532.529

気液二相流のボイド率変動特性に関する研究*

(第1報, 垂直管における一般的性質)

赤 川 浩 爾**

Fluctuation of Void Ratio in Two-Phase Flow
(1st Report, The Properties in a Vertical Upward Flow)

by Kōji AKAGAWA

The most remarkable characteristic in two-phase flow is the pulsating phenomenon of flow that liquid piston and gas piston flow alternately. In this study, the pulsation has been measured as the fluctuation of void ratio with an electrode probe which indicates the existence of liquid or gas-phase at the tip of probe. The experiment has been carried out for air-water two-phase upward flow in 27.6 mm ID glass tube.

The periods of the fluctuation of void ratio have normal distribution and the mean values are expressed with a experimental formula.

$$T = (0.11 + 0.09 w_{a0}) / (w_{w0} + 0.2 w_{a0}) \quad \text{s}$$

Where, w_{a0} : superficial velocity of air (m/s), w_{w0} : superficial velocity of water (m/s). The standard deviations are about 30 % of the mean values. The radial distribution of "the gas-phase existence time ratio" in the tube has been measured by shifting the probe.

1. 緒 言

気体と液体の混合した流れ, いわゆる気液二相流は原子炉, ボイラ蒸発管およびロケット冷却系などで見られるものであり, 工学的に重要な問題である. 最近では特に原子炉方面の要求により多くの研究がなされつつあり急速な進展が見られている⁽¹⁾⁽²⁾. 従来における二相流のボイド率 (void ratio, あるいは気体容積割合), 圧力損失および熱伝達などに関する研究はほとんどのものが巨視的な立場によっており, それらの平均値のみを取扱っている. そしてこの限りにおいては二相流の諸性質はかなり明らかにされてきている.

ところで二相流においては液体と気体がきわめてよく混合された流動状況になることは少なく, 一般にはいわゆるピストン流, 環状流と名付けられているような気液が軸方向にも半径方向にもかなり分離した流動様式を示すことが多い. 特に二相流の大きな特徴は, 気体部と液体部が断続して流れる脈動的性質をもっていることである. すなわち流路の任意断面においてはボイド率は時間的に変動しており, また流動軸方向では気液の分布密度が一様ではないのである. 最近では

流路断面上のボイド率分布 (比重量分布) に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾も行なわれているが, この場合には二相流は均質流とみなされてその密度が断面上で変化しているものとして示されているにすぎない. しかしこの値は後述するようにボイド率の時間的平均値の断面上分布を示しているのみであって, 二相流の特徴である脈動的性質を表わすところがない. なおピストン流の気体部, 液体部長さなどに関する研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾も発表されているが, その脈動周期およびボイド率の半径方向分布などについては述べられていない.

二相流の諸性質を解明するためには流動の脈動的性質を明らかにする必要がある. すなわち脈動は圧力損失に深い関連をもち⁽⁸⁾, また熱伝達およびバーンアウト現象に影響をおよぼすからである. またボイド率の変動は沸騰水形原子炉の熱出力に影響するので詳細な研究が必要である.

したがって本研究においては二相流の脈動をボイド率の時間的変動としてとらえて, 二相流の複雑な混合状態, 流動状況を定量的に解明することを目的としている. この第1報では常温の空気-水二相流の上向流に対するボイド率の変動周期, 変動ピッチおよび気体時間率(任意の位置における気体の存在する時間割合)の性質について述べる.

* 昭和 37 年 3 月 19 日 関西支部第 37 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 38 年 1 月 19 日.

** 正員, 神戸大学工学部 (神戸市灘区六甲台).

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概略を第 1 図に示す。水はポンプ①、流量調節弁②、流量測定用オリフィス③を通り、空気吹込部④で空気が混合されて二相流となり測定管⑤に流入し、大気開放のオーパフロータンク⑥に流出する。ここで空気は大気中に放出されて、水のみは連絡管⑦より水タンク⑧にかえり再循環する。空気は圧縮機⑨より流量調節弁⑩、流量測定用ノズル⑪(小流量用)、あるいは⑪' (大流量用)、空気分配管⑫、4本のビニル製空気導管⑬を通り同心二重管の空気吹込部④より水中に吹込まれる。直径 5 mm の 4 個の空気吹込孔が測定管の円周上に等間隔に配置されている。測定管⑤は内径 27.6 mm の硬質ガラス管であり、ボイド率変動の測定部⑭がこれに接続されている。測定管入口の急閉弁⑮は全開時に測定管と同一断面の開閉部をもつ実験室製の特殊三方弁であり、出口急閉弁⑯は同様に作製された二方弁である。このために入口、出口弁によって二相流の流動状況は乱されるおそれはない。急閉弁⑮⑯をレバー⑰⑱によりロープ⑲で同時に急閉することにより測定管中に水を閉込め、その水柱高さから測定管全長についての平均ボイド率を求める。

第 1 図 実験装置

第 2 図 測定電極

測定断面の半径上の各位置において電気抵抗を利用した測定電極により、二相流中の空気あるいは水の存在する時間を連続的に測定することによって、脈動の周期および気体時間率を求める。この測定部⑭の詳細を第 2 図に示す。本体⑮は測定管と同一内径の硬質ビニル管であり、これに直径 1 mm の銅線により作られた間げき約 2 mm の測定電極⑯がそう入されている。電極を半径方向に移動できるようにガラス管⑰に銅線を封入し、これは銅製ケーシング⑱の右端のオイルシール⑲を貫通している。⑭は⑮に接着剤⑲により接着されている。また⑮は二相流の流動状況を乱さないように管内面につけた整形用のろうであり、⑯は充てん剤である。電極の銅線は先端部以外は絶縁ワニスにより絶縁されている。電極に 4 V の直流電圧をかけて、この先端間げきに水あるいは空気の存在する時の電気抵抗変化による電流変化を第 1 図の増幅器⑳により増幅し、電磁オシログラフ㉑により記録させる。

実験を行なった流量範囲は水容積速度 0.2~0.8 m/s, 空気容積速度 0.14~1.5 m/s (大気圧における容積流量 100~1000 cm³/s) であり、電極位置は $r/R = 0.203, 0.384, 0.623, 0.746$ および 0.855 の 5 点である (R は管の半径, r は中心から任意の距離)。なお第 1 図に示すように測定管長は 2.595 m, 空気吹込部から測定管入口までの距離は 0.55 m, 空気吹込部からボイド率変動測定位置⑭までの距離は 1.87 m であるので十分の助走距離がある。

3. ボイド率変動の周期性

3.1 二相流の流動状況と脈動の定義 二相流は脈動的性質をもっているが、脈動という言葉は通常には 2 種類の意味に使われている。第 1 の意味の脈動は流路形状、蒸発の有無などに関係のないもので二相流の固有の性質である。この場合には第 3 図に一例を示すように気体と液体がおおよそ流動軸方向に分離し、気体ピストン部と液体ピストン部に分かれており、気体ピストン部の下に小気ほうを含有した乱れた部分がある。この場合には管中の一定点においては気体と液体が交互に流れるから、局所的にはボイド率変動していることになる。また管入口の流体の流速が一定でも、管出口では液体と気体が脈動的に流出する。このような脈動の周期は本実験によれば 1 秒

第 3 図

以下の短いものであり、また世古口の測定⁽⁸⁾によると静圧および差圧も短い周期で脈動している。この種の脈動は pulsation とよばれている。

第2の意味の脈動は自然循環回路で発生する蒸発管入口流速の周期的変動であって、これは回路形状、入口におけるサブクーリングおよび加熱量などの外部条件により生ずるもので、通常5秒から60秒程度の周期をもっている。これは水力学的不安定または流動の oscillation とよばれている。この場合には当然、管中で前者の pulsation が加わって複雑な流動状況を呈している。

本研究においては第1の意味の脈動をボイド率の変動面から取扱ってゆく。なお第3図に示したような気体ピストン、液体ピストンの境界のめいりょうな流動様式で脈動が観測されるのは当然であるが、本実験範囲内で両相の流量が多くて、流れの乱れが激しく両ピストンの境界が観察によってはめいりょうでない場合でも、このボイド率の変動の測定によると脈動が観測されている。したがって本実験の流量範囲内では、外見上は流動様式の相違があるにもかかわらずボイド率の特性にはめいりょうな区分は存在しない。

3.2 測定結果の例 第4図はボイド率の時間的変化の測定記録の一例である。測定電極位置 $r/R=0.203$ 、水容積速度 $w_0=0.4$ m/s 一定で、(a)~(e)図

第4図 ボイド率の変動の測定記録例

第5図 ボイド率の変動の測定記録例

は空気容積速度 $w_{d0}=0.14\sim1.48$ m/s に対応している。図上部のタイムマーク一目は $1/120$ 秒である。

(a) 図について説明すると山の部分④は測定電極位置に空気ピストン部があるとき、谷の部分⑤は水ピストン部があるとき、小突起の③は小気ほうのあるときである。(a)~(e)図で認められるように、本流量範囲においては二相流では水ピストン部と空気ピストン部がめいりょうに分かれており、かなり規則的な周期性をもっている。また空気流量が増大するにつれて空気存在時間 t_d が長くなり、水の存在時間 t_w は短くなっている*。また空気流量の増加に伴って水ピストン部に小気ほうが多く混入するために、図の谷の部分に乱れが大きくなっていることが認められる。なお図において T は周期である。また t_d の全測定値の和 Σt_d と全測定時間 T_t の比 $\Sigma t_d/T_t$ を気体時間率 E_d と定義する。この値については4章で詳述する。

第5図はボイド率の時間的変化の半径方向位置による影響を示す測定結果の一例である。 $w_{w0}=0.6$ m/s, $w_{d0}=0.14$ m/s 一定であり、 $r/R=0.203\sim0.855$ である。(a), (b)図のように管中央付近で多くの空気ピストンがある場合でも、(c)図のように管壁に近づくにつれて空気ピストンが少なくなり、(d)図のように管壁のごく近くでは空気ピストンは認められない。すなわち空気ピストンは管の全断面を占めることはなく、

管壁付近には常に薄い水層が存在する。そしてこの中にときどき空気ピストンの外周部が浸入したり小気ほうが流入する。ただし第5図は同時測定図ではないので、空気ピストンによる影響はあまり明らかではない(これについては次報で述べる)。

3.3 ボイド率脈動の周期 第4, 5図で認められるように、ボイド率の脈動現象は定常時系列の現象であり、その周期のひん度分布を求めると第6図がえられる。これにより二相流の脈動周期は空気流量、水流量のいかにかわらずほぼ正規分布をすることが認められる。すなわち周期は一定の平均値をもち、その前後のある限られた範囲内の値をとる。そしてこのような脈動周期をもつ流動状況が二相流の安定した状態である。つまり気液が混合されてからある助走距離をへたのちにこのような状態になり、以後はこの状態が持続されるのである。第1表に周期の平均値、標準偏差および資料数を示す。これより周期の水

* 記録波形の中心高さにおける値を t_d , t_w とする。

速, 空気流速による影響を示すと第 7 図のようになる。平均周期は水流速の増加とともに減少し, その影響は大きい, 空気流速による影響は比較的小さい。また空気流速の影響は $w_{w0} \leq 0.3 \text{ m/s}$ では逆であり, $w_{w0} > 0.3 \text{ m/s}$ では空気流量とともに周期は増加するが, $w_{w0} < 0.3 \text{ m/s}$ では減少する。なお図中に標準偏

第 1 表

水容積速度 $w_{w0} \text{ m/s}$	空気流量 $Q_0 \text{ cm}^3/\text{s}$	空気容積速度 $w_{d0} \text{ m/s}$	資料数 N	脈動の平均 周期 $T \text{ s}$	脈動周期の 標準偏差 $\sigma \text{ s}$
0.2	100	0.14	42	0.55	0.174
	300	0.44	39	0.57	0.199
	500	0.75	40	0.54	0.181
	700	1.05	53	0.42	0.167
	1000	1.51	52	0.40	0.137
0.3	100	0.14	41	0.41	0.146
	500	0.74	24	0.44	0.151
	700	1.04	37	0.45	0.123
	1000	1.50	29	0.36	0.114
0.4	100	0.14	66	0.26	0.087
	300	0.43	80	0.31	0.111
	500	0.74	63	0.37	0.111
	700	1.04	69	0.34	0.132
	1000	1.48	71	0.37	0.140
0.6	100	0.14	109	0.154	0.056
	300	0.43	74	0.241	0.081
	500	0.72	91	0.254	0.091
	700	1.02	78	0.291	0.087
	1000	1.46	78	0.261	0.096
0.8	200	0.27	86	0.145	0.052
	300	0.42	77	0.173	0.050
	500	0.71	91	0.193	0.073
	700	1.00	95	0.212	0.071
	1000	1.44	92	0.220	0.069

差 σ の範囲を破線により示すが, この値は周期の平均値の約 30 % である。これにより水流速の小さい場合ほど周期の分布範囲は広いので, それぞれの空気ピストン, 水ピストン部の長さの差が大きいことがわかる。また周期の平均値は次の実験式により表わされる。

$$T = \frac{0.11 + 0.09 w_{d0}}{w_{w0} + 0.2 w_{d0}} \quad (1)$$

ここで T は秒, w_{w0} , w_{d0} は m/s である。(1) 式による値を第 7 図中の一点鎖線により示す。

3.4 ボイド率変動のピッチ 第 3 図に示すような空気ピストンと水ピストンの長さの和 L , すなわちボイド率の変動のピッチについて述べる。この値について最近 Griffith, Wallis, Moisis⁽⁶⁾⁽⁷⁾ らによって研究されているが, ピッチの測定は両流体の流量が少なく両ピストンの境界がめいりょうな場合には写真撮影などの方法を用いることにより比較的容易にできるが, 流量が多く激しい乱れのためにピストンの境界が不明確な場合, また測定管長に比較してピッチが長い場合には写真による測定はきわめて困難である。したがって本報ではピッチを脈動の周期と平均ボイド率より求めて, その性質を明らかにする。

流動状況の観察結果にもとづき気液二相流を第 8 図

(a)

(b)

(c)

(d)

第 6 図 脈動の周期分布

のようなモデルで表わすことにする。すなわち内径 D (断面積 $F=\pi D^2/4$) の管中を直径 D_d (断面積 $F_d=\pi D_d^2/4$)、長さ L_d の円柱形の空気ピストンがピッチ L を保って絶対速度 w_d で流れ、水に対してはある相対速度で流れているものとする。単位時間に流れる空気量 Q_d は、通過ピストン数 $1/T$ を用いて $Q_d=F_d L_d/T$ で表わされ、また一方では絶対速度 w_d を用いて $Q_d=F_d w_d L_d/L$ で表わされる。したがってこの2式より

$$L=w_d T \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。すなわちピッチは絶対速度と周期の積で表わされるが、これは相対速度のない場合と同じ形である。また上記の Q_d の式と空気容積速度の定義式 $Q_d=F w_{d0}$ より $w_d=\{(FL)/(F_d L_d)\} w_{d0}$ となる。ここで $\{ \}$ 中の値は第8図のモデルで明らかのように、平均ボイド率 (管全体についてのボイド率の平均値) f_d の逆数であるから

$$w_d=w_{d0}/f_d \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。この式の形は従来の環状流モデルの場合と同一である。すなわち気体の絶対速度は流動様式に関係なくすべて(3)式で表わされるのである。したがって

第7図 脈動の周期の平均値

第8図 二相流モデル

流動様式が第8図のモデルと異なる場合でも一般的に成立する。(2)、(3)式よりピッチは次式で求められる。

$$L=w_{d0} T/f_d \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式の T と f_d に実験値の平均曲線から求めた値を代入してえられたピッチ L の値を第9図中の各点により示す。次にピッチの値を実験式により求める。平均ボイド率 f_d は既報⁽⁹⁾において次の実験式で表わされている。

$$f_d=1/\left(1+\frac{1}{A} \frac{w_{d0}^M}{w_{d0}^N}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで A , M , N は管径と流量範囲により定まる定数である。(4)式に(1)、(5)式を代入するとピッチは次式で表わされる。

$$L=\left(1+\frac{1}{A} \frac{w_{d0}^M}{w_{d0}^N}\right) \left(\frac{0.11+0.09 w_{d0}}{w_{d0}+0.2 w_{d0}}\right) w_{d0} \quad \dots\dots\dots (6)$$

本実験の $D=27.6$ mm の管に対しては、 $w_{d0}<0.5$ m/s で $A=0.82$, $N=0.96$, $M=0.69$ であり、 $w_{d0}>0.5$ m/s で $A=0.67$, $N=0.78$, $M=0.69$ である。これらの値を代入して求めたピッチ L の値を第9図中の実線により示すが実験点とよく一致している。図によりボイド率変動のピッチは気体流量にほぼ比例して増加し、水流量とともに減少することが認められる。この傾向は図中に破線で示した Griffith らの slug flow に対する測定値⁽⁶⁾と一致している。なお(6)式は周期の平均値の(1)式を用いて求められているのでピッチの平均値を示している。前述のように周期 T の標準偏差は平均値の約30%であるので、ピッチの値も(6)式の平均値の約30%の範囲に分布している。

4. 気体時間率

4.1 気体時間率の測定結果 第4図において定義した気体時間 $E_d=\sum t_d/T_t$ の実験値の一例を第10図に示す。各曲線は測定電極位置 $r/R=0.203\sim 0.855$ に対する平均曲線である ($w_{d0}=0.6$ m/s に対しては簡

第9図 二相流の流動状況のピッチ

単のために実験点の一部を省略している)。これらの実験値は約 3 秒ずつの 3 回の測定記録より算出した値であるが、流動状況の複雑さにもかかわらずなめらかな曲線上にあり、また再現性があるので、流動現象の定量的な解明に有用であることがわかる。また E_d におよぼす水流速の影響を第 11 図に示す。実線は $r/R = 0.203$ で空気流量の異なる場合、破線は空気流量 $Q_0 = 300 \text{ cm}^3/\text{s}$ (大気圧における容積流量) で r/R の異なる場合の値である。これらの図より E_d は測定位置に関係なく空気流量とともに増大しある漸近値に近づき、また水流量に比例して減少することがわかる。

脈動周期 T の中で $t_d = E_d T$ が気体の存在する時間であり、 $t_w = (1 - E_d) T$ が液体の存在する時間である。したがって前述の T と E_d より両相の存在する時間の絶対値 t_d , t_w は定まるので、特にその値については述べない。

第 10 図 気体時間率

第 11 図 気体時間率

次に気体時間率 E_d の半径方向分布を第 12 図に示す。 E_d は管中央部で大きくまた平坦であり、管壁付近で急激に減少する分布をしている。(a)~(c)図で

(a)

(b)

(c)

第 12 図 気体時間率の半径方向分布

見るように、一般に空気流量の少ないほど中央の平坦部が広く、空気流量の多いほどこの部分はせまくなる。このことは流動状況より説明することができる。すなわち空気量が少なきときには、空気ピストンと周囲の水層との境界が明確であり、また水ピストン中に含有される気ほうが少ないので、空気ピストンの直径に相当する部分では気体時間率はほぼ一定、つまり E_d は平坦になるのである。これに対して空気流量が多くなると空気ピストンの外周表面が乱れ、また水ピストン部に多数の小気ほうを含むために気体時間率は放物線状の分布をするのである。また(c)図では空気流量に関係なく中央の平坦部が広いのは水流量が多いために乱れが激しく空気が中央付近に比較的均一に分布するためである。

なお第12図の各曲線は $r/R=1$ において $E_d=0$ になるようにえがいてあるが、実際には管壁に薄い水層が存在するので $E_d=0$ の点は r/R が1よりわずかに小さい位置であるはずである。しかし水層は薄いのでその影響はきわめて小さい。また本実験では管壁に最も近い測定位置 $r/R=0.855$ で測定電極端と管壁とのすきまはわずかに1mm程度であるので、これ以上 r/R を増加させても電極が二相流に干渉して E_d の正確な値を求めることはできない。上述のようにえがいた曲線が妥当なことは、後記の第13図における平均ボイド率 f_d の実験値との比較によって確かめられている。

4.2 気体時間率と平均ボイド率との関係 従来から二相流中の気体の容積割合は平均ボイド率と定義されている。この値は気液の混合状態を考慮に入れない巨視的な値であり、測定管の両端を急閉し管中に残存した液量を測定することにより求められている。本実験でもそのようにして求めている。そこでこの平均ボイド率と気体時間率の関係を示しておこう。任意の

第13図 気体時間率の平均値と平均ボイド率の比較

r/R 点における気体時間率は、その点の流動軸方向の気体容積比の時間的平均値に等しいから、それを半径方向に積分して平均すると管全体についての気体容積比、すなわち平均ボイド率が求まるはずである。すなわち次式で表わされる気体時間率 E_d の管断面についての平均値 E_{dm} は、平均ボイド率 f_d と一致する。

$$E_{dm} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r E_d dr = 2 \int_0^1 E_d \left(\frac{r}{R}\right) d\left(\frac{r}{R}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(7)式に第12図の E_d 分布の値を用いて求めた E_{dm} と f_d の実験値との関係を第13図に示すが、両者は0～7%の誤差内でよく一致しているので、上記の考察および E_d の測定値が正しいことが認められる。このわずかな誤差の原因は前述の E_d 分布曲線のえがき方および測定電極の二相流に対する干渉などによるのであろう。

それぞれの r/R の位置における気体時間率 E_d と平均ボイド率 f_d との関係の一例を第14図に示す。この図は水流速 $w_{w0}=0.4$ m/s の場合であるが、他の流速に対してもこれと同様な結果がえられている。すなわち各点において E_d と f_d は比例している。また局所的な E_d の値が平均ボイド率の値に一致する点 (r/R) が存在することが推測される(図中の $E_d=f_d$ の破線的位置)。第12図中の十印の点はこのような位

第14図 気体時間率と平均ボイド率の関係

第15図 $(r/R)_e$ の値

置を示す。これより $(r/R)_0$ と水流速との関係を示すと第 15 図がえられる。これによると平均ボイド率の値は水流量, 空気流量に関係なく $r/R=0.6\sim 0.8$ における気体時間率の値と一致することがわかる。すなわちこの方法によれば高圧, 高温などの装置の条件のために直接ボイド率を測定することが困難な場合でも, 測定 of 容易な気体時間率の値より平均ボイド率の値を推定することができる。

4.3 気体時間率分布と局所的ボイド率分布の比較

従来から二相流の研究において, 管断面の局所的ボイド率分布が電気容量を用いた測定法⁽⁴⁾および γ 線の透過法⁽³⁾⁽⁵⁾により求められている。第 12 図 (c) 中に Novokhatskii の測定値⁽⁴⁾ (管直径 50 mm, 空気-水二相流) および Haywood らの測定値⁽⁵⁾ (管直径 $1\frac{1}{2}$ in, 17.5 ata 蒸気-水二相流) を示す。この場合には前述のように, 二相流は均質流体とみなされ, その半径方向の密度分布が定常値として示されているのである。ところで本測定によると二相流のボイド率は脈動しており定常値は存在しない。しかしその時間的平均値は気体時間率として求められた。そこでこれらの定常的な局所的ボイド率分布と気体時間率を第 12 図 (c) で比較してみると定性的にはよく似た傾向をとっていることが認められる (管径, 水流速, 流体が異なるために直接にこれらの絶対値を比較することはできない)。このことにより従来から求められていた半径方向のボイド分布 (密度分布) は, 脈動的流動状態におけるボイド率の時間的平均値を表わしたものであることがわかる。

5. 結 論

従来から二相流に対して環状流モデル, あるいは密度変化のある均質流体モデルが示されているが, 本報ではこれらと異なってピストン流モデルを提示し, 二相流の脈動的性質をボイド率の時間的変動としてとらえて流動の諸特性を数値的に明らかにした。すなわち内径 27.6 mm の垂直管中の空気-水二相流においてボイド率の時間的变化を測定し, 次の結果をえた。

(1) 管中の任意の位置において空気, 水の存在する時間は第 4, 5 図に示すようにめいりょうな周期的状況にある。

(2) その脈動周期はほぼ正規分布をとり, その平均値は空気流速, 水流速に対して (1) 式の実験式で表わされる。また周期の分散範囲は平均周期の $\pm 30\%$ の範囲にある。

(3) 脈動のピッチの平均値は周期と平均ボイド率により (4) 式で表わされ, また (6) 式の実験式で表わされる。

(4) 従来から求められていた半径方向のボイド率分布は, 気体時間率の分布と同一傾向にある。これにより前者は脈動的流動状態におけるボイド率の時間的平均値を表わすものであることを明らかにした。

(5) 気体時間率の管断面についての平均値は, 管全体の平均ボイド率と一致することが実験により確かめられた。

(6) 平均ボイド率は $r/R=0.6\sim 0.8$ における気体時間率の値と一致する。

本研究に対してご討議をいただいた大阪大学 石谷清幹教授, 測定装置について御援助をいただいた神戸工業会社 藤本行一氏, 実験に熱心に協力された神戸大学 二宮佳夫氏, 当時学生 石城 修, 山本 昌君に感謝する次第であります。なお本研究は昭和 36 年度文部省科学研究費によるものであります。

文 献

- (1) 赤川, 機械学会誌, **63**-495 (昭 35-4), 559.
- (2) 石谷, 機械学会誌, **66**-528 (昭 38-1), 58.
- (3) K. Schwarz, *VDI Forsch.-h.*, **20**-445 (1954), 1.
- (4) E.M. Novokhatskii, *Measurement Techniques*, **6** (1960), 486.
- (5) R.W. Haywood, G.A. Knights, & Others, *Proc. Inst. Mech. Engr.*, **175**-13 (1961), 669.
- (6) P. Griffith & G.B. Wallis, *Trans. ASME, Ser. C*, **83**-3 (1961), 307.
- (7) R. Moissis & P. Griffith, *Trans. ASME, Ser. C*, **84**-1 (1962), 29.
- (8) 世古口, 二相流に関する研究 (大阪大学学位論文), (昭 36).
- (9) 赤川, 機械学会論文集, **23**-128 (昭 32-4), 285; 石谷・赤川, ボイラの水循環 (訂正版), (昭 34), 73, コロナ社.