部分長燃料棒を有するロッドバンドル内気液二相流の圧力損失*

Pressure Drops in Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Rod Bundle with Partial Length Rods

太田基希***
OHTA Motoki

細川茂雄***
HOSOAKWA Shigeo

林公祐***
HAYASHI Kosuke

富山明男**
TOMIYAMA Akio

Abstract Pressure drops in air-water two-phase flows in a four by four rod bundle with partial length rods (PLR) are measured by using differential pressure transducers. The sampling frequency is 0.2 kHz and sampling number is 50000. The experimental apparatus consists of an acrylic channel box and 16 stainless rods. Air and water at atmospheric pressure and room temperature are used for the gas and liquid phases, respectively. The ranges of the gas and liquid volume fluxes, J_G and J_L , are $0.4 < J_L < 2.0$ m/s and $0.06 < J_G < 8.85$ m/s, which cover typical two-phase flow patterns appearing in the fuel bundle. As a result, the following conclusions are obtained: (1) Although the pressure drop decreases with increasing the number of PLRs, the magnitude of the pressure reduction scarcely depends on their locations. (2) The pressure drop is well evaluated by using the void correlation proposed by Ishizuka et al. and the homogeneous model for the frictional pressure drop.

Keywords: Pressure Drop, Rod Bundle, Partial Length Rod, Two-Phase Flow, Boiling Water Reactor

1. 緒言

沸騰水型原子炉(BWR)の燃料集合体(ロッドバンドル)の設計には、ロッドバンドル内圧力損失に関する知見が不可欠である[1-3]。また、二相流部での圧力損失低減及び中性子フラックス最適化のため、通常の燃料棒よりも短い部分長燃料棒(PLR) [4]が積極的に導入されるようになってきている。Tsukuda ら[5]は PLR を有する燃料集合体の実証試験を実施し、圧力損失を測定している。しかし、PLR の本数や配置パターンが圧力損失に及ぼす影響や、圧力損失評価法に関してはほとんど研究例が無い。

本研究では 4×4 ロッドバンドル実験装置[6]に PLR を組み込み、ロッドバンドル内水-空気系二相流の圧力損失を測定し、PLR 本数及び配置パ

ターンが圧力損失に及ぼす影響を調べるとともに、既存の圧力損失評価法の PLR を含むロッドバンドル体系への適用性を検討した。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。実験装置は、試験部、下部タンク、上部タンク、水供給系及び空気供給系からなる。空気はコンプレッサから流量計を介して下部タンクに、水はポンプにより流量計を介して下部タンクに供給される。下部タンクで水と空気は混合され試験部へ供給される。その後、上部タンクで二相は分離され、空気は大気へ開放され、水はタンクに戻り循環する。気相流量計及び液相流量計の測定精度は各々5、2.5 %である。試験部断面図を Fig. 2 に示す。16 本のス

* 2009.11.27 受付

** 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

TEL: (078)803-6131 FAX: (078)803-6131 E-mail: tomiyama@mech.kobe-u.ac.jp

*** 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

ステンレス製ロッドをアクリル製チャンネルボックス内に正方格子状に配置した。ロッド径は 10 mm、ロッドピッチは 12.3 mm とした。ロッドはスペーサ、上部タイプレート及び下部タイプレートにより支持した。これら支持部の詳細については既報[7]を参照されたい。PLR の配置は実機燃料集合体[8]における配置を参考にし、Case 2.1 - 4.2 の 5 種類とした。Case の最初の数字は PLR の本数を表し、2 番目の数字は同じ本数における配置パターンを示す。PLR が無い Case 0.1 での水力等価直径 D_e は 9.0 mm である。一方、PLR を有する場合の PLR 上端部より下流における D_e は、PLR の本数が 2、3、4 本の各々に対して 10.9、12.0、13.2 mm である。

気液各相の体積流束 J_G 、 J_L の実験条件を各条件における流動様式とともに Fig. 3 に示す。ここで、 J_G および J_L は流量条件を示す指標として、全てのロッドが存在する位置での体積流束として定義した。また、各流動様式における流れ場の可視化写真の例を Fig. 4 に示す。可視化領域で PLR 以外のロッドにフッ化エチレンプロピレン樹脂

(FEP) 製円管を用いて流れ場全体を可視化している。なお、流動様式の定義および詳細に関しては、既報[6,7]を参照されたい。ロッドバンドル内

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Location of PLRs.

Fig. 3 Experimental conditions.

に現れる全ての流動様式を網羅できるように、液相体積流速が $0.4 \leq J_L \leq 1.2$ m/s、気相体積流速が $0.06 \leq J_G \leq 8.85$ m/s 内の 40 条件で実験した。

Fig. 1 に示すように、圧力損失は PLR 上端 (End cap の付根) から 400 mm 下流までの差圧として測定した。試験部 4 側面 (Fig. 2 Case 0.1 の Ch1 ~ Ch4) に差圧計 (Nidec Copal Electronics, PA-100 500D-W, 誤差 $\pm 0.5\%$ FS) を取り付け、鉛直方向瞬時圧力損失 $\Delta p(t)$ をデータロガー (Yokogawa, WE-7000) によりサンプリング周波数 0.2 kHz で記録した。側面 i ($i = 1 \sim 4$) で測定した瞬時圧力損失 $\Delta p_i(t)$ から、 T 秒間の時間平均値 ΔP_i を算出した。

$$\Delta P_i = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p_i(t) dt \quad (1)$$

$J_G = 0.06$ m/s $J_G = 0.63$ m/s $J_G = 8.85$ m/s
 $J_L = 0.9$ m/s $J_L = 0.9$ m/s $J_L = 0.4$ m/s

(a) Bubbly (b) Churn (c) Annular

Fig. 4 Typical flow patterns.

Fig. 5 Dependence of ΔP_i on T ($J_L = 0.4$ [m/s]).

平均を行う時間 T と平均圧力損失 ΔP_i の関係を Fig. 5 に示す。 ΔP_i は $T > 100$ s でほぼ一定値となるため、測定時間を 250 s (サンプリング数 50000) とした。また、試験部 4 面において測定した ΔP_i の一例を Fig. 6 に示す。Case 4.2 では PLR が非対称に配置されているにもかかわらず、各面で測定した ΔP_i の差は小さく、 ΔP_i のばらつきは全ての条件を通して平均値の 2.6% 以内であった。従って、本研究では 4 面で測定した時間平均圧力損失の平均値 ΔP に関して議論する。なお、水温は実験を通して $20 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲にあり、水温変化に起因する物性値の変化により生じる ΔP の変化は 3.3% 以内である。

Fig. 6 Pressure drop measured at each side-wall (Case 4.2).

3. 実験結果および考察

3.1 圧力損失測定結果

Fig. 7 に圧力損失測定結果の一例を示す。圧力損失は PLR の本数、配置によらず J_G の増加に伴い減少し、極小値に達した後、増加に転じる。これは、 J_G 増加に伴うボイド率 α の増加に起因して位置圧力損失が低下するのに対して、摩擦損失は J_G 増加に伴い増加するためである。 J_G 増加に伴い、ロッドバンドル内の流動状態は気泡流からチェーン流、環状流へと遷移するが、 ΔP は滑らかに変化している。

PLR 本数が増加すると、いずれの J_G においても ΔP は低下するが、その低下量は J_G が高いほど大きい。PLR を 4 本用いた Case 4.1、4.2 では、PLR がない Case 0.1 に比べ圧力損失が最大 50% 低減している。また、Case 2.1 と Case 2.2 (PLR2

本)及び Case 4.1 と Case 4.2(PLR4 本)の比較から、PLR の本数が同じであれば圧力損失は PLR 配置に殆ど依存しないことがわかる。圧力損失が最小となる J_G の値は、PLR 本数増加に伴い大きくなることもわかる。なお、他の J_L でも同様の結果が得られたことを付記しておく。

3.2 既存の圧力損失評価法との比較

測定部での圧力損失 ΔP は、位置損失 ΔP_{SH} と摩

擦損失 ΔP_F の和として表せる。

$$\Delta P = \Delta P_{SH} + \Delta P_F \quad (2)$$

ここで、位置損失 ΔP_{SH} はボイド率 α を用いて

$$\Delta P_{SH} = \{(1 - \alpha)\rho_L + \alpha\rho_G\}gL \quad (3)$$

と表せる。ここで、 ρ は密度、 g は重力加速度、 L は測定区間長 (0.4 m)、添字の G, L は各々気相、液相を意味する。

これまで、多くの研究者により種々の摩擦損失評価法[9-12]、ボイド率評価法[13-16]が提案されてきた。これらの評価法の内、摩擦損失評価法 10 種類、ボイド率評価法 10 種類の組み合わせにより圧力損失を求めた。なお、PLR 上端で急拡大流路となっており、速度低下に伴う圧力回復と局所損失が存在すると考えられるが、これらの圧力変化を加味しない方が良好な結果が得られたことを付記する。全流動条件を対象に各々の組み合わせにより算出した圧力損失と測定した圧力損失の差 ε を Table 1 に示す。 ε は次式を用いて算出した。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta P_{exp,k} - \Delta P_{cal,k})^2} \quad (4)$$

Fig. 7 Pressure drops ($J_L = 0.9$ m/s).

Table 1 Difference between measured and predicted ΔP [kPa].

	(Void fraction)									
	Zuber [14]	Ishizuka [13]	Morooka [15]	Dix [14]	Bestion [14]	Jowitt [14]	Homogeneous [11]	Winterton [11]	Smith [16]	Bankoff [11]
(Friction loss)										
Homogeneous [9,11]										
1. $\mu_M = \mu_L$	0.344	0.191	0.341	0.313	0.216	0.239	0.824	0.418	0.382	0.420
2. $\frac{1}{\mu_M} = \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L}$	0.380	0.262	0.449	0.332	0.359	0.225	0.954	0.320	0.428	0.320
3. $\mu_M = x\mu_G + (1-x)\mu_L$	0.343	0.190	0.342	0.311	0.217	0.235	0.826	0.414	0.381	0.416
4. $\mu_M = \beta\mu_G + (1-\beta)\mu_L$	0.931	0.875	1.045	0.885	0.989	0.810	1.504	0.647	0.962	0.728
Beattie – Whalley [11]	0.536	0.476	0.640	0.486	0.585	0.407	1.126	0.389	0.580	0.372
Inoue – Aoki [11]	0.525	0.473	0.630	0.474	0.581	0.400	1.114	0.403	0.569	0.361
Lockhart – Martinelli [11]	0.646	0.537	0.737	0.600	0.639	0.490	1.229	0.343	0.687	0.492
Katsuhara [10,11]	0.361	0.377	1.028	0.302	1.873	0.273	9.394	0.630	0.334	0.595
Akagawa [12]	0.981	1.223	2.403	0.752	3.884	0.695	19.35	0.436	0.956	0.340
Storek – Brauer [11]	1.240	1.138	1.335	1.201	1.248	1.106	1.782	0.823	1.259	1.066
	Best agreement			Second			Third			

ここで、 n は全条件数 (J_L : 4 条件 $\times J_G$: 10 条件 $\times$ PLR 配置 : 6 条件 = 240 条件)、添字 *exp* は実験値を、*cal* は計算値を示す。Table 1 より、ボイド率評価にドリフトフラックスモデルに基づくモデル (Zuber[14]、Ishizuka[13]、Morooka[15]、Dix[14]、Bestion[14]、Jowitt[14]) を使い、摩擦損失評価に均質流モデルを用いた場合に良好な結果が得られている。Coddington and Macian[14]は、ドリフトフラックスモデルによるロッドバンドル内ボイド率評価精度を調べ、Ishizuka[13]、Dix[14]、Bestion[14]が良好な結果を与えると報告しており、Table 1 からこれらのモデルが比較的良好な結果を与えることが確認できる。最も実験値と良く一致したのは、摩擦損失評価法に均質流モデル [9]、ボイド率評価法に Ishizuka らが提案した相関式[13]を用いる組み合わせであった。

以下では本圧力損失評価方法を取り上げ、圧力損失評価結果と実験結果を詳しく比較する。

均質流モデルによる ΔP_F 評価では以下の式(5) - (8)を用いる。

$$\Delta P_F = \lambda_{TP} \frac{L}{D_e} \frac{G^2}{2\rho_M} \quad (5)$$

$$\lambda_{TP} = \begin{cases} 64 / \left(\frac{GD_e}{\mu_M} \right) & \text{laminar} \\ 0.3164 / \left(\frac{GD_e}{\mu_M} \right)^{0.25} & \text{turbulent} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_M = x\mu_G + (1-x)\mu_L \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_M} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (8)$$

ここで、 G は全質量流束、 x はクオリティ、 μ_G 、 μ_L は気相および液相の粘性係数、 μ_M 、 ρ_M は混合相の粘性係数および密度を表す。 μ_M の算出は Table 1 に示した 4 種の式を用いて比較したが、式(7)により最も良い結果が得られた。なお、 G は J_G 、 J_L と異なり PLR 下流の断面積を用いて算出した値であり、同一流量条件においても PLR の本数により異なる値をとる点に注意されたい。

位置圧力損失 ΔP_{SH} は、ドリフトフラックスモデルにより算出したボイド率 α を式(3)に代入し

て求める。この際、Ishizuka らが 8×8 ロッドバンドル試験 (系圧力 $P = 1 \sim 8.6$ MPa、 $G = 284 \sim 1988$ kg/m²/s、 $x = 0 \sim 0.25$) に基づいて提案した分布定数 C_0 及びドリフト速度 V_{GJ} を用いる。すなわち、

$$\alpha = \frac{x}{C_0 \{x + (1-x)\rho_G / \rho_L\} + \rho_G V_{GJ} / G} \quad (9)$$

$$C_0 = A_1 \cdot P + A_2 \quad (10)$$

$$V_{GJ} = (B_1 \cdot G + B_2) (C_1 \cdot P^2 + C_2 \cdot P + C_3) \quad (11)$$

ここで、 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 、 C_3 は Table 2 に示す定数である。なお、Hayama[17]は常温常圧条件においてロッドバンドル内水-空気系気液二相流のボイド率を中性子ラジオグラフィーにより測定し、Ishizuka らのボイド率相関式が水-空気系二相流にも適用できることを確認している。以下では、本圧力評価法を IH (Ishizuka and Homogeneous) 法と呼ぶことにする。

Table 2 Constants in Eqs. (10) and (11)

constant	value	constant	value
A1	6.76×10^{-3}	C1	9.42×10^{-2}
A2	1.026	C2	-1.99
B1	4.99×10^{-5}	C3	12.6
B2	6.91×10^{-2}		

まず、PLR の無い Case 0.1 における IH 法と実験結果の比較を Fig. 8 に示す。 J_G 増加に伴い位置

Fig. 8 Comparison between measured and calculated ΔP (Case 0.1, $J_L = 1.2$ m/s).

圧力損失が低下、摩擦圧力損失が増加する結果、全圧力損失に占める割合は低 J_G 領域では位置圧力損失が大きく、高 J_G 領域では摩擦損失が大きいことがわかる。IH 法は実験値と良好に一致することも確認できる。

PLR を有する Case 2.1 - 4.2 における圧力損失測定値と計算値の比較を Fig. 9 に示す。IH 法はいずれの PLR 本数でも実験値と良好に一致しており、 ΔP の極小値も良好に捉えている。このことは、位置圧力損失、摩擦圧力損失ともに評価精度が高いことを示している。また、摩擦圧力損失と位置圧力損失の計算値から、PLR 本数の増加に伴い摩擦圧力損失の J_G に対する勾配が緩やかになるため、 ΔP の極小値が高 J_G 領域に移動することがわかる。

全圧力損失の J_L 依存性に関して、実験値と計算値を比較した結果を Fig. 10 に示す。

J_G 一定の下で J_L が増加すると、位置圧力損失と摩擦圧力損失の両方が増加するため、全圧力損失は J_L に対して単調増加する。IH 法は全圧力損失の J_G 依存性のみならず J_L 依存性も良好に評価できている。また、PLR 本数の増加に伴う全圧力損失の低下も良好に評価できている。このことは、PLR 導入に伴う圧力損失の変化は、主に流路断面積の変化に伴う G および D_e の変化に起因することを示唆している。ただし、低 J_L 、高 J_G 領域では全圧力損失を若干過大評価する傾向にある。

全実験条件における全圧力損失の測定値と IH 法による計算値の比較を Fig. 11 に示す。IH 法の誤差は $\pm 10\%$ 程度であることがわかる。

以上、IH 法により、PLR の有無に関わらず、ロッドバンドル内気液二相流の圧力損失を良好に評価できることを確認できた。

4. 結 言

部分長燃料棒 (PLR) を含む 4×4 ロッドバンドル実験装置内水-空気系二相流における圧力損失を測定し、PLR 本数及びその配置が圧力損失に及ぼす影響を調べるとともに、既存の圧力損失評価法の PLR を含むロッドバンドル体系への適用性を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 全圧力損失は PLR 本数の増加に伴い低下するが、PLR 配置にはほとんど依存しない。

(a) Case 2.1, 2.2

(b) Case 3.1

(c) Case 4.1, 4.2

Fig. 9 Relations between ΔP and J_G for rod bundles with PLRs ($J_L = 1.2$ m/s).

(a) $J_G = 0.06$ m/s

(b) $J_G = 5.42$ m/s

(c) $J_G = 8.85$ m/s

Fig. 10 Relations between ΔP and J_L .

Fig. 11 Comparison between measured and calculated ΔP for all experimental conditions.

- (2) 液相体積流束 J_L 一定の下で気相体積流束 J_G を増加させた場合、全圧力損失が極小となる J_G が存在し、その J_G の値は PLR 本数の増加とともに大きくなる。一方、 J_G 一定の下では、 J_L の増加に伴い全圧力損失は単調増加する。
- (3) 摩擦圧力損失に均質流モデル、ボイド率に Ishizuka らが提案した相関式を用いる全圧力損失評価法により、PLR を含むロッドバンドル内全圧力損失を定性的かつ定量的に良好に評価できる。

謝 辞

本技術開発は「革新的実用原子力技術開発費補助事業 超高出力密度炉心 ABWR プラントの実用化に向けた技術開発」の一環として実施した。また、実験実施に当たりご尽力いただいた井上哲徳氏、亀井聡広氏に感謝の意を表する。

Nomenclature

C_0	: distribution parameter	[-]
D_e	: hydraulic diameter	[m]
G	: mass flux	[kg/m ² /s]
g	: acceleration of gravity	[m/s ²]
J	: volume flux	[m/s]
P	: system pressure	[MPa]
Re	: Reynolds number	[-]
V_{GJ}	: drift velocity	[m/s]

x	: quality	[-]
Greek letters		
α	: void fraction	[-]
ΔP	: pressure drop	[kPa]
ε	: error	[kPa]
λ	: friction factor	[-]
μ	: viscosity	[Pa·s]
ρ	: density	[kg/m ³]

Subscripts

<i>cal</i>	: calculated value
<i>exp</i>	: experimental value
<i>F</i>	: friction
<i>G</i>	: gas phase
<i>L</i>	: liquid phase
<i>M</i>	: mixture
<i>SH</i>	: static head

参考文献

- [1] Tamai, H., Kureta, M., Yoshida, H. and Akimoto, H., Pressure Drop Characteristics in Tight - Lattice Bundles for Reduced-Moderation Water Reactors, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 47, 293 - 298 (2004).
- [2] Morooka, S., Yamamoto, Y. and Shirakawa, K., Study for Pressure Drop of Rod Bundle with Tight Lattice Array, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 72, 701 - 708 (2006).
- [3] Bubelis, E. and Schikorr, M., Review and Proposal for Best Fit of Wire - Wrapped Fuel Bundle Friction Factor and Pressure Drop Predictions Using Various Existing Correlations, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, 3299 - 3320 (2008).
- [4] Tanabe, A., Doi, S., Introduction to Nuclear Fuel Engineering, Focused on LWR Fuel-(4) LWR Fuel-3, Journal of the Atomic Energy Society of Japan, Vol. 46, No. 8, 566-572 (2004).
- [5] Tukuda, Y., Hayashi, H., Kamimura, K., Hattori, T., Kaneko, H., Morooka, S., Mitsutake, T., Akiba, M., Abe, N., Warashina, M., Masuhara, Y., Kimura, J., Tanabe, A., Nishino, Y., Isaka, K. and Suzuki, R., Proving Test on Thermal-Hydraulic Performance of BWR Fuel Assemblies, Transactions of the Atomic Energy Society of Japan, Vol. 1, No. 4, 384-403 (2002).
- [6] Mizutani, Y., Tomiyama, A., Hosokawa, S., Sou, A., Kudo, Y. and Mishima, K., Two-Phase Flow Patterns in a Four by Four Rod Bundle, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 44, No. 6, 894-901 (2003).
- [7] Ohta, M., Kamei, A., Mizutani, Y., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Air-Water Two-Phase Flow in a Four by Four Rod Bundle with Partial Length Rods, Progress in Multiphase Flow Research, Vol. 4, 61 - 68 (2008).
- [8] Morooka, S., Yamamoto, Y. and Takeuchi, Y., Research on Hyper ABWR Plants of Extended Core Power Density, Report of Innovative and Viable Nuclear Energy Technology Development Project, 6 - 9 (2008).
- [9] Idsinga, W., Todreas, N. and Bowring, R., An Assessment of Two-Phase Pressure Drop Correlations for Steam-Water Systems, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 3, 401 - 413 (1977).
- [10] Katsuhara, T., Influences of Roughness of Inner Surface of Pipe upon Pressure Drop due to Friction in Two - Phase flow, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 24, No. 148, 1050 - 1056 (1958).
- [11] The Japan Society of Mechanical Engineers, Hand Book of Gas-Liquid Two-Phase Flow Technology, (1989).
- [12] Akagawa, K., The Flow of the Mixture of Air and Water, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 23, No. 128, 292 -298 (1957).
- [13] Ishizuka, T., Inoue, A., Kurosu, T., Aoki, T., Futakuchi, M., Yagi, M., Morooka, S., Hoshide, A. and Yoshimura, K., Void Fraction Correlation for Rod Bundle Void Fraction Correlation Based on Void Data of BWR Fuel Assembly Measured by X-Ray CT Scanner, Journal of the Atomic Energy Society of Japan, Vol. 37, No. 2, 133 - 143 (1995).
- [14] Coddington, P. and Macian, R., A Study of Performance of Void Fraction Correlations Used in the Context of Drift-Flux Two-Phase Flow Models, Nuclear Engineering and Design Vol. 215, 199 - 216 (2002).
- [15] Morooka, S., Ishizuka, T., Iizuka, M. and Yoshimura, K., Experimental Study on Void Fraction in a Simulated BWR Fuel Assembly (Evaluation of Cross-Sectional Averaged Void Fraction), Nuclear Engineering and Design Vol. 114, 91 - 98 (1989).
- [16] Smith, S. L., Void Fraction in Two - Phase Flow : A Correlation Based upon an Equal Velocity Head Model, Proc. Instn. Mech. Engrs., 184 Pt 1, 36, 647 - 664 (1970).
- [17] Hayama, S., Visualization and Measurement of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Rod-Bundle, Master's thesis, Kobe University (2001).