

# 液相加速時の非定常気液二相流の圧力損失と ボイド率に関する研究

神永文人\*, 益子一郎\*

(昭和60年9月6日受理)

## Pressure Drop and Void Fraction of Transient Gas-Liquid Flow under Increasing Liquid Flow Rate

Fumito KAMINAGA\* Ichiro MASHIKO\*

*Abstract* – A transient two phase flow was investigated in an air-water two phase system. Transient experiments were carried out by increasing liquid flow rate with time to change flow patterns from slug or plug to bubble flows.

Void fraction measured in the transient conditions is a little less than the one in the steady state which is evaluated by inlet flow rates of air and water at each time. This small difference is due to a limited effect of gas compressibility in the flow patterns in which the liquid is continuous and the gas discreet phases. An increasing rate of liquid flow rate has a negligible effect on the void fraction transient.

In low gas flow rates a pressure drop in transient conditions is a little larger than the one in the steady state and the increasing rate has no effect on the pressure drop. On the other hand, in high gas flow rates the transient pressure drop is less. This tendency is consistent with the void fraction transient. In this case the increasing rate significantly affects the pressure drop and its higher value makes a lower pressure drop.

### 1. 諸 言

気液二相流に関しては、近年多数の実験的および解析的研究が行なわれ、多くのことが明らかになってきた。しかし、現象の複雑さのため、二相流の流動機構に関する理解はまだ不十分である。定常状態での気液二相流に関しては圧力損失、ボイド率や流動様式を定量的に把握する試みが多数なされ、工業上有用なデータや設計式を提供している。一方、非定常状態での気液二相流に関しては、おもに水冷却型原子炉の冷却材喪失事故(LOCA)について多数の実験や計算機を用いた数値解析が行なわ

れてきた。しかし、それらの解析で用いられる相関式はすべて定常実験で得られたものと言ってよい。これまで LOCA では、時間的変化が大きく、非定常項が現象を支配しているため、たとえば圧力降下の計算には管摩擦係数の影響が小さいのが実情であった。しかし小破断事故のように流出流量が少ないため、非定常性が比較的小さい場合については、管摩擦係数などの非定常時の変化について調べておく必要性が高い。このような場合、非定常時の流動機構や流動様式の変化についても言及する必要がある。Taitelら<sup>(1)</sup>は非定常時の流動様式の遷移について実験的に調べた。その結果、非定常と定常時の流動様式の遷移流量が異なること、また気相流量が変化する

\* 茨城大学工学部機械工学第二学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering II, Faculty of Engineering, Ibaraki University,  
Hitachi 316, Japan

場合、定常状態が順次時間とともに変化する擬定常とは扱えず、変化の途中で定常状態では現われない流動様式が出現することがあり、液相の慣性と気相の圧縮性が複雑に関連していることを明らかにした。しかし扱っている領域が層状流からスラグ流れにかけての範囲が主で、また定性的な傾向が示されたにすぎない。

本研究では非定常二相流の流動機構の解明の第一歩として、水平管内での空気・水系二相流に関して、液相が加速されている状態での圧力損失とボイド率の変化について実験的に調べ、定常二相流との相違を検討した。本研究で扱った流動様式は気泡流とスラグ流である。

記号

- Q : 容積流量 (l/min)
- U : みかけ速度 (m/s)
- X : マルチネリパラメータ  $(\rho_g / \rho_l)^{0.5} \{ (1-x) / x \}^{0.9} (\mu_l / \mu_g)^{0.5}$

- x : クオリティ
- $\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  : 粘性係数 (kg/ms)
- $\alpha$  : ボイド率
- $\Phi^2_{\ell}$  : 二相流摩擦損失増倍係数 =  $\Delta h_F / \Delta h_l$
- $\Delta h$  : 圧力差 (mmAq)
- $R_T$  : 非定常二相流摩擦損失比 =  $\Delta h_{TF} / \Delta h_F$
- a : 液流速の時間変化率 (m/s<sup>2</sup>)
- $\beta$  : 容積流量クオリティ
- 添字 F : 二相, l : 液相, g : 気相, T : 非定常

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。供試管⑧は内径 25.7 mm, 長さ 6 mの透明アクリル管で水平に設置されている。上流端には気液混合部⑦が設けられ、混合される空気は、

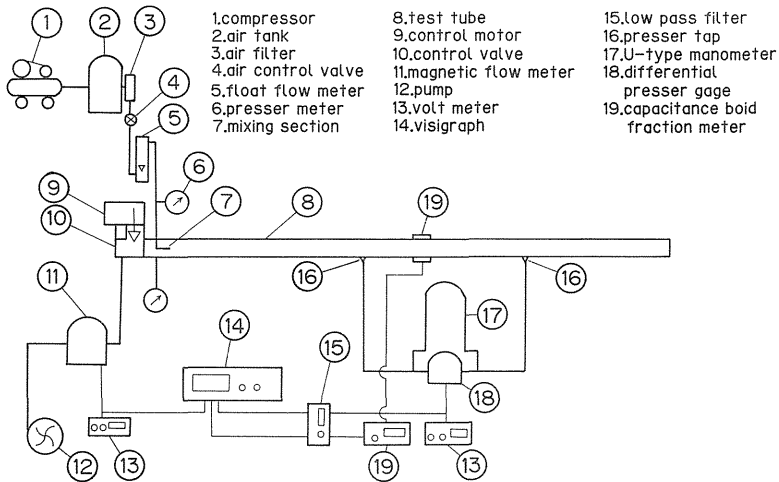


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

コンプレッサ①で約 8 kg/cm<sup>2</sup>に加圧され、エアタンク②、エアフィルタ③、減圧バルブ④、浮子型流量計⑤を通り、供試管の上流端に設けた外径10mm, 空孔径 150 μの合成樹脂製フィルタ筒の中を通り、外側に出て、供試管の中心で水と混合する。非定常実験中に浮子型流量計の読みは少し変化するが圧力計⑥で測定された背圧で補正すると、本実験の場合ほとんど変化しない。水は最大水頭 43.5 mのポンプ⑫により供給され、電磁流量計⑪で流量が測定された後、流量制御弁⑩を通り、供試管に流入する。制御弁は制御モータ⑨により駆動され、流量の時間変化率を一定に保ちつつ流量調整ができる。圧力損失

は、気液混合部から 1440 mmと 2440 mmの位置間(測定間隔 1 m)の圧力差を、定常では逆U字マノメータ⑭で、非定常では差圧計⑮で測定した。ボイド率は、混合部より約 2000 mmの位置の管外壁上下方向に取付けた銅電極板間の静電容量変化を利用して計測した。このボイド計の検定は締切法で行った。非定常実験では、差圧計とボイド計の出力はローパスフィルタ(Cut-off 周波数30Hz)⑮を通した後に、電磁流量計の出力は直接ビジグラフ⑬に記録した。

非定常実験は空気流量を一定に保ったまま、水の流量を制御弁により一定の加速度で増加させながら行なわれ

た。実験の範囲は, 流入流量は $Q_g = 5 \sim 100 \text{ l/min}$ ,  $Q_l = \text{約} 80 \sim 190 \text{ l/min}$ , 加速度は $a = 0.2 \sim 1.8 \text{ m/s}^2$ である。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 定常実験結果

二相流の実験を行う前に液单相流れにおける管摩擦係数のレイノルズ数に対する変化を測定した。図2にその結果を示す。本研究での流量範囲では乱流となり, 図中のブラジウスの式とよく一致し, 実験で用いた管はなめらかであると考えてよいことがわかる。今後单相の圧力損失が必要な場合はブラジウスの式より計算するものとする。

定常二相流の実験で得られた流動様式線図を図3に示す。流動様式の判別はおもに写真によって行った。流動様式の判別の基礎となった写真の一部を写真1に示す。流動様式の判別には目視観察以外にも深針法<sup>(2)</sup>, ボイド率の統計的整理<sup>(3)</sup>や圧力変化の統計的整理<sup>(4)</sup>などが試みられているが, 今までのところ十分と言える判別手法は確立されておらず, 研究者によって結果が少し異っているのが実情である。図中には比較のため Baker<sup>(5)</sup>と Mandhane<sup>(6)</sup>の結果を示す。本研究での実験値と比べ

ると実験値は気泡流とプラグ流との境界が低液流速側にずれているが, これは写真1-2に示されるように, 気泡が管の上部にあっても, その気泡が合体して比較的大きな単一気泡になっていない間は気泡流と定義したためである。写真と比べると Mandhane の線図は, 気泡が均一に分散している流動のみを気泡流と定義しているものと推察される。図中の矢印付き実線は非定常実験での上流端での流速の変化径路を示している。実験は気泡流とプラグあるいはスラグ流との境界から気泡流の範囲の変化であることが分かる。このことは図4に示した容積流量比とボイド率の関係からも明らかで, スリップのない  $\alpha = \beta$  曲線近くにほとんどのデータがあり, 均質流れの特徴を示している。

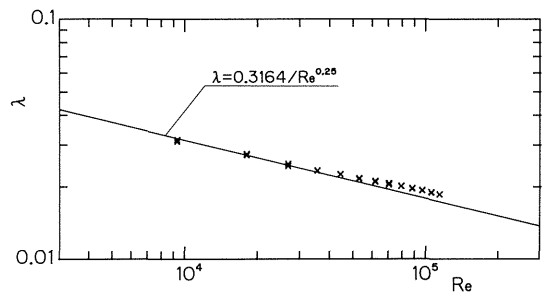


Fig. 2 Friction factor in single phase flow.

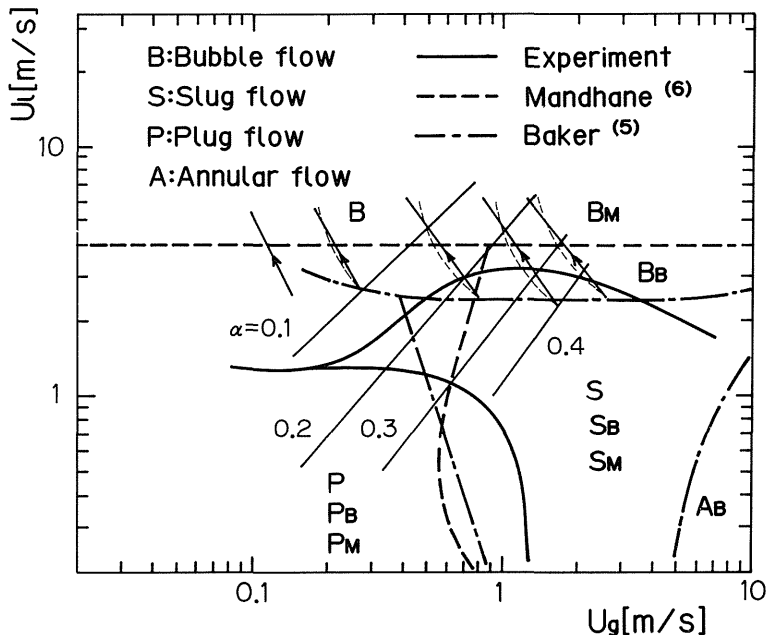


Fig. 3 Flow pattern map

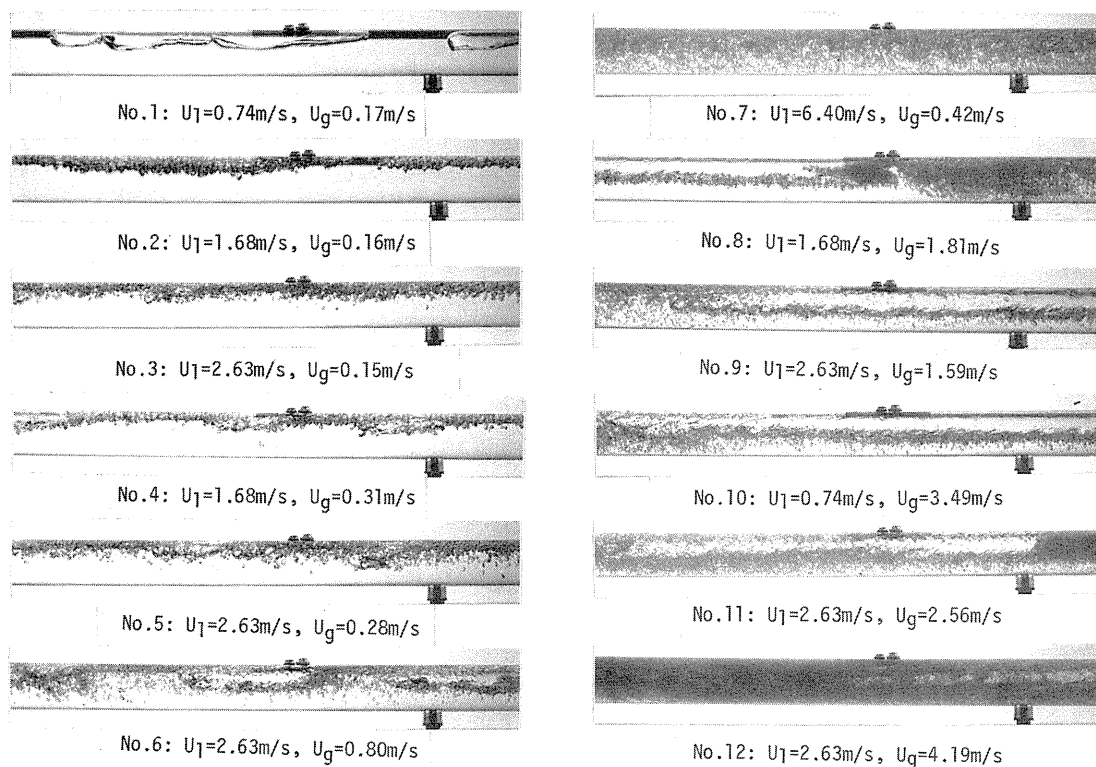


Photo. 1 Views of flow patterns (Bubble, Plug, Slug)

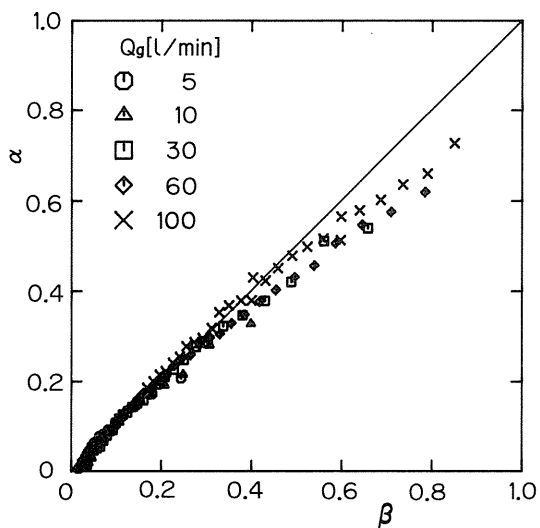


Fig. 4 Relation between void fraction and volumetric flow fraction.

二相流の圧力損失を評価するときによく用いられる二相流の圧力増倍係数  $\phi_f^2$  とマルチネリパラメータ  $X$  の逆数の関係を図5に示す。 $\phi_f^2$  と  $X$  の関係は流動様式や各相の流量によって影響を受け、一本の関係式では示すことが困難であるとの実験結果<sup>(7)</sup>も示されているが、この実験範囲ではほぼ一本の曲線で整理できることが分かる。ただし実験値は実線で示したLockhart-Martinelli<sup>(8)</sup>の値(液相と気相が共に乱流の場合)よりはる圧力損失が

少し大きくなっているが、その差は最大20%である。

ボイド率に関して圧力増倍係数をまとめた結果を図6に示す。同時に赤川<sup>(9)</sup>の相関式とLockhart-Martinelli<sup>(8)</sup>のデータを最小自乗近似して得られた曲線を比較のため示す。実験データは両曲線の間に位置しており、 $\phi_f^2$  と  $\alpha$  の関係は流動様式にはあまり大きな影響を受けず、実験範囲では増倍係数はボイド率の単調増加関数となっている。

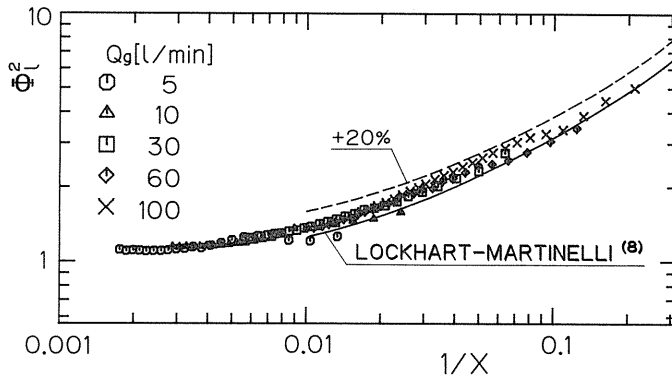


Fig. 5 Relation between two-phase frictional multiplier and Martinelli parameter.

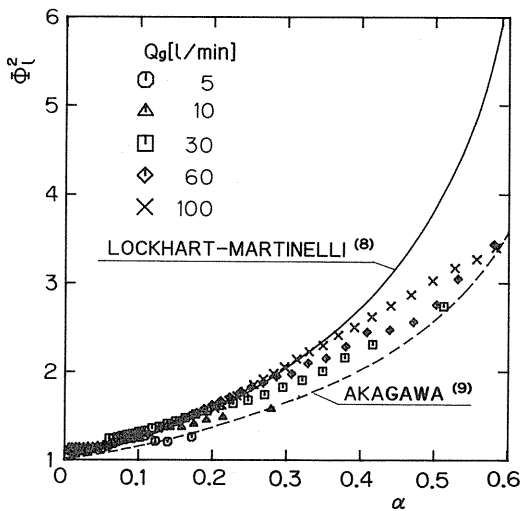


Fig. 6 Relation between two-phase frictional multiplier and void fraction.

### 3.2 非定常実験結果

非定常時のボイド率の変化を図7に示す。ただし、非定常実験開始時刻の認定が困難なことから各加速度で横軸

を同じスケールで評価するため、横軸は時間でなく、みかけの液流速を用いた。図中には定常状態におけるボイド率と液流速の関係を実線で示した。非定常時のデータはビジュグラフ上に記録された曲線から適当な時間間隔で読み取った結果を示している。本来ならばこれらの離散値はなめらかにつないで曲線で示すべきだが、各気相流量ごとに9本の曲線を書くときにくくなるので、ここでは読み取ったデータを記号で示している。また、気相流量5 l/minのデータは測定誤差が大きいのはふいた。気相流量が10 l/minで流速が約4 m/s以上のデータはボイド計の検出範囲外のデータが多く含まれているため、後半部で一定値を示している。図より以下のことが分かる。(1)ほとんどの流速の範囲で非定常時のボイド率は定常値より小さくなる。(2)加速終了時付近で(流速で6 m/s以上)逆に前者は後者より少し大きくなる。(3)非定常時と定常時の差が大きい所は気相の流量が小さくなるにつれて高流速(遅い時刻)の方にずれる。(4)液流速とボイド率の関係に対する加速度の効果は一定しておらず、この実験の加速度の範囲では、その効果はほとんどない。これらの結果は次に示す原因によると考えられる。液相の流量を増加させてゆく場合、気相の圧縮性

のためボイド率を測定している場所では注入流量に比べ流速の増加割合が小さくなり、測定部では定性的に図3中で破線で示した経路をたどって変化するものと考えられる。したがって図3の等ボイド線と比較すると、上記の(1)(2)に示すボイド率の変化は明らかである。(3)の結果は、気相流量が大きいほうが圧縮性の効果が大きく出て、時間遅れが大きくなるため、みかけの流速と実際の流速の差が早く出てくるものと考えられる。ただしここで取扱っている流動様式は図3にも示すように流速が比較的大きい範囲であり、気相流速が大きい所ではスラグ状流

れが現われているが、この流れにおいても分離流れとは異なり、気相の周りは液相で覆われ、液相が連続相、気相は分散相となっている。そのため気相は圧縮性があるものの、分離流あるいは気相が連続相をなしている流れに比べ圧縮性の効果が小さくなり、変化に対する時間おくれが小さくなり、その結果としてボイド率の相違もあまり大きくならなかつたものと考えられる。(4)に示す加速度の影響も同様な理由で大きくはならなかつたと思われる。

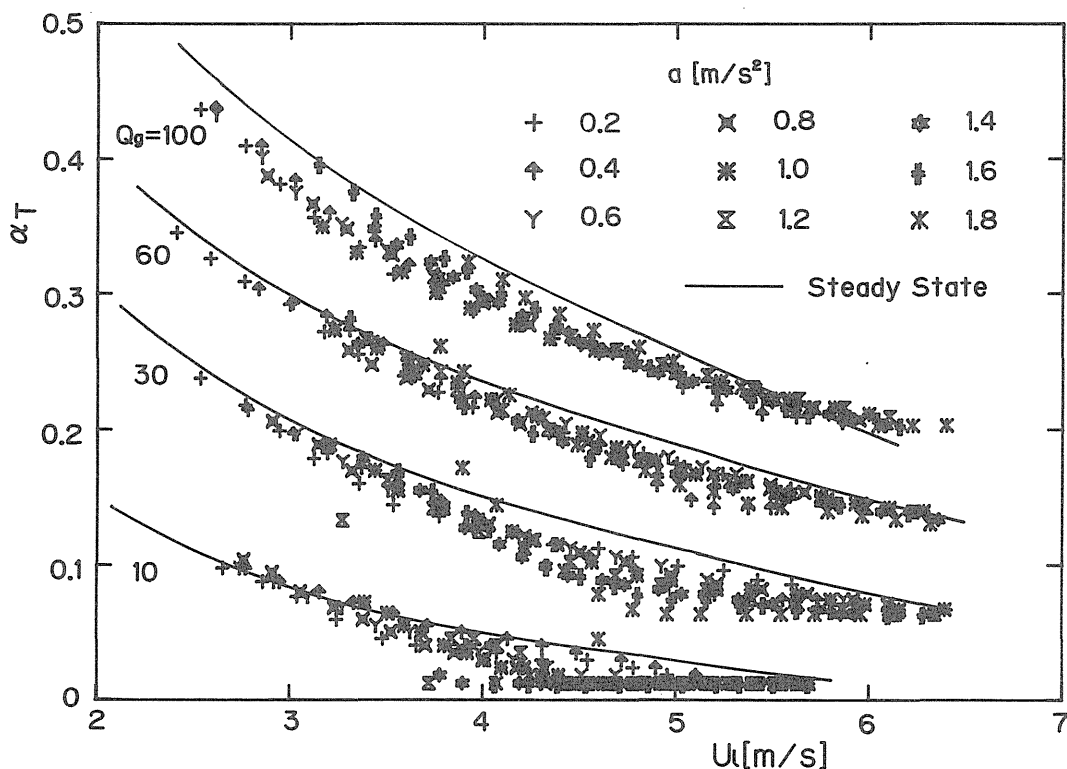


Fig. 7 Variation of void fraction in steady state and transient conditions.

非定常時の圧力損失の評価は、定常時の圧力損失との比  $R_T$  を用いて行った。定常時の圧力損失は各時刻で注入されている液と気体の流量を用いて、定常実験で得られた圧力損失を内そうして求めたものである。図8から12はその圧力損失比の時間的変化を示したものである。ただし、図7と同様に横軸は液のみかけ流速とし、記号は加速度の違いを示し、その意味は図7と同じである。また加速開始時付近では圧力変動が現われるので、変動がなくなってからのデータを図に示した。それらの図から

次のことが分かる。低い気相流量 (5 と 10 l/min) では圧力損失比は 1 より少し高く、非定常のほうが圧力損失が大きい。また加速度の効果は小さい。気相流量が高い (30, 60, 100 l/min) 所では、加速度が小さい場合は圧力損失比は 1 あるいは 1 より少し大きい程度で、みかけの液流速によらずほぼ一定の値を示すが、加速度が大きいと、みかけの液速度が小さい所 (変化の初期段階) ではその比は 1 よりかなり小さくなり、前記と逆に非定常時のほうが圧力損失が小さくなることから分かる。

非定常時の圧力損失に言及した研究は少ないが, 最近黒川ら<sup>(10)</sup>は円管内の水単相流で加速流れにおける管摩擦係数について次のような結果を得ている。実験は層流に始まり乱流域まで増速している。層流加速域では, 粘性の影響が伝播するのに有限時間を要するので, 速度分布は定常ポアズイユ流より平坦な分布となり, 非定常値のほうが大きくなる。一方, 乱流加速域では, 加速による乱れの抑制効果のため非定常値のほうが小さくなり, また加速度が大きくなるに従って定常と非定常の摩擦係数の差は大きくなる。本実験ではみかけの液流速を用いてもレイノルズ数は最小で $5 \times 10^4$ となり, 乱流と考えてよい。従って乱流域内での加速実験と言えるので, 上述の黒川らの実験とは少し異っていることも考えられる。つまり本実験においては, 一般には上述の層流域で観察されたように, 粘性の影響が伝播するのに有限時間を要するため, 非定常のほうが圧力損失が大きくなると考えられる。しかし, 気相の流量が多いと気相の圧縮性のため, 測定部を流れる液流量が注入流量よりも小さくなるため, 圧力損失が減少するものと考えられる。この結果は図7に示した非定常ボイド率が定常値より小さくなり, さらに図6に示されるように圧力損失がボイド率の単調増加関数であることを考慮すると定性的にはボイド率変化と合致する。定常値との相違が大きい所は気相流量が大きいほど, 変化時の早い時期(低い液流速に相当)にずれることはボイド率と圧力損失で同じである。ただしボイド率の変化に比べ圧力損失では加速度の効果が明確にあらわれ, その傾向が上述の単相加速流れの乱流域のそれと合致するが, この原因として, 黒川らが言う, 乱れの抑制効果が加速度の効果をより強くしていることも考えられるが, 今のところはっきりとは分らない。

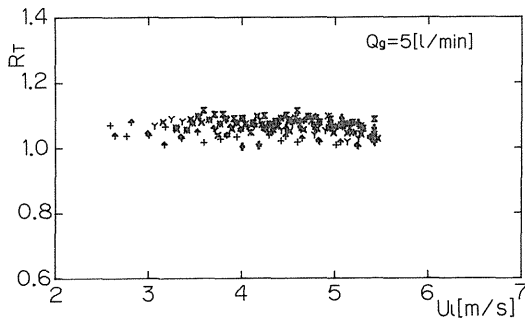


Fig. 8 Variation of pressure drop ratio of transient to steady state conditions.

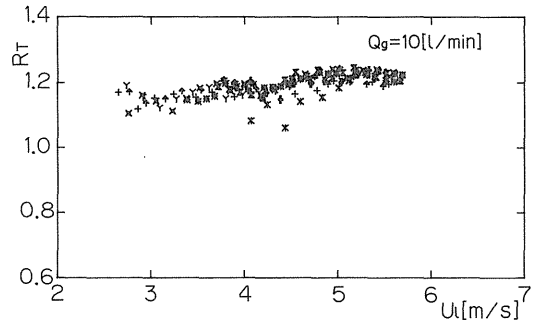


Fig. 9 Variation of pressure drop ratio of transient to steady state conditions.

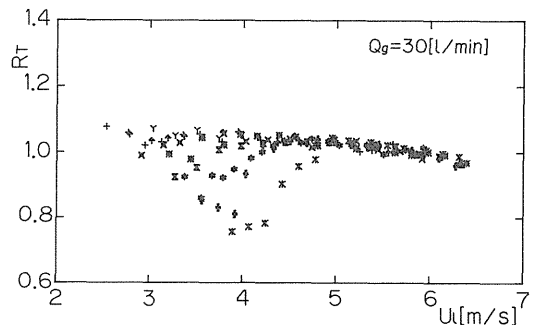


Fig.10 Variation of pressure drop ratio of transient to steady state conditions.

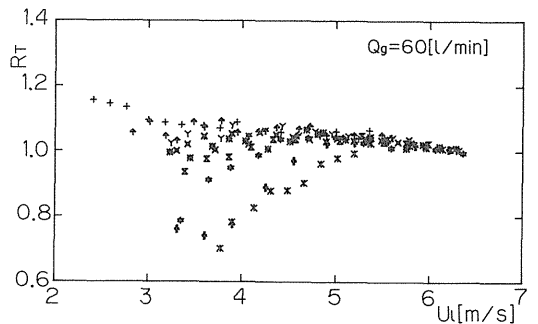


Fig.11 Variation of pressure drop ratio of transient to steady state conditions.

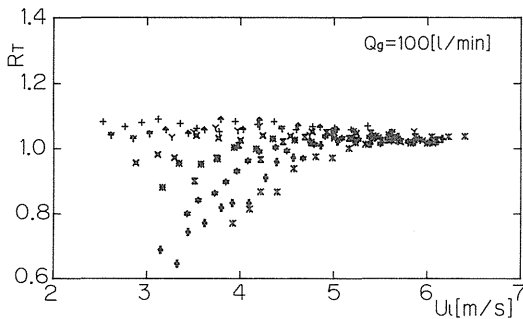


Fig.12 Variation of pressure drop ratio of transient to steady state conditions.

#### 4. 結 論

水平管内空気・水系二相流で水の流量を時間的に増加させていったときの非定常実験を行ない以下の結論を得た。(1)非定常時のボイド率は上流で流入する気相と液相の流量で評価した定常状態でのボイド率より小さな値を示す。これは気相の圧縮性による時間おくれがその差の原因であるが、本実験のように液相が連続相で、気相が分散相のような場合は圧縮性の効果はさほど顕著でなく、その差が大きくなる。 (2)ボイド率に対する液流速の加速度の効果は小さい。(3)非定常時の圧力損失は定常の場合よりも一般には少し大きい。しかし気相流量が大きい場合、ボイド率が定常値より小さくなることに対応し

て、定常の場合より小さくなる。(4)圧力損失に対する液流速の加速度の効果は気相流量が増すに従い顕著になり、その加速度が増すにつれて圧力損失の定常値との比は減少する。

#### 参 考 文 献

- (1) Y. Taitel, N. Lee, *AICHE J.*, 24-5 (1978) 920.
- (2) 世古口, 福井, 松岡, 西川, *日本機械学会論文集*, 40-336 (1974) 2295.
- (3) O.C. Jones, Jr., J.M. Delhaye, *Int. J. Multiphase Flow*, 3 (1976) 89.
- (4) P.K. Jain, R.P. Roy, *Int. J. Multiphase Flow*, 9 (1983) 463.
- (5) O. Baker, *The Oil and Gas Journal*, 53 (1954) 185.
- (6) J.M. Mandhane, G.A. Gregory, K. Aziz, *Int. J. Multiphase Flow*, 1 (1974) 537.
- (7) 青木, 高橋, 井上, *日本機械学会論文集*, 31-224 (1965) 588.
- (8) R.W. Lockhart, R.C. Martinelli, *Chemical Engineering Progress*, 45-1 (1949) 39.
- (9) 赤川, *日本機械学会論文集*, 23-138 (1957) 292.
- (10) 黒川, 森川, *日本機械学会論文集*, 51-467 (1985) 2076.