドリフト速度の定義からそれらの両パラメータの測定に成功し、更にその両パラメータのデータベースを確立した。

(5) 気泡の集積流動現象が発生する時の気液二相流の実験データを利用して、既存の大口径管内のドリフトフラックスモデルの妥当性を比較・検討し、それらモデルの問題点を指摘した。気泡の集積流動現象を予測するために、大きな気泡の運動特性を把握できる新たなドリフトフラックスモデルを提案した。このモデルは気泡流からスラグ流までの遷移変化に対応できる。

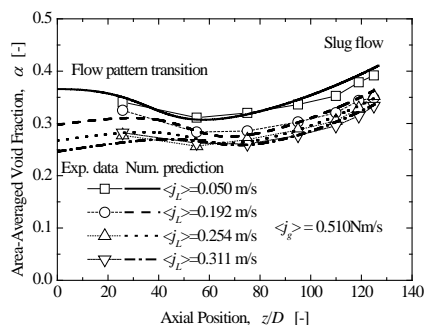


図1 ボイド率の実測値と予測値の比較

(6) 新しいドリフトフラックスモデルに基づいて、気泡流からスラグ流までの変化に対応できる界面抗力モデルを提案した。それらのモデルを取り込んだ二流体モデルの数値解析によって、図1のように複雑な気泡集積流動現象を予測できた。

(7) 大気泡の形成と発達で生じた気泡の集積流動現象が発生する際に、界面面積濃度が大幅に減少することで界面輸送特性が悪化している。エネルギー輸送利用として、この流域を避けることが望ましい。

(8) 広い断面積の流路に対して、障害物の挿入又は流路の区分の方法は大気泡の形成とそれに関連する気泡集積流動現象の発生を阻止することに有効である。

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6件)

- ① 沈秀中、三島嘉一郎、中村秀夫、大口径管内気液二相流の界面抗力モデルと数値解析、混相流、査読有、Vol. 24, No. 5, 2011, pp. 595-602
- ② Shen, Xiuzhong, Matsui, Ryota, Mishima, Kaichiro and Nakamura, Hideo, Distribution parameter and drift velocity for two-phase flow in a large diameter pipe, Nuclear Engineering and Design, 査読有, Vol. 240, No. 12, 2010, pp 3991-4000
- ③ 沈秀中、三島嘉一郎、中村秀夫、熱線流速計による垂直大口径管内の気液二相流の計測、混相流、査読有、Vol. 23, No. 5, 2010, pp. 605-613
- ④ Saito, Yasushi, Shen, Xiuzhong, Mishima, Kaichiro, Matsubayashi, Masahito; Shape measurement of bubble in a liquid metal, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 査読有, Vol. 605, No. 1-2, 2009, pp.192-196
- ⑤ Shen, Xiuzhong; Mishima, Kaichiro; Nakamura, Hideo; A method for measuring local instantaneous interfacial velocity vector in multi-dimensional two-phase flow, International Journal of Multiphase Flow, 査読有, Vol. 34, No. 5, 2008, pp 502-509
- ⑥ Shen, Xiuzhong; Mishima, Kaichiro; Nakamura, Hideo; Error reduction, evaluation and correction for the intrusive optical four-sensor probe measurement in multi-dimensional two-phase flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 51, No. 3-4, 2008, pp 882-895

[学会発表] (計8件)

- ① Shen, Xiuzhong, Axial Development of Gas-Liquid Flow Parameters in a Narrow Rectangular Channel, The 2010 American Nuclear Society Winter Meeting and Nuclear Technology Expo, November 7-11, 2010, Las Vegas, Nevada, US.
- ② Yoshiie, Toshimasa, Development of Beam Window Materials for Accelerator Driven System in the Kyoto University, Tenth Japan-China Symposium (JCS-10) on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, October 19-22, 2010, Uji, Kyoto, Japan.
- ③ 沈秀中、大口径管内気液二相流の界面抗

カモデルと数値解析、日本混相流学会年会講演会 2010、2010年7月17-19日、静岡県静岡大学

- ④ Shen, Xiuzhong, Flow-induced void fraction transition phenomenon in two-phase flow, the 18th International Conference on Nuclear Engineer, May 17-21, 2010, Xi'an, China
- ⑤ 沈秀中、熱線流速計による垂直大口径管内の気液二相流の計測、日本混相流学会年会講演会 2009、2009年8月7-9日、熊本県熊本大学
- ⑥ Shen, Xiuzhong, Distribution Parameter and Drift Velocity for Two-Phase Flow in a Large Diameter Pipe, Sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), November 24- 27, 2008, Okinawa, Japan
- ⑦ Matsui, Ryota, Experimental Study of Two Phase Flow in a Large Diameter Vertical Pipe Using Hot-Film Anemometer, Korea-Japan Student Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, November 22- 23, 2008, Okinawa, Japan
- ⑧ Shen, Xiuzhong, Shape measurement of bubble in a liquid metal, 6th International Topical Meeting on Neutron Radiography, Sep 14-18, 2008, Kobe, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/TH/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沈 秀中 (SHEN XIUZHONG)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：20362410

(2) 研究分担者

三島 嘉一郎 (MISHIMA KAICHIRO)

京都大学・原子炉実験所・名誉教授

研究者番号：60027472

(3) 研究分担者

齊藤 泰司 (SAITO YASUSHI)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：40283684