

2116 2x3 ロッドバンドル流路におけるボイドドリフト (二流体モデルによる流量再配分計算)

Two-Phase Void Drift Phenomena in 2x3 Rod Bundle (Calculation of Flow Redistribution by a Two-Fluid Model)

○正 佐田富 道雄 (熊本大) 正 川原 顕磨呂 (熊本大) 学 工野 司 (熊本大院)

Michio SADATOMI, Akimaro KAWAHARA and Tsukasa KUNO
Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto City, 860-8555

The purpose of this study is to describe analytically two-phase void drift phenomena in a 2x3 rod bundle channel simulating BWR fuel rod bundle. For that, a subchannel analysis code, which was developed by the present authors and based on a two-fluid model, was used, and prediction of gas and liquid flow redistribution due to void drift between subchannels in the 2x3 rod bundle channel was conducted. In the code, a void settling model for evaluating the void drift effect was incorporated with usual conservation equations of mass and momentum. From a comparison, it was found that the subchannel analysis code can predict well the data on subchannel flow and void fraction variations in the 2x3 rod channel if an appropriate correlation was employed to evaluate wall and interfacial friction forces.

Key Words : BWR, Subchannel Analysis, Two-Phase Flow, Void Drift, Two-Fluid Model

1. 緒言 BWR 燃料集合体内の熱流動予測にはサブチャンネル解析が使用されており、その予測精度の高度化は原子炉安全性の観点から今なお重要である⁽¹⁾。解析コードの高度化のためには、適切な実験データによりコードを検証する必要がある。そのような観点から、著者らは最近、六つのサブチャンネルを有する2x3 正方位列ロッドバンドル流路内の水力学的に非平衡な気液二相垂直上昇流の実験を行い、ボイドドリフト⁽²⁾のみにより生じた流量再配分データ⁽³⁾を採取した。そこで本研究では、この実験で観察されたボイドドリフト現象を記述すべく、二流体モデルによる数値計算を行った。その際、壁面摩擦と界面摩擦の計算式には既存の様々な式を試用し、流動様式との関連でそれらの適否を調べた。その結果を以下に報告する。

2. ボイドドリフトによる流量再配分の解析モデル

2.1 基礎式 本解析モデルは、もともと二つのサブチャンネルを持つ流路内のボイドドリフトによる流量再配分データ⁽²⁾を記述すべく開発されたもの⁽⁴⁾である。そこで本研究では、六つのサブチャンネルを有する流路システム⁽³⁾に適用すべく、そのモデルに若干の修正を施した。すなわち、既報⁽³⁾の実験条件に合わせて、六つのサブチャンネルから成る流路においてサブチャンネル間に時間平均として圧力差のない、二成分系の非加熱、定常、かつサブチャンネル間で流体力学的に非平衡な流れを解析の対象とした。このような流れでは、サブチャンネル間の流体移動は、互いに独立した成分であるボイドドリフトと乱流混合のみが生じる⁽⁵⁾。

基礎式は二流体モデルに基づいており、次に示すように、サブチャンネル i (Ch. i) と j に対応する一般的な連続の式(式(1))と運動量式(式(2), (3))である。

$$\frac{\partial G_{ki}}{\partial Z} + \sum \frac{G_{kj} S_{ij}}{A_i} = 0: \text{Ch.}i \quad \frac{\partial G_{kj}}{\partial Z} - \sum \frac{G_{ki} S_{ij}}{A_j} = 0: \text{Ch.}j \quad (1)$$

ここで、 G_{ki} と A_i は Ch. i における k 相の主流方向 (Z 方向) 質量流束と断面積、 G_{kj} はボイドドリフトによる Ch. i から Ch. j への k 相の横方向質量流束、 S_{ij} は間隙寸である。次に、 k 相についての管軸方向運動量式は次式である。

$$\frac{dP_{ki}}{dZ} = -\frac{1}{\alpha_{ki}} [F_{wki} + F_{gki} + F_{lki} + \sum \frac{S_{ij}}{A_i} \{G'_{kij}(u_{ki} - u_{kj}) + G_{kij}u_k^*\} + \frac{d}{dz}(G_{ki}u_{kj})] \quad (2)$$

$$\frac{dP_{kj}}{dZ} = -\frac{1}{\alpha_{kj}} [F_{wki} + F_{gkj} + F_{lkj} - \sum \frac{S_{ij}}{A_j} \{G'_{kij}(u_{ki} - u_{kj}) + G_{kij}u_k^*\} + \frac{d}{dz}(G_{kj}u_{kj})] \quad (3)$$

ここで、 dP_{ki}/dZ と α_{ki} は、Ch. i における k 相の圧力勾配と体積率、 F_{wki} 、 F_{gki} 、 F_{lki} はそれぞれ検査体積の単位体積当たりの壁面摩擦力、重力による力、界面摩擦力である。 G'_{kij} は乱流混合による k 相の横方向質量流束である。式(2)と(3)における u_k^* は G_{kij} の方向に依存して、 $G_{kij} > 0$ の時 u_{ki} 、 $G_{kij} < 0$ の時 u_{kj} をとった。さらに、本研究が対象とする垂直上昇流では一圧力モデルが適するので、 $dP_{Gij}/dZ = dP_{Li}/dZ$ と $dP_{Gij}/dZ = dP_{Lij}/dZ$ を採用し、サブチャンネル間に圧力差のない流れではその圧力勾配が互いに等しくなるので、等圧力勾配の式、 $dP_{Gij}/dZ = dP_{Gij}/dZ$ と $dP_{Li}/dZ = dP_{Lij}/dZ$ 、も併用した。

2.2 構成式 上述の基礎式を解くためには、乱流混合およびボイドドリフトによる横方向質量流束、 G'_{kij} と G_{kij} 、壁面摩擦力 F_{wki} 、界面摩擦力 F_{lki} の構成式が必要となる。 G'_{kij} には既報⁽⁶⁾の実験値を代入した。一方、気相の G_{Gij} の構成式には、Lahey ら⁽⁷⁾による次式のボイド整理モデルを採用した。

$$G_{Gij} = \rho_G \tilde{D} \{(\alpha_{Gi} - \alpha_{Gj}) - (\alpha_{Gi} - \alpha_{Gj})_{EQ}\} / S_{ij} \quad (4)$$

\tilde{D} はボイド拡散係数、 $(\alpha_i - \alpha_j)_{EQ}$ は平衡流れにおけるサブチャンネル間のボイド率差である。本計算では、 \tilde{D} と $(\alpha_i - \alpha_j)_{EQ}$ には既報^(3, 8)の実験値を用いた。なお、液相の G_{Lij} は、等圧力勾配条件等を満たすように自動的に決定された。

F_w と F_l について次の既存の構成式を試行的に用いた。 F_w の式: TRAC-PF1/MOD1⁽⁹⁾, RELAP5/MOD3⁽¹⁰⁾, NASCA⁽¹¹⁾, 分離流モデル⁽¹¹⁾, 均質流モデル⁽¹²⁾, Beattie & Whalley⁽¹³⁾, Lockhart & Martinelli⁽¹⁴⁾, 勝原⁽¹⁵⁾, Wallis⁽¹⁶⁾

なお、検討した流れの条件では液相が常に壁面と接触しているため、気相の壁面摩擦力は $F_{wG} = 0$ とした。

F_i の式: TRAC-PF1/MOD1⁽⁹⁾, RELAP5/MOD3⁽¹⁰⁾, NASCA⁽¹¹⁾, 富山⁽¹⁷⁾, Fukano ら⁽¹⁸⁾, Henstock ら⁽¹⁹⁾, Moeck ら⁽²⁰⁾, Nigmatulin ら⁽²¹⁾, Wallis⁽¹⁶⁾

3. 検証用実験データ 解析モデルの検証には、著者らによる流量再配分過程の実験値⁽³⁾を使用した。この実験値は、Fig.1 に示す断面の流路内の空気-水二相流（室温、大気圧下）においてサブチャンネル間に圧力差のない条件で得られている。すなわち、サブチャンネル間には流体の差圧移動が生じない条件である。流動様式はスラグ流、チェーン流、環状流であり、流路全体に関する平均ボイド率は $\alpha = 0.3 \sim 0.92$ の範囲、両相の体積流速は気相 $j_G = 0.7 \sim 20$ m/s、液相 $j_L = 0.1 \sim 2.0$ m/s の範囲であった。

4. 解析モデルの検証結果 上述の実験値と本解析モデルによる計算値の比較を行った結果、壁面摩擦力 F_{wL} と界面摩擦力 F_i の選択によって、計算値と実験値の一致の程度が流動様式（またはボイド率）ごとで異なった。すなわち、以下に示すような構成式の組合せが既報の実験値を記述する上では適することが分かった。

- $\alpha < 0.4$: F_{wL} - NASCA の式⁽¹⁾ F_i - 富山らの式⁽¹⁷⁾
- $0.4 < \alpha < 0.7$: F_{wL} - 分離流モデルの式⁽¹¹⁾, 勝原の式⁽¹⁵⁾, NASCA の式⁽¹⁾ F_i - 富山らの式⁽¹⁷⁾
- $0.7 < \alpha < 0.8$: F_{wL} - 分離流モデル⁽¹¹⁾, 勝原の式⁽¹⁵⁾ F_i - 富山らの式⁽¹⁷⁾ と Fukano & Furukawa の式⁽¹⁹⁾ を内挿した式⁽⁴⁾
- $\alpha > 0.8$ F_{wL} - 分離流モデル⁽¹¹⁾, 勝原の式⁽¹⁵⁾ F_i - Moeck の式⁽²⁰⁾, Wallis⁽¹⁶⁾ の式（ガスコア部を液滴と気体の均質流と仮定⁽²²⁾）

上記の検証例をスラグ・チェーン流について Fig.2 に、環状流について Fig.3 に示す。図の縦軸は一つのサブチャンネル Ch.1 の流路全体に対する体積流量比を各相について表している。それぞれ管軸方向 Z への変化過程について曲線の計算値と○印（気相）と△印（液相）の実験値とを比較している。流れの条件（液体、気体の体積流速 j_L, j_G とテスト区間入口 ($Z = 0$) における体積流量比 $Q_{L1}(0)/Q_L, Q_{G1}(0)/Q_G$) は図中に示す通りである。図から分かるように、実験値と計算値の一致は定性的に良いことが分かる。ただし、Fig.3 の環状流の液相に関しては、定量的な一致は不十分であり、今後の検討課題として残された。ボイド率の変化過程についても比較を行い、十分な結果が得られたが、紙面の都合で省略する。なお、本研究で推奨する F_i と F_w の組合せは、既報⁽⁴⁾の結果と類似であったことを付言しておく。

5. 結言 六つのサブチャンネルを有する 2x3 正方形配列ロッドバンドル流路内の水力学的非平衡気液二相垂直上昇流におけるボイドドリフトによる流量再配分過程を記述すべく、二流体モデルによる数値計算を行った。その際、壁面摩擦力 F_{wL} と界面摩擦力 F_i の計算式には既存の様々な式を試用し、流動様式との関連でそれらの適否を調べた。その結果、適切な F_{wL} と F_i の計算式を用いれば、流量再配分は予測可能であることが分かった。

本研究の一部は「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」（財）エネルギー総合工学研究所）における「広範囲の燃料格子に適用する汎用沸騰遷移解析手法に関する技術開発」として実施した。

[参考文献] (1) Ninokata, H., et al., Proc. of Fourth Int. Seminar on Subchannel Analysis, (1997), 231-265. (2) Sadatomi, M., et al., Nucl. Eng. Des., **148** (1994), 463-474. (3) 佐田富ら・ほか 3 名, 日

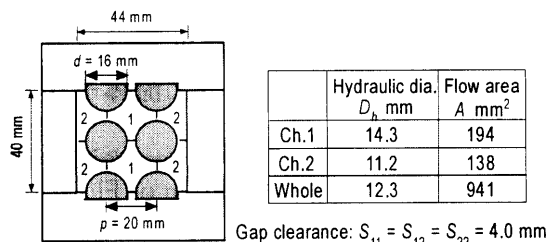


Fig.1 Cross-section of the 2x3 rod bundle channel used in our previous study

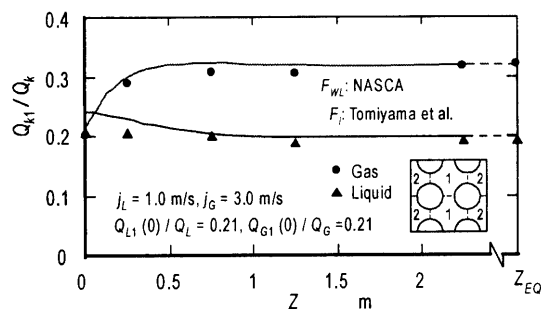


Fig.2 Comparison of axial variation of flow rate ratio between experiment and calculation for a typical slug or churn flow

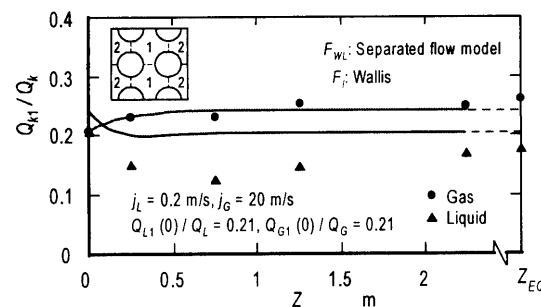


Fig.3 Comparison of axial variation of flow rate ratio between experiment and calculation for a typical annular flow

本混相流学会年會講演會 2003 (第 4 回) 講演論文集, 投稿中. (4) 川原・ほか 2 名, 混相流, **14**-3 (2000), 320-328. (5) Sato, Y., et al., Chem. Eng. Comm., **141&142**, (1996), 399-413. (6) Kano, K., et al., Proc. of the Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conf., Nagoya, Japan, (2002), 6 Pages in CD-ROM. (7) Lahey, Jr., R.T. and Moody, F.J., *The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor*, 2nd ed., ANS, (1993). (8) Kano, K., et al., Proc. of 8th Int. Symp. on Gas-Liquid Flows, ASME/JSME Joint Fluids Engineering Division Summer Meeting, Honolulu, Hawaii, (2003), 8 Pages in CD-ROM. (9) Lies, D.R. et al., NUREG/GR-5069, LA-11208-MS. (1988). (10) Carlson, K.E. et al., NUREG/CR-5533, EGG-2596, (1990). (11) Ali, M.I., et al., Can. J. Chem. Eng., **71** (1993), 1993. (12) McAdams, W.H. et al., Trans. ASME, **64**, (1942), 193-200. (13) Beattie, D.R.H., Whalley, P.B., Int. J. Multiphase Flow, **8** (1982), 83-87. (14) Lockhart, R.W., Martinelli, R.C., **45** (1949), 39-48. (15) 勝原, 機論 (第 2 部), **24**-148, (1958), 1050-1056. (16) Wallis, G.B., *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York (1969). (17) 富山・ほか 2 名, 機論 (B 編), **57**-536 (1991), 1239-1245. (18) Fukano, T. and Furukawa, T., Int. J. Multiphase Flow, **24**-4 (1998), 587-603. (19) Henstock, W.H., Hanratty, T.J., *AIChE J.*, **26** (1976), 990-1000. (20) Moeck, E.O. and Stachewitz, J.W., Int. J. Heat Mass Transfer, **15** (1970), 637-653. (21) Nigmatulin, B.I. et al., *Teplofizika Visokikh Temperature*, **16** (1978), 1258. (22) Wallis, G.B., *Multiphase Science and Technology*, **3** (1987), 63-83.