

2316 稠密三角格子サブチャンネル間の乱流混合

Turbulent Mixing between Triangle Tight Lattice Subchannels

○正 川原 顕磨呂 (熊本大) 正 佐田富 道雄 (熊本大)
 正 加野 敬子 (熊本大) 木村 行宏 (熊本大院)

Akimaro KAWAHARA, Michio SADATOMI, Keiko KANO, Hiroyuki KIMURA
 Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto City, 860-8555

A vertical test channel made up of two subchannels simplifying a triangle tight lattice rod bundle was newly constructed, and experimental data were obtained on turbulent mixing rate between the subchannels. Experiments were conducted in various single-phase and two-phase air-water flows under the hydrodynamic equilibrium flow conditions. The present mixing rate data were compared with those reported so far for triangle lattice rod bundle channels as well as square ones, having hydraulic diameters of about four times larger than the present tight lattice channel. It was found that the mixing rate was considerably smaller in the present channel than the previous triangle and square lattice channels, i.e., a channel size effect.

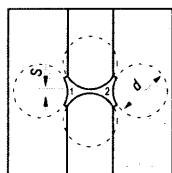
Key Words : Subchannel Analysis, Triangle Tight Lattice Rod bundle, Turbulent Mixing

1. 緒言 次世代 BWR として燃料棒配列を稠密三角格子としたものが計画中等であるが⁽¹⁾, その燃料体内の熱流動予測に現在の正方格子燃料体を対象としたサブチャンネル解析法が役立つかは分からない。そこで、本研究では、この解析法の検証用データを得る目的から、サブチャンネル間の流体移動機構(乱流混合・ポイドドリフト・差圧移動)のうちの乱流混合に注目し、水力学的平衡流における実験を行った。すなわち、稠密三角格子燃料体を模擬した二つのサブチャンネルから成る垂直流路内の単相流および二相流において乱流混合量のデータを取得し考察を行った。なお、本流路に関するポイドドリフトの研究結果は報告済みである⁽²⁾。

2. 実験 Fig. 1 に供試流路の断面形状を示す。4本のロッドを三角格子状に配置して形成された二つの同一形状サブチャンネルを持つ流路である。サブチャンネルの水力学相当直径と断面積は、正方格子燃料体のセンターサブチャンネルのそれらのそれぞれ約 1/4 と 1/8 であった。

図は省略するが、実験装置は全長約 2.5 m の垂直流路であった。作動流体には常温・大気圧近傍の空気と水を用いた。乱流混合量はトレーサ法⁽³⁾により測定した。

単相流の実験は、レイノルズ数 Re が $Re = 1500 - 27000$ の範囲で行った。二相流の実験では空気および水の体積流速がそれぞれ $j_G = 0.1 - 20$ m/s, $j_L = 0.1 - 2.0$ m/s の範囲であった。これらの流量条件で観察された二相流の流動様式は気泡流、スラグ・チャン流および環状流であった。



Gap clearance: $S = 1.0$ mm
 Rod diameter: $d = 12.0$ mm
 Rod to rod pitch: $p = 13.0$ mm
 Pitch to rod diameter ratio: $p/d = 1.083$
 Hydraulic diameter: $D_h = 3.19$ mm
 Flow area of one subchannel: $A_1 = 16.6$ mm²

Fig. 1 Cross-section of the test channel.

3. 実験結果と考察

3.1 単相流の乱流混合量 Fig. 2 に単相流におけるサブチャンネル間の乱流混合量 w' の実験値を示す。図の縦軸は、 w' を粘性係数で除した無次元の混合量 w'/μ , 横軸はレイノルズ数 Re である。 w'/μ で表すと、作動流体が異なってもその値に差は見られない。また、 Re 数が増加するにつれて、

w'/μ の値は大きくなる。ただし、 $2 \times 10^3 < Re < 10^4$ の範囲では増加のこう配が小さく、 $Re > 10^4$ ではそのこう配が大きくなった。この原因として流動状態の相違が考えられる。すなわち、 $2 \times 10^3 < Re < 10^4$ の流れは層流と乱流の状態が混在した遷移領域にあり、 $Re > 10^4$ の流れは完全乱流になっていると予想される。参考までに三角格子配列流路内の流動状態の遷移境界に関する Chen & Todreas⁽⁴⁾ の式による計算結果を図の上部に示す。さらに、図の下部には Yang⁽⁵⁾ と Johannsen⁽⁶⁾ による境界を示す。 w'/μ の本実験値の Re 数に対する傾きから推測すると、本稠密流路の境界について層流-遷移の境界は Yang, 遷移-乱流の境界は Cheng & Todreas のものに近いことが分かる。

次に、三角格子流路における混合量の予測モデル⁽⁷⁻¹⁰⁾ による計算値(5本の線)と本実験値とを比較した。低 Re 数領域 ($Re < 4 \times 10^3$) を除いて、いずれのモデルも実験値を過大評価した。この原因として、これらのモデルでは基としたデータの間隙寸法や流路断面積等が本稠密流路よりも大きいことが考えられる。

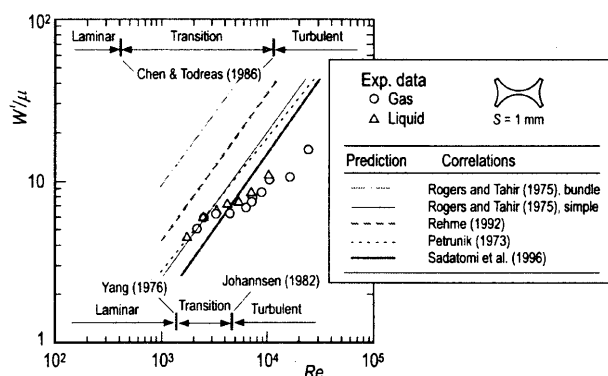


Fig. 2 Comparison of single-phase turbulent mixing rate between the present experiment and calculations from five correlations.

3.2 二相流の乱流混合量 Fig. 3 は二相流における気・液両相の乱流混合量 w'_k ($k = G$: 気相, $k = L$: 液相) の本実験値(実験点)と Rudzinski ら⁽¹¹⁾ の実験値(曲線)を示す。図の横軸はポイド率 α である。まず、本実験データの傾向を説明する。水の体積流速 j_L の違いによらず w'_k は α に対してまとま

り、 w'_k は α に強く依存することが分かる。すなわち、 $\alpha < 0.25$ の気泡流領域では、液相の w'_k は $\alpha = 0$ の単相流の値に近い。気体の流量が増え、流れが気泡流からスラグ流へ遷移すると急増し、単相流の5倍の値となる。スラグ流では α の増加に依らず横ばいで推移し、 $\alpha > 0.8$ の環状流で α の増加と共に減少する。一方、気相の w'_k は $\alpha < 0.8$ では α の増加に伴い増加し、 $\alpha > 0.8$ の環状流で横ばいとなる。次に曲線で示すRudzinskiら⁽¹¹⁾の実験値と比較をしてみる。RudzinskiらはFig. 3の上部に示す三角格子配列垂直流路を用いて、圧力0.34MPa(絶対圧)の下で空気-水二相流の両相の乱流混合量を測定している。 α に対するRudzinskiらの w'_k の傾向は気液両相とも本実験値と定性的に類似であるが、定量的には特にスラグ流において8倍程度Rudzinskiらの w'_k の値が大きい。また、図は省略するが著者ら⁽¹²⁾による正方格子配列の気液の乱流混合量データと比較した結果、両者の定性的な傾向は類似であったが、定量的には異なり、本実験値が低い値を示した。この違いの原因として、ロッド直径およびサブチャンネル断面積の違いが考えられる。

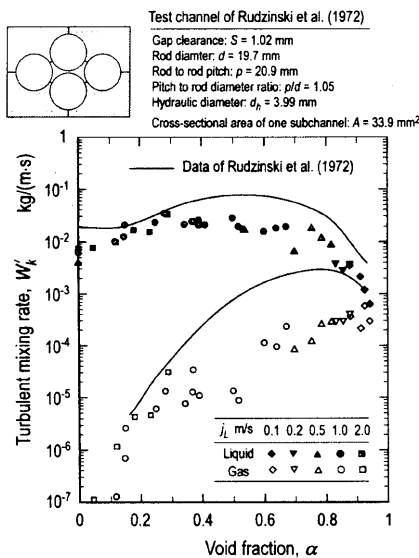


Fig. 3 Comparison of two-phase turbulent mixing rate data between the present experiment and Rudzinski et al.'s (1972) one.

Fig. 4はCarlucciら⁽¹³⁾の最新の二相流乱流混合予測モデルによる計算値と本実験値との比較を示す。CarlucciらのモデルはRudzinskiらを含む数名の研究者による正方および三角格子配列流路における実験値に基づいて作成されている。Fig. 4からCarlucciらのモデルは特に気相の実験値を過大評価しており、改良の余地がある。

二相流における気相と液相の乱流混合量には互いに関係があることが知られており、Kawaharaら⁽¹⁴⁾は気液両相の乱流混合量を横方向の気体体積流量比 $\tilde{\beta}$ を用いて、関係付けることを提案している。Fig. 5に本稠密三角格子流路、Rudzinskiら⁽¹¹⁾の流路および著者ら⁽¹²⁾の正方格子流路における w'_k のデータから $\tilde{\beta}$ を求め、管軸方向の気体体積流量比に対して整理した結果を示す。多少ばらつきはあるが、 $\tilde{\beta}$ と β の間には流路サイズやロッド配列によらず一義的な関係が見られる。したがって、この関係を用いて片方の相、例えば液相の混合量が予測できれば、もう一方の気相の混合量を推測できる。

4. 結 言 稠密三角格子サブチャンネル間の乱流混合量の実験値を単相流および二相流の水力学的平衡流において得た。そして、本実験値と既存の三角および正方格子流路の実験値と比較した結果、本実験値は他の実験値よりも小さく

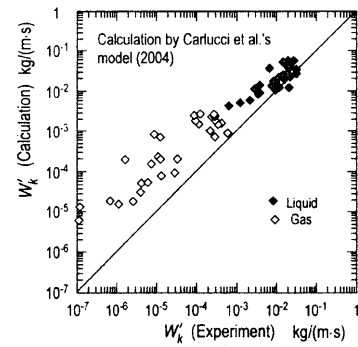


Fig. 4 Comparison of two-phase turbulent mixing rate data between the present experiment and calculation using Carlucci et al.'s (2004) model.

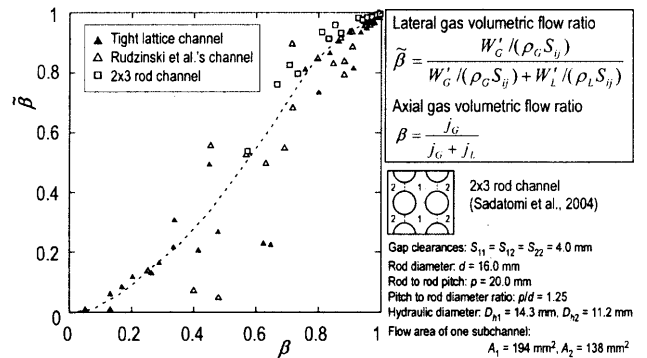


Fig. 5 Relation of gas volumetric flow fraction between axial and lateral directions.

なることが分かった。さらに、本実験値と既存の予測モデルによる計算値を比較した結果、既存のモデルでは本実験値を精度良く表せないことが明らかとなった。今後、モデルの改良を行い、適用性の広いモデルの開発を行う必要がある。

最後に、本実験に協力頂いた熊本大学学生の工藤博幸君と森道幸君に感謝する。また、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」として実施したことを記して、謝意を表す。

[参考文献] (1) 例えば、Iwamura, T. et al., Proc. of 13th Pacific Basin Nuclear Conf., TS-8C-6, (2002). (2) Kawahara A. et al., Proc. Int. Conf. Multiphase Flow 2004, Paper No.223, 14 pages in CD-ROM. (3) Sadatomi, M. et al., Proc. Int. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 1995, **1**, G.P. Celeta and R.K. Shah eds., (1995), 403-409. (4) Chen, S.K., Todreas, N.E., Nucl. Eng. Des., **92** (1986), 227-251. (5) Yang, J.W., Nucl. Sci. Engrg., **62** (1976), 579-582. (6) Johannsen, K., Longitudinal flow over tube bundle, *Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers*, eds. Kakac, S., Shah, R.K. and Bergles, A.E., (1982), Hemisphere Pub. Co., New York. (7) Petrunik, K., PhD Thesis, Dept. of Chemical Engineering, University of Windsor, Canada, (1973). (8) Rogers, J.T., Tahir, A.E.E., ASME paper, No. 75-HT-31, (1975). (9) Rehme, K., Int. J. Heat Mass Transfer, **35** (1992), 567-581. (10) Sadatomi, M. et al., Nucl. Eng. Des., **162** (1996), 245-256. (11) Rudzinski, K.F. et al., Can. J. Chem. Eng., **50** (1972), pp. 297-299. (12) Sadatomi, M. et al., Int. J. Multiphase Flow, **30** (2004), 481-498. (13) Carlucci, L.N. et al., Nucl. Eng. Des., **227** (2004), 65-84. (14) Kawahara, A. et al., Nucl. Eng. Des., **202** (2000), 27-38.