

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)

佐田富道雄**, 佐藤泰生**, 深野 徹***

Two-Phase Flow in Multiple Channels
(3rd Report, Calculation of fully developed flow distributions)

Michio SADATOMI, Yoshifusa SATO, and Tohru FUKANO

In the subchannel analysis of nuclear reactor rod bundles it is necessary to predict the flow distributions among different regions of the bundle. In this paper, the fully developed two-phase flow distributions in two interconnected subchannels of different cross-sectional area were calculated. The mathematical model consists of four equations: the two continuity equations for gas and liquid phases, the equation of equal pressure drop of both subchannels and the empirical correlation of the flow distribution of the gas phase. The experimental data presented in the previous reports of this series have been used for this empirical correlation. Comparisons are made between the calculations and the experimental data reported by other investigators as well as by the present authors. Good agreements are obtained.

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

1. 緒 言

二つ以上の副流路から構成される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実際上の例としてあげられる。このような複合流路においては、しばしば局所のボイド率や伝熱状態の予測が要求されるから、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あげる。

発達した单相流の流量配分は、工業上十分な精度で予測が可能となっている⁽¹⁾。他方、気液二相流の気液それぞれの流量配分については、その予測モデルはまだ検討段階にあるといえる。二相流の場合、副流路ごとに気液両相の流量を予測するとすれば、副流路が2個であっても四つの基礎式が要る。これには、单相流の場合⁽¹⁾と同様に、まず気相と液相のそれぞれの連続の式と等圧力こう配の式との三つの式が考えられる。もう一つの基礎式として Gonzalez-Santaloら⁽²⁾は環状流を対象として、液相の配分比を副流路のぬれ縁長

さの比とする式を用いている。また、著者ら⁽³⁾あるいは世古口ら⁽⁴⁾は散逸エネルギー最小条件を用いた解析を試みている。しかるに、これらの方法では、2個の副流路の流量配分でも予測は十分とはいえず⁽⁵⁾、多数の副流路からなる実用的な管群内の流れの予測までには、多くの問題が残されているように思われる。

前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、流動モデルの検討に必要なデータベースを得ることを目的として、実験値の精度を確保するために管群流路を単純化された非等断面積の二つの副流路からなる複合流路を用いて、発達した気液二相流の流量配分、ボイド率ならびに流動様式を調べる実験を行った。本報では、まず前報の実験データに基づいて気相流量配分の整理式を求める。次に、この整理式と連続の式ならびに等圧こう配の式を基礎式とする、非等断面積の2副流路の流量配分計算式を構成し、その妥当性を前報および他の研究者⁽²⁾⁽⁷⁾の実験値によって検討する。

記 号

A : 流路の断面積 m^2
 D : 水力学相当直径 m
 G : 質量速度 $kg/(m^2 \cdot s)$
 j : みかけの速度 $= Q/A$ m/s

* 昭和61年11月23日 関西支部第246回講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月25日。

** 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1)。

*** 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

$\Delta P/\Delta z$: 管軸方向の圧力こう配 Pa/m

Q : 体積流量 m^3/s

S : 間げき寸法 m

u : 断面平均速度 m/s

W : 乱流混合量 $kg/(m \cdot s)$

α : ボイド率

λ : 管摩擦係数

ρ : 密度 kg/m^3

添字

A, B, I, J, i, j : 副流路番号

副流路番号の添字なし: 総括流路

a, f, h, m : 圧力こう配の加速, 摩擦, 静水圧, 乱流混合の成分

G, L : 気相, 液相

2. 気相流量配分の整理式

前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾では, 図1に示す断面形状の流路による気液両相の流量配分データが報告されている。流路は, 二つの長方形副流路からなる「A-B 流路」と同じく二つの半円形副流路からなる「I-J 流路」の2種類である。A-B 流路においては流路の寸法を変えて実験を行っている。すなわち, 総括流路の面積を $A=447 \text{ mm}^2$ 一定に保ち, さらに間げき寸法を $S_{AB}=2.0 \text{ mm}$ に保ったまま, 仕切フィンの位置 a を変えることによる断面積比 $A_B/A_A=1/3, 1/2, 2/3$ の三つの流路をつくっている。さらに $A_B/A_A=2/3$ のもとで間げき寸法を $S_{AB}=2, 4, 6 \text{ mm}$ に変えている。流路の姿勢はいずれも垂直である。I-J 流路に関しては垂直流のほか水平流の実験も行われている。間げき寸法は $S_{IJ}=1.1 \text{ mm}$ であり, 断面積比は $A_J/A_I=2/3$ である。

上述の流路による実験値と Gonzalez-Santalo ら⁽²⁾ などの実験値を総合的に比較した結果, 流量配分について次の事実が明らかとなった。

(1) 流動様式の影響が顕著である。

(2) 流量配分は流路が同じであれば水平流と垂直流でほぼ同じ値となる。

(3) 流量配分は副流路断面積比に依存する。

(4) 副流路の断面形状と間げき寸法の流量配分への影響は小さい。

これらの実験事実は液相の流量配分よりむしろ気相のそれに顕著に認められるので, 気相の流量配分に関して整理式を作るのが容易であると考えられる。以下に, その作成過程を述べる。

図2は前報で示した流量配分データの一例で, 垂直 I-J 流路において空気と水を用いて得られたものである。データは, 総括流路に対する断面積が大なる側の副流路 I のみかけの速度比 j_i/j をみかけの空気流速 j_c に対してプロットしたもので, 気相を白抜き記号, 液相を黒塗り記号で示してある。総括流路の水のみかけの速度 j_L を 1.0 m/s の一定として, 空気のみかけの速度 j_c を徐々に増していくと, 気相のデータ $j_c i/j_c$ は次のように変わる。すなわち, 気泡流では単相流の速度比 u_i/u にほぼ等しいが, スラグ・チャーン流になると値が増大し, 気相の流れは断面積の大きい副流路側へ偏る。環状流に近づくと値は再び u_i/u に漸近する。このような傾向は他の j_L の流れについても, また幾何学的形状の異なる A-B 流路においても認められた。

したがって, 一般的に, 断面積の大きい副流路 i のみかけの速度比 $j_c i/j_c$ は単相流成分 u_i/u と偏流成分との和で表しうると考えられる。偏流は流動様式に依存するから偏流成分はボイド率の関数であると仮定すると, 上の考えは次式のように書ける。

$$\frac{j_c i}{j_c} = \frac{u_i}{u} + f_n(\alpha) \dots\dots\dots (1)$$

次に $f_n(\alpha)$ を定めるために, $A_J/A_I \cong 2/3$ の六つの流路で得られた気相のデータ⁽⁵⁾⁽⁶⁾ を, 縦軸に $(j_c i/j_c - u_i/u)$, 横軸に α をとってプロットすると図3に示すごとくである。図3の横軸のボイド率 α は Smith の式⁽⁸⁾

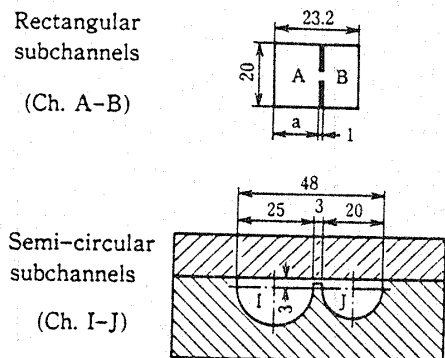


図1 前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾の実験で使用した流路の断面形状

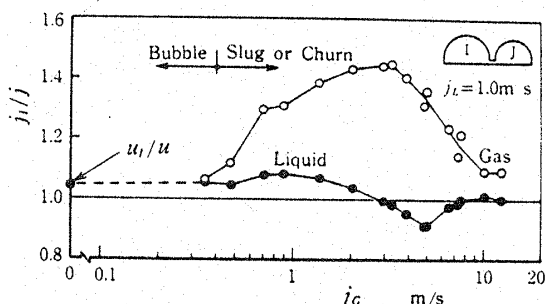


図2 典型的な流量配分の実験データ⁽⁵⁾

による計算値である。また、これらのデータはいずれも $0.3 \leq j_i \leq 1.0$ m/s の範囲で得られたものである。図3が示すように、実験点のばらつきは多少大きい、 j_{ci}/j_c の整理式として次式が得られる。

$$\frac{j_{ci}}{j_c} = \frac{u_i}{u} + C\alpha^4(1-\alpha)^3 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、係数 C は $A_j/A_i=2/3$ の流路の場合には約40である。

$A_j/A_i=1/3, 1/2$ および $2/3$ の流路で得られた実験データの示すところによれば、式(1)右辺第2項の偏流成分はポイド率ばかりでなく副流路の断面積比にも依存する⁽⁹⁾。すなわち、式(2)の係数 C は副流路の断面積比に関係し、近似的に

$$C = 60 \frac{A_j}{A_i} \dots\dots\dots (3)$$

で表される。 $A_j/A_i=1$ のとき偏流は生起しないから、式(3)は等断面積の副流路からなる場合には適用することはできない。したがって、その適用範囲は、現在のところ、実験データの得られている $1/3 \leq A_j/A_i \leq 2/3$ に限定すべきであろう。

結局、 $A_i > A_j$ の2副流路における発達した二相流の気相流量配分の整理式として次式を得る。

$$\frac{j_{ci}}{j_c} = \frac{u_i}{u} + 60 \frac{A_j}{A_i} \alpha^4(1-\alpha)^3 \dots\dots\dots (4)$$

3. 流量配分の計算式

3.1 流れの基礎式 番号 i と j の二つの副流路からなる複合流路内の発達した二相流の気液の流量配分を予測する計算式を以下に示す。

基礎式は、二つの副流路の流量の合計が気相、液相のそれぞれについて総括流路の流量に等しいことを表す連続の式、

$$\rho_c j_c A = \rho_{ci} j_{ci} A_i + \rho_{cj} j_{cj} A_j \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho_L j_L A = \rho_{Li} j_{Li} A_i + \rho_{Lj} j_{Lj} A_j \dots\dots\dots (6)$$

副流路の圧力こう配が互いに等しいことを表す等圧力こう配の式、

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_i = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_j \dots\dots\dots (7)$$

ならびに式(4)の気相流量配分の整理式である。

流量配分の計算は、総括流路の気、液の流量、二つの副流路の断面積と水力学相当直径、および物性値を入力データとして、次の手順で行う。

(1) 式(4)より j_{ci}/j_c を求める。その際、 u_i/u は文献(1)の方法で算定する。

(2) (1)で求めた j_{ci}/j_c と式(5)から副流路 i と j のみかけの気相速度 j_{ci} と j_{cj} を求める。

(3) 液相の速度 j_{Li} を仮定し、式(6)から j_{Lj} を求

め、(2)で求めた j_{ci} と j_{cj} とともに3.2節の運動量式に代入し、各副流路の圧力こう配を計算する。

(4) 式(7)を満足するまで(3)を繰返す。

3.2 副流路の運動量式 番号 i の副流路の管軸方向の圧力こう配 $(\Delta P/\Delta z)_i$ は、発達した気液二相流の場合、次式で表される⁽⁹⁾。

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_i = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta z}\right)_i + \left(\frac{\Delta P_h}{\Delta z}\right)_i + \left(\frac{\Delta P_a}{\Delta z}\right)_i + \left(\frac{\Delta P_m}{\Delta z}\right)_i \dots\dots\dots (8)$$

ここで、右辺第1~3項はそれぞれ摩擦、静水圧および加速の成分である。第4項は隣の副流路との流体の混合による主流の運動量変化を表す成分で、副流路に特有のものである。発達した流れで生じる混合を本論文では乱流混合と呼び、以下ではこの項を乱流混合成分と呼ぶ。次に、式(8)の各成分の計算式を示す。

摩擦成分は、次式で求める。

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta z}\right)_i = \phi_{Li}^2 \lambda_i \frac{1}{D_i} \frac{\rho_L j_{Li}^2}{2} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、摩擦損失係数 ϕ_{Li}^2 は、非円形流路への適用性の確かめられている⁽¹⁰⁾次の Chisholm-Laird の式⁽¹¹⁾により求める。

$$\phi_{Li}^2 = 1 + \frac{21}{\chi_i} + \frac{1}{\chi_i^2} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)の χ_i は Lockhart-Martinelli のパラメータである。

$$\chi_i = \sqrt{\frac{(\Delta P_f/\Delta z)_{L,i}}{(\Delta P_f/\Delta z)_{G,i}}} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、式(11)の圧力こう配と式(9)の管摩擦係数 λ_i の算定において、副流路の断面形状が非円形であることを文献(1)の方法で考慮する。

静水圧成分と加速成分はそれぞれ次式で表される。

$$\left(\frac{\Delta P_h}{\Delta z}\right)_i = \{\rho_{ci}\alpha_i + \rho_{Li}(1-\alpha_i)\}g \sin \theta \dots\dots (12)$$

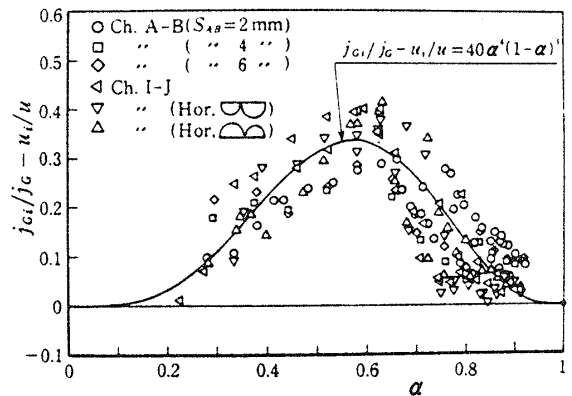


図3 気相流量配分⁽⁹⁾⁽⁶⁾とポイド率の関係 ($A_j/A_i \cong 2/3$)

$$\left(\frac{\Delta P_a}{\Delta z}\right)_i = -\frac{\Delta}{\Delta z} \left[\frac{G_{oi}^2}{\rho_{ci}\alpha_i} + \frac{G_{li}^2}{\rho_{li}(1-\alpha_i)} \right] \dots\dots(13)$$

ここで、 θ は管軸と水平軸のなす角であり、 α_i は次の Smith の式⁽⁹⁾で求める。

$$\alpha_i = \left[1 + 0.4 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{1}{x_i} - 1 \right) + 0.6 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{1}{x_i} - 1 \right) \times \left\{ \frac{\frac{\rho_L}{\rho_G} + 0.4 \left(\frac{1}{x_i} - 1 \right)}{1 + 0.4 \left(\frac{1}{x_i} - 1 \right)} \right\}^{1/2} \right]^{-1} \dots\dots(14)$$

式中の x_i はクオリティである。なお、式(13)の加速成分は、本検討の範囲では最大でも全圧力こう配の 0.8 % 程度であり、流量配分の計算にも 0.2 % 程度の影響しかないことが判明したので、次の 4 章の計算では無視する。

乱流混合成分は Rowe⁽⁹⁾の次式で求める。

$$\left(\frac{\Delta P_m}{\Delta z}\right)_i = -\frac{1}{A_i} K_{ij} W_{L,ij} (V_{Lj} - V_{Li}) \dots\dots(15)$$

ただし、気相による寄与分は液相のそれと比較して無視されている。ここで、 $W_{L,ij}$ は副流路 i と j の間の液相の乱流混合量であり実験値を用いる。液相の代表速度 V_L としては液スラグの速度、 $(j_c + j_L)$ を選ぶ。 K_{ij} は運動量変化を補正する係数で、 $0 < K_{ij} < 1$ の範囲の値である。

4. 計算結果

4.1 実験値による運動量式の検討 流量配分の予測において式(8)~(15)の当否を調べるため、試みにいっぽうの相の流量配分が既知であるとして実験値を用い、他方の相の流量配分を連続の式と等圧力こう配の式を用いて求めてみた。

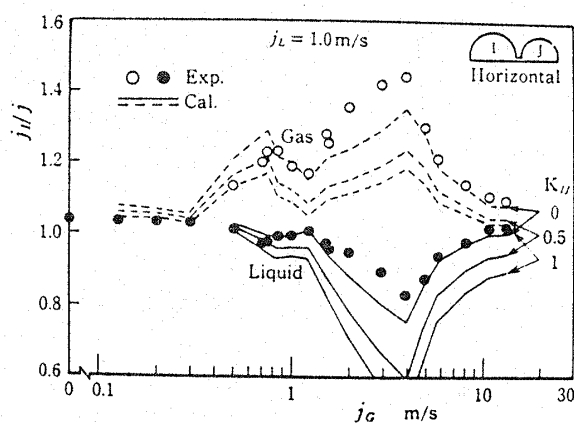
図 4 (a) は、間げき部が下向きの水平 I-J 流路における $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ の流れに対して実験値⁽⁵⁾と計算値とを比較したものである。実験値は、気相を白抜き記号で、液相を黒塗り記号で表している。計算値は、液相の配分比を既知として気相の配分比を求めた場合を破線で、逆に液相を求めた場合を実線で表しており、それぞれ式(15)の K_{ij} を 0, 0.5 および 1 の三とおりに変えた結果である。前報⁽⁵⁾に示したいずれの水平流についても、図 4 (a) と同様な結果が得られた。すなわち、 $K_{ij} = 0$ の場合に実験値と計算値の一致が最も良く、 K_{ij} が大なるほど計算値は気、液ともに小さくなる。なお、水平流の場合には式(8)の右辺第 2 項は零であるから、圧力こう配はほぼ摩擦成分と乱流混合成分との和である。したがって、 $K_{ij} = 0$ の計算値と実験値との

一致が良いことは、乱流混合成分の無視できること、および摩擦成分の予測精度が良好であることを表す。

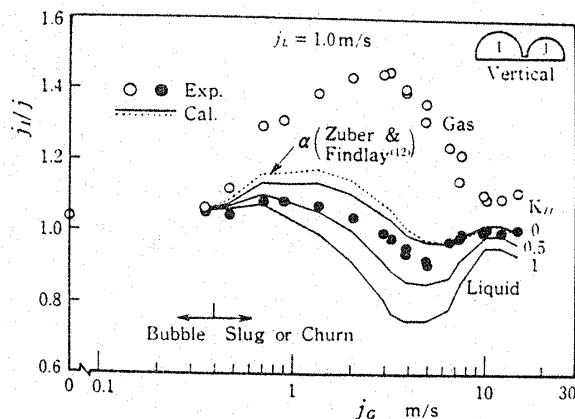
図 4 (b) は垂直流の液相に対して同様の比較を行った例である。実線の計算値は、 $K_{ij} = 0.5$ でも実験値に近い場合があるが、概して $K_{ij} = 0$ のほうが一致がよい。前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾のいずれの垂直流の場合も同様な結果が得られ、水平流の場合と同様、乱流混合成分は無視できることがわかった。なお、点線の計算値は、 $K_{ij} = 0$ とおき、ボイド率の計算に Smith の式のかわりに Zuber-Findlay⁽¹²⁾の式を用いた場合である。これと $K_{ij} = 0$ の実線との比較から式(12)の静水圧成分のボイド率計算には、どちらかといえば Smith の式が適するようである。

4.2 計算値と実験値との比較 図 5 (a)~(c) は流量成分の計算値を I-J 流路の実験値と比較したものである。計算値は、気相、液相いずれも実線で表している。

図 5 の (a) と (b) は $j_L = 0.5 \text{ m/s}$ の場合で、図 (a)



(a) $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ の水平流



(b) $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ の垂直流

図 4 流量配分のデータ⁽⁵⁾による運動量式の検討

が水平流, 図(b)が垂直流の比較である。気相の計算値は両者で同じ値となる。他方, 液相は, 圧力こう配の静水圧成分が零となる図(a)のほうが小さい値となっており, 実験値の傾向をよく表している。計算値と実験値の定量的な一致は, 液相9%以内, 気相13%以内であり, 液相のほうがいくぶんよい。

図5(c)は $j_L=1.0$ m/sの垂直流の場合である。気泡流の領域では, 気相と液相の計算値はほぼ一致し, 実験値の傾向をよく表している。

以上の図5(a)~(c)から, 全圧力こう配に占める静水圧成分の比率が高まるほど, 液相の流量配分比は気相のそれに近づくといえる。このことは, 例えば形状の相似な二つの複合流路内を同一の速度で二相流が流れても, 寸法に応じて全圧力こう配に占める静水圧成分の比率が異なるため液相の配分比は異なりうる, という複合流路に関する二相流の相似実験のむずかしさを示唆している。

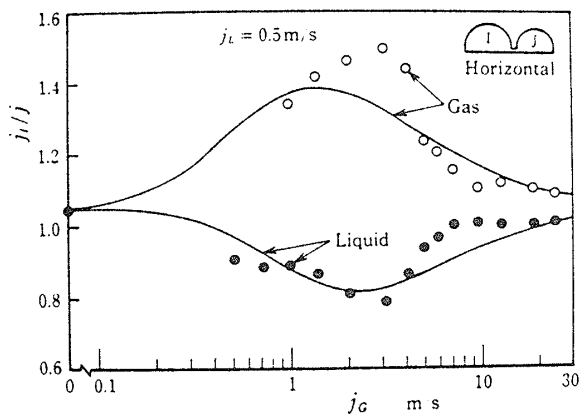
図5(d)は $A_B/A_A=1/3$ のA-B流路に関する垂直流の実験値を計算値と比較した1例である。 $0.3 \leq j_L \leq$

2.0 m/sの範囲のこのほかのA-B流路の実験値についても同様の比較を行い, いずれも気相15%, 液相10%以内で計算値は実験値と一致することを確かめた。

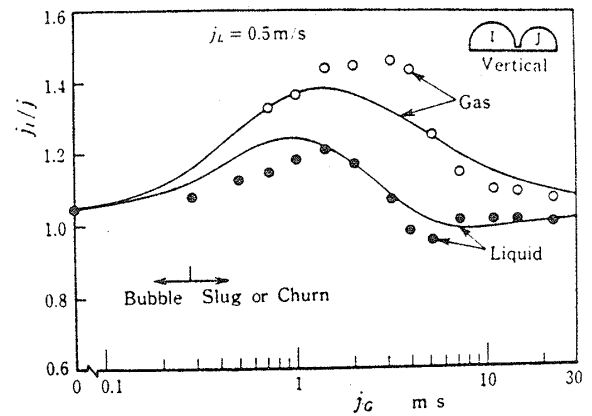
図6は本研究と同様の実験を行っている Gonzalez-Santaloらの垂直流のデータ⁽²⁾との比較である。供試流路には, 間げき寸法が4.3 mmで副流路面積比 $A_2/A_1=0.68$ の図6中に示す形状のものを用いている。このほか, $j_L \cong 1.0$ m/sの場合も比較したが, いずれも気相10%, 液相8%以内で計算値は実験値と一致した。

以上の検討結果より, 本計算式による流量配分の予測値は気相15%, 液相10%以内で実験値と一致すると結論できる。

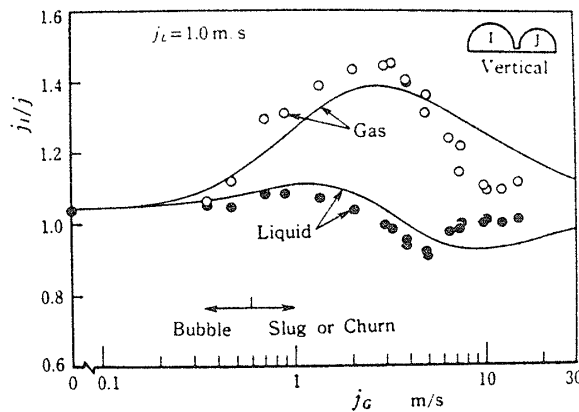
4.3 計算値と多副流路の実験値との比較 図7はSternerら⁽⁷⁾の垂直流のデータを計算値と比較したものである。Sternerらはロッド径, ピッチなどの寸法がBWR形の燃料集合体の約2倍の4本管群流路を用いている。ここでは, 図7中の二つの副流路IとII($A_{II}/A_I=0.66$)の配分比について計算値を実験値と比



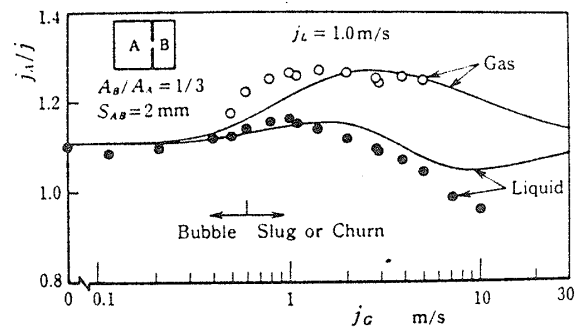
(a) I-J 流路, $j_L=0.5$ m/s, 水平流



(b) I-J 流路, $j_L=0.5$ m/s, 垂直流

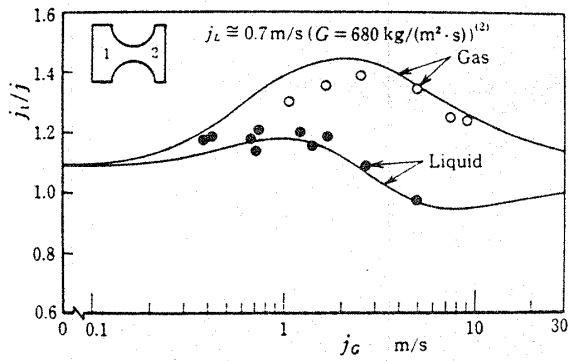
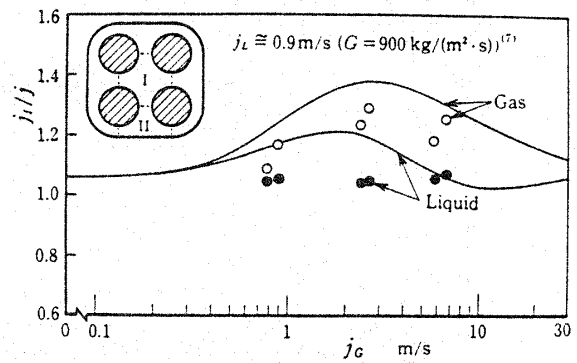


(c) I-J 流路, $j_L=1.0$ m/s, 垂直流



(d) A-B 流路, $j_L=1.0$ m/s, 垂直流

図5 計算値と前報⁽⁵⁾の実験値との比較

図6 計算値と Gonzalez-Santalo らの実験値⁽²⁾との比較図7 計算値と Sterner らの実験値⁽⁷⁾との比較

較した。両者の一致は満足とはいえないが、データが少なく計算結果の可否の結論を下すことができない。今後は、副流路数が2以上の流路について副流路数とその配列の流れへの影響を系統的に調べ、本計算式の改良を進めていく必要がある。

5. 結 言

(1) 非等断面積の2副流路内の発達した気液二相流の気相流量配分の整理式として、式(4)を得た。

(2) 気・液各相の連続の式、等圧力こう配の式ならびに式(4)を基礎式とする、発達した二相流の2副流路への流量配分を予測する計算式を示した。

(3) 提示した副流路の圧力こう配の算定式は、流量配分予測のうえで十分な精度を有する。

(4) 流量配分の計算値を前報ならびに他の研究者の実験値と比較検討した結果から、本計算の予測精度は、気相15%、液相10%であり、従来の方法⁽²⁾⁻⁽⁴⁾の

それより良好であるといえる。

文 献

- (1) 佐藤・ほか2名, 機論, 49-442, B(昭58), 1135.
- (2) Gonzalez-Santalo, J. M. and Griffith, P., *ASME Paper*, 72-WA/NE-19(1972).
- (3) 佐田富・ほか2名, 機論, No. 810-15 (昭56-10), 304.
- (4) 世古口・ほか3名, 機論, 50-454, B(昭59), 1575.
- (5) 佐田富・佐藤, 機論, 52-473, B(昭61), 351.
- (6) 佐田富・ほか2名, 機論, No. 854-6 (昭60-11), 37.
- (7) Sterner, R. W. and Lahey, Jr., R. T., *US DOE Rep.*, NUREG/CR-3373, (1983).
- (8) Smith, S. L., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 184-pt. 1-36(1969-70), 647.
- (9) Rowe, D. S., *BNWL-371*, PT 1(1967).
- (10) 佐田富・ほか2名, 機論, 48-434, B(昭57), 1893.
- (11) Chisholm, D. and Laird, A. D. K., *Trans. ASME*, 80-2(1958), 276.
- (12) Zuber, N. and Findlay, J. A., *Trans. ASME*, Ser. C, 87-4(1965), 453.