

複合流路における気液二相流体の流動\*  
(第2報, 流動特性)

佐田富道雄\*\*, 佐藤泰生\*\*

Two-Phase Flow in Multiple Channels  
(2nd Report, Flow Characteristics)

Michio SADATOMI and Yoshifusa SATO

Experiments have been performed on the two-phase flow of air-water mixtures through a multiple channel consisting of two interconnected subchannels. The purpose was to obtain data on the void fraction and to observe the flow pattern when the cross-sectional area of the subchannels is different. The mean void fraction of each subchannel was well correlated with the Smith equation. Photographs showed that a void drift is more prominent in a slug or churn flow, while it is less pronounced in a bubbly flow and an annular flow. The flow pattern in each subchannel has been mapped on a diagram of the superficial velocities of both phases, and its flow pattern boundaries were found to be close to those proposed by Taitel et al.

**Key Words:** Multiphase Flow, Tube Bundle, Subchannel, Flow Pattern, Void Fraction, Void Drift

## 1. 緒言

流路の断面が複雑で、二つ以上の副流路に分割することが流れの記述上便利であるような流路を複合流路と呼ぶ。原子炉の燃料集合体などにみられる管群流路がその一例としてあげられる。

気液二相流体の管群流路における局所の流れを予測するうえで有望な手段はサブチャンネル解析であるが<sup>(1)</sup>、これには多くの実験情報を必要とする。しかるに管群に平行な気液二相流は複雑であるから、実験には工夫を要する。実験方法は二つに大別できると思われる。一つは、断面が管群流路とは幾何学的に相違しても、単純化された流路によって境界条件を明確にし、流動条件との因果関係の明らかな流れによって情報を採る方法である。これから流動特性やメカニズムの一部を把握し、得られた結果を流れのモデル化に役立てていく。他の一つは、管群ないしはそれに近いような幾何学的に複雑な流路を用いて行う実験である。技術的にかなり難しい実験ではあるが、サブチャンネル解析モデルの総括的な検証には不可欠なものであろう。

このような流れでは複数の流動機構が重なり合うから、流動条件と流れの因果関係を個々に明らかにするには必ずしも適当な方法とはいえない。

本研究は上記の実験方法のうち前者の立場に立つもので、二つの副流路だけから成る単純な複合流路によって実験を行った。前報<sup>(2)</sup>では流量配分のデータを提示した。そして、隣り合う副流路の断面積が異なればボイド・ドリフト<sup>(3)</sup>が起り偏流が現れること、さらにこの偏流は水平流路においても現れるのでその支配因子は重力ではないこと、を示した。これに引き続き、本報においては流れに及ぼす副流路間げき部の影響、流動様式およびボイド率の調査結果を報告する。さらに、本研究と同様の実験を行った他の研究者の結果<sup>(4)-(6)</sup>と本実験データを比較し、流路の形状の相違と二相流との関係に言及する。

## 記号

- A: 流路の断面積  $m^2$   
 D: 水力学相当直径  $m$   
 j: みかけの速度  $=Q/A$   $m/s$   
 Q: 流量  $m^3/s$   
 S: 間げき寸法  $m$   
 x: クオリティ

\* 昭和61年11月3日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演, 原稿受付 昭和61年3月10日。

\*\* 正員, 熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。

$\alpha$ : ボイド率

$\rho$ : 密度  $\text{kg/m}^3$

添字

$A, B, I, J, i$ : 副流路番号

副流路の添字なし: 総括流路

$G, L$ : 気相, 液相

2. 実 験

2.1 供試流路 供試流路の断面形状を図1に示す。流路形状は2種類で、いずれも断面積の相異なる二つの副流路から成っており、二つは間げきによって通じている。図のように長方形の副流路をもつほうを「A-B流路」、半円形の副流路をもつほうを「I-J流路」と呼ぶことにする。いずれも滑らかな内壁をもつ透明なアクリル樹脂材で作られている。

A-B流路は、 $20 \times 23.2 \text{ mm}$ の長方形流路を厚さ1 mmの2枚の黄銅製フィンで仕切ることにより、断面の中央にすきまをもつ副流路AとBを形成する。両者の断面積比を $A_A/A_B=1.5$ に保ったまま、間げき部の寸法を $S_{AB}=2, 4, 6 \text{ mm}$ の3とおりに変えて、流れに及ぼすすきまの影響を調べた。次に、 $S_{AB}=2 \text{ mm}$ に保ったまま、フィンの位置を移動させることにより副流路の断面積比を $A_A/A_B=2$ および3に変えて流れを観察した。

I-J流路は直径25 mmと20 mmの半円形流路から成り、二つは幅 $S_{IJ}=1.1 \text{ mm}$ 、長さ3 mmの間げき部で連結している。副流路の断面積比は $A_I/A_J=1.5$ で、 $A_A/A_B=1.5$ のA-B流路の実験データとの比較によって、流れに及ぼす流路形状と間げき部の位置の影響をみることができる。

A-B流路は管群における中央部の二つの副流路を、I-J流路は同じくシュラウド側の二つの副流路を想定して単純化したもので、観測の容易さと製作の容易さの観点からこれらの形状を選定した。なお、隣接する

副流路の断面積比1.5は沸騰水形原子炉等にみられる。

2.2 実験方法 実験装置の概要を図2に示す。常温、大気圧近傍の空気と水の混合物を約 $260 D$ の長さの鉛直な供試流路に流し、その流動状態を調べた。流量を測定された空気と水は最下部から流路に導入され、 $40 D$ の混合区間を流動する。この区間は副流路に分離されていない長方形断面をもつ流路で、その寸法はA-B流路の場合には基本流路と同じ $20 \times 23.5 \text{ mm}$ 、I-J流路の場合には $15.5 \times 48 \text{ mm}$ である。I-J供試流路の入口部においては、断面積の急縮少効果を低減するため、図3に示すように流路を分ける尾根部を長さ100 mmにわたって削除した。

供試流路に流入した気水混合物は、 $110 D$ の助走区間とその下流の測定区間を経て流路の出口に至る。測定区間では、気泡流を除き、気水混合のいかんにかかわらず整理した流れの得られることは予備実験で確

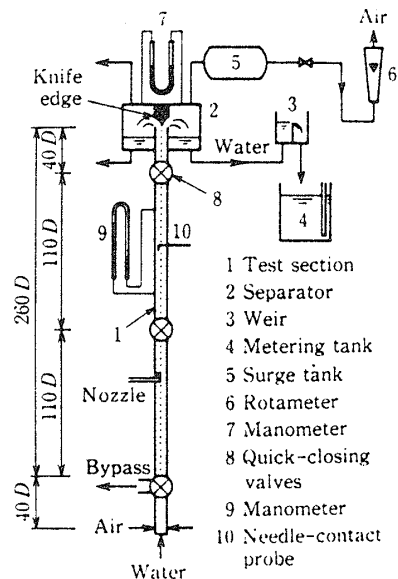
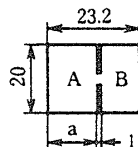


図2 実験装置

Rectangular subchannels

(Ch. A-B)



Semi-circular subchannels

(Ch. I-J)

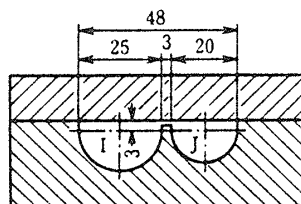


図1 供試流路の断面形状と寸法

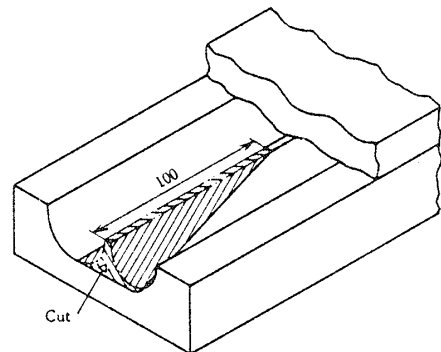


図3 I-J流路の入口部

認されている<sup>(7)</sup>。流路の出口に達した混合流体はナイフエッジにより副流路ごとに分割され、気水分離のうちロータメータと量水槽によって気水それぞれの流量を測定した。流量の測定精度は、空気が8%、水が4%程度であった。流量測定についてのさらに詳しい説明は前報<sup>(2)</sup>に述べてある。

測定区間において流動様相を観測した。点電極プローブによってスラグ間隔を求め、この値に基づいて流動様式の判定を行った。また、I-J流路においては1.8mの間隔で設けられた一対の急閉弁によって平均ボイド率を得た。この弁の回転円筒には流路と同一形状の通路が加工されており、開かれた状態において流れの障害とならぬように十分な注意が払われた。

3. 実験結果とその考察

3.1 副流路間げき部の流量配分への影響 図4は、A-B流路において間げき部の寸法を  $S_{AB}=2, 4, 6$  mm に変えて得られた副流路への流量配分を比較したもので、 $j_L=1.0$  m/s の場合の結果である。横軸は気体のみかけの速度、縦軸は副流路Aと総括流路のみかけの速度の比  $j_A/j$  である。 $S_{AB}$  の値によって記号を変え、かつ気相のデータを白抜き印、液相のそれを黒塗り印で表している。

図の示すところによれば、 $2 \leq S_{AB} \leq 6$  mm の範囲で流量配分は副流路間のすきま寸法の影響をほとんど受けない。 $j_L=0.3, 0.5, 2$  m/s の場合も流量配分にすきま寸法の影響は認められなかった。前報<sup>(2)</sup>でも述べたように、水流量一定のもとで空気流量を漸次増加させた場合にみられる流量配分の特徴は次のとおりである。気泡流では速度比  $j_A/j$  は単相流の値 ( $j_G=0$  における値) に近い。スラグ・チャーン流では  $j_G$  の増加に従って気相が断面積の大きい流路に偏り、液相は逆に小さい流路を流れやすくなるという偏流を示すようにな

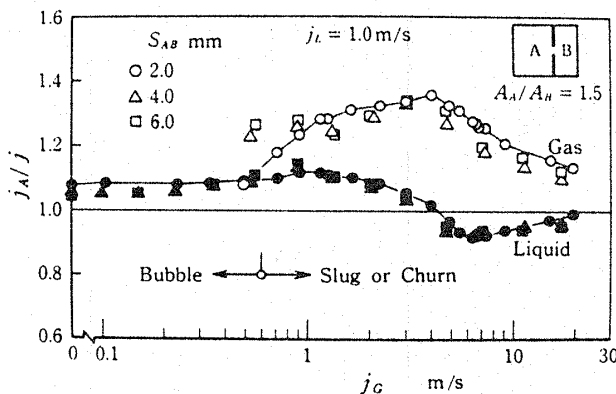


図4 気液の流量配分と間げき寸法との関係

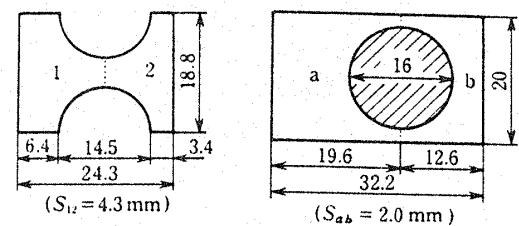
る。環状流に近づくとも偏流は弱くなり、気液両相の速度比は互いに近づく傾向がある。

3.2 他の研究者の流量配分と本実験値との比較

図5は本実験に類似の実験を行った Gonzalez ら<sup>(4)</sup>、Sterner ら<sup>(5)</sup>および世古口ら<sup>(6)</sup>の供試流路の断面形状を示したものである。Gonzalez らの流路は、間げき寸法が4.3mmで、副流路の断面積比は  $A_1/A_2=1.46$  である。Sterner らの4本ロッドの管群流路は、ロッド径とピッチの寸法を典型的な沸騰水形原子炉の2倍にとって製作されている。図中の副流路IとIIの面積比は  $A_I/A_{II}=1.52$  で、本供試流路の1.5に近い。間げき寸法は  $S_{II}=9.5$  mm である。世古口らの流路は  $A_a/A_b=1.92$  で、寸法  $S_{ab}=2.0$  mm の二つの間げきを有している。

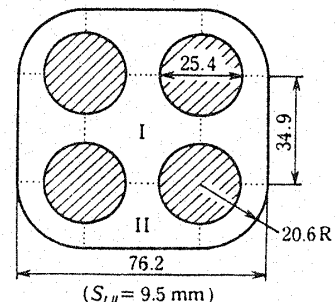
図6は、 $j_L=1.0$  m/s の場合に関して図5に示す各流路における流量配分の実験値と本供試流路の実験値とをみかけの流速比  $j_i/j$  で整理し、比較したものである (正確な  $j_L$  は実験者間に少しの差があり、 $0.93 \leq j_L \leq 1.08$  m/s の範囲にある)。線で連ねた実験値が本実験のA-BとI-J流路の結果である。Sterner らの液相のデータには  $j_G$  による変化が比較的小さいという事実が見られるものの、概して5種類の流路のデータは類似している。したがって、流路の形状と寸法の流速比  $j_i/j$  に及ぼす影響は小さいと結論できる。ただし、断面積の大なる側の副流路の番号が  $i$  である。

副流路間のすきまの寸法と流路の形状にかなり相違



(a) Gonzalez-Santalo & Griffith<sup>(4)</sup>

(c) Sekoguchi et al.<sup>(6)</sup>



(b) Sterner & Lahey<sup>(5)</sup>

図5 他の研究者<sup>(4)-(6)</sup>の流路の断面形状と寸法

があっても類似の流れが得られるという図4と6の事実は、観測を容易にするために簡単化された流路による実験に方法論的根拠を与えるものであろう。

**3.3 断面平均ボイド率** 副流路の断面平均ボイド率が単一流路の整理式によって気液の流量から推定できるものと仮定すると、本実験では流量配分が得られているので各副流路のボイド率を求めることができる。そこでI-J流路に関して、副流路のボイド率から次式により総括流路の断面平均ボイド率 $\bar{a}$ を計算し、これと急閉弁法による実験値との比較を行ってみる。

$$\bar{a} = (A_I \bar{a}_I + A_J \bar{a}_J) / A \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\bar{a}_I$ と $\bar{a}_J$ は副流路IとJの断面平均ボイド率であり、単一非円形流路において推定精度の高い<sup>(8)</sup> Smithの式<sup>(9)</sup>、式(2)を用いて求める。

$$\bar{a}_i = \left[ 1 + 0.4 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left( \frac{1}{x_i} - 1 \right) + 0.6 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left( \frac{1}{x_i} - 1 \right) \times \left\{ \frac{\frac{\rho_L}{\rho_G} + 0.4 \left( \frac{1}{x_i} - 1 \right)}{1 + 0.4 \left( \frac{1}{x_i} - 1 \right)} \right\}^{1/2} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

流量配分と式(1)、(2)から求めた総括流路のボイド率 $\bar{a}_{cal}$ と急閉弁法によって得られたそれ $\bar{a}_{exp}$ との比較結果を図7に示す。両者は $\pm 10\%$ で一致している。このことから、間接的ながら式(2)は副流路のボイド率を推定しうるものと考えられる。

図8は、上記の考え方に立って副流路のボイド率を式(2)より求めた結果の一例である。実験点はI-J流路において $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ 一定のもとで空気流量を漸次変えて得られたもので、横軸は $j_G$ である。破線は式(1)による総括流路のボイド率 $\bar{a}$ である。0.25 <  $\bar{a}$  < 0.7の領域で断面積の大きいI流路のボイド率がJ流路のそれより高く、また、 $\bar{a} = 0.5 \sim 0.6$ で副流路のボ

イド率の差は最大になっている。なお、図中のアルファベットA~Dは次節の流動様式の説明において用いる。

**3.4 流動様式**

(a) 流れの写真 図9はI-J流路で得られた典型的な流れの写真である。写真はいずれも $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ において観察された流れで、一对の写真の右側が副流路I、左側が副流路Jである。写真(A)から(D)へ向かって空気流量が増加しており、各流れの副流路IとJの断面平均ボイド率は図8にそれぞれA~Dで示してある(気液の流量配分データは図6にプロットされている)。写真(A)の気泡流の場合、IとJの気泡密度は同程度であり、両者の流動様相は類似している。写真(B)のスラグ・チェーン流になると副流路Iの気体スラグの長さは副流路Jのそれより大きく、空気の流れが断面積の大きい副流路Iへ偏っている様子が認められる。このような偏流現象は写真(C)付近で最も著しい。空気流量がさらに増して $j_G = 7.5 \text{ m/s}$ 程度になると、流れは写真(D)のようになり、IとJの間に様相の差異は認められない。

(b) 流動様式線図 図10は、断面積比が $A_A /$

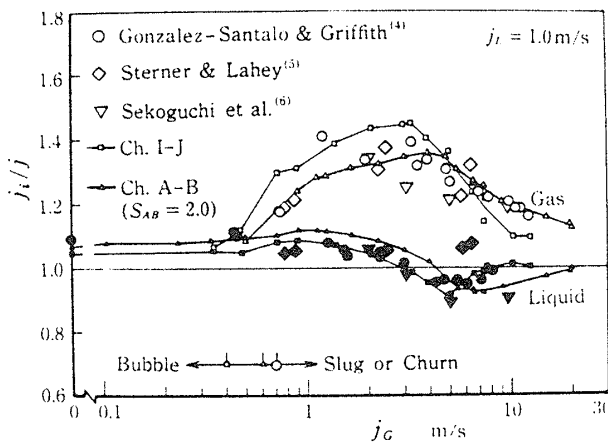


図6 気液の流量配分に関する他の研究者の実験値と本実験値との比較

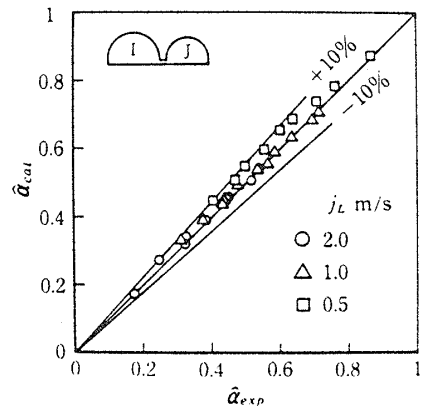


図7 断面平均ボイド率の実験値と計算値との比較

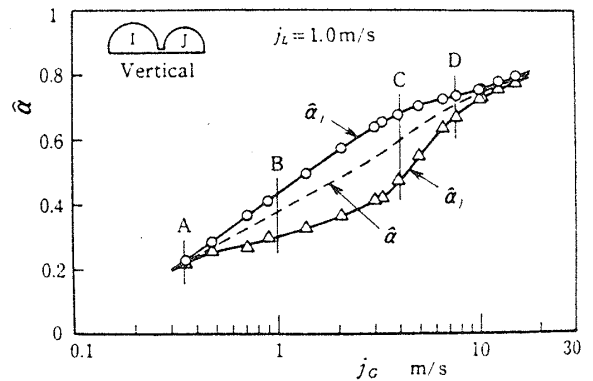
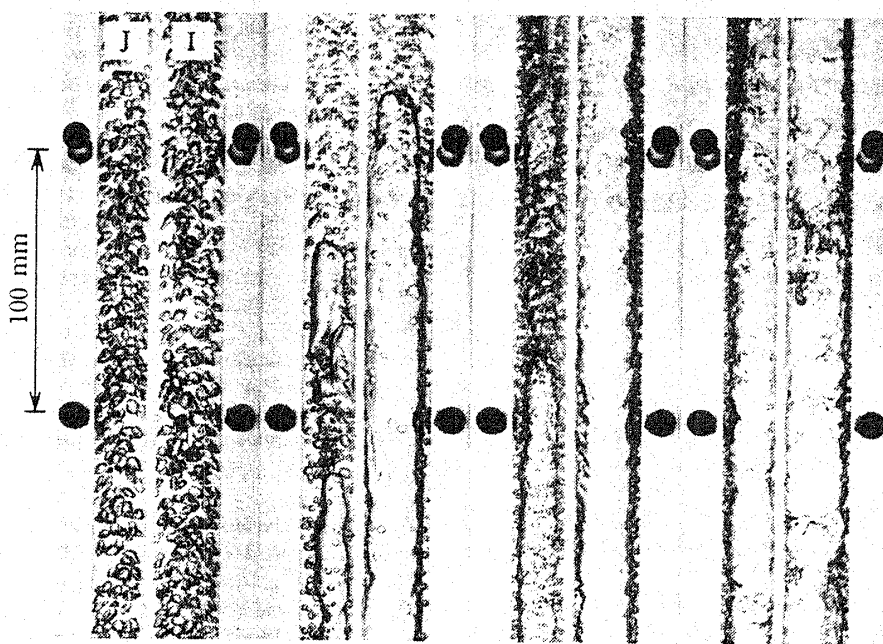


図8 副流路の断面平均ボイド率の例 (I-J流路)



(A)  $j_c=0.35$  m/s (B)  $j_c=1.0$  m/s (C)  $j_c=4.0$  m/s (D)  $j_c=7.5$  m/s

図9 I-J 流路内の流れの典型的な写真 ( $j_L=1.0$  m/s)

$A_B=2$  の A-B 流路における流動様式の遷移を内径 26 mm の円管のそれ<sup>(8)</sup>と比較したものである。座標軸としては副流路の気液のみかけの速度が選ばれている。実験点は副流路と流動様式で区別されている。すなわち、○印が副流路 A, △印が副流路 B を表し、左黒塗り印が気泡流, 白抜き印がスラグ・チャーン流, 右黒塗り印が環状流を示している。流動様式の判別は次のようにして行った。すなわち、点電極プローブの信号と気体スラグの上昇速度\*1から平均的なスラグ間隔  $l$  を求め、気泡流とスラグ・チャーン流の境界を  $l=100D$ , スラグ・チャーン流と環状流の境界を  $l=1000D$  と定めて<sup>(8)</sup>判別した。こうして判別された実験点は、一点鎖線で示した Taitel ら<sup>(10)</sup>の半理論的な境界線ならびに破線の 26 mm 円管の境界線とほぼ一致する。ただし、Taitel らのスラグ・チャーン流から環状流への遷移線は、 $j_{Li} > 0.5$  m/s では円管についても必ずしも妥当ではないように思われる (Taitel らの論文ではスラグ流とチャーン流の境界も提案されているので、図 10 には参考までにこれも描いてある)。

図は省略するが、 $A_A/A_B=1.5$  と 3 の A-B 流路および I-J 流路 ( $A_A/A_B=1.5$ ) に関する結果も図 10 とほとんど同じ境界線となった。したがって、副流路の気液の流量が求められれば、流動様式は流路の形状によらず単一円管の流動様式予測法によって予測は可能で

\*1 0.5 m 離れて設置された 2 本の点電極プローブの出力信号から決定した。

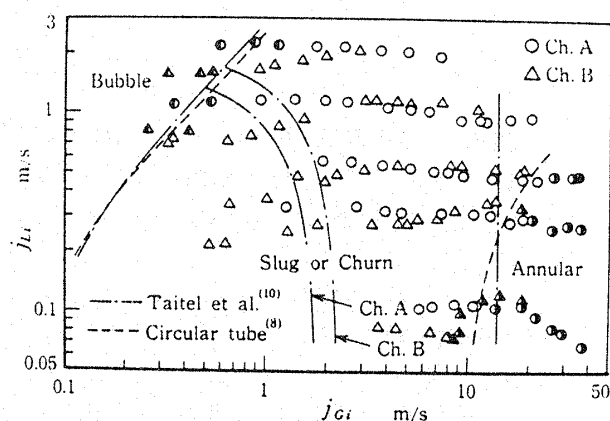


図 10 副流路の流動様式線図 (A-B 流路,  $A_A/A_B=2$ )

あるといえる。

#### 4. 結 論

非等断面積の二つの副流路を持つ複合流路を用いて気液二相流体の流動特性を調べ、次の知見を得た。

(1)  $D=12\sim 18$  mm の水力学相当直径をもつ副流路で構成される複合流路においては、間げき寸法が  $2\leq S\leq 6$  mm の範囲にあればその寸法の流量配分に及ぼす影響は無視できる程度に小さい。

(2) 他の研究者のものも含め 5 種類の複合流路の気液の流量配分データをみかけの流速比  $j_i/j$  (断面積の大なる側の副流路  $i$  と総括流路との比率) で整理し、比較した。その結果、総括流路の気液のみかけの流速

が同一の条件では,  $j_{ci}/j_c$  と  $j_{Li}/j_L$  の値はいずれの流路も同様となり, 流れは類似する。

(3) 総括流路および副流路のボイド率予測には Smith の式は適している。

(4) 気液の流量配分がわかれば, 各副流路の流動様式は流路の形状によらず単一円管の流動様式予測法によって予測が可能である。

終わりに, 有意義なご討論をいただいた九州大学 深野 徹教授に心からお礼申し上げる。

## 文 献

- (1) 例えば, Lahey, R. T. and Moody, F. J., *The thermal-hydraulics of a boiling water-nuclear reactor*, (1979), 122, The American Nuclear Society.
- (2) 佐田富・佐藤, 複合流路における気液二相流体の流動 (第1報, 副流路への気液流量配分), 機論, 52-473, B (昭61), 351.
- (3) Lahey, R. T., Shiralkar, B. S., Radcliffe, D. W. and Polomik, E. E., (Hetzroni, G. ほか編), *Out-of-pile sub-channel measurements in a nine-rod bundle for water at 1000 PSIA*, *Progress in Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, *Proc. Symp. on Two-Phase Flow Systems* (1972), 345, Pergamon Press.
- (4) Gonzalez-Santalo, J. M. and Griffith, P., *Two-Phase Flow Mixing in Rod Bundle Subchannels*, *ASME Winter Annual Meeting*, New York (1972-11), ASME Paper 72-WA/NE-19.
- (5) Sterner, R. W. and Lahey, Jr., R. T., *Air/Water Sub-channel Measurements of the Equilibrium Quality and Mass-Flux Distribution in a Rod Bundle*, *USDOE Report NUREG/CR-3373*, (1983).
- (6) 世古口・武石・森川・原田, 断面積の異なる二つのサブチャンネルにおける気液二相流動に関する研究, 機論, 50-454, B (昭59), 1574.
- (7) Sato, Y. and Sadatomi, M., *Data on two-phase gas-liquid flow distribution in multiple channels*, *Proc. 2nd Int. Conf. on MULTI-PHASE FLOW (BHRA)*, London, (1985-6), 27.
- (8) 佐田富・猿渡・佐藤, 垂直非円形流路内気液二相流の研究, 機論, 48-434, B (昭57), 1893.
- (9) Smith, S. L., *Void Fractions in Two-Phase Flow: A Correlation Based upon an Equal Velocity Head Model*, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 184-Pt. 1-36 (1969-70), 647.
- (10) Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E., *Modelling Flow Pattern Transitions for Steady upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes*, *AIChE J.*, 26-3 (1980), 345.

## 討 論

〔質問〕 寺坂 晴夫 (㈱東芝原子力技術研究所)  
複合流路内の気液二相流の流動特性に関し, 詳細な実験を行われ信頼性の高いデータを提供されていることに敬意を表する。

(1)  $j_{ci}/j_c$  の測定精度はいかほどか。図6における著者らの実験結果, Ch. I-J と Ch. A-B の差異は有意と考えるとよいのか。

(2) 著者らの実験では, 副流路間の流量配分が完了し十分に整定した所の流れ (換言すれば, 流路間のクロスフローがほとんどない実質的に独立した二つの流路を流れる流れ) を測定しているために, すきま寸法の影響がなく, また各副流路のボイド率や流動様式が単一流路における式あるいは線図で予測できたのではないかと思われるがいかがか。

〔回答〕 (1) 2・2節に述べてあるように空気流量の測定精度は8%程度であるから,  $j_{ci}/j_c$  の測定誤差は最大16%と見積られる。したがって, Ch. I-J と Ch. A-B の差異は必ずしも有意とはいえない。

(2) 示された解釈のとおりであろうと考えている。したがって, 乱流混合の各副流路のボイド率や流動様式への影響は小さいといえる。

〔質問〕 小堀 哲 雄 (動力炉・核燃料開発事業団)  
原子炉の燃料体の流動現象を考えていくうえで貴重

な知見であると思う。一, 二質問させていただきたい。

(1) スラグ・チャーン流領域だけが偏流を示すところがあるが, どういう流体のメカニズムによると考えるのか。この流動様式では液相が平均化され, 気相はますます偏っている傾向を示しており, しかも流路間げきの影響を受けないのはなぜか。

(2) 著者らの CHF の実験では流路間げきを2~0.6 mm の範囲で変化させると1.6 mm 以下で急に CHF (限界熱流束) が低下する傾向を示すが, このように狭くなった場合には副流路相互の流動はどのようなになると考えたらいいか。

〔回答〕 (1) 気泡流や環状流に比べスラグ・チャーン流において著しい偏流が認められることから, 流れの非均質性の程度が偏流の度合に関係するものと考えている。図4と図6の縦軸は見掛けの速度であり, 線速度ではない。液相の線速度,  $u_{Li} = j_{Li}/(1 - \alpha_i)$ , はスラグ・チャーン流においても必ずしも平均化してはいない。

流路間げきの影響については寺坂氏の質問(2)の回答を参考願いたい。

(2) 小堀氏らの CHF 実験とは模擬燃料集合体を用いたもの(付1)を指しておられると思うが, これとの比較であればスペーサの影響を考えねばならない。す

なわち、間げき寸法が小さくなるとスパーサ下流の流れの再配分過程(クロスフロー)は次のスパーサの断面近くまで継続し、冷却材の復帰が間に合わず CHF に至ると推測される。このような場合に対しては、クロスフローのない発達した流れに関する本実験のデータでは解釈しにくい現象が起こっている可能性があり、今後の調査を要する。

〔質問〕 福田 研二 (九州大学工学部)

(1) (概要集) 図3において面積比の有意な影響は現れているといえるだろうか。

(2) 燃料集合体のような複雑な体系での流れでも、ドリフト速度理論がかなり良く適用できることが指摘されているが、Smithの式以外にも、ドリフト速度相関式をご検討されたか。

(3) 実際のサブチャンネル解析に対してこの結果がどのように反映されるのか。

〔回答〕 (1) 概要集図3 (論文図6) のデータに対応する流路の面積比は、本論文に示してあるように、世古口らのものは  $A_a/A_b=1.92$  で、他はおおよそ1.5である。寺坂氏への回答(1)に示したように、測定精度を考慮すると Ch. I-J と Ch. A-B の差異は有意と

はいえない。図3で比較されている供試流路の幾何学的寸法と形状はそれぞれ相違するが、 $j_o$  と  $j_L$  が同じであれば流量配分を  $j_i/j_j$  で整理すると類似の結果が得られる。これが図3から導かれる一つの結論である。

(2) Zuber と Findlay (付2) のドリフト速度の式を利用して副流路のポイド率を求め、本論文図7の Smith の式の場合と同様な実験値との比較も行っている。これによると、両者の一致は  $-10 \sim +15\%$  であり、Smith の式の場合よりもわずかに予測誤差が大きかった。

(3) 素性の明らかなデータが得られたので、このデータを説明できるような運動量方程式の構成が次の手続きであると考えている。さらにその次の段階ではスパーサによる流れの再配分過程を記述しなければならないが、そこでは発達した流れの流量配分値との差を起動力とするクロスフローを生じると考えられるから、この流動過程の記述の研究成果を反映させていきたい。

(付1) 小堀, 機誌, 78-682 (昭50), 811.

(付2) Zuber, N. and Findlay, J. A., *Trans. ASME, Ser. C*, 87 (1965), 453.