

サブチャンネル内気液二相流の乱流混合量の取り扱いについて*

(サブチャンネル間に圧力差がない未発達流れについて)

川原 顕磨呂*¹, 佐田富 道雄*¹
志賀 栄 一*², 佐藤 泰 生*¹

Treatment of Turbulent Mixing Rate in a Two-Phase Subchannel Flow (For Developing Flow without Pressure Differential between Subchannels)

Akimaro KAWAHARA, Michio SADATOMI,
Eiichi SHIGA and Yoshifusa SATO

Based on the assumption that the fundamental modes of the fluid transfer between subchannels are turbulent mixing, void drift and diversion crossflow in a developing (hydrodynamic nonequilibrium) two-phase flow, we have examined whether the following treatment is applicable or not, i. e., whether the turbulent mixing rate in such a flow can be considered to be equal to the rate in the equilibrium state that the flow will attain. In order to obtain the data needed for the examination, experiments were performed for hydrodynamic nonequilibrium air-water churn flows without pressure differential between the subchannels, using simple vertical multiple channels consisting of two circular subchannels. Data on tracer concentration distribution along the channel axis were obtained for both gas and liquid phases. The analysis of the data showed that the assumption and the treatment mentioned above are valid for all nonequilibrium flows tested. Furthermore, it has been clarified that the effect of turbulent mixing on tracer mass exchanges between the subchannels is more dominant than that of void drift.

Key Words: Multiphase Flow, Turbulent Mixing, Nonequilibrium Flow, Subchannel Analysis, Air-Water Two-Phase Flow, Void Drift, Tracer Concentration Distribution

1. 緒 言

沸騰水型原子炉燃料集合体内の熱流動予測の実用的な方法の一つはサブチャンネル解析である⁽¹⁾。この解析においては、複雑な燃料集合体の断面をいくつかのサブチャンネルに分割し、分割したサブチャンネルごとに断面平均の物理量を求めていく。サブチャンネルは流体の往來の自由な仮想境界で接しているから、隣接サブチャンネル間で冷却材の移動が生じる。したがって、この横方向への流体移動を如何に記述するかがサブチャンネル解析における重要な課題の一つである。

燃料集合体内の整定した蒸気-水二相流では、隣接サブチャンネル間で時間平均として圧力差はなく、かつ、あるサブチャンネルから隣のサブチャンネルへの液相および気相それぞれの正味の質量移動は起こらない。したがって、サブチャンネル境界において各相それぞれの質量交換が平衡しているの、このような流動状態を流体力学的平衡状態 (Hydrodynamic equilibrium condition) にある流れあるいは平衡流と称し、それ以外の流れを非平衡流と呼んでいる⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

このような平衡流ならびに非平衡流におけるサブチャンネル間の流体移動は、次の三つの機構に分類できると言われている⁽¹⁾⁽⁵⁾。

(1) 乱流混合 (Turbulent Mixing): 平衡流においても、乱れによってサブチャンネル境界を往來する流体の混合が起こる。時間平均的にはこれによる気相および液相それぞれの正味の質量移動はないが、運動量とエネルギーの移動が生じる。

(2) ボイドドリフト (Void Drift): 隣接サブチャンネル間に時間平均としての圧力差がなくても、サブチャンネルの流れが非平衡状態にあれば、流れを平衡させるようにサブチャンネル境界を横切る流体の移動が起こる。これをボイドドリフトと呼んでおり⁽⁶⁾、一方向性の流体移動である。

(3) 差圧移動 (Diversion Crossflow): サブチャンネル間に時間平均としての圧力差があれば、これを解消する方向への流体移動が生じる。圧力差はサブチャンネル断面の幾何学的形状の変化やスペーサ等の障害物によって生じる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

実際の燃料集合体内の非平衡流では、通常、三者が重なり合った結果の流体移動が起こる。多くのサブチャンネル解析は、「三つの流体移動は互いに独立した現象である」と仮定し、結果の流体移動量を三者の線形

* 原稿受付 平成6年6月15日。

*¹ 正員, 熊本大学工学部 (☎860 熊本市黒髪2-39-1)。

*² 正員, 九州電力(株)川内火力発電所 (☎899-19 川内市港町字唐山6110-1)。

和として記述している。この仮定は流体移動の定式化に発展性があるが、その当否は十分に検討されていない。これは、非平衡状態における乱流混合量を直接測定することが困難であるからである。

本研究の目的は、非平衡二相流における乱流混合をいかに取り扱うかを明らかにすることである。本報では、まず差圧移動の生じない流れを調査対象とした。そのために簡単な二つの円形サブチャンネルから成る垂直複合流路内に、ボイドドリフトが生起する非加熱の非平衡の二相流をつくり、その流れに気液両相のトレーサ物質を導入して、管軸方向への濃度変化を調べた。その結果、サブチャンネル間の流体移動量を「ボイドドリフトによる量」と「この流れが平衡状態に達したときの乱流混合量」の線形和として記述できることが明らかになったので、報告する。

2. サブチャンネル間の流体移動量の評価

乱流混合とボイドドリフトが共存する非加熱の非平衡流について、サブチャンネル間の流体移動量をトレーサ物質の濃度変化過程から調べた。二つのサブチャンネル*i*と*j*のみから成る複合流路を想定し、図1に示すΔ*Z*の区間の検査体積に対して、*k*相(*k*=*G*のとき気相、*k*=*L*のとき液相)に含まれるトレーサの質量保存式を考える。その際、乱流混合に関して次の二つの仮定を置く。

仮定1：乱流混合はボイドドリフトと独立した流体移動である。

仮定2：ボイドドリフト生起時の乱流混合量は、この流れが流体力学的平衡状態に達したときに呈するそれに等しい。

これらの二つの仮定により、サブチャンネル*i*内の*k*相に関するトレーサの質量保存の差分式は次のように書ける。

$$A_i G_{ki}(n) C_{ki}(n) - G'_k S_{ij} \Delta Z$$

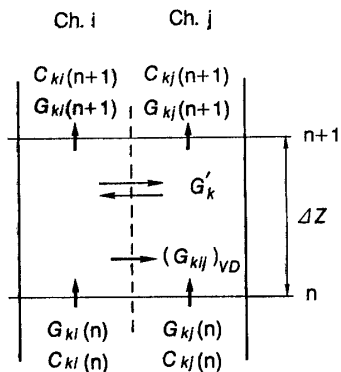


図1 検査体積

$$\begin{aligned} & \times \left\{ C_{ki} \left(n + \frac{1}{2} \right) - C_{kj} \left(n + \frac{1}{2} \right) \right\} \\ & - (G_{kij})_{VD} S_{ij} \Delta Z C_{kVD} - A_i G_{ki}(n+1) C_{ki}(n+1) \\ & = 0 \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 A_i , S_{ij} はそれぞれサブチャンネル *i* の断面積 [m^2] と二つのサブチャンネル間の間隙寸法 [m] であり、管軸方向に不変とする。また、 C_{ki} は *k* 相に関するトレーサの質量濃度 [(kg of tracer)/(kg of fluid)], G_{ki} はサブチャンネル *i* における管軸方向の *k* 相の質量流束 [$kg/(m^2 \cdot s)$] である。さらに、 G'_k は乱流混合による横方向への質量流束 [$kg/(m^2 \cdot s)$], $(G_{kij})_{VD}$ はボイドドリフトによるサブチャンネル *i* から *j* への質量流束 [$kg/(m^2 \cdot s)$] である。 $(G_{kij})_{VD}$ は一方向への流体移動であるので、それによって輸送されるトレーサ濃度 C_{kVD} は次の値とする。

$$(G_{kij})_{VD} > 0 \text{ のとき } C_{kVD} = C_{ki} \left(n + \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$(G_{kij})_{VD} < 0 \text{ のとき } C_{kVD} = C_{kj} \left(n + \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式(2)はサブチャンネル *i* から流体が流出する場合、式(3)は逆に流入する場合である。

次に、二つのサブチャンネル全体(総括流路)の混合平均濃度 C_k を次式で定義する。

$$A G_k C_k = A_i G_{ki}(n) C_{ki}(n) + A_j G_{kj}(n) C_{kj}(n) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A は総括流路の断面積、 G_k は総括流路の質量流束である。サブチャンネル *i* のトレーサ濃度 C_{ki} を混合平均濃度 C_k で除し、次の無次元濃度を定義する。

$$C_{ki}^*(n) = C_{ki}(n) / C_k \dots\dots\dots (5)$$

式(5)を式(1)に代入し、整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} C_{ki}^*(n+1) = & \left[A_i G_{ki}(n) C_{ki}^*(n) \right. \\ & - G'_k S_{ij} \Delta Z \left\{ C_{ki}^* \left(n + \frac{1}{2} \right) - C_{kj}^* \left(n + \frac{1}{2} \right) \right\} \\ & \left. - (G_{kij})_{VD} S_{ij} \Delta Z C_{kVD}^* \right] / \left\{ A_i G_{ki}(n+1) \right\} \dots\dots (6) \end{aligned}$$

他方、ボイドドリフトによる流体移動量 $(G_{kij})_{VD}$ は、次のように管軸方向の流量変化と関係付けられる。

$$(G_{kij})_{VD} S_{ij} \Delta Z = A_i G_{ki}(n) - A_i G_{ki}(n+1) \dots\dots\dots (7)$$

結局、 G_{ki} の管軸方向への変化過程と乱流混合による質量流束 G'_k がわかると式(2)~(7)よりボイドドリフトと乱流混合の共存した流れにおける管軸方向へのトレーサ濃度の変化を計算できる。この方法による濃度分布の計算結果を実験結果と比較し、前述の仮定1、

2の妥当性を検討する。

3. 実験

3・1 供試流路 燃料集合体のような複数のサブチャンネルが存在する流路体系では、複数の流動メカニズムが重なり合うので、流れは非常に複雑になる。したがって、そのような流路はサブチャンネル間における個々の流体移動機構の把握には向かない。そこで、生起する現象と流動条件との因果関係の明らかな実験データを得ることを目的として、単純な二つの円形サブチャンネルから成る流路を用いて実験した。

図2に二つの供試流路を示す。便宜上、図2(a)の流路をCh. E-F、図2(b)のそれをCh. F-Fと呼ぶことにする。いずれの流路も既報⁽⁹⁾で用いたものと同じであった。Ch. E-Fは、直径20 mmと16 mmの二つの円形サブチャンネルEとF(以後、Ch. E、Ch. Fと呼ぶ)とをすきま $S_{EF}=1.0$ mm、長さ3 mmの間げき部で連結した流路であった。Ch. F-Fはいずれも直径16 mmの同一円形サブチャンネルから成る流路であった。間げき部の寸法はすきま $S_{FF}=1.0$ mm、長さ3 mmであった。Ch. F-Fについては必要に応じて二つのサブチャンネルを区別するために片方のサブチャンネルをCh. F₁、他方のそれをCh. F₂と呼ぶことにする。

3・2 実験装置と実験方法 図3に実験装置の概略を示す。実験流路は、上流側から順次、助走区間(長さ1.5 m)、測定区間(2.5 m)、排出区間(0.5 m)を連結した垂直流路であった。サブチャンネルの断面形状はどの区間でも同一であったが、助走区間と排出区間にはサブチャンネル間にすきまはなく、二つのサブチャンネルの流れは独立していた。一方、測定区間には二つのサブチャンネル間に図2に示したすきまがあり、ここで流体の移動が可能であった。

作業流体には常温、大気圧近傍の空気と水を用いた。二つのサブチャンネルに空気と水を、それぞれロータメータ(精度3%)とタービン流量計(精度1%)で流量を測った後、気水混合部から流路に導入した。混

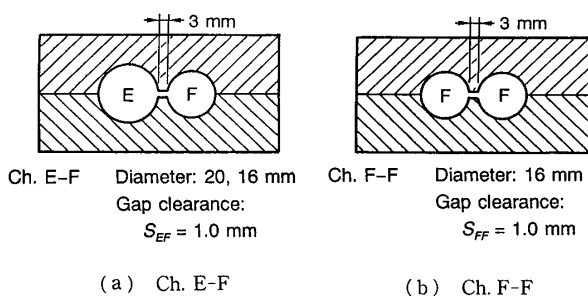


図2 供試流路

合部で気液二相流体となった流れは、助走区間を流れ、測定区間に流入した。測定区間を流れた二相流体は、その出口で等速状態で各サブチャンネルに分割され、それぞれの排出区間を経て気水分離タンクに流出した。ここで分離した水はせきを経て量水槽で流量が測られた。他方、空気はサージタンクと圧力調整弁を経てロータメータで流量が測られた。

2章に述べた乱流混合の取り扱いを検討するために、上記の実験システムを用いて2種類のトレーサ濃度分布を測定した。一つは、乱流混合とボイドドリフトのみが共存する非平衡流における濃度分布、もう一つは、乱流混合のみが生起する平衡流におけるそれであった。まず、非平衡流のトレーサ濃度分布の測定について説明する。測定区間の流れを差圧移動の生起しない非平衡流とするために、次の条件を満たすように流れを設定した⁽⁹⁾。

1. 助走区間の両サブチャンネルの圧力こう配を同じにする。

$$\left(\frac{dP}{dZ}\right)_i = \left(\frac{dP}{dZ}\right)_j \dots\dots\dots (8)$$

2. 測定区間の始点と終点における両サブチャンネルの圧力を同じにする。

$$P_i(0) = P_j(0), P_i(Z) = P_j(Z) \dots\dots\dots (9)$$

実際には、サブチャンネル間の差圧は測定区間入口において ± 30 Pa以内、測定区間終点で ± 10 Pa以内であった。

上記の方法で設定した流れの片方のサブチャンネルにトレーサを導入し、両サブチャンネルの管軸方向へのトレーサ濃度変化を調べた。トレーサとして気相側にメタン、液相側にアシッドオレンジII水溶液を使用した。いずれも気水混合部の十分上流から注入したので、測定区間入口でサブチャンネル断面に一樣なトレーサ濃度となった。次に、測定区間において、主流の気

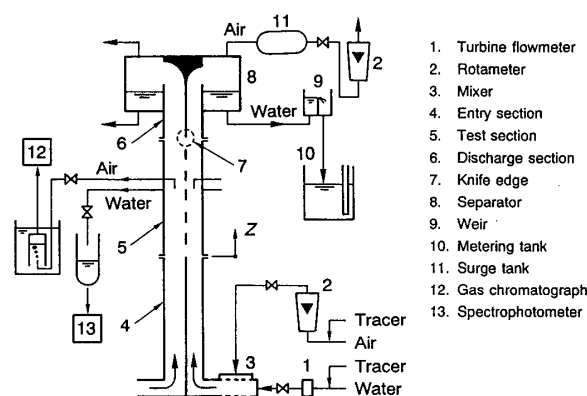


図3 実験装置

相および液相を微量抽出し、気相は水上置換により、液相は滴下により捕集した。捕集した空気中に含まれるメタン濃度をガスクロマトグラフで、水中のアシッドオレンジII濃度を分光光度計によりそれぞれ測定した。主流の抽出に際して、液相は流路の壁面にあけた直径0.7 mmの穴から、気相はサブチャンネルの中心に開口させたプローブからそれぞれ抽出した。これらの位置から抽出した試料の濃度は気相、液相共にサブチャンネルの混合平均濃度に十分近い値となることをあらかじめ確認した。なお、サンプリング時間は1分間とした。抽出断面を、管軸方向500 mmの間隔で4箇所設けることにより、非平衡流におけるトレーサ濃度分布を得た。

次に、平衡流における乱流混合量を求めるために、この流れにおけるトレーサ濃度分布を測定した。その際、測定区間の流れを平衡状態とするために、式(8)、(9)の条件に加えて、次の条件を満たすように二つのサブチャンネルの入口に所定流量の空気と水を導入した。

$$G_{hi}(0) = G_{ki}(Z), G_{kj}(0) = G_{kj}(Z) \dots\dots\dots (10)$$

式(10)はそれぞれのサブチャンネルの流量は軸方向に不変であることを意味している。このように設定した流れにおいて、測定区間における管軸方向のトレーサ濃度分布を調べた。この濃度分布のデータをトレーサの質量保存式にあてはめて、平衡流における管軸方向単位長さ当たりの乱流混合量 W_k [kg/(m·s)] を求めた。 W_k は乱流混合による質量流束 G_k^* と次式の関係にある。

$$W_k = G_k^* S_{ij} \dots\dots\dots (11)$$

流動条件は、Ch.E-FとCh.F-Fのそれぞれについて、総括流路に対する水と空気の体積流束の組合せが、 $j_L = 1.0$ m/s と $j_C = 3.3$ m/s、および $j_L = 1.5$ m/s と $j_C = 4.0$ m/s の2種類とした。これらの流れは、ポイド率が $\alpha \approx 0.6$ 近傍のスラグ・チャーン流であった。Ch.E-

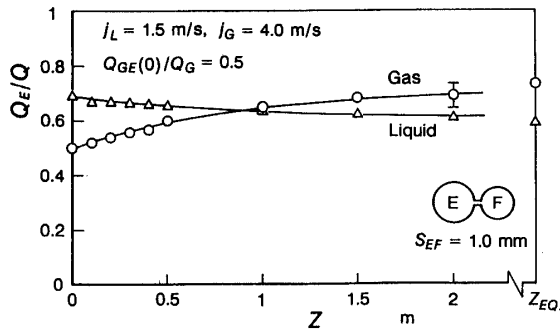
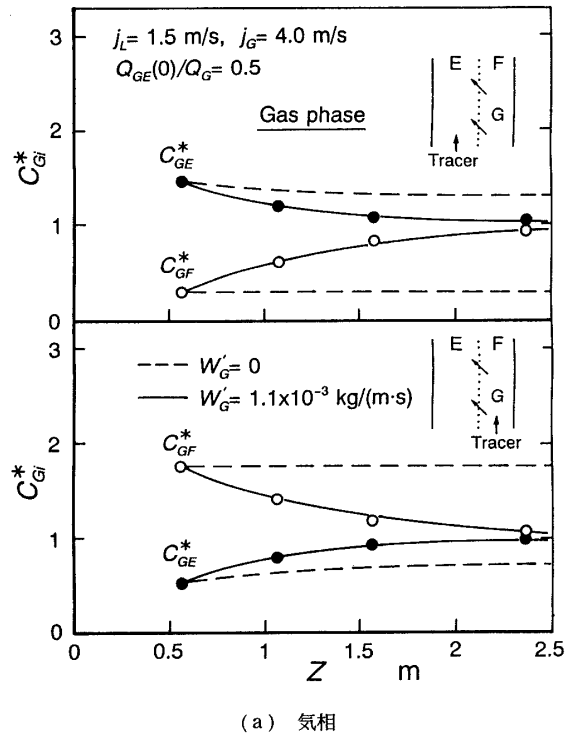
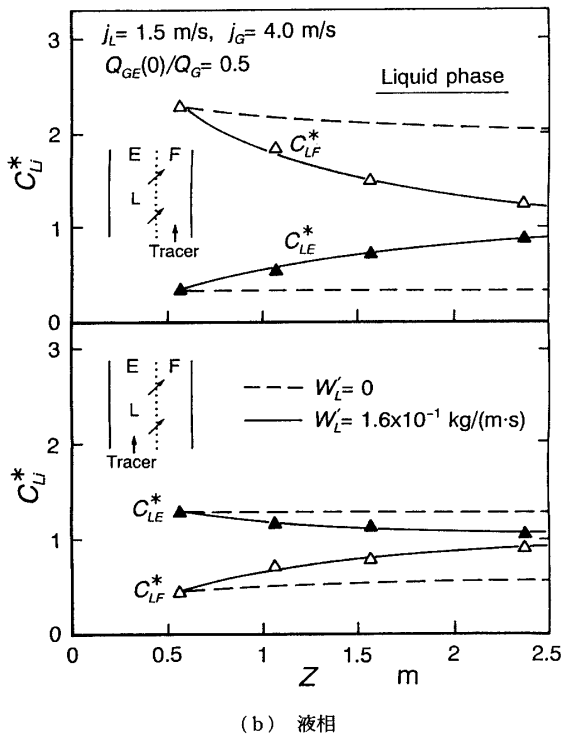


図4 ポイドドリフトによる流量再配分 (Ch. E-F: $j_L = 1.5$ m/s, $j_C = 4.0$ m/s の場合)

Fのような非等断面積のサブチャンネルから成る複合流路の場合、平衡流においては気相は断面積の大きいサブチャンネルに、液相は断面積の小さいサブチャンネルに偏って流れる偏流現象が現れる。この偏流現象は、 $\alpha \approx 0.6$ 付近のスラグ・チャーン流領域で最も顕著



(a) 気相



(b) 液相

図5 トレーサ濃度分布 (Ch. E-F: $j_L = 1.5$ m/s, $j_C = 4.0$ m/s の場合)

となり、気泡流および環状流領域ではほとんど生起していない⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また、この偏流現象はポイドドリフトの結果であるから、ポイドドリフトによるサブチャンネル間の流体移動量は、スラグ・チャーン流領域で大きく、気泡流および環状流領域で小さいと予想される。そこで、ポイドドリフトの影響が顕著となる上記の流動条件のスラグ・チャーン流において、提案の乱流混合量の取り扱い法を検討した。

4. 実験結果と考察

4.1 ポイドドリフトによる流れの再配分とトレーサ濃度分布 Ch.E-F および Ch.F-F のそれぞれに対して、 $j_L=1.0$ m/s と $j_G=3.3$ m/s, および $j_L=1.5$ m/s と $j_G=4.0$ m/s の 2 種類の流動条件に関して乱流混合量の取り扱い法を検討した。しかしながら、得られた結果は類似していたので、紙面の都合上それぞれの流路に対して一条件の結果のみを以下に示す。

図4はCh.E-Fにおけるポイドドリフトによる軸方向への気液の流量再配分の実験結果である⁽⁹⁾。図の縦軸は総括流路の空気もしくは水の体積流量に対するCh.Eのそれらの比、 Q_{GE}/Q_G もしくは Q_{LE}/Q_L であり、横軸は測定区間入口を起点とする流れ方向への距離 Z である。総括流路に対する水と空気の体積流量が、それぞれ $j_L=1.5$ m/s, $j_G=4.0$ m/s の場合である。 $Z=Z_{EQ}$ 上のプロット点は、この流れが平衡状態に達したときの水および空気の流量配分比である。図4の場合、測定区間入口において空気の流量を各サブチャンネルに平衡状態のそれから外れた値 $Q_{GF}(0)/Q_G=0.5$ に配分したので、流れはポイドドリフトにより平衡状態に漸近した。空気(○印)はCh.FからCh.Eへ、水(△印)はCh.EからCh.Fへそれぞれ移動している。実線は実験データを近似したものである。

図5は図4の流れにトレーサを注入して得られた管軸方向への濃度分布の実験値で、図5(a)に気相、図

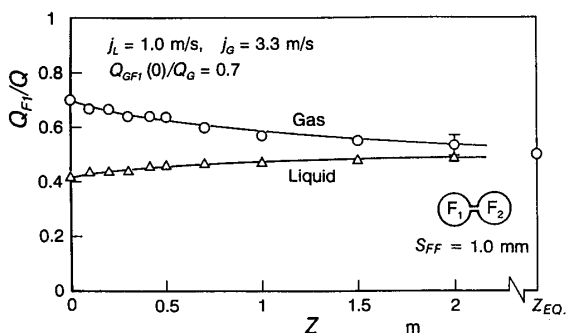
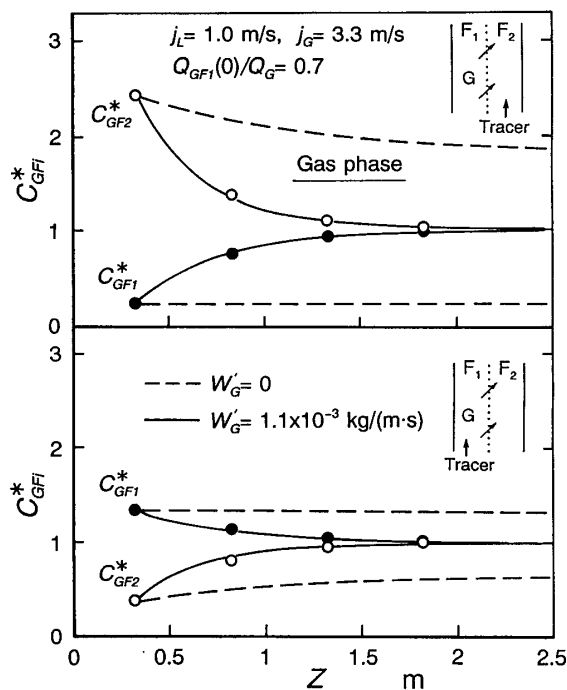
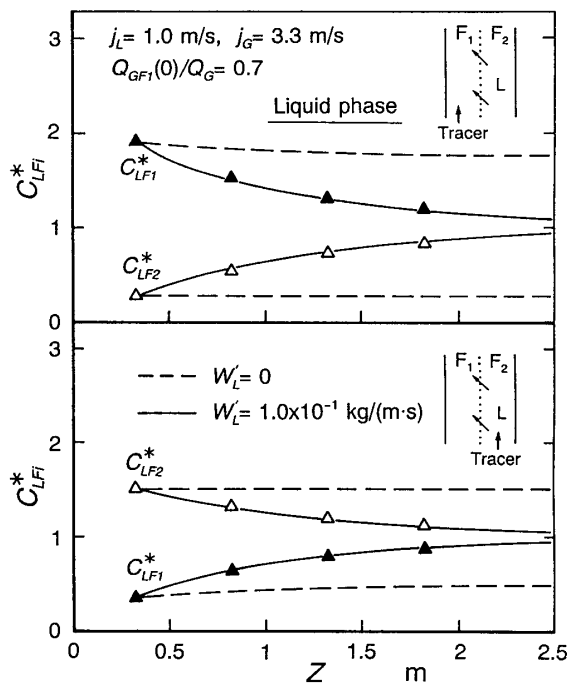


図6 ポイドドリフトによる流量再配分 (Ch. F-F : $j_L=1.0$ m/s, $j_G=3.3$ m/s の場合)

5(b)に液相の結果を示す。図の縦軸は式(5)の無次元濃度 C_{GF}^* であり、横軸は図4と同じである。トレーサをCh.EあるいはCh.Fに注入した場合のそれぞれ二つの結果を示している。各実験点はそれぞれ3回の測定の平均であり、 C_{GF}^* および C_{LF}^* の誤差はそれぞれ



(a) 気相



(b) 液相

図7 トレーサ濃度分布 (Ch. F-F : $j_L=1.0$ m/s, $j_G=3.3$ m/s の場合)

れ ±6% と ±3% と見積られた。図中の実線は、乱流混合量 W'_k としてこの流れが平衡状態に達したときに呈する値を用い、 $Z=0.57\text{ m}$ の濃度の実験値を初期値として与えた時の計算結果である。実線と実験点はよく一致している。一方、図中の破線は乱流混合を無視した場合 ($W'_k=0$) の計算結果であり、実験結果とは一致しない。

図6および図7(a), (b)に、Ch. F-Fにおける気液両相の流量再配分⁽⁹⁾とトレーサ濃度分布の結果を示す。総括流路に対する水と空気の体積流束が、それぞれ $j_L=1.0\text{ m/s}$, $j_G=3.3\text{ m/s}$ の流れであった。Ch. F-Fは同一の円形サブチャンネルから成るので、平衡した流れの気水の流量配分比はいずれも0.5となる。そこで、図6に示すように測定区間入口のCh. F₁への空気の流量配分比を $Q_{GF1}(0)/Q_G=0.7$ に設定し、ポイドドリフトにより平衡状態に漸近していく流れを起こした⁽⁹⁾。この流れの場合、空気はCh. F₁からCh. F₂へ、水はCh. F₂からCh. F₁へ移動している。図7のトレーサ濃度の実験値の傾向は、図5の流れと同じであり、実線の計算結果との一致はよい。なお、計算開始点は $Z=0.325\text{ m}$ とした。

以上、サブチャンネルにおける管軸方向への気相と液相のトレーサ濃度分布に関して、トレーサを注入するサブチャンネル、流量条件および流路の違いにもかかわらず、実線の濃度分布の計算値は実験値とよく一致している。このことは、乱流混合とポイドドリフトを独立した流体移動とした仮定、および非平衡流の乱流混合量は、その流れが流体力学的平衡状態に達したときに呈するそれに等しいとした仮定がいずれも合理的であることを示している。

4・2 乱流混合およびポイドドリフトによる横方向速度 4・1節の検討により、非平衡流におけるサブチャンネル間の流体移動は乱流混合とポイドドリフトの二つの成分の線形和で記述できることがわかった。そこで、これら二つの流体移動量を主流に垂直な横方向への移動速度として評価し、二つの速度成分の大きさを比較した。乱流混合による横方向速度 \tilde{V}_k を次式で定義した。

$$\tilde{V}_k = \frac{W'_k}{\rho_k S_{ij}} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 ρ_k は k 相の密度 [kg/m^3] であり、乱流混合量 W'_k には平衡流における実験値を与えた。次に、ポイドドリフトによる横方向速度 $(V_{kij})_{VD}$ は次式で求めた。

$$(V_{kij})_{VD} = (G_{kij})_{VD} / \rho_k \dots\dots\dots (13)$$

ここで、ポイドドリフトによる質量流束 $(G_{kij})_{VD}$ は、

図4および図6に示した流量再配分の実験値の近似曲線から式(7)を用いて計算した。

図8および図9はそれぞれCh. E-FとCh. F-Fの流れにおける \tilde{V}_k と $(V_{kij})_{VD}$ を比較した結果である。ここで、 $(V_{kij})_{VD}$ は、流体がサブチャンネルEあるいはF₁からサブチャンネルFあるいはF₂に移動する場合を正としている。一方、 \tilde{V}_k は方向性のない流体移動であるから、正、負両方の値をとるが、図8と9においては正の値でプロットしている。ただし、気相の \tilde{V}_G が Z の増大につれて増加しているのは、静圧の減少による空気の膨張のためである。

図8と9のいずれにおいてもデータの傾向は同じである。すなわち、管軸方向の距離 Z が増すにつれて、流れは平衡流に近づくので、ポイドドリフトによる横方向速度 $(V_{kij})_{VD}$ は零へ漸近していく。さらに、 $(V_{kij})_{VD}$ は乱流混合による横方向速度 \tilde{V}_k より小さい値である。したがって、図5および図7の濃度分布の

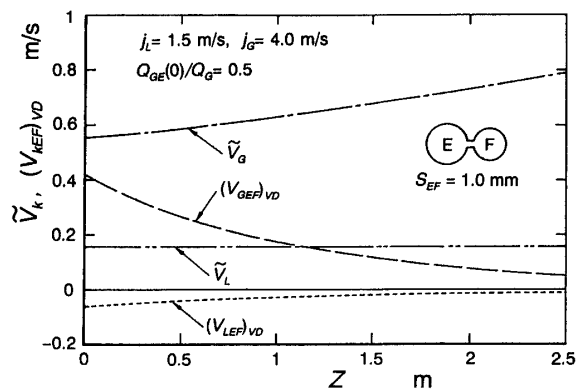


図8 乱流混合およびポイドドリフトによる横方向速度成分の比較 (Ch. E-F : $j_L=1.5\text{ m/s}$, $j_G=4.0\text{ m/s}$ の場合)

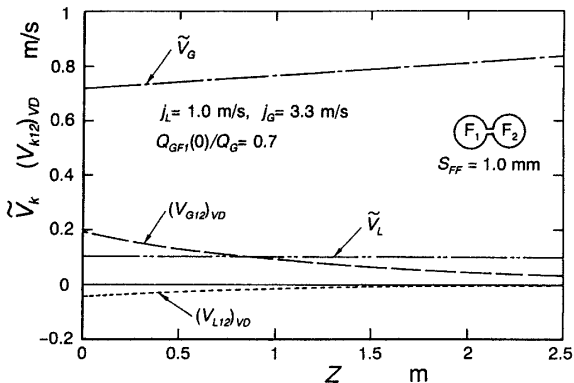


図9 乱流混合およびポイドドリフトによる横方向速度成分の比較 (Ch. F-F : $j_L=1.0\text{ m/s}$, $j_G=3.3\text{ m/s}$ の場合)

計算結果には乱流混合量 W_k の影響が大きく現われている。以上の事実から、サブチャンネル間に圧力差のない非平衡流においては、サブチャンネル間のトレーサの質量交換には、ボイドドリフトよりも乱流混合の寄与が大きいと結論できる。

なお、乱流混合による横方向速度 \bar{V}_k の値は各相の主流の見掛け速度(体積流束) j_k と比較したとき、気相で約 20%、液相で約 10% の大きさであった。

5. 結 言

乱流混合をボイドドリフトと独立した流体移動とする計算の当否を実験値との比較により検討した。実験は、二つの円形サブチャンネルから成る垂直流路の空気-水二相流で行った。サブチャンネル間に一方方向性の流体移動としてボイドドリフトのみが生起する流れをつくり、一つのサブチャンネルの流れにトレーサを注入して、管軸方向へのトレーサ濃度変化を調べ、計算と比較した。その結果、サブチャンネル間の流体移動量を評価する上で、「乱流混合とボイドドリフトは独立した流体移動である」と「非平衡流における乱流混合量は、その流れが流体力学的平衡状態に達したときに呈するそれに等しい」、の二つの仮定が合理的であることがわかった。また、乱流混合とボイドドリフトそれぞれによる横方向速度成分を比較した結果、サ

ブチャンネル間のトレーサの質量交換にはボイドドリフトよりも乱流混合の寄与が大きいことがわかった。

文 献

- (1) Lahey, Jr., R. T. and Moody, F. J., *The Thermal-Hydraulics of Boiling Water Nuclear Reactor*, 2nd ed., (1979), 122, ANS.
- (2) Lahey, Jr., R. T., ほか 3 名 (Hetzroni, G., ほか 2 名編), *Progress in Heat and Mass Transfer*, 6(1972), 345, Pergamon.
- (3) Gonzalez-Santalo, J. M. and Griffith, P., *ASME Paper*, 72-WA/NE, (1972).
- (4) Lahey, Jr., R. T., *Proc. 8th IHTC* (San Francisco), NR-01, (1986), 2399.
- (5) Collier, J. G. (Kakaç, S. and Spalding, D. B. 編), *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles*, 2(1979), 1041, Hemisphere.
- (6) Lahey, Jr., R. T. and Schraub, F. A., *Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rod Bundles*, *ASME Booklet*, (1969), 1.
- (7) Rowe, D. S. and Angle, C. W., *BNWL-371, PT1*, Pacific Northwest Laboratory, (1967).
- (8) Bowring, R. W., *AEEW -R524*, (1967), and -R 582(1968).
- (9) 佐藤・ほか 4 名, *機論*, 56-528, B(1990), 2327.
- (10) Sato, Y., ほか 2 名, *Proceedings of 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf.*, (1987), 389.
- (11) Sato, Y. and Sadatomi, M., *Proceedings of the Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics* (Ohtsu), (1988), E 4-1.