

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)

佐田富道雄**, 佐藤泰生**

Two-Phase Flow in Multiple Channels
(1st Report, Flow Distribution to Subchannels)

by Michio SADATOMI and Yosifusa SATO

Fully developed two-phase air-water flows through a multiple channel consisting of two interconnected subchannels were investigated. The purpose was to obtain more reliable data on the flow distributions when the cross-sectional area of the subchannels is different. Five test sections were used. The three of them were rectangular ones aligned vertically, and their area ratio of the subchannels were 1.5, 2 and 3. The two others had the semi-circular subchannels of the area ratio 1.5; one was arranged horizontally while the other vertically. Void drift phenomena have been observed not only in vertical flows but also in horizontal flows. A more prominent void drift took place in a slug flow while less pronounced in a bubble flow and an annular flow. It was seen that the channel geometry has very little effects on the flow distributions and the flow pattern transitions. This supports the so-called one dimensional subchannel analysis in such a multiple channel.

Key Words: Multiphase Flow, Tube Bundle, Subchannel, Flow Distribution, 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称する。軽水炉や蒸気発生器の管外流路がこの例としてあげられる。このような複合流路においては、しばしば局所のポイド率や伝熱状態の予測が要求される。したがって、複合流路における各副流路への流れの配分予測は重要である。本報はこの副流路への流量配分問題のうち、最も基本的な発達した流れの配分をとり上げる。実際の管外流路の流れにおいては、スパーサなどの存在のため、あるいは局所の熱出力が異なるため、発達した流れの領域は必ずしも大きくはないかもしれない。しかしながら、このような局所の流動変化およびその後の流れの再配分過程を適切に評価するためにも、発達した流れの知見は必要と考えられる⁽¹⁾。

発達した单相流の流量配分は、連続と等圧力こう配の二つの条件式を基礎式として予測され、その精度は工業上十分な程度まで向上している⁽²⁾。さらに、文献

(2)はこの流量配分は複合流路全体の流れの散逸エネルギーが最小となるように起こるとも示している。これに対し、気液二相流の流量配分予測モデルはまだ検討段階にあるといえる^{(3)~(6)}。その理由としては、

(1) 高精度、広範囲の実験データが不足のためモデルの検証が困難であること、

(2) 「気相は断面積の大きい、より速度の大きい管群コア部の副流路を流れやすく、液相は面積が小さく、速度の小さい副流路を流動しやすい」という、偏流現象の観察は以前から報告されているが〔例えば、文献(7)~(9)〕、そのメカニズムが不明であること、

(3) 流量配分予測に必要な基礎式として、連続と等圧力こう配の二つの条件式に加えてさらにもう一つの条件式が必要であるが、この候補として考えられる二相流の散逸エネルギー式が未確定であること、が考えられる。

本研究は、上述のような背景から、発達した気液二相流の流量配分に関する精度の高い実験データを得ること、および流路の姿勢(垂直と水平)、副流路断面の形状と寸法の偏流に及ぼす影響を把握すること、を目的としている。実験は、データの精度を確保するため、二つの副流路からなる複合流路によって行われた。

* 昭和59年5月30日 第21回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和59年10月1日。

** 正員, 熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。

記号

- A: 流路断面積 m^2
- D: 水力学相当直径 m
- j: みかけの速度 m/s
- $\Delta P/\Delta z$: 圧力こう配 Pa/m
- Re : レイノルズ数
- S: 間げき寸法 m
- u: 平均速度 m/s
- W': 乱流混合量 $kg/(m \cdot s)$
- Φ : 散逸エネルギー W/m

添字

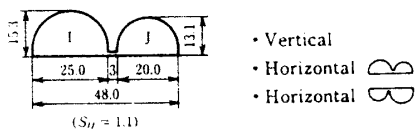
- A, B, I, J, i, k: 副流路番号
- 副流路の添字なし: すべての副流路を含む総括流路
- G: 気相あるいは気体の単相流
- L: 液相あるいは液体の単相流

2. 実験

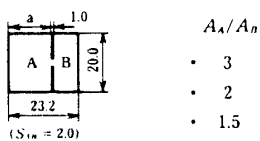
2.1 供試流路 テストセクションの断面形状および種類を図1に示す。構成副流路は二つである。いずれも滑らかな内壁をもち、外部から流れを観察できるように透明なアクリル樹脂でつくられている。流路は、番号IとJの二つの半円形の副流路をもつI-J流路と長方形2副流路のA-B流路の、2種類である。工作のしやすさ、観察の容易さ、の2点からこのような形状の流路とした。

I-J流路は、副流路の断面積比 A_I/A_J が約1.5である。この流路によって垂直上昇流と水平流の実験を行った。水平流路としては、 $S_{IJ}=1.1$ mmの間げき部が上にある場合と下にある場合の二とおりが考えられるので、その両方について実験した。この水平流の実験目的は次の二つの疑問によるものである。

(1) 垂直流で報告されている偏流が水平流でも起こりうるか。



Semi-circular subchannels (Ch. I-J): $A_I/A_J = 1.5$



Rectangular subchannels (Ch. A-B): Vertical

図1 供試流路の断面形状と種類

(2) 水平の二つの姿勢の流路では、同一気液流量条件においても重力のため断面内の相分布が異なりと予想されるが、これと流量配分の関係はどうなるか。

A-B流路では垂直上昇流についてのみ実験した。二つの副流路AとBの間げき寸法を $S_{AB}=2.0$ mmに保ったまま、1.0 mm厚の黄銅仕切フィンの位置aを変えることにより $A_A/A_B=3, 2, 1.5$ の3本の流路をつくった。これによって、流量配分に及ぼす副流路面積比の影響を調べた。また、このうちの $A_A/A_B=1.5$ の流路のデータと垂直I-J流路のデータの比較から、流路断面形状と流量配分の関係を調べた。

以上6本の供試流路と断面積Aと水力学相当直径Dに関しては、副流路および二つの副流路を含む総括流路の値が表1に示されている。

なお、間げき部の寸法は前述のように $S_{IJ}=1.1$ mm, $S_{AB}=2.0$ mmである。この寸法がさらに大きくなれば、この部分の流れの記述が難しくなり、ひいては副流路分割を困難にするかもしれない。そこで、本実験では簡単化された流路を得る目的から、比較的小さめの間げき寸法を選んだ。

2.2 実験方法 実験装置の概略を図2に示す。供試流路①の全長は、表1に示した総括流路の水力学相当直径Dの値に応じてI-J流路とA-B流路と異なるが、いずれも $262D$ 以上である。流路の下部から導入された流量を測定された空気と水はまず $37D$ の混合区間を流動する。この区間は下流の二つの副流路へ気液が自由に配分されるようになっている。その後、流れは $111D$ 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。なお、I-J水平流路の場合には、助走区間の長さを垂直の場合の約2倍とした。このため、水平流でも助走区間で流れは十分発達すると判断され

表1 供試流路の断面積と水力学相当直径

Cross Section	Ch.	A mm^2	D mm	Comments
	I	317	17.7	$A_I/A_J = 1.5$
	J	221	14.8	
	Whole	538	16.4	
	A	335	18.5	$A_A/A_B = 3$
	B	114	9.1	
	Whole	449	14.6	
	A	297	17.3	2
	B	150	11.1	
Whole	447	14.6		
	A	269	16.4	1.5
	B	177	12.5	
	Whole	446	14.6	

た。

供試流路の出口に達した気液二相流体は、ナイフエッジにより二つの副流路に分割され、そらせ板に沿ってそれぞれの気水分離タンク②へ流出した。流路出口における流体の等速排出を実現するため、後述のごとく二つの気水分離タンクがほぼ同じ圧力になるよう注意を払った。ここで分離された水は、せき③を経て、量水槽④により流量を測定された。せきは空気の一部が気水分離タンクの下部から水といっしょに逃げないための水封である。他方、空気はサージタンク⑤と圧力調整弁を経てロータメータ⑥に至り、ここで流量が測定された。

上述の流量配分の測定のほか、急閉弁⑧を用いた112Dの測定区間の平均ボイド率、⑨の水マノメータによる圧力損失、点電極プローブ⑩による相構造と流動様式⁽¹⁰⁾、および染料を用いた液相の乱流混合量の測定も行ったが⁽¹¹⁾、その結果の詳細は次報で述べることにする。

2.3 流量配分の測定精度 気水流量の測定精度を確認するために行われた予備実験を簡単に述べる。図3はI-J垂直流路における空気と水それぞれの単相流の流量配分値を示す。縦軸は副流路と総括流路の平均速度の比 u_i/u 、横軸は代表寸法を水力学相当直径 D とした場合のレイノルズ数 Re と気液の平均速度 u_c, u_L である。空気と水の実験値は、 $Re \geq 8 \times 10^3$ の領域でほぼ等しい値をとり、かつ文献(2)の計算結果と3%以内の一致を示している。したがって、空気も水も満足しうる精度の実験値が得られた。しかし、本供試流路の場合、 $Re < 8 \times 10^3$ の領域において空気と水の値に不一致がみられ、これは水のデータの精度低下と

考えられた。すなわち、 $u_L < 0.5 \text{ m/s}$ の慣性力の小さい水の流れでは流路の出口に水たまりができ、分離タンクの差圧を零にしても、表面張力の影響がデータに現れた(図3中の破線内のデータ)。このことから、二相流の実験では水の平均速度 $u_L (= j_c + j_L)$ と仮定)が 0.5 m/s 以下におけるデータ採取は行わなかった。なお、空気の場合は表面張力の影響がないので、低速度においても二つの気水分離タンクの差圧を十分低く、たとえば 1 Pa 以内に保てば、図3のように十分な精度のデータが得られた。

図4は気液二相流における気液の流量配分データと分離タンクの差圧の関係を示した例である。これは $A_A/A_B = 2$ のA-B流路の結果で、総括流路の水のみかけ速度が $j_L = 0.5 \text{ m/s}$ 、空気のそれが $j_G = 2.0 \text{ m/s}$ および 5.0 m/s の二つの流動条件の結果を同時に示している。 j_G が低いほど、気相のデータは差圧の影響を受けやすい。例えば、 $j_G = 2.0 \text{ m/s}$ の $P_A - P_B = 10 \text{ Pa}$ の場合、液相が0.3%、気相が4%の誤差をもつ。このような差圧の影響を調べた結果、 $j_L = 0.3 \text{ m/s}$ では $j_G \leq 3 \text{ m/s}$ 、 $j_L = 1 \text{ m/s}$ では $j_G \leq 0.5 \text{ m/s}$ の領域で気相データの誤差が5%以上となることがわかった。そこで、本実験では、このような j_G の小さい領域の

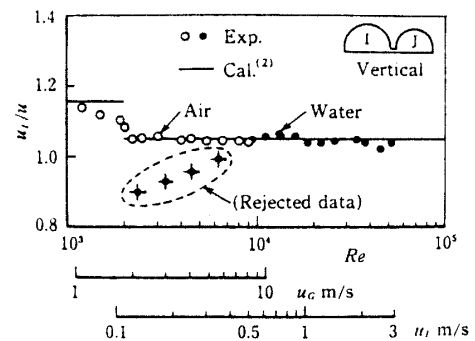


図3 空気と水の単相流の流量配分の例

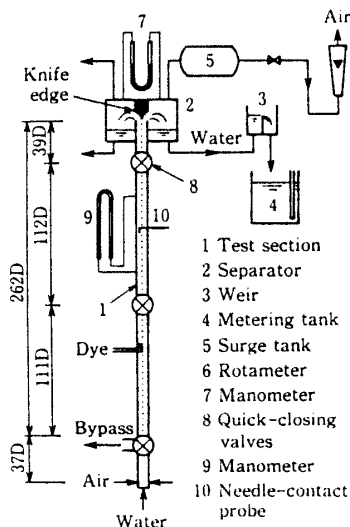


図2 実験装置

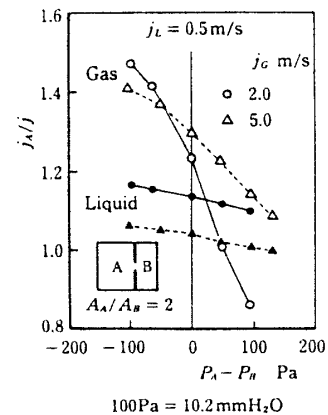


図4 タンク差圧の流量配分への影響

気相データの採取は控えた。結局、読取り誤差などの測定誤差も含めて、本実験データの精度は気相が5%以内、液相が2.5%以内と推定される。実験値の再現性もこれと同程度であった。

3. 流量配分の実験結果

3.1 管路の姿勢の影響 I-J 管路によって垂直流と水平流の実験を行い、流量配分に及ぼす管路の姿勢の影響を調べた。結果を図5(a)~(d)に示す。図5(a)~(d)は総括管路の液相流量を一定に保ち($j_L = 2.0, 1.0, 0.5$ と 0.3 m/s)、気相流量を漸次変えて得られるものである。縦軸は副管路 I と総括管路のみかけ速度の比 j_I/j である。実験点は、気相と液相および管路の姿勢で区別されている。すなわち、気相が白抜き記号、液相が黒塗り記号、垂直流が○印、水平流が△印と▽印である。ただし、図5(a)と図5(d)では、複雑さを避けるため、水平の▽印のデータは記入されていない。それは、水平の二つの姿勢のデータが類似であったからである。

$j_I/j = 1$ は副管路 I と J のみかけの速度が等しいことであるから、 $j_I/j = 1$ の線から実験点が離れるほど偏流が著しいことを意味する。流動様式との対応をみると次のことがいえる。気泡流では偏流は弱く、液相

の流量配分は单相流の値($j_c = 0$)に近い。スラブ流になると、世古口ら⁽⁴⁾も報告しているように、 j_c の増加にしたがい特に気相の偏流が顕著となる。環状流に近づくと偏流は弱くなる。このように、流量配分あるいは偏流現象は流動様式と深く関係している。

流動様式については、点電極プローブの信号にもとづき、気泡流、スラグ流および環状流の三つに分類した。各様式の境界が図5にプロットされている。偏流のため二つの副管路の流動様式が相違する場合、および垂直流と水平流で様式の異なる場合(特に $j_L < 2$ m/s で j_c が十分低い場合)があった。詳細については既にデータを得ているので⁽¹⁰⁾、次報で論述したい。

I-J 管路に関する図5(a)~(d)を総合して、次のことがわかる。水平流にも偏流現象は存在する。水平流と垂直流の流量配分の定性的傾向は類似である。また、二相流体の平均流速($j_c + j_L$)の値が大きくなるほど、姿勢の異なる3本の管路の気液流量配分比は互いに近づく。すきまの位置の異なる二つの水平管路のデータ間に大きな差異は認められない。

3.2 副管路断面形状の影響 図6は、副管路の断面積比は同じであるが、管路断面形状の異なる2本の垂直流路の流量配分を比較した例である。 $j_L = 1.0$ m/s の場合で、I-J 流路を○印、A-B 流路を△印で

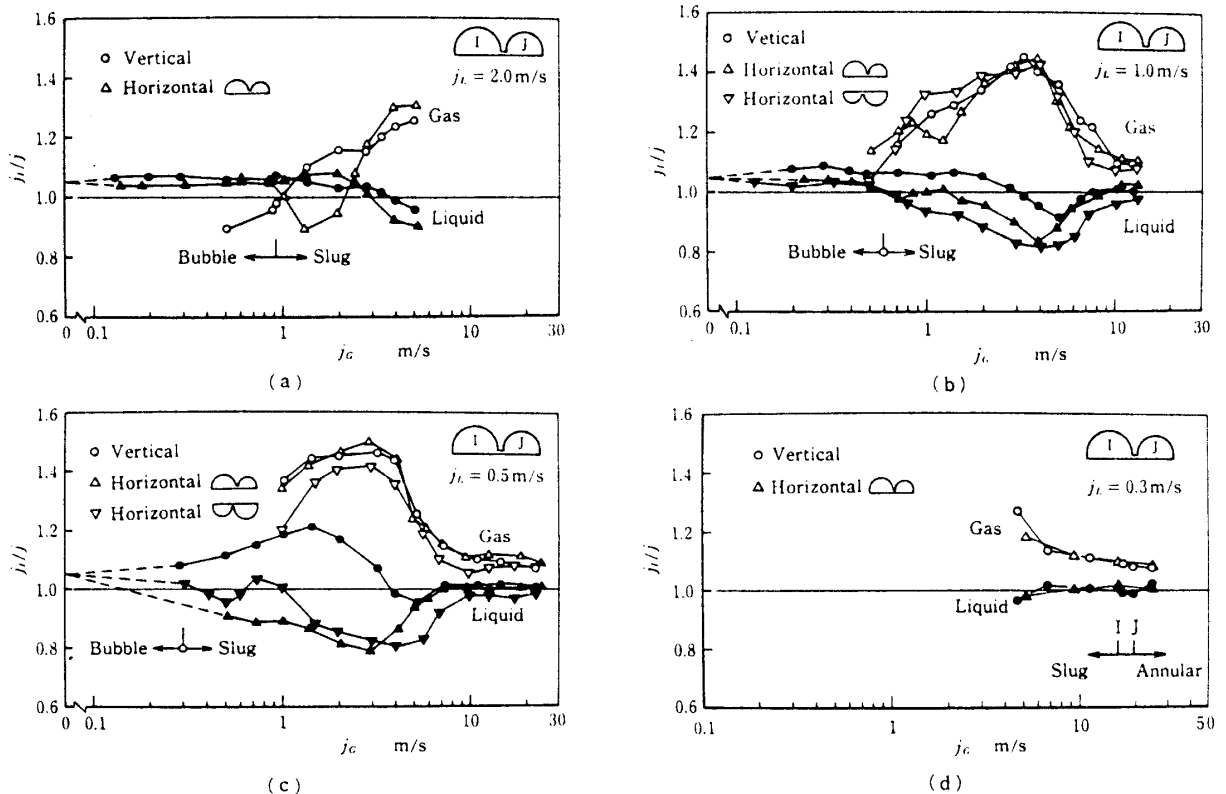


図5 管路の姿勢と気液流量配分の関係

ロットしている。両流路のデータは定量的および定性的に一致しているといえる。他の j_L の場合も図6の程度に両者は一致し、副流路の形状の流量配分への影響は軽微と判断される。このことは、副流路の流れを一次元で扱うことの妥当性を支持している。

3.3 副流路面積比の影響 図7は、A-B流路に関してその副流路断面積比を $A_A/A_B=3, 2$ および 1.5 の三つに変え、それぞれの実験値を比較したものである。みかけの液流速は $j_L=1.0$ m/s である。三者の実験点は同じ傾向をもっている。しかるに、 $A_A/A_B=1$ であれば、すなわち二つの副流路の面積が等しければ、気相、液相とも縦軸は1となるはずであるから、気液の流量配分の傾向は、 A_A/A_B が1から1.5の間で大きく変化することが予想される。結局、偏流は副流路面積比が1~1.5の間に顕著に現れ、1.5~3の間では類似な傾向をもつといえる。

4. 考 察

偏流は発達した流れにおいても生起するから、二相流の副流路解析はこれを記述しうるものでなければならない。比較的単純な系で得られた本実験データは、偏流のメカニズムの推定あるいはそのモデルの吟味に役立つものと思われる。一例として、現在提案されている式による流量配分の計算値と本実験データとを以下に比較してみる。

発達した気液二相流の副流路解析では、まず、単相

流のそれ⁽¹²⁾⁽²⁾と同様に連続性と等圧こう配の二つが条件式となる。

$$\rho_C j_C A = \sum_{i=1}^k \rho_{Ci} j_{Ci} A_i \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho_L j_L A = \sum_{i=1}^k \rho_{Li} j_{Li} A_i \dots\dots\dots (2)$$

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

式(3)右辺は次式で表される⁽³⁾。

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_i = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta z} \right)_i + \left(\frac{\Delta P_h}{\Delta z} \right)_i + \left(\frac{\Delta P_a}{\Delta z} \right)_i + \left(\frac{\Delta P_m}{\Delta z} \right)_i \dots\dots\dots (4)$$

ここで、右辺の第1~3項はそれぞれ摩擦、静水頭、加速の各成分であり、第4項は流体の乱れによる隣接副流路からの運動量輸送を評価する項である。

単相流に関しては上述の二つの条件で解析できるが、二相流の場合には条件式がさらに1個不足する。これに対して散逸エネルギー最小の条件を使う試みがなされている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。すなわち、式(1)~(3)を満足するもののうち摩擦による散逸エネルギーが最小となる流れが実現しうる、と考えるモデルである(単相流においては、連続性と等圧力こう配の二つの条件を満たす流れは自動的に散逸エネルギー最小の条件を満たす⁽²⁾)。これは、たとえば、次式で表される。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial j_{Li}} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta z} \right)_i A_i (j_{Ci} + j_{Li}) \dots\dots\dots (6)$$

上記の式(1)~(6)によって各副流路への流量配分は計算できる。しかしながら、式(4)の各項および式(6)をどのような式で計算するかによって結果は相違する。ここでは、試みに世古口ら⁽⁴⁾の提案式による計算値と本実験値とを比較してみよう。世古口らは、摩擦圧力損失係数に赤川⁽¹³⁾、勝原⁽¹⁴⁾らの

$$\phi_{f_i}^2 = (1 - \alpha_i)^{-1.75} \dots\dots\dots (7)$$

を用い、さらにボイド率の算式として

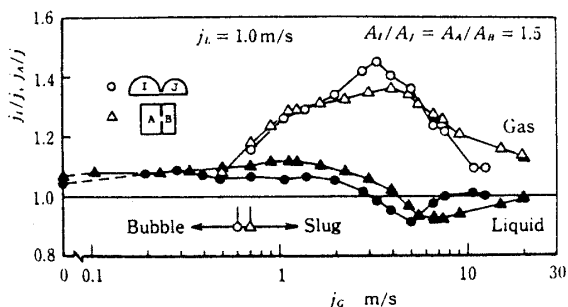


図6 流路の断面形状と気液流量配分の関係

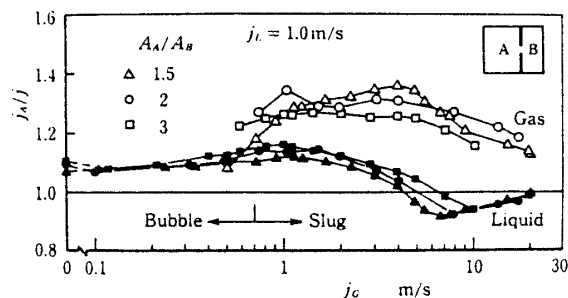


図7 副流路面積比と気液流量配分の関係

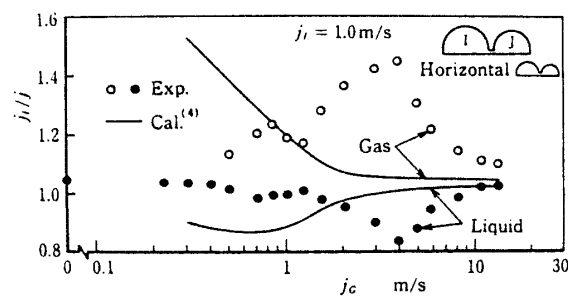


図8 気液流量配分の計算値⁽⁴⁾と本実験値の比較

$$\alpha_i = (F_i \beta_i + \alpha_{si}) / (1 + F_i) \quad \dots \dots \dots (8)$$

なる実験式を与えている。ここで、 α_{si} と β_i は Smith の式⁽¹⁵⁾によるポイド率と気体体積流量比であり、 F_i は修正係数、 $F_i = 10j_{Li} - 0.006j_{Gi}$ である。

図8は世古口らの推奨する式(7)と式(8)による計算値と実験値の比較例で、I-J流路における $j_L = 1.0$ m/s の水平流である。計算値の傾向は実験値のそれと相違している。水平流においては水頭項が零となるため式(4)の運動量式は簡単になり、副流路解析モデルの基本的な検討には適するはずである。この意味から、特に、式(8)には検討の余地があるようである。

この例に見られるように、現在提案されている二相流の副流路解析モデルは、偏流現象の記述において満足のいくものではない。式(4)の各項に適切な算式を見いだすこと、および散逸エネルギー式の再検討も含めて第3の条件式を見いだすこと、が今後の課題であろう。

5. 結 言

(1) 二つの副流路からなる複合流路内の気液二相流に関して、各副流路への気液流量配分の実験値を得た。水平流路の実験値も得られた。

(2) 同一流路の水平流と垂直流では、流量配分の定性的傾向は類似であり、いずれにも偏流は起こる。したがって、重力は偏流の支配因子ではない。

(3) 偏流の度合は流動様式に依存する。すなわち、偏流はスラグ流で強く現れ、気泡流と環状流では弱い。

(4) 副流路断面の幾何学的形状は流量配分にあまり影響を及ぼさない。これは、副流路解析において流れを一次元的に取扱うことの妥当性を支持する。

(5) 副流路の断面積比が1.5~3の範囲では、偏流の程度は変わらない。

本研究で得られたデータと知見は、複合流路内の流動モデルの推定あるいは吟味に役立つと思われる。考察においては、モデルの検討例を示した。

終わりに、研究意義を認められ、ご助言を下さった九州大学 深野 徹教授に心からお礼申し上げます。

文 献

- (1) Lahey, Jr., R. T. and Moody, F. J., *The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor*, (1979), 122, The American Nuclear Society.
- (2) 佐藤・ほか2名, 機論, 49-442, B (昭58), 1135.
- (3) Rowe, D. S., *BNWL-371*, Pt. 1 (1967).
- (4) 世古口・ほか3名, 機論, 50-454, B (昭59), 1575.
- (5) 佐田富・ほか2名, 機講論, No. 810-15 (昭56-10), 304.
- (6) 佐藤・ほか2名, 第19回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭57-5), 406.
- (7) Lahey, Jr., R. T. and Schraub, F. A., *Proc. Winter Annual Meet. ASME*, Los Angeles (1969), 1.
- (8) Bergles, A. E., 文献(7)の47ページ.
- (9) Tsuge, A., ほか2名, *Fluid Flow and Heat Transfer Over Rod or Tube Bundles* (ed. Yao, S. C. and Pfund, P. A.), (1979), 129, ASME.
- (10) 佐田富・佐藤, 機講論, No. 848-2 (昭59-5), 121.
- (11) 佐藤・ほか2名, 機講論, No. 834-9 (昭58-11), 17.
- (12) Rehme, K., *Chem. Ing. Tech.*, 43-17 (1971), 962.
- (13) 赤川, 機論, 23-128 (昭32), 292.
- (14) 勝原, 機論, 24-148 (昭33), 1050.
- (15) Smith, S. L., *Prog. Inst. Mech. Eng.*, 184-36 (1969-70), 647.

討 論

〔質問〕 柘植 綾夫

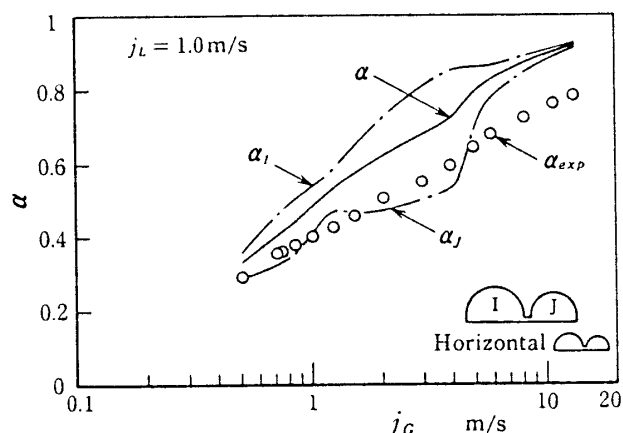
(三菱重工業(株)技術本部高砂研究所)

複合流路における気液二相流の偏流という現象に対して、細心の注意を払った試験によるベースデータを出された点に意義があると考えます。

世古口らの先の研究⁽⁴⁾においては、式(7)および式(8)を用いて式(5)の考え方に立ち、実験値の定性的挙動の予測に成功していたが、貴論文の実験に対して同モデルを適用した図8においては、定性的挙動すら全く逆の結果を呈しているのには困惑する。

この点について、もう少し深い考察がこの論文において望まれる。すなわち、世古口らの研究⁽⁴⁾における実験と貴論文の実験とに、同じ偏流現象であっても境界条件などによる根本的に異なる現象を見ていたの

か、あるいは、世古口らの研究⁽⁴⁾における実験と解析



付図1 ポイド率の実験値と式(8)の計算値との比較

値との比較が、貴論文の対象とした実験領域と異なっていたのか、もう少し立ち入った考察を加えてもらおうとありがたいが、いかがか。

〔回答〕 世古口らは一つの垂直流路で得られた28点のデータから式(8)と F_i を提案しており、そのデータは $2 \leq j_c \leq 10$ m/sの領域のものに限られている。このように式の裏付けとなる実験範囲は必ずしも広くはない。式(8)を用いた副流路解析結果が本実験の流量配分と必ずしも良い一致を示さない原因の一つは上のような点にあるのではないかと考えている。この式(8)をさらに直接的にボイド率の実験値と比較してみよう。

I-J流路の流量配分値を式(8)に代入すると、 a_i と a_j が求まる。これから

$$\alpha = \frac{A_i}{A} a_i + \frac{A_j}{A} a_j \dots \dots \dots (i)$$

によって総括流路のボイド率は推定できる。他方、I-J流路については急閉弁法によりボイド率の実験値は得

られているので⁽¹⁰⁾、これと式(i)の予測値とを図8の $j_c=1$ m/sにおける一連の流れと比較すると付図1のごとくである。実線が α の予測値、○印が実験値である。付図1で明らかなように、偏流のような微妙な流れを表す観点からは、両者の一致は良いとは言えない。

付図1中の一点鎖線は式(8)による a_i と a_j の予測値である。これらも前述の α と同程度の予測誤差をもつと考えられる。このことが、式(7)の摩擦損失倍数、ひいては式(4)の圧力こう配および式(6)の散逸エネルギーの値にも影響を与え、流量配分の推定精度を低下させるのであろう。

以上の事柄を考え合せると、式(8)は大胆にすぎるのではないか。世古口ら自身も、この式が幅広い流動条件を包含しうるとは必ずしも期待しておらず、解析上の手続きの一つを示したものと著者らは理解している。