

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420870

研究課題名(和文) ロッドバンドル内低流速気液二相流の流動特性と界面積濃度輸送機構解明に関する研究

研究課題名(英文) Study on flow characteristics and interfacial area transport mechanism in low flow rate gas-liquid two-phase flows in a rod bundle flow channel

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、フォーセンサ・光学プローブ計測システムを開発・整備し、6×6ロッドバンドル内低流速多次元気液二相流における局所流動特性値の測定を行い、データベースを構築した。本研究と他の研究者の実験データにより既存ドリフトフラックスモデル相関式、界面積濃度相関式と界面積濃度輸送方程式の適用性評価を行い、ロッドバンドル内気液二相流に適用できる二群気泡界面積濃度相関式とチャンネルボックス内気液二相流に適用できる二群気泡界面積濃度相関式を新たに開発・検証した。更に、気液二相流の界面積濃度輸送方程式を一元化する際に導入した界面積濃度加重平均界面速度がボイド率加重平均気相速度により近似できるモデルを提案・検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a four-sensor optical probe system including its laser circuits was developed and verified for local measurements in multi-dimensional two-phase flows. Local measurements for void fraction, interfacial area concentration (IAC), bubble diameter and so on were performed in upward-flowing two-phase flows in a 6×6 rod bundle channel and the corresponding databases were obtained. Based on the present and the other researchers' databases, existing drift-flux distribution parameter and drift velocity correlations, existing IAC correlation and existing interfacial area transport equation (IATE) were evaluated. New IAC correlations applicable for bubbly, slug and churn flows were respectively developed for rod bundle channels and large-diameter channel-box channels. The constitutive equation for area-averaged interfacial velocity weighted by IAC was proposed by using area-averaged gas velocity weighted by void fraction in 1D IATE based on the obtained experimental data.

研究分野：工学

キーワード：燃料集合体内気液二相流 ボイド率 界面積濃度 ドリフトフラックスモデル 界面輸送モデル 気液二相流計測 データベース構築 国際研究者交流

## 1. 研究開始当初の背景

2011年福島第一原子力発電所で長時間交流電源喪失と冷却機器の損壊によってもたらされた炉心溶融を伴うシビアアクシデント事故が発生し、人々の生活環境激変と地元住民の避難が余儀なくされた。この事故以後、原子力が人々の生活に不可欠なエネルギーの一種類であり、その効率向上と安全確保研究の社会的意義が大きいと実感している。然し、その研究開発状況はまだ不十分である。この事故の発生は、設計と安全審査段階において、精度良く事故現象を模擬できる解析コードと要素モデル整備の重要性を改めて示している。

### (1) 最適評価コード用物理モデルの社会的意義と開発研究状況

近年、詳細物理モデルを用いた最適評価コードの開発が進められている。原子炉設計・許認可の根拠となる過度変化及び事故時の詳細な核熱水力特性の予測には、最適評価コードの不確かさを定量的に評価することが必要となる。この不確かさ評価のためには、コードに用いられている物理モデルの適切性とスケールアップ特性を検討することが不可欠である。一般に用いられているコードの物理モデルは、比較的小規模スケールで得られたデータを用いて開発されている。例えば、原子炉炉心のように流れを規定する特性長さがテイラー不安定による気泡の分裂限界径を越える場合には、流れの様相が一変し、多次元性や未発達性が顕著に現れるため、従来の通常口径管に基づいて開発された二相流モデルでは、原子炉システムの熱水力現象を精度良く再現できないことが明らかとなっている。

### (2) ロッドバンドル内気液二相流研究の社会的意義とその状況

本研究で対象とする炉心燃料集合体のロッドバンドル内気液二相流は、軽水炉の運転特性、過度変化、事故時の炉心除熱に密接に関連している。この気液二相流特性を予測可能なモデル開発とその検証は最適評価コードの開発に関連して最重要課題の一つとなっている。炉心内ポイド率予測に対する感度が大きい界面摩擦項は、現在、ドリフトフラックスモデルを用いて計算されている。既存の最適評価コードでは、ロッドバンドル用ドリフトフラックスモデルの分布定数とドリフト速度の相関式として、小口径管用の式、実験係数に依存する式、高圧条件下に対する式が用いられている状況である。さらに、将来的には抗力係数に基づく精緻な界面摩擦項予測手法の導入が必要と考えられているが、そのためには界面積濃度の正確な予測が必要であり、界面積濃度輸送方程式の導入が不可欠となる。このようなモデル開発と検証の必要性に関わらず、既存の模擬燃料集合体を利用したロッドバンドル内気液二相流の実験研究は、流動様式の観察及びポイド率と圧力損失の計測研究が中心である。米国原子

力規制局(USNRC)は、このような状況を受け、パデュー大学付属USNRC熱水力研究所を通じて、ロッドバンドル内二相流の局所計測と界面積濃度輸送方程式の開発研究を開始しているが、対象は高流速領域であり、原子炉のメンテナンス運転時や小口径破断冷却材喪失事故時に重要な低液相流速条件下での研究は、未だ端緒についていない状況である。

## 2. 研究の目的

本研究は、軽水型原子炉の安全性と事故特性に関わるロッドバンドル内低流速領域の複雑な気液二相流の流動特性を局所計測によって系統的に調べ、気液二相流のポイド率、界面積濃度、気泡速度、及び気泡径など局所流動パラメータのデータベースを構築することにより、ロッドバンドル内低流速気液二相流の複雑相間相互作用と界面積濃度輸送機構を解明し、気液二相流流動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相関式、界面積濃度予測相関式と界面積濃度輸送方程式の適用性評価とそれらのモデル・相関式の改良を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、流れの発達過程が流動特性に及ぼす影響を検証可能なロッドバンドル内低流速の気液二相流の実験ループを京都大学に新たに設置し、実験的研究と解析的研究を行う。研究期間は、3年とする。本研究ではロッドバンドル内低流速気液二相流において、(1)改良型多次元気液二相流用フォーセンサ・プローブ法を用いて、気泡を球状小気泡群(一群気泡)とキャップ状大気泡群(二群気泡)に分類し、それぞれの群のポイド率、界面積濃度、気泡速度、気泡径の流れ方向局所計測と(2)差圧計による断面平均ポイド率計測を実施し、データベースを構築するとともに気液二相流の相間相互作用と界面積濃度輸送機構を明らかにし、低流速気液二相流のドリフトフラックスモデル相関式、界面積濃度予測相関式と界面積濃度輸送方程式の適用性の評価または改良を行った。

## 4. 研究成果

(1) ロッドバンドル内低流速気液二相流挙動は軽水炉事故時の炉心冷却性能の維持にとっても重要である。その挙動の把握と予測のため、本研究では、ロッドバンドルの構成部品と気液二相流の発達過程が流動特性に及ぼす影響を検証可能なロッドバンドル内気液二相流の試験ループを京都大学に新たに設置した。その試験部は、直径10mm長さ3.8mのステンレスロッドをピッチ16.7mmにて正方格子状に配置した6×6ロッドバンドルと内部辺長10cmの正方形断面のチャンネルボックスから構成される。ロッドバンドル内気液二相流の流動特性を測定可能なフォーセンサ・プローブ法、高速度カメラを併用し

た画像処理計測法と差圧計測法の局所計測システムを開発・整備・検証した。更に、6×6 ロッドバンドルの試験部において、空気・水低流速気液二相流の計測実験を行い、局所圧力損失、ボイド率、気相速度、気泡サイズと界面積濃度など実験データを取得し、これらの流れの流動特徴と界面輸送機構を明らかにした。

(2) フォーセンサ・プローブは、気液二相の界面信号を確実に捕捉し、多次元気液二相流の局所計測に重要な役割を担っている。本研究は、このフォーセンサ・プローブの光学計測システムを新たに開発・整備・検証した。新しく開発した計測システムは4セットの光学ユニットとフォーセンサ・プローブ本体で構成する。この光学ユニット概略図は図1に示す。フォーセンサ・プローブ本体は4本の光ファイバを触針とするものであり、図2に示す。

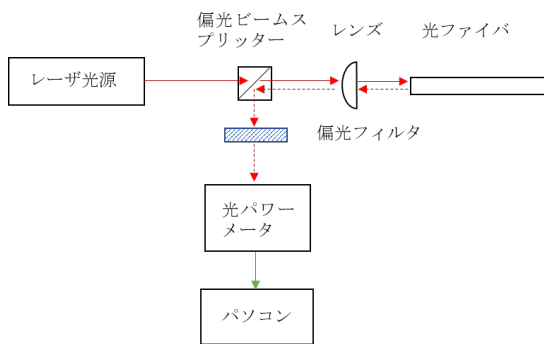


図1 光学ユニット概略図

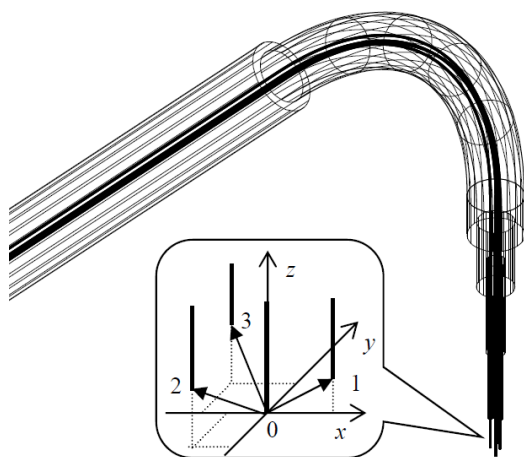


図2 フォーセンサ・プローブ本体

(3) ロッドバンドル内気液二相流のボイド率変動は軽水炉炉心の反応度変化と出力変化と深く関係しているため、その予測と予測精度の向上は、ロッドバンドル内気液二相流研究の重要な課題である。現在ボイド率予測には、二相の相分布と相間相対運動を考慮したドリフトフラックスモデルが広く利用されている。本研究は、既存ロッドバンドル内気液二相流用ドリフトフラックスモデルの分布定数及びドリフト速度の相関式をレビ

ューし、それらの相関式の予測と本研究の試験部で取得した実験データとの比較を行い、次のことが分かった。低ボイド率において、既存のドリフトフラックスモデルの Ishii (1977) と Ozaki ら(2013) 相関式は、本実験のデータをよく予測できる。ボイド率が高くなるとそれらの相関式の予測誤差は次第に大きくなる。これらの相関式予測と実験データの比較の一例は図3に示す。

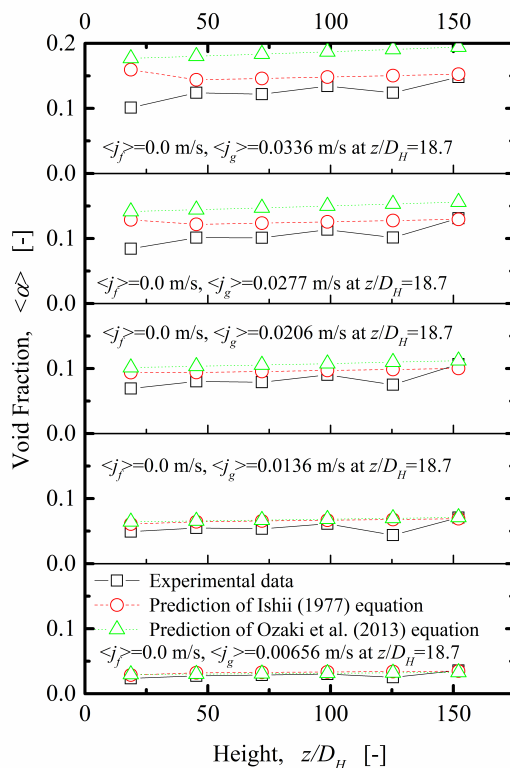


図3 ボイド率の測定値と予測値の比較(見掛け液相流速 $\langle j \rangle = 0.0 \text{ m/s}$ )

(4) ロッドバンドル内気液二相流用界面積濃度輸送モデルは、この気液二相流の二流体モデルの問題完結として、非常に重要な構成モデルである。既存の気液二相流の界面積濃度輸送モデルは大きく分けると2種類がある。一つは界面積濃度が直接に算出できる界面積濃度予測相関式で、もう一つは界面積濃度の連続変化を予測できる界面積濃度輸送方程式である。現在これらの二種類モデルが並存している。既存の界面積濃度予測相関式は低ボイド率の気泡流を対象としたもので、高ボイド率のスラグ流・チャーン流などへの適用が十分にできず、改善又は再開発が叫ばれている。本研究は、気泡の抵抗により気泡を大小の二群に分類し、フォーセンサ・プローブの実験データに基づき小気泡の一群と大気泡の二群のボイド率予測モデルを構築し、更に一群気泡の抵抗係数分析と二群気泡のサイズと形状解析によりそれぞれ気泡の界面積濃度変化の直接予測相関式を提案した。この新しく開発したロッドバンドル内気液二相流に適用できる二群気泡の界面積濃度予測相関式は次のように示す。

一群気泡と二群気泡のボイド率 ( $\langle \alpha_1 \rangle$  と  $\langle \alpha_2 \rangle$ ) 予測相関式：

$$\langle \alpha_1 \rangle = \langle \alpha \rangle - \langle \alpha_2 \rangle = \frac{\langle \alpha \rangle e^{-k(\langle \alpha \rangle - \langle \alpha_{mid} \rangle)}}{1 + e^{-k(\langle \alpha \rangle - \langle \alpha_{mid} \rangle)}} \quad (1)$$

$$\langle \alpha_2 \rangle = \frac{\langle \alpha \rangle}{1 + e^{-k(\langle \alpha \rangle - \langle \alpha_{mid} \rangle)}} \quad (2)$$

②一群気泡と二群気泡の界面積濃度 ( $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$ ) 予測相関式：

$$\langle a_{i1} \rangle = 4.83 \langle \alpha_1 \rangle D_H^{-0.285} \left[ \frac{(\rho_f - \rho_g)g}{\sigma} \right]^{0.3575} \left( \frac{\rho_f \langle j_f \rangle D_H}{\mu_f} \right)^{0.130} \left( \frac{\rho_g \langle j_g \rangle D_H}{\mu_g} \right)^{-0.0754} \quad (3)$$

$$\langle a_{i2} \rangle = 3.41 \langle \alpha_2 \rangle D_H^{0.533} \left[ \frac{(\rho_f - \rho_g)g}{\sigma} \right]^{0.600} \times \left( \frac{\rho_f \langle j_f \rangle D_H}{\mu_f} \right)^{-0.311} \left( \frac{\rho_g \langle j_g \rangle D_H}{\mu_g} \right)^{0.263} [0.0154 -$$

$$1.21 D_H + D_H \left( \frac{\langle j_g \rangle}{\langle j \rangle} \right)^{1.70} \left( \frac{\langle j_f \rangle}{\langle j \rangle} \right)^{-0.408} \times$$

$$\left( \frac{\langle j \rangle}{\sqrt{g D_H}} \right)^{0.582} \left( \frac{\rho_f D_H \langle j \rangle}{\mu_f} \right)^{0.149} \times$$

$$\left( \frac{\rho_f D_H \langle j \rangle^2}{\sigma} \right)^{-0.207} \left( \frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.291} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.831} \right]^{-0.333} \quad (4)$$

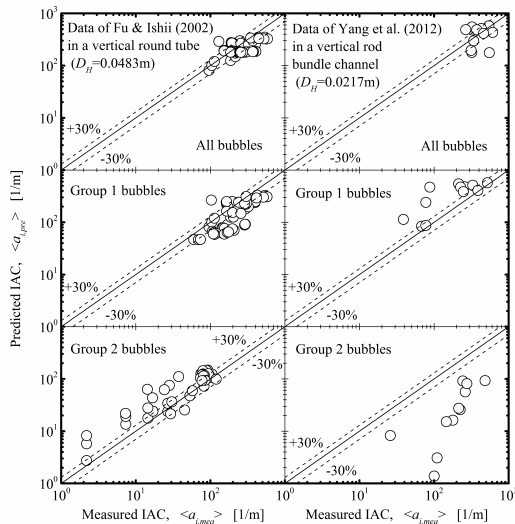


図4 新しく開発した界面積濃度相関式の予測と実験データとの比較

更に、フォーセンサ・プローブで取得した気

液二相流の実験データに基づいて、これらの界面積濃度予測相関式を検証し、この予測相関式の有効性を確認した。この相関式予測の検証の一部は図4に示す。

(5) ロッドバンドル内気液二相流に影響を与える重要な特性長さは、安定な最大気泡サイズを決定するチャンネルボックスサイズである(Chen ら, 2012)。この大口径管のチャンネルボックスはロッドバンドル内気液二相流の流動特性に大きな影響を及ぼす。この気液二相流に対し、本件研究は、フォーセンサ・プローブを用いて実験を行い、この流れの流動特性を明らかにした。更に、この実測データと既存気泡速度理論に基づいた解析を行い、次のような二群気泡の界面積濃度予測相関式を提案・検証した。

一群気泡と二群気泡のボイド率 ( $\langle \alpha_1 \rangle$  と  $\langle \alpha_2 \rangle$ ) 予測相関式：

$$\langle \alpha_1 \rangle = \begin{cases} \langle \alpha \rangle & \langle \alpha \rangle \leq 0.15 \\ 0.417 \langle \alpha \rangle + 0.0875 & 0.15 < \langle \alpha \rangle \leq 0.51 \\ 0.3 & \langle \alpha \rangle > 0.51 \end{cases} \quad (5)$$

$$\langle \alpha_2 \rangle = \langle \alpha \rangle - \langle \alpha_1 \rangle \quad (6)$$

②一群気泡と二群気泡の界面積濃度 ( $\langle a_{i1} \rangle$  と  $\langle a_{i2} \rangle$ ) 予測相関式：

$$\langle a_{i1} \rangle = 3.37 \times \frac{\langle \alpha_1 \rangle \varepsilon_1^{0.0279}}{Lo^{0.889} v_f^{0.0836}} \quad (7)$$

$$\langle a_{i2} \rangle = 1659 \langle \alpha_2 \rangle^{0.796} (1 - \langle \alpha_2 \rangle)^3 \frac{Lo^{0.525} \varepsilon_2^{0.131}}{v_f^{0.394}} \times$$

$$\left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.314} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{-0.5} N_{if}^{1.124}$$

(6) 界面積濃度輸送方程式は、ロッドバンドル内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が可能となるので、二流体モデルへの界面積濃度輸送方程式の導入はロッドバンドル内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いる。既存の気液二相流の界面積濃度輸送方程式は、気泡の大きさによって一群と二群気泡の界面積濃度輸送方程式に分けられている。本研究は、気液二相流の界面積濃度輸送方程式を一元化する際に導入した界面積濃度加重平均界面速度  $\langle \langle v_{iz} \rangle \rangle_a$  に対して検討を行い、フォーセンサ・プローブの実測データに基づき、この  $\langle \langle v_{iz} \rangle \rangle_a$  がボイド率加重平均気相速度  $\langle \langle v_{gz} \rangle \rangle$  により近似できるモデルを提案した。一次元一群気泡の界面積濃度輸送方程式に対して、これらの界面速度と気相速度の定義は次の通りである。

$$\langle\langle v_{iz} \rangle\rangle_a = \langle a_i v_{iz} \rangle / \langle a_i \rangle \quad (9)$$

$$\langle\langle v_{gz} \rangle\rangle = \langle \alpha v_{gz} \rangle / \langle \alpha \rangle \quad (10)$$

フォーセンサ・プローブの測定結果を利用して、これらの界面速度と気相速度の実測値の比較は図5に示す。

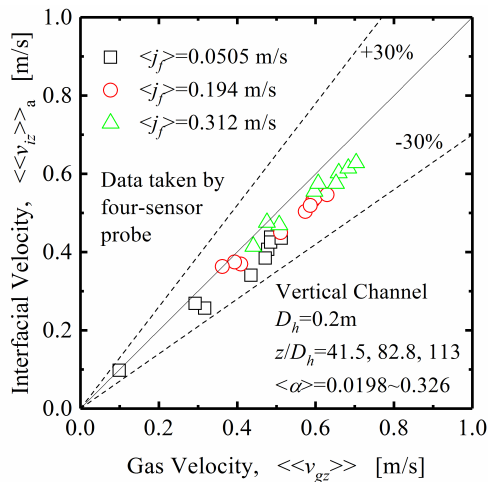


図5 気相速度と界面速度

(7) ロッドバンドル内高ボイド率の気液二相流において、流動様式は複雑なスラグ流とチャーン流になる。この流れの流動特性と界面輸送機構を予測するために、二群気泡の界面積濃度輸送方程式が二流体モデルに導入されることが必要である。本研究は、Smithら(2012)の二群気泡の合体と分裂モデルを含んだ二群気泡の界面積濃度輸送方程式を一次元二流体モデルに導入し、新しいシミュレーションコードを作成し、燃料集合体のチャンネルボックスのような大口径管内気液二相流の数値解析を行った。その数値解析結果は、フォーセンサ・プローブを用いて測定した実験データと良好な一致を示した。

#### <引用文献>

- Chen, S., et al, “Experimental study of air-water two-phase flow in an 8×8 rod bundle under pool condition for one-dimensional drift-flux analysis”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 33, 168-181, 2012.
- Fu, X. Y., Ishii, M., “Two-group interfacial area transport in vertical air-water flow: II. Model evaluation”, *Nuclear Engineering Design*, 219(2), 169-190, 2002.
- Ishii, M., “One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes”, Argonne National Laboratory Report, ANL-77-47, USA, 1977.
- Ozaki, T., et al., “Development of drift-flux model based on 8×8 BWR rod bundle

geometry experiments under prototypic temperature and pressure conditions”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50, 563-580, 2013.

Smith, T.R., et al, “Mechanistic modeling of interfacial area transport in large diameter pipes”, *International Journal of Multiphase Flow*, 47, 1-16, 2012.

Yang, X., et al., “Measurement and modeling of two-phase flow parameters in scaled 8×8 BWR rod bundle”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 34, 85-97, 2012.

#### 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 8 件)

Schlegel, Joshua P.; Hibiki, Takashi; Shen, Xiuzhong; Appathurai, Santosh; Subramani, Hariprasad; Prediction of Interfacial Area Transport in a Coupled Two Fluid Model Computation, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 査読有, Vol. 54, pp. 58-73, 2017.

<http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2016.1205530>.

Shen, Xiuzhong; Deng, Baoqing; Development of interfacial area concentration correlations for small and large bubbles in gas-liquid two-phase flows, *International Journal of Multiphase Flow*, 査読有, Vol. 87, pp. 136-155, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.017>.

Shen, Xiuzhong; Sun, Haomin; Deng, Baoqing; Hibiki, Takashi; Nakamura, Hideo; Gas-liquid bubbly flow structure in a vertical large-diameter square duct, *Progress in Nuclear Energy*, 査読有, Vol. 89, pp. 140-158, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.014>.

Li, Jiajia; Deng, Baoqing; Zhang, Bing; Shen, Xiuzhong; Kim, Chang Nyung; CFD simulation of an unbaffled stirred tank reactor driven by a magnetic rod: assessment of turbulence models, *Water Science and Technology*, 査読有, Vol. 72, No. 8, pp. 1308-1318, 2015.

<http://wst.iwaponline.com/cgi/doi/10.2166/wst.2015.314>.

Shen, Xiuzhong; Hibiki, Takashi; Interfacial area concentration in gas-liquid bubbly to churn flow regimes in large diameter pipes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 査読有, Vol. 54, pp. 107-118, 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.05.002>.

Guo, Yuan; Deng, Baoqing; Ge, Daqiang; Shen, Xiuzhong; CFD simulation on hydrodynamics in fluidized beds: assessment

of gradient approximations and turbulence models, Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 51, No. 8, pp. 1067-1074, 2015.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00231-014-1478-y>.

Shen, Xiuzhong; Hibiki, Takashi; Nakamura, Hideo; Bubbly-to-cap bubbly flow transition in a long-26m vertical large diameter pipe at low liquid flow rate, International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有, Vol. 52, pp. 140-155, April 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.01.001>.

Zhang, Jian; Shen, Xiuzhong; Fujihara, Yasuyuki; Sano, Tadafumi; Yamamoto, Toshihiro; Nakajima, Ken; Experimental study on the safety of Kyoto University research reactor at natural circulation cooling mode, Annals of Nuclear Energy, 査読有, Vol. 76, pp. 410-420, Feb. 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.10.010>

〔学会発表〕(計 9 件)

Shen, Xiuzhong; Schlegel, Joshua P.; Hibiki, Takashi; Nakamura, Hideo; Multi-dimensional gas-liquid two-phase flow in vertical large-diameter channels, Proceeding of the 11th Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics at Sapporo, Hokkaido, Japan, June 22-24, 2017.

沈秀中、鄧保慶、ロッドバンドル内気液二相流用界面積濃度輸送モデル, 第 51 回京都大学原子炉実験所 学術講演会, 京都大学原子炉実験所, 大阪, 論文番号: P22, pp. 36, 2017 年 1 月 26-27 日。

Shen, Xiuzhong; Deng, Baoqing; Estimation of interfacial area concentrations for two-group bubbles in gas-liquid two-phase flows, Proceeding of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11) at Gyeongju, Korea, Paper No.: N11P0136, October 9-13, 2016.

沈秀中、日引俊、軽水炉用ロッドバンドル内低流速気液二相流の流動特性研究, 第 50 回京都大学原子炉実験所 学術講演会, 京都大学原子炉実験所, 大阪, 論文番号: P23, pp. 39, 2016 年 1 月 27-28 日。

Schlegel, Joshua P.; Hibiki, Takashi; Shen, Xiuzhong; Appathurai, Santosh; Subramani, Hariprasad; Evaluation of interfacial area transport equation in coupled two-fluid model computation, Proceeding of the 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16) at Hyatt Regency, Chicago, Illinois, USA, Paper No.: NURETH-16-13363, August 30-September 4, 2015.

Shen, Xiuzhong; Hibiki, Takashi; Two-group

interfacial area concentration correlations of two-phase flows in large diameter pipes, Proceeding of the 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-23) at Makuhari Messe, Chiba, Japan, Paper No.: ICONE23-1795, May 17-21, 2015.

沈秀中、中村秀夫、気液二相流用高精度 4 センサ・プローブ計測法の開発, 第 49 回京都大学原子炉実験所 学術講演会, 京都大学原子炉実験所, 大阪, トピックス講演論文番号: T4, pp. 64-66, 2015 年 1 月 28-29 日。

Shen, Xiuzhong; Hibiki, Takashi; Sun, Haomin; Nakamura, Hideo; Local measurements of 3-D bubble velocity vector, bubble diameter and interfacial area concentration in a vertical large diameter square duct, Proceeding of the 9th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-9) at Buyeo, Korea, Paper No.: N9P0011, November 16-19, 2014.

Schlegel, Joshua P.; Hibiki, Takashi; Ishii, Mamoru; Shen, Xiuzhong; Appathurai, Santosh; Implementation of two-group interfacial area transport in a one-dimensional computational environment, Proceeding of International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics 2014 (ATH'14) at Reno, Nevada, USA, Paper No.: 042, pp. 555-567, June 15-19, 2014.

〔産業財産権〕

取得状況 (計 1 件)

名称: 気液 2 相流パラメータ測定装置及びコンピュータプログラム (フォーセンサ・プローブによる多次元気液二相流の気泡速度、気泡径、界面積濃度の計測方法及び装置)

発明者: 沈秀中

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許第 5916509 号

取得年月日: 2016 年 4 月 15 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/iL4nC>

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) 研究協力者

日引 俊 (HIBIKI, Takashi)

パデュー大学・原子力工学研究科・教授