複合流路における気液二相流体の流動*

(第4報, 三つの副流路を有する流路の流量配分データ)

佐藤 泰生^{*1}, 佐田 富道雄^{*1}
猿渡 眞一^{*2}, 藤末 泰三^{*3}

Two-Phase Flow in Multiple Channels

(4th Report, Data on Flow Distribution in Three-Subchannel Test Section)

Yoshifusa SATO, Michio SADATOMI,
Shinichi SARUWATARI, and Taizo FUJISUE

An experiment was performed for two-phase flow of air-water mixtures through a multiple channel consisting of three subchannels. Each subchannel was interconnected to the other two by a gap clearance, and the respective cross-sectional area of each subchannel was different, with equal area ratio of 1.5. The purpose was to provide such data on the flow distributions so as to be applicable for the improvement of subchannel analysis. Data on the fully developed flow distributions of both phases are presented and compared with those obtained from other multiple channels. A practical method to calculate the flow distributions in a multiple channel is proposed also in this paper.

Key Words: Multiphase Flow, Tube Bundle, Subchannel Analysis, Flow Distribution, Fully Developed Flow, Void Drift

1. 緒 言

流路の断面が複雑ゆえ、これを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称している。工業上では、複合流路の気液二相流に遭遇することが少なくない。複雑な体系の例としては、原子炉燃料集合体における冷却材の流れや、蒸気発生装置の管外流体の流れなどがあげられる。

サブチャンネル解析が管群流路の局所の流動予測に有効な手段であることは広く認められてきている⁽¹⁾。しかるに、二相流に関する限り、その予測精度は十分とは言えない状況にある。例えば「気相は断面積の大きい、より速度の高い副流路を流れやすく、液相は面積の小さい、速度の低い副流路に集まる傾向がある」という偏流(ボイド・ドリフト)の起こることは以前から知られているが⁽²⁾⁽³⁾、これの予測可能なサブチャンネル解析モデルはまだ提案されていない。予測精度の向上には、複合流路における気液二相流のメカニズムを把握する必要がある。

この一連の研究においては、サブチャンネル解析法の構築に有用な情報を提供することを目的として、比較的簡単な流路によって十分な精度の実験データを収集し、流れと流動条件との因果関係を調べている。これまでに、二つの副流路から成る種々の形状の複合流路に関して流量配分、ボイド率分布、流動様式等の実験データを提示し⁽⁴⁾⁽⁵⁾、さらに、二つの副流路の流動を予測するモデルの検討⁽⁶⁾を行ってきた。このような2副流路を用いる実験的研究は他の研究者によっても行われている⁽⁷⁾。これらを比較してみると、二つの副流路からなる複合流路の発達した流れには強い類似性のあることがわかった⁽⁵⁾。しかるに、このような知見がさらに副流路数の多い複合流路に対しても適用できるのかどうか、まだ不明である。本報では、この点を三つの副流路からなる複合流路によって実験的に調べ、考察する。

記 号

A : 流路断面積 m^2

C : 形状係数⁽⁸⁾

D : 水力学相当径 m

j : 容積流束 $= Q/A$ m/s

$\Delta P/\Delta z$: 圧力こう配 Pa/m

* 昭和63年7月31日 九州支部鹿児島地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年10月24日。

^{*1} 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1)。

^{*2} 正員、有明工業高等専門学校 (〒836 大牟田市東萩尾町 150)。

^{*3} 正員、日商岩井(株) (〒107 東京都港区赤坂 2-4-5)。

Q : 容積流量 m^3/s

S : 間げき寸法 m

u : 平均速度 m/s

α : ボイド率

添字

$I, J, I', J', K', i, j, 1, 2, 3$: 副流路番号

副流路の添字なし: すべての副流路を含む総括流路

ij : 副流路 i と j を一括した流路

G : 気相

L : 液相

2. 実験

2.1 供試流路 副流路の数が増えるに従って副流路の構成は多様になる。そして、副流路の構成が複雑になるほど、流量配分の測定精度を高く維持することが困難になってくる。そこで、本実験では十分な精度の流量配分データを得るために副流路の数を3個とし、それらがすき間を通して両隣りと連絡することを条件に入れて図1の断面の流路を選んだ。

本実験に用いた流路の詳細は次のとおりである (図1)。内径33mmのアクリル樹脂管の中心に直径11mmの真ちゅう棒を置き、この棒に3枚の真ちゅうフィンを軸に沿って植込み、扇形の断面をもつ三つの副流路をつくった。ここでは、便宜上、これらの副流路を断面の大きいほうから I', J', K' と呼び、全体を「 $I'-J'-K'$ 流路」と呼ぶことにする。フィンはいずれも厚さ2mm、高さ10mmで、その先端と管壁との間に1mmの間げきをもたせた。この間げきを維持するために、管軸に沿って0.5m間隔でスペーサ (幅2mm、

図1 供試流路の断面形状

図2 前報の実験に用いた流路の断面形状⁽⁴⁾⁽⁵⁾

厚さ1mm、長さ4mmの半円柱形真ちゅう片) をそれぞれのフィンの先端に取付けた。副流路の断面積比を $A_{I'}/A_{J'}=A_{J'}/A_{K'}=1.5$ とするために、フィンの間の角度を図のように163度、114度および83度とした。

図2の流路は前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾の実験に用いたものの一つで、「 $I-J$ 流路」と称しており、二つの半円形の副流路 I と J から成っている。実験データの直接的な比較のために、本実験の「 $I'-J'-K'$ 流路」の断面積はこの「 $I-J$ 流路」のそれぞれに対応している。すなわち、 $A_{I'}=A_I$ 、 $A_{J'}=A_J$ である。「 $I'-J'-K'$ 流路」と「 $I-J$ 流路」の断面積、水力学相当径、壁面摩擦に関する層流と乱流それぞれの形状係数⁽⁸⁾および間げき寸法は表1に各副流路ならびに総括流路についてまとめられている。

2.2 実験方法 常温、大気圧近傍の空気と水を作動流体として、その混合物を垂直な供試流路に流し、発達した流れにおける三つの副流路への気液流量配分を求めた。実験方法は前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾と同様である。

流路の下端に混合部を設置した。内径33mmの円管の壁に96個の穴をあけ (8列×12個/列、千鳥配列)、これを通して空気を管内の水の流れに導入した。これらの空気穴の径は、 $j_c \leq 2 \text{ m/s}$ の小流量の場合には0.3mm、 $j_c \geq 2 \text{ m/s}$ の比較的大きな流量の場合には2mmであった。気水二相流体は、まず0.64mの長さのフィンのない同心二重円管部 (33mmID, 11mmOD) を上昇し、その後、長さ5m (350D) の供試管路を流れた。

供試流路の出口に達した二相流体は、ナイフエッジにより I', J' および K' の三つの副流路に分割され、それぞれの気水分離タンクに流出した。ナイフエッジの設置された断面において等速流出を実現するために、この断面における各副流路の静圧を±1mm水柱の範囲で一致させた。空気と水は気水分離タンクを経たのち、それぞれの流量をロータメータと量水槽により測定した。空気流量の測定精度は6%以内、水流量のそれは2%以内と推定された。

表1 流路の断面積、水力学相当径、形状係数および間げき寸法

test section	Ch.	A mm^2	D mm	$C_l^{(8)}$	$C_t^{(8)}$	S_{ij} mm
Ch. $I'-J'-K'$	I'	324	15.7	67.0	0.319	1.0
	J'	221	13.8	62.2	0.314	
	K'	155	11.9	59.1	0.310	
	whole	700	14.1	62.0	0.312	
Ch. $I-J$ ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	I	317	17.7	59.8	0.311	1.1
	J	221	14.8	59.1	0.310	
	whole	538	16.4	58.0	0.308	

3. 実験結果と考察

3.1 気液の流量配分 発達した流動領域における流量配分の実験結果を図3に示す。総括流路の液体容積流束を $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ に保ち、気相流量を漸次変えて得られた実験値がプロットされている。縦軸は総流量 Q に対する各副流路の流量 Q_i の比、横軸は総括流路における気体の容積流束 j_G である。白抜きの実験点は気相、黒塗りは液相を示し、一点鎖線は単相乱流に対する流量配分比の計算値⁽⁹⁾で、二相混合物が均質流体であれば、この配分比になるはずの値である。

気相流量を零から漸次増加させてゆくと、流量配分には次のような傾向がみられる。液単相流 ($j_G = 0$) のデータは $\pm 2\%$ 以内で計算値に一致している。気相の体積流束が $j_G \leq 0.7 \text{ m/s}$ の範囲にあって、流れが気泡流の場合には、気液の流量配分は均質流の値に近い。 j_G が 0.7 m/s を越えて流動様式がスラグ・チャーン流になると、気液の流量配分は均質流のそれからずれを生じ、いわゆる偏流が起こる。すなわち、断面積の大きい副流路 I' の気体流量が増大し、このため副流路 J' と K' の気体流量が減少する。気体流量の偏りは $j_G = 3 \sim 4 \text{ m/s}$ 付近において顕著で、これを越えてさらに j_G が大きくなると、流量配分は均質流の値に近づいていく。液相は気相の偏りの影響を受けて副流路 I' の流量が減り、副流路 K' の流量が増える。ただし、液相流量の偏りの程度は気相流量のそれに比べて小さい。

3.2 隣りの副流路との流量配分関係 図4は「I'-J'-K' 流路」の I'-J' 部分に注目し、ここの流れと第1報⁽⁴⁾に報告されている I-J 流路 (図2) の流れを比較したものである。 $j_{LJ} = 1.0 \text{ m/s}$ (一定) のもとで得られている I-J 流路の流量配分データと比較するために、「I'-J'-K' 流路」においても I'-J' 部分の水の体積流束が $j_{LJ'} = (Q_{LJ'} + Q_{LJ}) / (A_{J'} + A_J) = 1.0 \text{ m/s}$

となるように調整し、副流路 I' と J' への気液流量配分を測定した。図5は、上記と同じ考えのもとに「I'-J'-K' 流路」の J'-K' 部分に注目して流量配分のデータを取り、I'-J' 部分のそれと比較したものである。2.1節で述べたように、「I'-J'-K' 流路」と「I-J 流路」の副流路の面積に関しては $A_{J'} = A_J$, $A_{J'} = A_J$ および $A_{J'}/A_{J'} = A_{J'}/A_{K'} = A_J/A_J = 1.5$ の関係がある。

図4と5の実験データから次の事柄がわかる。 $j_G > 5 \text{ m/s}$ の範囲において、気相の流量配分は比較に供されている二つの流路でよく一致している。 $j_G < 5 \text{ m/s}$ では二つの流路で気相の流量配分に多少の差はみられるが、測定誤差を考慮するとその差は有意と認めるほどではなく、両者の値はほぼ同じとみてよい。さらに、液相の流量配分比は j_G の実験範囲全般にわたって二つの流路でよい一致を示している。

上に述べた実験的事実は、複合流路における発達した流れの流量配分に関して次の示唆を与えている。ある複合流路の中に隣り合う副流路二つを考える。別の複合流路において、この二つの副流路の断面積比と同じ断面積比の関係にある二つの隣接副流路を考える。これら独立した二組の隣接副流路において気液両相の容積流束が互いに等しければ、隣り合う副流路の流量

図4 副流路 I'-J' 部と I-J 流路の流量配分の比較

図3 各副流路への気液の流量配分比 ($j_L = 1.0 \text{ m/s}$)

図5 副流路 I'-J' 部と J'-K' 部の流量配分の比較

配分比は両者で同じになる。考える複合流路の一つは二つの副流路のみからなるものでもよい(ただし、この段落の記述はどのような副流路配列の流路に対しても普遍的に正しいとは言えない。例外とすべき流路の例を付録に示す)。

3・3 流量配分計算 前節で述べた知見を、三つの副流路からなる複合流路の流量配分予測に反映させてみる。その基本的な点は、複合流路の中で隣接している二つの副流路の間の流量関係はその二つが他から独立している場合と変わらない、ということである。これに基づいて、2副流路の情報を、必要があれば、利用する。

条件式をまとめて書くと次の四つである。

連続の式(気相と液相):

$$j_G A = \sum j_{Gi} A_i \dots\dots\dots (1)$$

$$j_L A = \sum j_{Li} A_i \dots\dots\dots (2)$$

等圧力こう配の条件式⁽⁶⁾:

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{\Delta P_i}{\Delta z}, \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots (3)$$

気相の流量配分⁽⁶⁾:

$$\frac{j_{Gi}}{j_{Gj}} = \frac{u_i}{u_j} + 200 \left(\frac{A_i}{A_j} \right)^2 \left(1 - \frac{A_j}{A_i} \right) a_{ij}^4 (1 - a_{ij})^3 \dots\dots\dots (4)$$

式(4)は隣接する副流路*i*と*j*($A_i \geq A_j$)における気相

の流量配分を求める式で、2副流路の情報をもとに前報⁽⁶⁾で提案したものである。ただし、 $A_j/A_i=1$ では偏流は生じしないから、この場合に式(4)の右辺第2項が零とならなければならないことを考慮して、第2項に少し修正が加えられている。

図6に計算過程の概要を示す。これは三つの副流路からなる複合流路に対する例で、手順は次のとおりである。

- (1) 気体と液体の総流量, 流路の幾何学的パラメータ, 流体の物性を入力する。
- (2) 単相流の場合の流速分布 u_i/u を計算する⁽⁹⁾。
- (3) 流路を, 例えば図のように, 副流路1と他の部分(破線部)とに分割する。
- (4) 副流路1の容積流速(j_{G1} と j_{L1})を仮定し, これに対応する圧力こう配 $\Delta P_1/\Delta z$ を計算する。
- (5) 図中の破線部の流量を連続の式から求める。
- (6) 破線部をさらに副流路2と3に分割する。そして, この二つについて連続の条件, 等圧力こう配条件($\Delta P_2/\Delta z = \Delta P_3/\Delta z$), および式(4)の気相の流量配分式を満足するような気液の容積流速を求める⁽⁶⁾。
- (7) (4)で求めた $\Delta P_1/\Delta z$ と(6)で求めた $\Delta P_2/\Delta z$ ($=\Delta P_3/\Delta z$) を比較する。両者が一致するまで(4)

図6 流量配分計算の流れ図(3副流路の例)

(a) 本実験

(b) Laheyの実験

図7 流量配分の計算値と実験値の比較

～(6)の過程の繰返し計算を行い、流量配分を決定する。

本研究の「I'-J'-K' 流路」の実験と Sterner-Lahey の「4本ロッド流路」の実験⁽¹⁰⁾に上述の計算法を適用し、流量配分の推定値を得た。この推定値と実験値の比較を図7(a), (b)に示す。推定値の示す傾向は実験値のそれに良く合っており、計算の基本的考え方は妥当であるといえる。ただし、詳細にみると $j_c > 5 \text{ m/s}$ の範囲における予測精度は必ずしも十分ではない。予測精度を上げるためには、式(4)の改良ないしはこれに代わる基礎式の構成が必要である。さらに、それを可能にするためには精度の確保された流量配分データ、特に副流路数の多い流路におけるデータの収集が望まれる。

4. 結 言

(1) 3個の副流路を有し、それらが互いにすき間で通じている垂直な複合流路において二相流の流量配分の実験値を得た。

(2) 複合流路において隣接する二つの副流路の流量配分関係は、二つの副流路のみからなる単純な流路における流量配分関係に類似する。ただし、二つの系の流れが類似する条件は、副流路の面積比が等しいこと、および二つの副流路を一括したときの気液の容積流束が等しいことである。

$D = D_J = 14.8 \text{ mm}$, $S_{JJ} = 1.3 \text{ mm}$

図8 J-J-J 流路の断面形状

図9 流量配分 (J-J-J 流路)

(3) 本研究で得た知見をもとに、複合流路の流量配分を求める計算法を提示した。これによる推定値を本実験値のほか Sterner-Lahey の実験値と比較した結果、計算の基本的な方法の妥当性が確かめられた。

終わりに、実験に協力された当時熊本大学学生、田中政隆氏と山川 規氏に心からお礼申し上げる。

付録 副流路の配列に起因する偏流の例

隣接する副流路の断面積が異なれば、偏流が生じる。本文で述べた偏流はこの種のものである。しかるに、副流路の断面積は同じでも、それらの配列のいかんによって偏流の起こりうるものが別の実験で観察されたので、その実験事実を以下に簡単に説明する。

図8に用いた流路の断面を示す。断面積の等しい三つの副流路が一行に並んでおり、両側の副流路どうしは直接には連絡していない。副流路の形状は、流れの観察の容易さと流路製作の容易さから選んだ。図2のI-J 流路における副流路Jと同一の寸法・形状であるから、J-J-J 流路と呼ぶ。

(a) $j_c = 0.35 \text{ m/s}$

(b) $j_c = 1.0 \text{ m/s}$

図10 J-J-J 流路内の代表的な流れの写真 ($j_L = 1.0 \text{ m/s}$)

図9は、 $j_L=1.0\text{ m/s}$ の一定のもとで空気流量を変化させて得たJ-J-J流路の発達した流れの流量配分比である。データは本文の2・2節と同様な方法によって得た。図の左端の $j_c=0$ に示した水単相流における値は $Q_i/Q=1/3$ であり、中央と両端の副流路における流量が等しい。 $j_c<0.5\text{ m/s}$ で流れが気泡流の場合には、図10(a)の流動写真からわかるように各副流路の気泡の寸法と密度は類似して偏流は観察されず、流量配分比は気液いずれも $Q_i/Q\cong 1/3$ となる。しかるに、 $j_c>0.5\text{ m/s}$ のスラグ・チャーン流では、気体は中央の流路へ、液体は両端の流路へ偏る傾向がある〔図10(b)参照〕。気体の偏流は $j_c\cong 2\text{ m/s}$ で最も顕著であり、中央の副流路は両端の約3倍の気体流量となっている。もし両端の副流路が直接連絡していれば、このような偏流は現れないはずであるから、この実験で観察された偏流は副流路の配列に起因するものであり、副流路面積の差異によるものとは異なる性質の偏流である。

J-J-J流路の類の複合流路が工業上で使われる例は稀であり、その意味においては、これは特殊な流路と見るべきかも知れない。しかしながら、副流路の断面積が同じであっても、二相流では副流路の配列いかんで偏流の起こりうることは注意しておく必要がある。

文 献

- (1) 例えば、Lahey, Jr., R. T. and Moody, F. J., *The thermal-hydraulics of boiling water nuclear reactor*, (1979), 122, The American Nuclear Society.
- (2) Lahey, Jr., R. T. and Schraub, F. A., Mixing, flow regime and void fraction for two-phase flow in rod bundles, *Proc. Winter Annual Meeting, ASME, Los Angeles*, (1969), 1.
- (3) Bergles, A. E., Two-phase flow structure observations for high pressure water in a rod bundle, 文献(2)の47ページ.
- (4) 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.
- (5) 佐田富・佐藤, 複合流路における気液二相流体の流動 (第2報, 流動特性), 機論, 53-487, B (昭62), 731.
- (6) 佐田富・佐藤・深野, 複合流路における気液二相流体の流動 (第3報, 発達した流れの流量配分計算), 文献(5)の738ページ.
- (7) Gonzalez-Santalo, J. M. and Griffith, P., Two-phase flow mixing in rod bundle subchannels, *ASME Winter Annual Meeting, New York*, (1972), Paper 72-WA/NE-19.
- (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) 佐藤・佐田富・峯, 管群に平行な流れにおける流量配分と圧力損失, 機論, 49-442, B (昭58), 1135.
- (10) Sterner, R. W. and Lahey, Jr., R. T., Air/water subchannel measurements of the equilibrium quality and mass-flux distribution in a rod bundle, *US DOE Report, NUREG/CR-3373*, (1983).

討 論

〔質問〕 山崎 堯 右〔高知大学農学部〕

副流路の数の多い場合の流量配分予測を提示されたことに敬意を表す。

(1) 実用を前提とすれば、流路入口部でのやむをえない偏流条件が下流の配分に影響してくる問題もあるだろうと思われる。こういった問題にここでの計算法は拡張できないか。

(2) 例えばスラグ流のときに生じる脈圧によって各流路間の瞬間的差圧変動が生じ、管軸方向に各流路間のフローパターンの干渉はなかったか。特に j_c の大きいところでの非定常性が観測データに与える影響はどうか。

(3) 実用上への適応性を考えると、各流路間のheat balanceを考慮した圧力損失の均合による流量配分ということになると思われる。そうすると管壁寸法や配置が重要な因子となり、等価流路の考えに限度があるように考えられる。いかがお考えか。

〔回答〕 (1) 非整定(未発達)の状況からの流れの再配分過程を予測することがサブチャネル解析の課題の一つである。そのモデルが完成されていないので、整定(発達)した流れの情報を得るべくデータを収集してきた。このことは第1報⁽⁴⁾に述べてある。この質問(1)は次の研究課題であると認識している。

(2) 間げきによって副流路は通じているから、流れの干渉は当然ある。本実験では整定した流動領域の時間平均的流量を求めており、干渉の結果はデータに含まれている。整定した二相流は定常時系列現象と考えられる。

(3) 本研究は、ご質問の「管壁寸法(副流路寸法であると思う)や配置が重要な因子となる」ことを実験的に確かめ、結論(2)を得たものである。著者らが入手しうる範囲のデータはこの結論を支持している(図7)。これの適用限界は推測では何とも言えない。