

垂直管内気液二相系の流動様式に関する実験的研究

山田 昭* ・ 茂地 徹*
桃木 悟* ・ 金丸 邦康**
国弘 浩二***

An Experimental Determination of the Flow Pattern
for a Gas-Liquid Two-Phase System in Vertical Pipes

by

Takashi YAMADA*, Toru SHIGECHI*
Satoru MOMOKI*, Kuniyasu KANEMARU** and Kouji KUNIHIRO***

A gas-liquid two-phase system was experimentally studied for the case that gas(air) was supplied, through a disk with multiple holes, from the bottom end of a vertical pipe into the initially stagnant liquid (water) column with a free surface. The behavior of the two-phase mixture in the stagnant liquid column was observed visually and the flow pattern was determined using measured void fractions.

In a range of low air flow rate where the flow pattern is always a bubbly flow, the void fractions at the pipe center have constant values of less than 0.2. With an increase in air flow rate, the flow state becomes unstable at lower part of the pipe; whereas, for the higher part of the pipe, the flow pattern turns to either transition or slug flow, depending on the vertical position. And the void fraction at the pipe center decreases sharply along the pipe axis for the transition flow and has a constant value between 0.3 and 0.4 for the slug flow.

1. まえがき

気体と液体の混在する気液二相系の現象は、各種動力プラント、化学プラントおよび空調・冷凍装置に関係し、特に、ボイラ蒸発管、原子炉冷却系、蒸発器、凝縮器などにおける主要過程である。従って、その流動状態や伝熱過程を理解しておくことが、これらの機器を設計する上で極めて重要である。

従来の研究は主としてボイラ蒸発管を模擬した水と空気の両者が同時に流れる二相流であり、例えば、垂直管内を流れている液体中に気体が存在するような場合を対象とする研究がほとんどで、流動状態の気液流量比による分類、ボイド率分布、圧力損失等に関して

多くの知見が得られている¹⁻³⁾。

一方、自由表面(必ずしも静止してはなくてよい)を有する液体中で気体(蒸気)が運動するような容器内の気液二相系の現象は、古くからプール沸騰や蒸発器などでみられるが、最近、二相サーモサイホンや狭い空間内での沸騰に関連した研究が注目されるようになってきた⁴⁻⁶⁾。この現象は、通常の気液二相流では安定していない領域で発生するため非常に複雑な流動様相を示し、これまで、ほとんど研究されていない。

本研究は、大気圧下で垂直管内静止水柱の底部より空気を吹き込んだ場合の空気と水による気液二相系の流動機構を解明することを目的として、まず流動状態

平成4年9月30日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

**共通講座・工業物理学 (Applied Physics Laboratory)

***マツダ(株) (Matsuda Ltd.)

を定性的に把握するために、目視、写真撮影並びにビデオ撮影による視覚観察結果に基づいて流動様式の種類を行い、空気吹き込みによる初期液高さと液体の自由表面の持ち上がりの高さの関係について考察を行った。次に、ボイド率分布の測定結果から流動形態の定量的分類を行い、視覚観察結果から得られた流動状態に関する情報を参照して、気液二相系の流動形態を定量的に推定する方法を確立したので、その概要⁷⁾をここに報告する。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1は本研究で使用した実験装置の系統を示したものである。実験装置は垂直供試管、供試管へ供給する空気と水の配管系統およびボイド率測定装置より構成されている。供試管は管内気液二相系の流動状態を

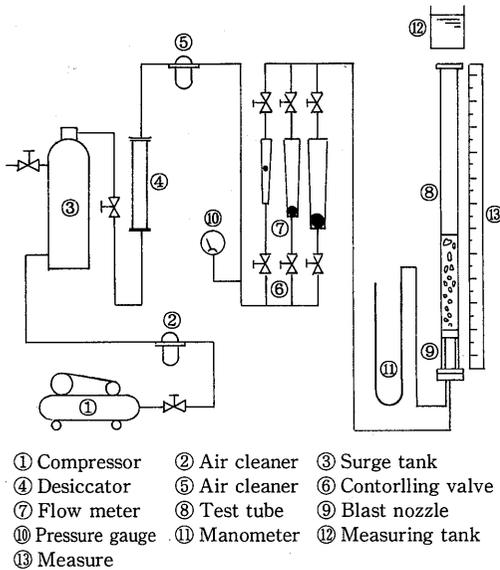


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

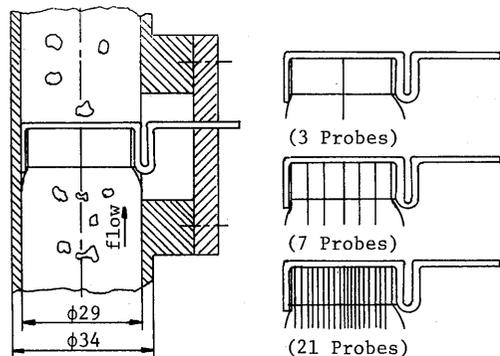


Fig. 2 Probes for void fraction measurements

観察するため、内径29mm、長さ2mの透明のポリカーボネイト製円管を使用した。また、供試管にはボイド率を測定するために、管下端より375mm、730mmおよび1290mmの位置に Fig. 2に示すようにボイド率測定用電極挿入口が設けられている。また、Fig. 2にはボイド率測定に使用した3種類のプローブ形状の概略を示す。

供試管に供給される空気はコンプレッサー①によって加圧された後、エアフィルタ②をへて、サージタンク③に導かれる。サージタンク③によって一定圧力に保たれた空気は乾燥器④を通過した後、エアフィルタ⑤、空気流量調整弁⑥および浮游式流量計⑦をへて、供試管⑧の下部に設置されている空気吹き込みノズル⑨を介して垂直供試管に垂直上向きに吹き出され、供試管内を通過した後、外部に放出される。なお、空気の供給管路には浮游式流量計が3種類(流量測定範囲: 0.3~3.5, 3~30, 6~60ℓ/min)取り付けられており、弁の開閉と調整で供給流量の設定ができるようになっている。また、供給空気の圧力を測定するためにブルドン管圧力計⑩と差圧計⑪が取り付けられている。供試管内へ供給される液体は蒸留水である。初期液高さ相当の体積に計量された蒸留水は、管壁に付着しないように、供試管上部開放端の上方に設置されている計量タンク⑫より管内に挿入された供給用の細いビニール管を介して供給される。ビニール管は実験前に供試管の外に取り出される。

Fig. 3に供試管へ空気を供給するノズルの概略を示す。図中(a)は空気吹き込み孔の個数による流動への影

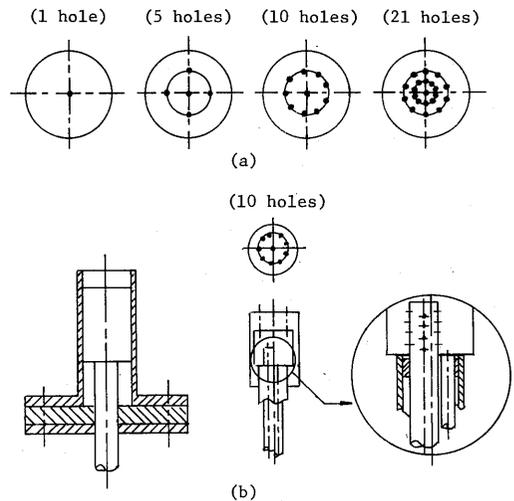


Fig. 3 Nozzle and position of hole (a) fixed nozzle (b) movable nozzle

響を調べるために製作した4種類の空気吹き込みノズル板を示したものである。製作したノズル板はノズル個数1個の単孔ノズル板、5個、10個および21個の多孔ノズル板で、供試管とはフランジによって固定されるようになっている。一方、図中(b)に示すノズル装置は供試管内を上下方向に移動できるように改良したもので、ボイド率測定の際に使用された。ノズル孔の個数は10個である。ノズルは流入側孔径2.0mm、流出側孔径0.5mmの先細形状で、材質はいずれもアクリル製である。

実験時のパラメータは空気吹き込みノズル孔の個数 N 、初期液高さ H_i 、空気吹き込み流量 Qa であり、それにボイド率測定の際には空気吹き込みノズル流出口から探針までの距離 L が付加される。なお、初期液高さは空気吹き込み前の静止液柱高さのことであり、空気吹き込み流量は JIS Z 8761 に基づいた標準状態 (0°C, 1気圧) に換算した値である。本研究の実験条件を Table 1 に示す。実験範囲の空気吹き込み量を、空気のみが供試管内を満たして流れると仮定したみかけの流速に換算すると 0.01m/sec~0.25m/sec 程度である。

Table 1 Experimental conditions

parameter	visual observation	void fraction
N	1, 5, 10, 21	10
H_i [mm]	100, 200, 300, 400, 500	500
Qa [cm ³ /sec]	7.0, 11.7, 23.4, 46.8, 58.5, 70.1, 93.5, 116.9, 140.3, 163.7	11.7, 23.4, 46.8, 58.5, 70.1
L [mm]	—	100~500

視覚観察実験においては実験パラメータの中で、供試管前方600mmの位置にモータドライブ付カメラをセットし、1/2000秒のシャッター速度で140種類の組合せに対して、写真撮影した。また、ビデオ撮影では32種類の組合せに対して行った。

3. ボイド率の測定装置および計算方法

本研究で使用したボイド率測定装置は探針電極、トランジスタ回路、インターフェイスおよびパソコンより構成されている。探針電極は直径0.1mmのエナメル線で、探針の先端は45°にカットされ尖鋭になっている。トランジスタ回路は探針電極と壁面電極間の抵抗変化を電圧信号に変換させる回路で、これまで一般に用いられてきた点電極回路⁹⁾を多点電極が使用できるように改良したものである。トランジスタおよびインター

フェイスの回路図は紙面の都合上、割愛した [文献7参照]。

ボイド率は測定した全ての時間に対する気相(空気)の存在する時間割合で表せる。気相の存在する時間の総和を $\sum Ta$ 、液相(水)の存在する時間の総和を $\sum T_l$ とすると、ボイド率 α は次式で求まる。

$$\alpha = \frac{\sum Ta}{\sum Ta + \sum T_l} \quad (1)$$

本研究ではこの式(1)を用いてボイド率の計算を行う。

4. 実験結果

4.1 視覚観察

4.1.1 観察項目

実験中に観察した項目は液面の最大持ち上がり高さ H_{max} と気泡流、遷移流、スラグ流の各流動様式の始まり高さ H_s である。液面の持ち上がり高さおよび各流動様式の始まり高さは供試管横に設置している直尺 [Fig. 1の⑬] によって測定した。なお、観察項目の測定は、本研究ではそれぞれ以下の定義のもとで行われた。

- (1) 液面の最大持ち上がり高さ
供試管内の液体が最も持ち上がった時の自由表面の高さ。
- (2) 気泡流の始まり高さ
吹き込みノズルから供試管内へ供給された気泡が管断面全体に一樣に分散し始めた位置。
- (3) 遷移流の始まり高さ
吹き込みノズルから供試管内へ供給された気泡が集合し始め、合体・成長を始めた位置。
- (4) スラグ流の始まり高さ
吹き込みノズルから供試管内へ供給された気泡が合体して弾丸型をなし、供試管径の70%の直径をもつひとつかたまりの気体プラグに成長を始めた位置。特に、空気供給量が多い場合、気体プラグは Fig. 4に示しているように変形するが、その平均直径が管径の70%以上になれば気体プラグとみなして、その位置をスラグ流の始まり高さとした。

Fig. 4はこれらの項目に関する各流動様式の観察例をスケッチで表したものである。また、Photo. 1は垂直管内静止液中へ空気を吹き込んだ時の流動様式の写真例である。この写真の実験条件は空気吹き込みノズル数 $N=10$ 、初期液高さ $H_i=400$ mm および空気吹き込み流量 $Qa=140.3$ cm³/sec の場合である。この写真例では、気泡一個の大きさは2mm~5mm程度、また、各

流動様式の始まり高さを推算すると空気吹き出しノズル出口端より約10mmの位置で気泡流としての流動が開始され、約30mmで遷移流へ遷移している。スラグ流への遷移点は約200mmで、液面の最大持ち上がり高

さは650mmである。

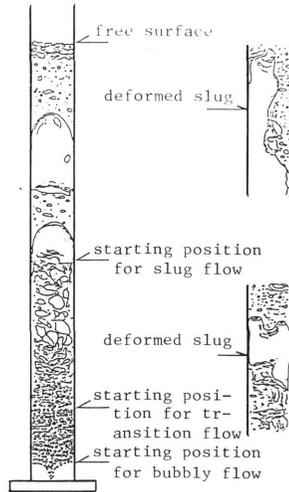


Fig. 4 Sketch of flow pattern

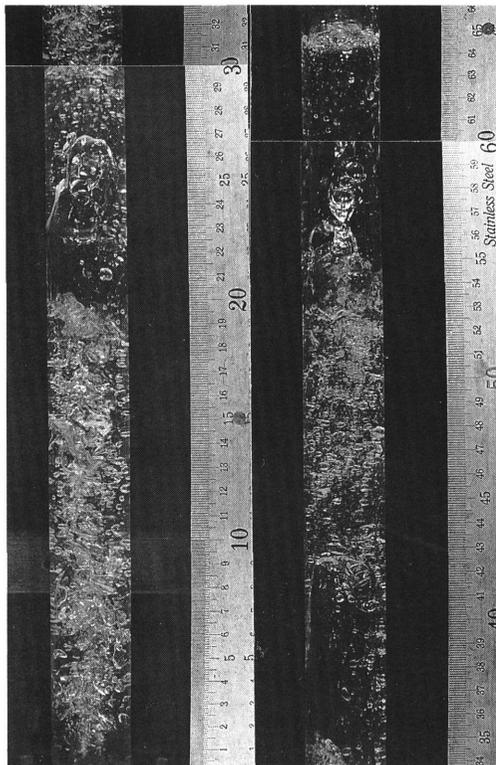
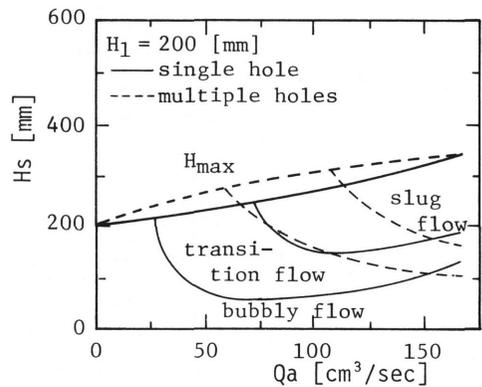


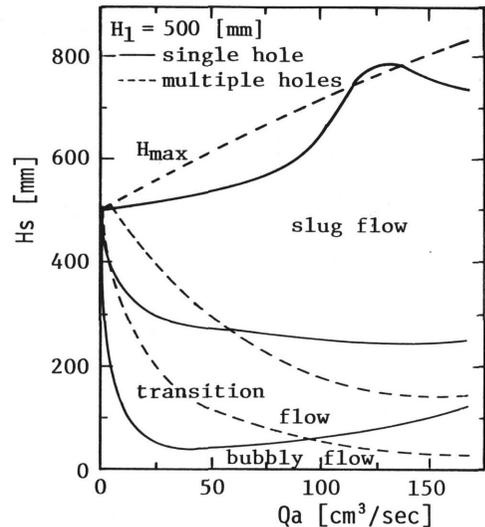
Photo. 1 Still photograph of a flow pattern ($N=10$, $H_t=400\text{mm}$, $Q_a=140.3\text{cm}^3/\text{sec}$)

4.1.2 流動様式判別線図

Fig. 5 は各流動様式の始まり高さ H_s と空気吹き込み流量 Q_a の関係を示した流動様式判別線図である。図中の実線は空気の吹き込みノズル孔数が単孔の場合、点線は多孔の場合である。また、 H_{max} は液面の最大持ち上がり高さを示している。実線および点線に囲まれた領域は各流動様式の部分領域を表示している。一般に、これまでの気液二相流の流動様式では気泡流 (bubbly flow)、スラグ流 (slug flow) および環状流 (annular flow) の三つに大きく分類されているが、本研究では気泡流とスラグ流との遷移域の流れを遷移流 (transition flow) と名付け、これを付加して四つに分類した。図中(a)から明らかなように、初期液高さ



(a) $H_t=200\text{mm}$



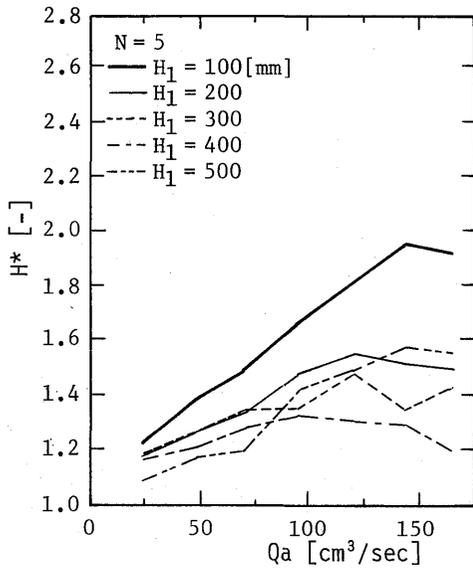
(b) $H_t=500\text{mm}$

Fig. 5 Flow pattern classification diagram

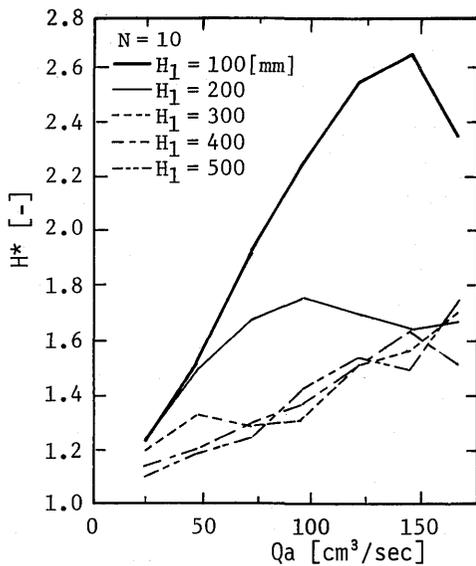
H_i が200mmの場合、空気吹き込みノズルが単孔ノズルでは、空気吹き込み流量の増加とともに液面の最大持ち上がり高さは単調に増加している。一方、多孔ノズルでは液面の最大持ち上がり高さはそれより僅かにふくらんでいるけれども同様な傾向を示している。次に、各流動様式の変遷の度合について比較すると、吹き込み流量が $150\text{cm}^3/\text{sec}$ 以下では単孔ノズルの方が多孔ノズルの場合よりも気泡流から遷移流、遷移流からスラグ流へ早く遷移していることが判る。例えば、

空気吹き込み流量が $125\text{cm}^3/\text{sec}$ の場合、単孔ノズルでは約90mm、多孔ノズルでは約140mmの場合で遷移流に、スラグ流へは単孔ノズルでは約160mm、多孔ノズルでは約210mmの場所でそれぞれ遷移している。一方、図中(b)に示した初期液高さ H_i が500mmの場合、単孔ノズル、多孔ノズルとも空気吹き込み流量の増加につれて液面の最大持ち上がり高さは増加している。しかし、単孔ノズルの場合には、図のように空気吹き込み流量が $125\text{cm}^3/\text{sec}$ 付近で液面の持ち上がりの高さは最大値をとり、ノズルの孔数の相違で液面の持ち上がり高さの増加傾向が異なっている。また、吹き込み流量が $100\text{cm}^3/\text{sec}$ 以下では単孔ノズルが多孔ノズルの場合より早く遷移流に遷移することがわかる。

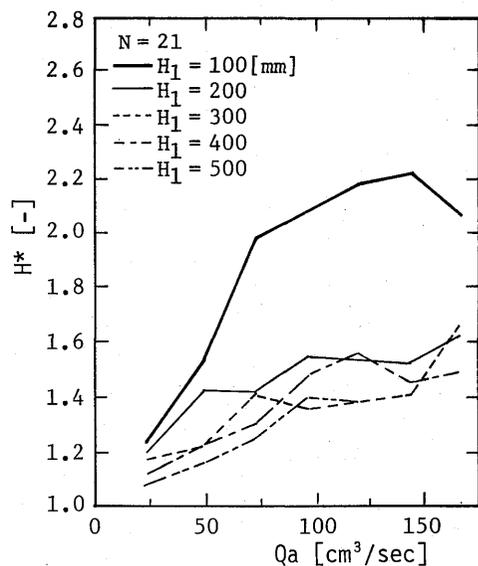
Fig. 6は液面の最大持ち上がり高さを初期液高さで除した管軸方向無次元高さ $H^*(=H_{max}/H_i)$ と空気吹き込み流量 Q_a の関係を示したものである。パラメータは初期液高さ H_i で、空気吹き込みノズル孔数 N が5, 10および21の場合に対して図示したものである。図中の太実線は初期液高さ H_i が100mm, 細実線は200mm, 点線は300mm, 一点鎖線は400mm, 二点鎖線は500mmをそれぞれ表している。これらの図から明らかのように、空気吹き込み流量の増加とともに管軸方向無次元高さは大きくなっていることがわかる。太実線で示した初期液高さが最も低い100mmの場合には、管軸方向無次元高さは、ノズル孔数に関係なく空気吹き込み流量が約 $140\text{cm}^3/\text{sec}$ で減少し始め、他の初期液高さの場合とはやや異なる結果が生じている。従って、



(a) $N=5$



(b) $N=10$



(c) $N=21$

Fig. 6 Dimensionless lifting height

液面は初期液高さの最大約2.0~2.6倍持ち上がっていることになる。一方、他の初期液高さにおいては液面の最大持ち上がり高さ H^* は空気吹き込み流量で多少高低差があるものの約1.1~1.7倍の間にある。

以上のことから、静止液柱内へ気泡を吹き込んだ場合の気液二相系の流動現象の視覚観察結果より、(1)空気吹き込み流量が少ない場合は、流動様式は気泡流のみで、管内の自由表面に泡状の薄皮 (foam film) が発生する場合がある。この泡状の膜を考慮しなければ液面の持ち上がり高さはほぼ一定である。(2)空気吹き込み流量が多い場合は、気泡の合体、成長によって形成された気体スラグは管内の自由表面近傍で周期性のある上下方向の脈動を伴った現象を引き起こし、振幅が変動し、液面の持ち上がりは空気吹き込み流量が少

ない場合に比べてさらに増加することが明らかとなった。

4.2 ボイド率測定

気液二相流の流れを分類する方法として、4.1.2節に示した流動様式による分類と流動形態による分類とがある。流動形態とは定量判別により一つの流動機構から他の流動機構への遷移条件を調べることで流れを分類する方法で、ボイド率測定、圧力変動特性の解析等が考えられる。そこで、本研究では供試管の管軸方向並びに管断面方向でのボイド率を測定して、流れの流動機構を流動形態により分類した。

4.2.1 管内流動に及ぼすボイド率測定用プローブ探針の影響

ボイド率の測定に際し、多数のプローブを供試管内へ挿入するため、管内の流動状態に影響が生じる懸念がある。そこで、Fig. 2に示した探針数が3本、7本および21本の3種類のプローブを使用して、それぞれのプローブが流動機構にどのような影響を与えるかについて調べた。ただし、探針数21本のプローブで探針に電流を流すのは、探針数7本のプローブと同一場所の7本だけで残りの14本はダミーである。これら3種類の探針数の相違によるボイド率の測定結果を初期液高さ H_i 800mm、空気吹き込みノズルから探針までの距離 L 760mm について Fig. 7に示す。図の縦軸は式(1)によって求めた管軸方向のボイド率 α で、横軸は半径方向無次元座標 r^* である。測定値は1回のサンプル時間を6秒とした計5回の平均値である。図中の実線は空気吹き込み流量が7.0cm³/secの場合、点線は23.4cm³/secの場合、一点鎖線は46.8cm³/secの場合である。また、図中に示す3個の記号は探針数の違いを表しており、⊕印は3本、○印は7本、●印は21本である。図より明らかなように、空気吹き込み流量が小さい7.0cm³/secの場合には3種類のプローブともほぼ一致した測定結果が得られており、挿入されたプローブの本数による流動機構の変化は無視できる。空気吹き込み流量が大きい場合には、探針数が21本と多い場合には管中心部で3本や7本の場合より高いボイド率を示している。これは探針の抵抗により、探針近傍で気泡の上昇が阻害されるためと思われる。従って、探針数が21本の場合には管内の流動機構に影響を与えることが考えられる。なお、このボイド率分布より、管内の断面流れはほぼ軸対称流れであることがわかる。

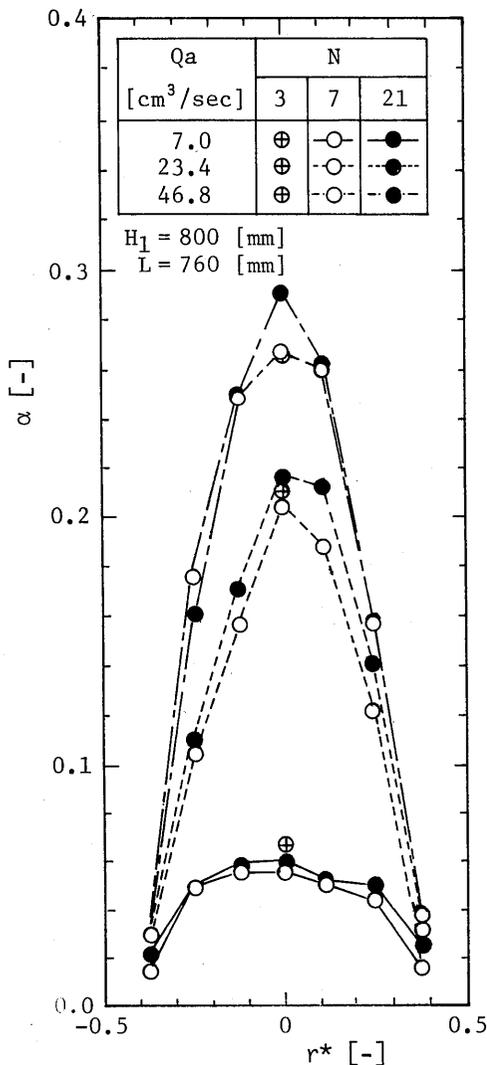


Fig. 7 Effect of probe number on void fraction

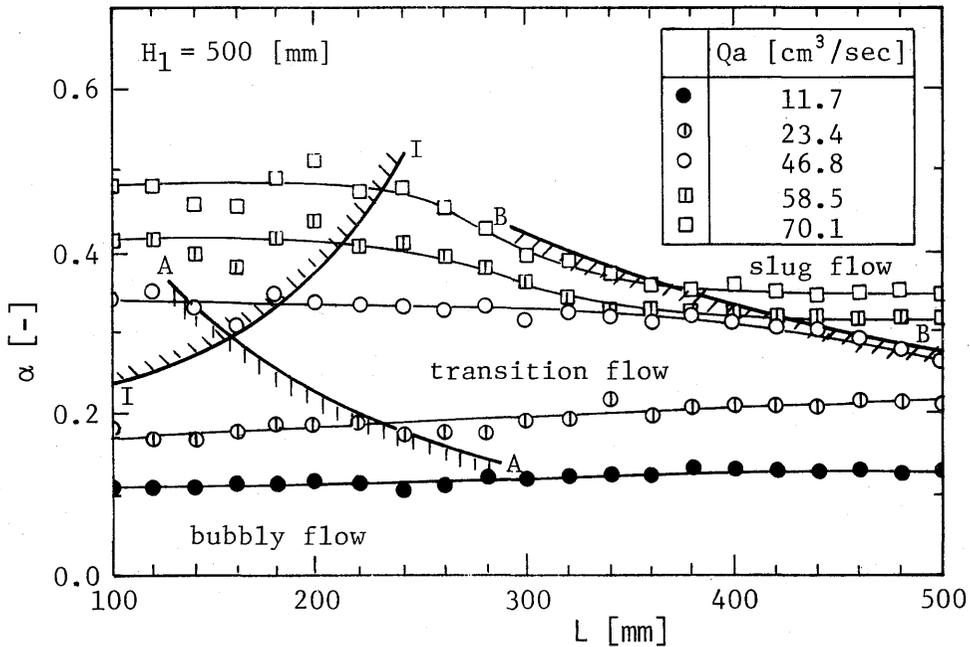


Fig. 8 Variations of void fraction at the pipe center along the pipe axis

4.2.2 管中心のボイド率分布

探針数3本のプローブを使用して、供試管中心でのボイド率を測定した。その結果を Fig. 8に示す。座標系の縦軸にはボイド率 α をとり、横軸には空気吹き込みノズルから探針までの距離 L をとった。この図は空気吹き込み流量 Q_a をパラメータとした管中心での管軸方向ボイド率分布を示したものである。測定値は初期液高さ H_i が500mmで、ノズルから探針までの距離 L を100mmから500mmまで20mm間隔に測定したものである。一個のデータのサンプル時間は6秒でそれを20回測定しその平均をとったものである。図より明らかなように、●印および⊙印の記号で示す空気吹き込み流量 Q_a が11.7cm³/secおよび23.4cm³/secの場合には、管中心での平均ボイド率はノズルから探針までの距離が大きくなるにつれてわずかに増加する傾向にあるが、それぞれ0.12および0.20程度の大きさである。空気吹き込み流量が○印の記号で示す46.8cm³/secの場合、ノズルから探針までの距離が180mmまではボイド率は若干変化しているもののほぼ一定な値となっているが、ノズルから探針までの距離が300mm以上ではボイド率はわずかに減少している。空気吹き込み流量が⊠印および□印の記号で示した58.5cm³/secおよび70.1cm³/secの場合には、ノズルから探針までの距離が約200mm以下ではボイド率はそれぞれ平均すれば0.42および0.47とかなり高い値でしかも変化が著しい

が、その位置より約360mmまでの間ではボイド率は急激に低下し、360mm以上ではそれぞれ0.32および0.35程度ほぼ一定な値となっている。このように、空気吹き込み流量が大きくなるとボイド率が場所によって大きく変化する。この現象は流動状態に変化が生じていることを示唆しているものと考えられる。そこで、同図に前章で得られた流動様式の結果を重ね合わせてみた。実線に影をつけて示した部分がそれである。A-A線は気泡流と遷移流との境界、B-B線は遷移流とスラグ流との境界を示す。また、図中に示すI-Iの境界線より左側の領域では、空気吹き出し流量が大きい場合、ノズルからの気泡噴出圧力が高いため、気泡流出速度が速くなり、ノズル近傍で気泡の逆流が生じたり気泡がらせん状の上昇運動等を起こして流れが大きく乱され、流動状態が不安定である。この領域を、本研究では気泡混合部領域と特別に設定した。

4.2.3 管断面ボイド率分布

ここでは、管の同一断面内で半径方向に同時に16点のボイド率を測定し、管断面ボイド率が管軸方向へどのように変化するかを調べた。その測定結果を Fig. 9に示す。これは500mmの初期液高さ H_i に対して、空気吹き込み流量 Q_a とノズルから探針までの距離 L をパラメータとして図示したものである。図中の実線は空気吹き込み流量 Q_a が11.7cm³/secの場合、点線は

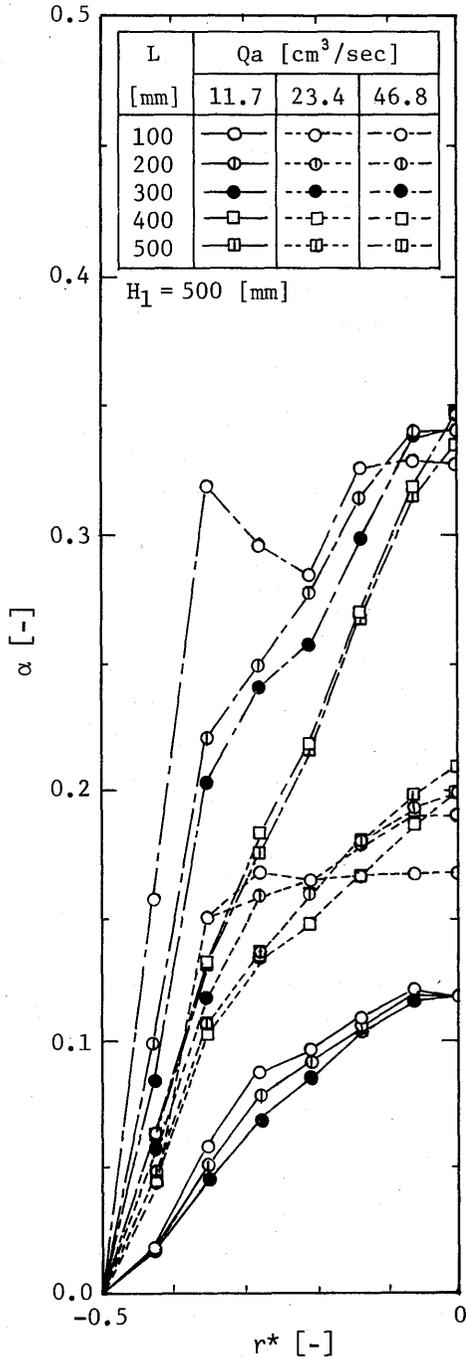


Fig. 9 Void fraction distributions

23.4cm³/sec の場合、一点鎖線は46.8cm³/sec の場合である。また、5種類の記号はノズルから探針までの距離を示したもので、○印、⊙、●印、□印および⊠印の記号はそれぞれ100mm、200mm、300mm、400mm および500mmの時である。図より明らかなように、実線で示した空気吹き込み流量が11.7cm³/sec の場合に

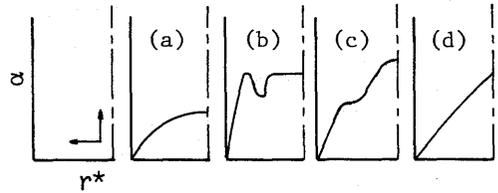


Fig. 10 Sketch of the four kinds of void fraction distributions

はボイド率は管中心で最大値0.12程度を示し放物線の形状を描いている。また、ノズルから探針までの距離の変化による管断面ボイド率分布の変化はそれほど認められない。特に、ノズルから探針までの距離が300mm以上では300mmの場合の管断面ボイド率分布と非常に良く合致している。次に、点線および一点鎖線で示す空気吹き込み流量が23.4cm³/sec および46.8cm³/sec の場合には、ノズルから探針までの距離が100mm (○印) の時に半径方向無次元座標 r^* が-0.30 および-0.45付近で、ボイド率のピークが現れ放物線とは異なる分布形状となっている。一点鎖線で示した空気吹き込み流量が46.8cm³/sec の場合、ノズルから探針までの距離が400mm (□印) と500mm (⊠印) の時には、ほぼ直線的に増加して管中心で鋭いピークが生じている。

管断面のボイド率の分布形は、空気吹き込み流量の変化とノズルから探針までの距離の変化に伴い各流動状態でそれぞれ異なる特徴を示し、管断面内のボイド率分布の形は4種類に大別される。その分布形の概略を Fig. 10に示す。これまで示した結果から4種類の分布形の特徴について記述すると、図中(a)は流れが気泡流の場合にみられるもので、管中心ボイド率が小さく、管軸方向への変化も小さい。ボイド率の管断面分布は放物線状になる。(b)は無次元座標 r^* が0.35付近でボイド率のピークがあり、管中心付近にボイド率の様な領域が存在する。これはノズルを用いて空気を吹き込む本研究特有のものと思われる。(c)は流れが遷移領域でみられるもので、無次元座標 r^* が0.35付近で僅かなボイド率のピークがある。ボイド率は管中心に近い程大きな値となるが、その増加傾向は直線的ではない。そして管中心付近がやや平坦となる。(d)は流れがスラグ流の場合にみられるもので、管中心ボイド率は遷移流より小さい値をとり、管軸方向の変化が小さくなる。管断面分布ではボイド率は管中心へほぼ直線的に増加して、管中心で鋭いピークを有する。これら4種類の分布形をもとにして、どのような条件でどのようなボイド率分布がみられるか簡略化して図に示した

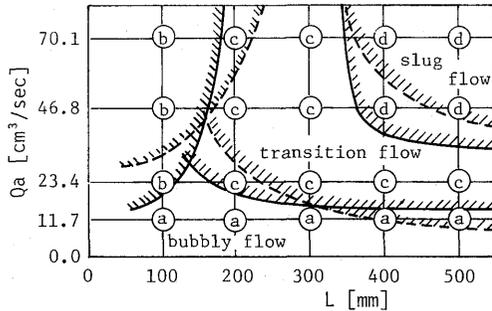


Fig. 11 Flow pattern map

ものが Fig. 11である。座標系の縦軸に空気吹き込み流量 Q_a 、横軸にノズルから探針までの距離 L をとった。図中の実線は流れを流動形態により分類したもので、点線は前章の流動様式より定めたものである。この図より、実線（流動形態）と点線（流動様式）はほぼ類似の傾向を示していることが明らかである。従って、管断面でのボイド率分布の測定結果より、対象としている系の流動状態を推定することができる。

5. 結 論

内径29mm、長さ2mの供試管内の静止液柱に空気を吹き込んだ場合の気液二相系の流動状態について視覚観察とボイド率測定を行った。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 空気吹き込み流量が少ない場合には流動形態は気泡流で、管中心ボイド率は0.2以下で管軸方向に大きな変化は生じない。
- (2) 空気吹き込み流量が増加してくると、管軸方向に変化が現れ、気液混合部流領域でボイド率の変化が起こる。また、管内の自由表面近傍の流れは周期性のある上下方向の脈動を伴った現象になる。空気吹き込み流量の増加に伴い、周期は早くなりかつ脈動振幅は大きくなる。
- (3) 流動形態が遷移流の場合には管中心ボイド率は急激な降下を示し、スラグ流の場合にはほぼ一定値になる。
- (4) 管断面ボイド率分布は流動状態に対応して4種類の分布形状をとる。

終わりに、本研究の実験を進めるにあたり協力いただいた当時長崎大学工学部4年生、下田正浩氏と藤本宏之氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

1) 小林, 飯田, 鐘ヶ江; 機論, 35, 280, (1969), 2365.

2) 井上, 青木; 機論, 32, 238, (1966), 940.
 3) 植田; 機論, 33, 248, (1967), 611.
 4) 門出, 三原, 野間; 機論, 55, 510, B (1989), 483.
 5) 門出, 三武; 機論, 55, 515, B (1989), 2030.
 6) 門出, 三武; 機論, 55, 519, B (1989), 3441.
 7) 国弘; 長崎大学大学院工学研究科機械工学専攻修士論文, (1984).
 8) 飯田, 小林, 熊谷; 原子力学会誌, 9, 1, (1967), 2.