

SF6 – 水を用いた水平管群の気液二相流計測

Experimental Study on Two-Phase Flow in Horizontal Tube Bundle Using SF6-Water

石川 温 士 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
今井 良 二 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主幹 博士（工学）
田中 貴 博 エネルギーセクターエンジニアリングセンターボイラエンジニアリング部 主査 博士（工学）

気液二相流は気体と液体が混在する流れであり、原子炉をはじめとして多くの工業機器に応用されている。気液二相流では気体と液体の密度比が流動状況を決めるうえで最も重要なパラメータの一つとなる。本研究では常温かつ低圧の条件で、高温高圧環境下での水-水蒸気の気液密度比を再現可能な装置を製作した。実験は加圧水型原子炉（PWR）の蒸気発生器（SG）において重要になる伝熱管 U 字管部を対象として、水平管群を流れる気液二相流のボイド率および気液界面速度の計測を行った。得られた結果は既存の実験式と良好に一致し、装置の健全性ならびに計測手法の妥当性を確認することができた。

It is important to know the flow structure in industrial products that use gas-liquid two-phase flow. The gas-liquid density ratio is one of the most important parameters in the simulation of flow structure. In this study, a vertical upward two-phase flow in a horizontal tube bundle, which occurs frequently on the shell side of heat exchangers such as PWR steam generators, was measured. This test facility can simulate the behaviors of water-vapor two-phase flow at high pressures (5.6 MPa_{abs}) by using sulfur hexafluoride (SF6) gas for the gas phase and water for liquid phase at ambient temperatures and low pressures. These results were compared with the values generated by previous empirical equations to verify soundness of this facility and measurement method.

1. 緒 言

気液二相流は気体と液体が混在する流れであり、原子炉や工業用ボイラ、化工機、培養攪拌槽など幅広い工業製品に利用されている。気液二相流の特徴としては、時間と空間とともに自由に変形する気液界面をもつことが挙げられる。気液界面では気相と液相の物性値が大きく変化することと、界面を通じて相互作用することから、気液二相流の流動および伝熱問題を解くうえで、気液界面の様相を把握することは非常に重要になる。また、気液二相流を利用した製品の設計および開発に使用する解析コードでは、当該機器を対象とした要素試験によって得られた結果を基に作成された構成方程式を使用している。そのため、新規製品や既存式の適用範囲外での使用が想定される製品などの設計開発においては、実機条件相当の計測データから独自に構成方程式を作成することが求められる。

気液二相流は前述した特徴のとおり、流路形状や流路障害物によって、気液界面が複雑に変形する。それに伴い流動様相がダイナミックに変化するため、構成方程式を独自に作成する場合、それぞれの機種や対象とする流路形状に応じた形態での気液二相流を形成することが必要になる。しかし、多くの工業製品において二相流動場は高温高圧の

環境下となり、実機の流動状態を直接計測することは困難な状況にある。

気液二相流を利用する機器の代表例として挙げられる、加圧水型原子炉（Pressurized Water Reactor：PWR）の蒸気発生器（Steam Generator：SG）では、伝熱管内部を流れる高温高圧の 1 次冷却水と、伝熱管外部のシェル側を流れる比較的低温の 2 次冷却水との熱交換によって、2 次側冷却水が沸騰し、シェル側において水と水蒸気の気液二相流が形成される。U 字型伝熱管をもつ蒸気発生器においては、U 字型伝熱管群が気液二相流にさらされることで、流体による励振力を受ける。励振力を評価するには気液二相流中のガスの体積割合を意味するボイド率および気液界面の速度が重要な因子になる。蒸気発生器は PWR のアキレス腱とも称され、なかでも U 字管部における気液二相流による励振力の評価と、流力弾性振動を抑制するための振れ止め金具（Anti-Vibration Bar：AVB）の設計はプラント全体の安全設計の重要な役目を担う。

本研究は、製品の設計開発に使用する解析コードの予測精度向上を目的として、当該解析コードに組み込む構成方程式を作成、評価するための技術を構築した。本装置では PWR/SG の U 字管部を対象として、水平管群周りを垂直に上昇する 2 次冷却水（水-水蒸気）を模擬した気液二

相流を形成し、局所のボイド率および気液界面速度を計測した。U字管部には傾斜部も含まれるが、U字管部においては二相流が管群に対して垂直方向に流れる傾向があることや、従来研究においてU字管部を水平管群で評価する手法が多数報告されていることから、供試体は水平管群とした。

気液二相流の流動を決定するうえでは、気液密度比、表面張力、気液の粘性比などが重要なパラメータとなることが知られている。本装置では、これらのなかで最も影響が大きいパラメータである気液密度比について、六フッ化硫黄 (Sulfur Hexafluoride: SF6) ガスを用いることによって常温かつ 1 MPa 以下の圧力で実機相当の流動場を再現可能なものとした。模擬流体によって実機相当の気液密度比を再現した試験は幾つか報告されている^{(1), (2)}が、その数は非常に少ないことから、本装置で得られるデータは貴重である。

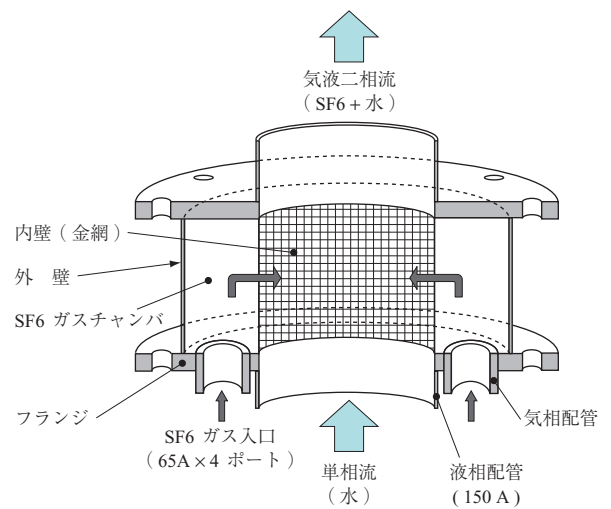
2. 実 験

2.1 実験装置

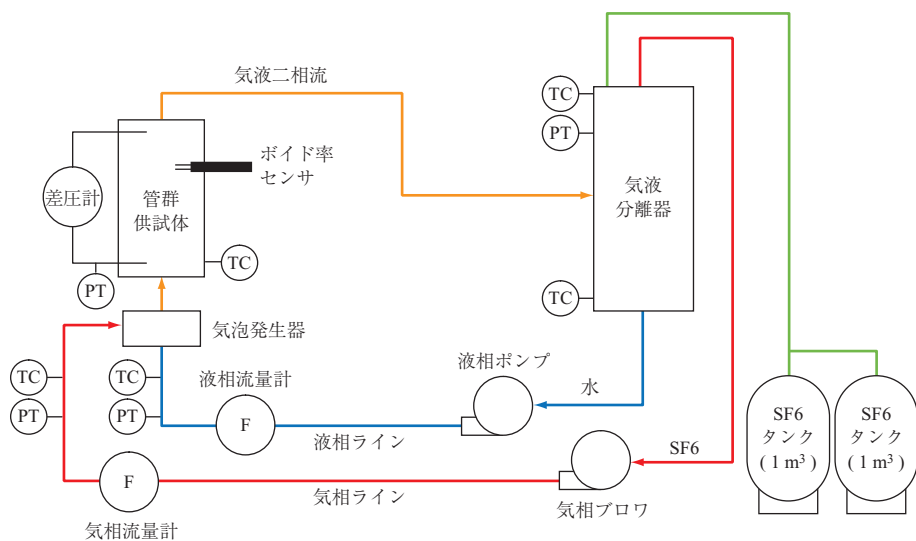
第 1 図に実験装置の系統図を示す。作動流体には液相に水、気相に SF6 ガスを用いた。SF6 ガスは空気約 5 倍の密度をもち、本作動流体の組み合わせによって、比較的低压で高温高压の水-蒸気に相当する気液密度比を再現できる。試験装置ループ内の圧力調整および SF6 ガス回収のため、SF6 タンク (1 m³ × 2 基) を設置した。作動流体の流れを以下に述べる。

SF6 ガスと水は気液分離器において、重力によって分離される。水は循環ポンプ (渦巻きポンプ: 37 kW) によって昇圧された後、流量計を経由して供試体下方から上昇流を形成し、気液分離器に戻る。SF6 ガスはブロワ (電動送風機: 9 kW × 4 台) で昇圧された後、マニホールドにおいて 4 系統に分岐してから流量計を通過して、気泡発生器に供給される。第 2 図に気泡発生器の構造を示す。

気泡発生器は、液相配管の壁の一部を金網とし、その外側をドーナツ状のチャンバで覆う。チャンバに SF6 ガスを供給することで、液相配管の外周からガスが吹き込まれる構造になっている。なお、水が気相配管へ逆流することを防止するため、気泡発生器と流量計の間には逆止弁を設



第 2 図 気泡発生器の構造
Fig. 2 Structure of bubble generator



(注) TC: 熱電対
PT: 圧力伝送器

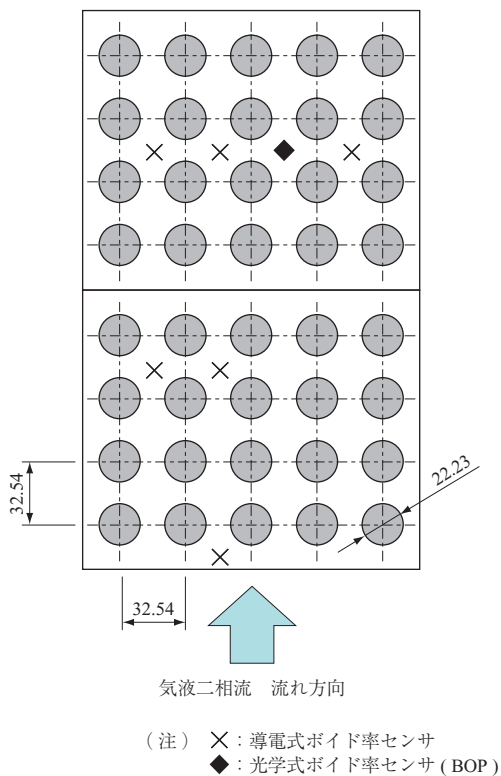
第 1 図 実験装置系統図
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

置している。気泡発生器で混合した水と SF6 ガスは、金網の整流板を通り、水平管群の供試体に対して垂直上昇流を形成した後、気液分離器へ戻る。液相および気相の流量計にはオリフィス流量計を用いた。

本装置における実験時の最大体積流量は、気相 5 m³/min 程度、液相 1 m³/min 程度である。流量計は供試体の下方に位置し、水頭圧の分だけ供試体の圧力よりも高いことから、供試体を通る気相の体積流量は、オリフィス流量計で得られた値を供試体部の圧力によって補正した値とした。供試体部の流路断面形状は 150.9 × 160.0 mm の矩形流路である。第 3 図に水平管群供試体の配列を示す。

供試体の形状は、5 コラム（流路幅方向）× 8 列（流路流れ方向）の水平管群であり、配管外径 $D = \phi 22.23$ mm、配管ピッチ $P = 32.54$ mm ($P/D = 1.46$) とした。第 3 図に示す × 印の位置には単針の導電式ボイド率センサ（素線外径： $\phi 0.2$ mm）、◆印には 2 針式の光学式ボイド率センサ（Bi-Optical Probe：BOP）を装着した。

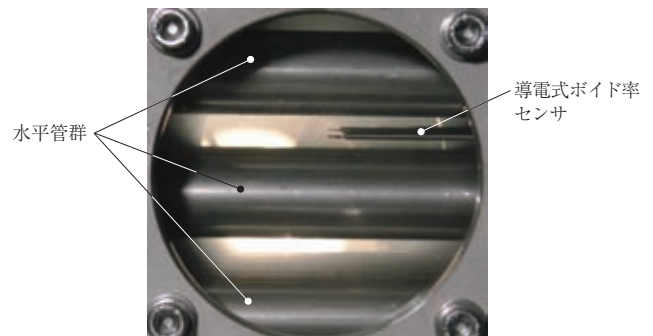
本装置では、計測手法の妥当性を確認するため、原理の異なるボイド率センサを使用した。光学式ボイド率センサは高感度であるが高価かつもろいため、取り扱いに細心の注意を払う必要がある。導電式ボイド率センサは非導電性



第 3 図 水平管群供試体の配列（単位：mm）
Fig. 3 Schematic diagram of test section (unit : mm)

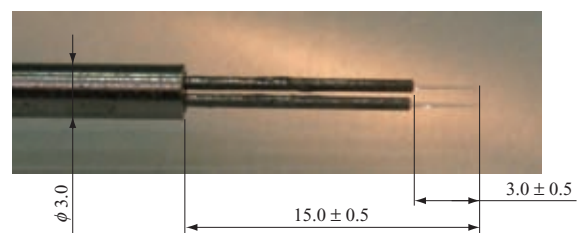
の流体には使用できないが、安価で堅ろうなセンサを自作できることから自由度が高く、局所の二相流計測においては最も一般的に使用されている。

第 4 図には供試体内部流動を観察するための窓を示す。図では 5～7 列目の管群を可視化している。第 5 図に BOP（先端径 < 50 μm）および導電式ボイド率センサを示す。単針の導電式ボイド率センサではボイド率のみを計測し、BOP ではボイド率ならびに気液界面速度を計測した。導電式は気相と液相での電気伝導度の差異を検出し、光学式は気相と液相の屈折率の違いを利用する⁽³⁾。アンプおよび光电変換器で、得られた信号を電圧に変換した後、気相と液相の電位の差異を基に定めたしきい値によって、局所の時間平均ボイド率を算出する。また気液界面速度は、2 針のセンサ間距離をセンサからの二つの出力信号波形のずれ時間で除すことで求める。ずれ時間は、センサからの出力信号波形を時間シフトさせて得られる相互相関関数⁽⁴⁾によって気液界面移動時間を読み取る。

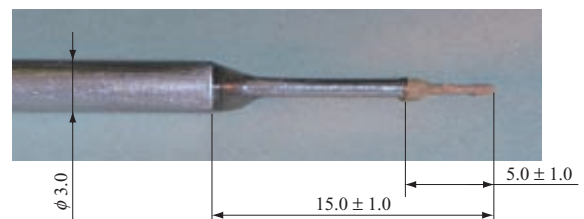


第 4 図 水平管群供試体の観察窓
Fig. 4 Observation window of test section

(a) 光学式ボイド率センサ (BOP)



(b) 導電式ボイド率センサ (IHI 製)



第 5 図 ボイド率センサ（単位：mm）
Fig. 5 Picture of void probe sensor (unit : mm)

2.2 実験条件

第1表に供試流体の気液密度比を、第2表に実験条件を示す。水-SF6ガスの0.6 MPa_{abs}における気液密度比が実機のSGに相当する。また、後述する本実験結果との比較に用いたフランス原子力庁 (Commissariat à l'énergie atomique : CEA) での実験条件も同等の気液密度比である⁽¹⁾。体積流量を配管間隙の最小流路断面積で除した見掛け流速は、気相 1.5 ~ 15.8 m/s、液相 1.2 ~ 2.4 m/s である。ケース 1 およびケース 2 の気液密度比はそれぞれ 4.0 MPa_{abs}、飽和温度 250℃と 5.6 MPa_{abs}、飽和温度 271℃の水-水蒸気の密度比に相当する。

3. 結果と考察

第6図に本実験で計測した蒸気質量率に対するボイド率の、実験式との比較した結果を示す。図は横軸が蒸気質量率であり、実験結果をプロット、ドリフトフラックスモデルの実験式^{(5)~(7)}による推測値をラインで示す。第3表にドリフトフラックスモデルを用いてボイド率を導出す

る際に必要になる分布関数 C_0 とドリフト速度 V_{Gf} をまとめた。管群を対象とした十分な実験結果に基づく実験式がないため、円管での実験式と比較したが、蒸気質量率の増加に伴うボイド率の変化は定性的に一致する結果となっている。また、導電式ボイド率センサによって得られた値とBOPによって得られた値を比較すると、低蒸気質量率領域において良好な一致が見られ、ボイド率計測手法の妥当性を確認することができた。ただし、高蒸気質量率領域においては、両者の値に差異が生じている。導電式センサは回路も含めて自作のものを使用しており、光学式センサに比べて応答性が劣るという問題点が挙げられる。

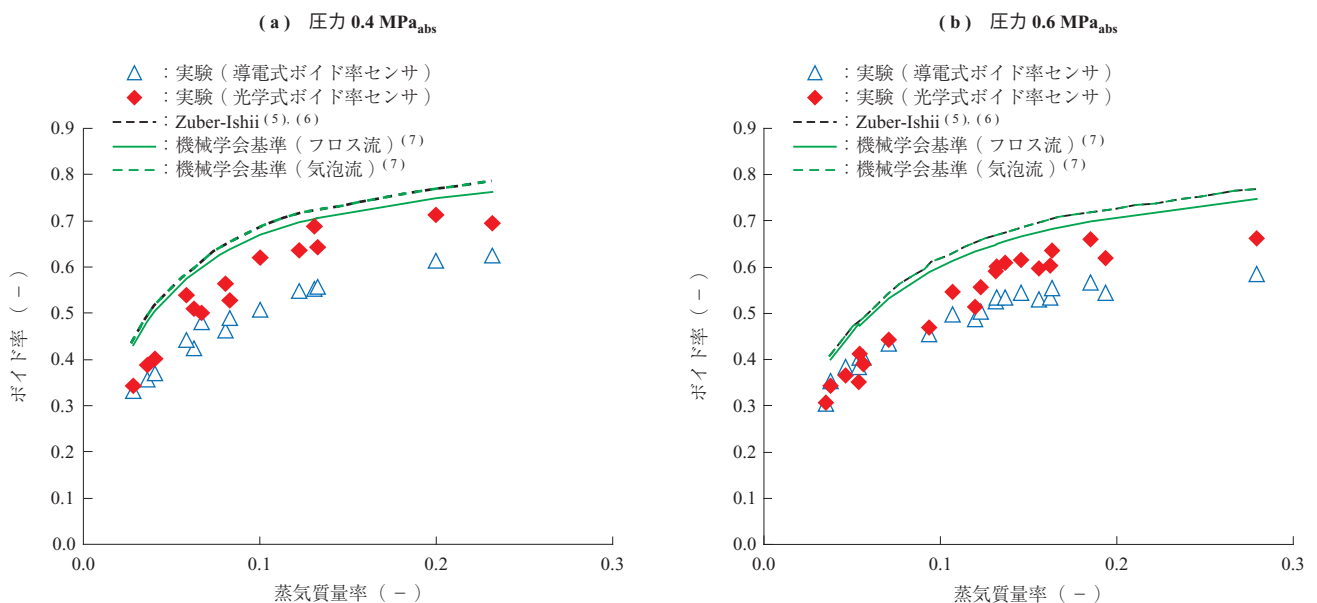
なお、第6図において、ドリフトフラックスモデルの実験式に対して、今回得られたすべての実験結果が低い値を示している。第7図に示すように、ボイド率の計測点は4本の配管の中心としている。気泡は配管後流の渦に巻き込まれるように、流れ方向の管と管の隙間に捉えられる。そのため、計測点でのボイド率が相対的に低くなったと考えられる。CEAの実験においても、渦巻き込みによ

第1表 供試流体の気液密度比
Table 1 Liquid-gas density ratio of working fluid

項	目	単 位	PWR/SG 実験条件		実験装置 (IHI)		実験装置 (CEA)
			水	水	水	水	Freon114
流 体	液 相	-	水	水	水	水	Freon114
	気 相	-	水蒸気	水蒸気	SF6	SF6	Freon114 蒸気
	圧 力	MPa _{abs}	5.3	6.2	0.4	0.6	0.9
	温 度	℃	267.58	277.70	20	20	68.12
密 度	液 相	kg/m ³	771.76	754.60	998.46	998.55	1 309.33
	気 相	kg/m ³	26.98	31.95	25.21	38.90	51.31
気 液 密 度 比	-	-	28.61	23.62	39.60	25.67	25.52

第2表 実験条件
Table 2 Experimental conditions

項	目	単 位	ケース 1	ケース 2
圧 力	MPa _{abs}	-	0.4	0.6
温 度	℃	-	20	20
気 液 密 度 比	-	-	39.6	25.7
気相見掛け流速	m/s	-	2.2 ~ 15.8	1.5 ~ 11.2
液相見掛け流速	m/s	-	1.2 ~ 2.4	1.2 ~ 2.4



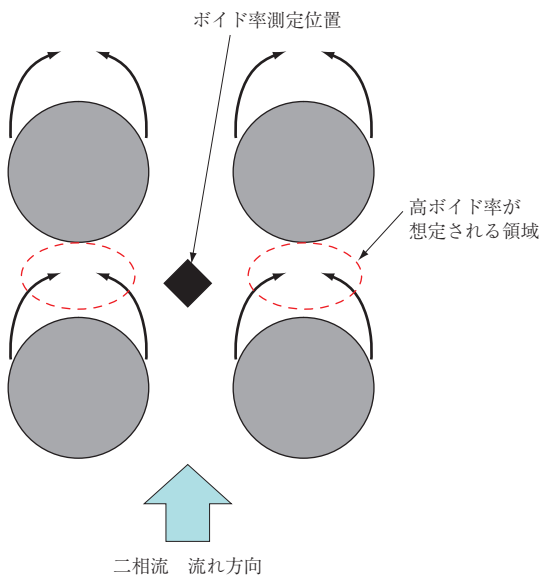
第6図 蒸気質量率に対するボイド率の実験式との比較
Fig. 6 Relationship between quality and void fraction at test section

第3表 ドリフトフラックスモデルのパラメータ

Table 3 Parameters of drift flux model

項 目	分布関数 C_0	ドリフト速度 V_{Gj}
Zuber - Ishii ^{(5), (6)}	$(1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_G / \rho_L}) \cdot (1 - e^{-18/\alpha})$	$\sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}^{1/4}$
機械学会基準 (フロス流) ⁽⁷⁾	1.2	$0.35 \left\{ \frac{g D (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right\}^{1/2}$
機械学会基準 (気泡流) ⁽⁷⁾	$1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_G / \rho_L}$	$\sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}^{1/4}$

(注) ρ_G : 気相密度
 ρ_L : 液相密度
 α : ボイド率
 σ : 表面張力
 g : 重力加速度
 D : 水力等価直径
 $\langle \rangle$: 断面平均値



第7図 管群中のボイド率計測位置

Fig. 7 Measurement point of void fraction within the tube bundle

るボイド率分布の変化が報告されている⁽¹⁾。

第8図に、供試体観察窓で観察された水平管群供試体における二相流の様子を示す。系圧力 0.6 MPa_{abs}、液相見掛け流速 $j_L = 1.6$ m/s、気相見掛け流速 $j_G = 1.6$ 、

4.8, 7.8 m/s (蒸気質量率: 0.04, 0.11, 0.16) での画像である。本画像はビデオカメラを用いてコマ数 30 fps, シャッタースピード 1/1 000 s で動画撮影したものを静止画キャプチャしている。画像から、多数の微細な気泡が上昇する様子が観察された。撮影装置のコマ数が小さいため、本実験条件の二相流流速に対して十分な性能で撮影できず、気泡の詳細な挙動までは不明確であるが、蒸気質量率の増加に伴い気泡の残像が変化する様子を確認できる。

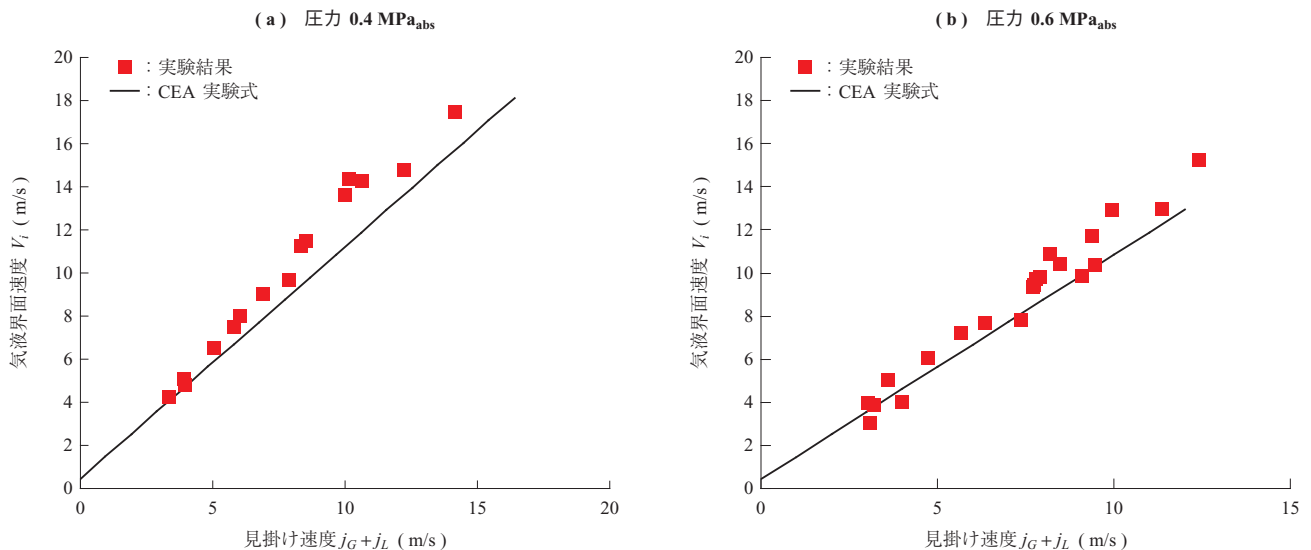
なお、管群内において計測しているボイド率は第8図 - (a) の場合、0.3 程度であるが、第8図 - (b) および - (c) については 0.5 を超えており、スラグ流やフロス流ないしチャーン流に遷移しているものと想定される。可視化している壁面近傍のボイド率が低く、流路中心のボイド率が高くなるという傾向は従来研究による報告例があり、本実験においても同様の傾向が観察された。

第9図に、横軸に気相と液相の見掛け流速の合計、縦軸に気液界面速度を示す。本結果を直線で最小自乗近似することによって、ドリフトフラックスモデルの分布関数お

項 目	(a)	(b)	(c)
系 圧 力 (MPa _{abs})	0.6	0.6	0.6
j_L 液相見掛け流速 (m/s)	1.6	1.6	1.6
j_G 気相見掛け流速 (m/s)	1.6	4.8	7.8
X 蒸気質量率 (-)	0.04	0.11	0.16
二 相 流 画 像			

第8図 水平管群供試体における二相流の様子

Fig. 8 Image of two-phase flow at test section



第 9 図 見掛け速度に対する気液界面速度の変化
 Fig. 9 Relationship between superficial velocity and interfacial velocity

よびドリフト速度を求めることが可能になる。ドリフトフラックスモデルで使用する関係式を (1) 式に示す。

$$V_i = C_0(j_G + j_L) + V_{Gf} \dots\dots\dots (1)$$

- V_i : 気液界面速度
- C_0 : 分布関数
- j_G : 気相見掛け流速
- j_L : 液相見掛け流速
- V_{Gf} : ドリフト速度

また、第 9 図には実験結果との比較対象として、CEA で実施された実験で得られた評価式による結果を記した。CEA の評価式は作動流体にフロン (Freon114) を用いた沸騰系の実験であり、圧力条件は約 0.9 MPa、気液密度比は 25.5 である。既存の CEA の実験式と同等の気液密度比で実施した実験結果の誤差は 10% 以内であり、良好な一致が得られた。

非加熱系の本実験結果と、沸騰系の CEA の実験式が良好に一致しており、流れに沿った流動様式の遷移が存在しないような、発達した二相流領域において、加熱系二相流を非加熱系実験で模擬することの有効性を確認することができた。

4. 結 言

常温かつ 1 MPa 以下の圧力で高温高压水-水蒸気の気液密度比を再現可能な実験装置を製作し、非加熱系の二相流実験を実施した。本結果を既存の実験式と比較したところ、両者の誤差は 10% 以内という良好な一致が得られ、実験装置の健全性ならびに計測手法の妥当性を確認するこ

とができた。ただし、気液界面速度については流路中央の 1 点のみにおけるデータであり、点数が不足していることから、今後、さらに流路断面でのボイド率分布ならびに流速分布を取得するため、計画を進めている。

— 謝 辞 —

本装置で使用した導電式ボイド率センサの製作に当たっては、大阪大学大学院工学研究科の片岡勲教授ならびに吉田憲司准教授から貴重なご助言をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) J. F. Haquet and J. M. Gouirand : Local Two-Phase Flow Measurements in a Cross-Flow Steam-Generator Tube Bundle Geometr : The Minnie II XF Program Proc. of International Multiphase Flow (1995) p. TT-17
- (2) T. Suzuta, T. Ueno, Y. Hirao, K. Tomomatsu, K. Kawanishi and A. Tsuge : Measurement of Interfacial Velocities in Gas-Liquid Upward Two-Phase Flow across Tube Bundle 7th International Conference on Nuclear Engineering ICONE-7483 (1999. 4) pp. 1 - 9
- (3) 社団法人日本原子力学会 : 混相流計測法 森北出版株式会社 2003 年 3 月 pp. 93 - 96
- (4) A. Serizawa, I. Kataoka and I. Michiyoshi : Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow -

- I. Measuring Techniques International Journal
of Multiphase Flow (1975. 12) Vol. 2 No. 3
pp. 221 - 233
- (5) N. Zuber and J. A. Findlay : Average Volumetric
Concentration in Two-Phase Flow Systems Journal
of Heat Transfer Trans. ASME (1965. 11) Vol. 87
No. 4 pp. 453 - 468
- (6) M. Ishii : One-Dimensional Drift-Flux Model and
Constitutive Equations for Relative Motion Between
Phases in Various Two-Phase Flow Regimes ANL-
77-47 (1977. 10)
- (7) 社団法人日本機械学会：日本機械学会基準 蒸
気発生器伝熱管 U 字管部流力弾性振動防止指針
JSME S016 2002 年 3 月 p. B80