研究論文

551. 探針による局部ボイド比測定法の研究

北山正文*

(1971年 1月9日 受理)

(1971年 3月11日 再受理)

Measurement of Void Fraction by Single Type Probe

By Yoshifumi KITAYAMA

Measurements of void fraction by probe method have been the subject of a number of recent reports, which have used the principle of measuring the void ratio in terms of the time ratio of gas-phase existence.

The paper describes the principle of void ratio measurement based on the gas-liquid volume ratio by measurements of local void velocity with single type probe.

The difference between the values based on the gas-liquid volume ratio and the gas-phase existence time ratio is explained from such factors as the local void velocity fraction.

I. 緒言

局部ボイド比(気液容積比)の測定法は、気液2相流動現象等の解析においていろいろな分野から提案され、また使用されている。

しかし、これらの方法はおのおののボイドの速度が均一である場合、またはそれに近い状態においてのみ測定原理上使用可能なものであって、決して流動変動の激しい場において使用可能なものではない。

したがって、従来の局部ボイド比の測定原理の考え方は、ボイド速度のバラツキがかなり小さい場合、または赤川⁽¹⁾が提案した気体時間率的な考え方をする場合にのみ有効である。

例えば、赤川のゾンデ法⁽¹⁾、飯田ら⁽²⁾、里見ら⁽³⁾、著者ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾が提案した探針式局部ボイド比測定法は、すべて気相と液相が探針の先端にある時間内に存在する時間率を求めたものであって、必ずしもボイド比(気液容積比)を示すものではない。

なぜなら、2相流動中の個々の気相速度が明確にされていないからである。

そこで、著者らが最近本誌に投稿した単針による局部気相速度測定法⁽⁶⁾を用いて、局部ボイド比(気液容

積比)を測定する1つの測定原理を確立したので、ここに報告する。

II. 局部ボイド比測定原理

Fig. 1の①は、 n 個の気泡が垂直チャネル内を上昇してちょうど探針に当たるときの状態を表わし、おのおののボイド速度をそれぞれ $V_1, V_2, V_3, \dots, V_{n-1}, V_n$ (m/sec) とする。

Fig. 1の②は、探針に気泡が当たっている長さと、液相が当たっている長さを表わす。そして、気相および液相のそれぞれの長さを $L_{1,v}, L_{2,v}, L_{3,v}, \dots, L_{n-1,v}, L_{n,v}$ および $L_{1,l}, L_{2,l}, L_{3,l}, \dots, L_{n-1,l}, L_{n,l}$ (m) とする。

Fig. 1の③は、単針による局部ボイド速度測定法⁽⁶⁾の測定回路の Switching circuit から出て来るボイドの検出波形に相当するもので、気体時間率的なボイド比および気相速度を求める場合に用いる信号である。この場合、気相が探針の先端に存在する時間を $t_{1,v}, t_{2,v}, t_{3,v}, \dots, t_{n-1,v}, t_{n,v}$ (sec) とし、また液相が存在する時間を $t_{1,l}, t_{2,l}, t_{3,l}, \dots, t_{n-1,l}, t_{n,l}$ (sec) とする。

* 広島工業大学工学部(Faculty of Eng., Hiroshima Inst. of Technol.)

Fig. 1 Principle of void ratio measurement

Fig. 1 の②、③を対応させて見れば明らかなように、ボイド速度 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_{n-1}, V_n$ が互いに等しくない場合は②と③は必ずしも対応せず、 n 個の気相の平均速度 $\bar{V}$ で運動しているボイドを基準にとれば、②と③のズレは明確になり、そのおのおのの時間的ズレ、すなわち $\Delta t_{1,v}, \Delta t_{2,v}, \Delta t_{3,v}, \dots, \Delta t_{n-1,v}, \Delta t_{n,v}$ は次のような式で定義することができる。

$$\left. \begin{aligned} V_1 t_{1,v} &= \bar{V}(t_{1,v} + \Delta t_{1,v}) \\ V_2 t_{2,v} &= \bar{V}(t_{2,v} + \Delta t_{2,v}) \\ V_3 t_{3,v} &= \bar{V}(t_{3,v} + \Delta t_{3,v}) \\ &\vdots \\ V_{n-1} t_{n-1,v} &= \bar{V}(t_{n-1,v} + \Delta t_{n-1,v}) \\ V_n t_{n,v} &= \bar{V}(t_{n,v} + \Delta t_{n,v}) \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2)$$

(1)式より $\Delta t_{i,v}$ を導くと、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_{1,v} &= (V_1/\bar{V} - 1)t_{1,v} \\ \Delta t_{2,v} &= (V_2/\bar{V} - 1)t_{2,v} \\ \Delta t_{3,v} &= (V_3/\bar{V} - 1)t_{3,v} \\ &\vdots \\ \Delta t_{n-1,v} &= (V_{n-1}/\bar{V} - 1)t_{n-1,v} \\ \Delta t_{n,v} &= (V_n/\bar{V} - 1)t_{n,v} \end{aligned} \right\} (3)$$

以上のような考え方で Fig. 1 の②と③を対応させてボイド比(気液容積比)を表わす式を求めると、

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum_{i=1}^n L_{i,v}}{\sum_{i=1}^n (L_{i,v} + L_{i,l})} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (t_{i,v} + \Delta t_{i,v})}{\sum_{i=1}^n (t_{i,v} + t_{i,l})} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (t_{i,v} + \Delta t_{i,v})}{T} \end{aligned} \quad (4)$$

$$T = \sum_{i=1}^n (t_{i,v} + t_{i,l}) \quad (5)$$

(3)式を(4)式に代入すると、ボイド比 α は次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \left\{ \sum_{i=1}^n t_{i,v} + \sum_{i=1}^n (V_i/\bar{V} - 1)t_{i,v} \right\} / T \\ &= \sum_{i=1}^n V_i t_{i,v} / \bar{V} T \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式の右辺の個々の値は、著者が提案した単針による局部ボイド速度測定法を応用して、結果を電磁オシログラフにより記録すればすべて測定可能な値である。

(6)式より明らかなように、 $n=1$ の場合、または $n \geq 2$ で $V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_{n-1} = V_n$ の場合は、ボイド比 α は次のようになり、従来から用いられているボイド比(気体時間率) α_t と一致する。すなわち、

$$\alpha = \alpha_t = \sum_{i=1}^n t_{i,v} / T \quad (7)$$

なお、ボイド個数 n およびボイド比測定時間 T は、解析する現象の周期性等によって適当に選ぶ必要がある。

Ⅲ. 垂直チャネル静止水中の 局部ボイド比分布

1. 実験装置および実験方法

Fig. 2 および Photo. 1 に示すような垂直チャネルの静止水中に 5, 10, 20% の空気ボイドを発生させて、垂直チャネル内の局部ボイド比分布、気体時間率および局部ボイド速度分布を測定した。

Fig. 2 の垂直チャネル⑤は内径 28 mm ϕ 、長さ 2,300 mm のガラス管で出来ていて、探針はボイド発生器から 25cm のところに Probe 1 を、さらにその上 50 cm のところに Probe 2 を設定し、垂直チャネル中央から壁面に向かって半径方向に 4 mm 間隔で 4 個所において測定した。

なお、Probe 1, 2 の単針の形状および寸法は、Fig. 3 および Photo 2 に示す。

ボイド状態の計測は、Probe 1, 2 からの信号を文献⁽⁶⁾に示した検出回路を通して、電磁オシログラフによって記録して解析を行なった。

ボイド比の設定は液面上昇法を用い、5, 10, 20% の

Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus

3つとし、それぞれの場合のボイドの発生状態の1例を Photo. 3 (1)~(3)に示した。

ボイド状態の測定時間 T は 15 sec とし、ボイドの個数 n は半径方向の探針の位置によってかなりの差はあるが、5%の場合で平均 50個、10%の場合で平均 100 個、20%の場合で平均 175 個であった。

なお、本実験は同じ条件で3度繰り返し行い、そのデータを整理した結果、大体同じ傾向を示したので、Table 1 にその内の代表的な1例を示すことにした。

2. 実験結果およびその検討

Table 1 に実験結果の1例をまとめて示す。

A_0 は液面上昇法によるボイド比、Probe Position のところは P1-0 の場合、P1 は Fig. 1 に記入した Probe 1 の意味で、0 は中央を示す。したがって、Probe 2 の場合 P2 で、0, 1, 2, 3 の順に探針が 4 mm の間隔で壁面に近づいて行くことを

Experimental equipment
Photo. 1

Fig. 3 Cross section of single type probe

Photo. 2 Single type probe

Photo. 3 Behavior of void fraction

示す。

次に、 ML は垂直方向の平均ボイド長さ、 MV は垂直方向の平均ボイド速度、 MT は個々の気泡が探針の先端に存在した平均時間を示す。

また、 A は(6)式で提案したボイド比、 TR は従来からのボイド比(気体時間率)、 SDV, SDT, SDL はそれぞれボイド速度、ボイド存在時間、ボイド長さの標準偏差値を表わす。

Fig. 4~7 はパラメータを液面上昇法によるボイド比 A_0 と垂直方向の探針の位置を取り、横軸に半径方向の探針の位置(R は垂直チャンネルの中央からの距離を示す)をとって、縦軸に Fig. 4では ML 、Fig. 5では MT 、Fig. 6では MV 、Fig. 7では A と TR を示した。

Fig. 4 より次のようなことがいえる。まず、ボイ

Table 1 One of the experimental results

A_0	Probe position	ML (mm)	MV (cm/sec)	MT (msec)	A (%)	TR (%)	SDV ($\times 10^{-4}$)	SDT ($\times 10^{-5}$)	SDL ($\times 10^{-7}$)
5 %	P1-0	1.31	12.2	10.9	6.12	6.15	1.94	3.69	16.98
	1	1.33	12.1	11.3	4.94	5.07	2.28	3.11	14.14
	2	1.26	10.3	12.8	4.09	4.27	2.82	3.46	5.48
	3	1.20	12.6	9.8	4.43	4.56	1.98	2.78	14.88
	P2-0	1.98	14.0	14.7	4.71	4.89	2.58	5.38	17.89
	1	1.32	10.7	12.3	4.91	4.91	1.24	3.83	11.18
	2	1.73	10.6	17.0	7.60	7.93	2.53	5.08	18.90
	3	1.20	12.1	10.3	0.66	0.69	2.00	2.40	0
10 %	P1-0	1.55	12.0	13.5	9.48	9.87	3.35	7.26	22.56
	1	1.77	9.9	18.7	15.48	16.20	3.17	12.11	26.75
	2	1.39	10.1	13.9	8.24	8.36	1.66	3.56	17.00
	3	1.71	11.3	15.8	11.64	12.08	2.70	5.05	23.03
	P2-0	1.50	12.1	12.9	8.27	8.63	2.54	7.68	23.98
	1	1.82	11.2	17.7	15.70	17.11	3.09	10.00	24.21
	2	2.18	11.8	18.7	14.10	14.36	2.12	9.51	23.68
	3	1.70	11.0	15.9	1.54	1.59	1.76	3.06	8.16
20 %	P1-0	1.88	10.0	18.9	21.24	21.46	2.62	7.63	29.26
	1	1.75	9.5	19.4	23.96	25.26	2.44	9.89	28.91
	2	1.75	9.1	20.8	19.23	20.83	3.11	13.24	26.20
	3	1.74	7.6	24.4	12.93	13.82	1.81	13.55	21.28
	P2-0	3.01	12.5	24.6	28.10	28.71	3.11	16.05	34.35
	1	2.26	11.4	22.6	20.40	23.35	2.77	20.31	30.95
	2	1.97	12.0	17.3	6.05	6.33	3.63	7.14	19.54
	3	0		0	0	0		0	0

ド比 A_0 が小さいときは大きいときに比較して、ボイド発生器から 25 cm の位置でも 75 cm の位置でも平均して小さいボイドが存在している。また、ボイドの大きさの半径方向の分布は Probe 1 の位置、すなわちボイド発生器に近いところの方がほぼ均一で、Probe 2 の位置、すなわち Probe 1 の上方 50 cm の位置では半径方向においてかなりの変化がある。これはボイド比 5, 10% の場合でも、Probe 2 の位置では多少ボイドの合体があることを示している。

したがって、ボイド発生器から 75 cm 上方の位置におけるボイドの長さは、チャンネルの中央と中央から壁面に 8 mm 寄ったところでボイド発生器から 25 cm の位置のボイドの長さより 1.5 倍程度大きくなっている。ボイド比 A_0 が 20% の場合は半径方向全体にさらにその傾向が顕著に現われている。

Fig. 5 のボイドの平均存在時間の傾向は、Fig. 6 のボイドの平均速度の分布状態も合わせ考えないと説明を加えることはできない。

明を加えることはできない。

次に、Fig. 6 の結果であるが、ボイドがボイド発生器から出で 25 cm 付近ではボイド比 A_0 が小さい方が気泡速度は速く、また半径方向の速度分布の変化が大きいことがわかる。さらに、ボイド速度はボイド比 A_0 が 5, 10% の場合はチャンネルの中央と壁面で速く、20% の場合はチャンネルの中央に近くなるほど速くなっている。しかし、ボイド発生器から 75 cm の位置では 25 cm の位置の傾向と反対で、ボイド比 A_0 の大きい方が小さい場合より垂直方向の速度が速いところが多い。

Fig. 6 から明らかなように、このような傾向はそう顕著に現れているわけではなく、むしろ、チャンネル中央および壁面においてはほぼ同じと判断される。

また、ボイド発生器から 25 cm の位置における傾向と異なっている点は、20% の場合の壁面におけるデータがないので断言はできないが、大体どのボイド比

Fig. 4 Experimental results, (I)

Fig. 6 Experimental results, (III)

Fig. 5 Experimental results, (II)

Fig. 7 Experimental results, (IV)

A_0 の場合も壁面と中央においてボイド速度の平均値が速く、その中間では多少遅くなっていることである。

Fig. 7 にはボイド比分布の結果を示した。ボイド発生器から 25 cm の位置のボイド比分布 A は 5, 10% の場合は従来のボイド比(気体時間率的)分布 TR と測定誤差範囲内でほとんど一致している。これはボイド相互間の速度にあまりバラツキがなかったことによるもので、Table 1 の SDV の値を見てもはっきりわかる。また、20% の場合は、垂直チャンネル中央の位置の値を除いて A と TR の間に 6~8% の差が出ているが、そのうちでも管壁に近いところの差は大きく、かなりボイド速度にもバラツキが見られる。

Probe 2 による結果、すなわち、ボイド発生器から 75 cm 上方の位置のデータは、5, 10% の場合はチャンネル中央から 8 mm および 4 mm 管壁に寄ったところにボイド比 A および気体時間率 TR のピーク値がある。しかし、 A_0 が 20% の場合はピークが完全に中央にできる。これは、Probe 2 の位置では 20% のときかなり合体が起り、気泡流からスラグ流に遷移し始めていることを示している。この点については Photo. 3 (2) からもしっかり見出すことができる。

ボイド比 A_0 が 5% の場合は A と TR との差が大体 4~5% であるが、10% になると垂直チャンネル中央から 4 mm 管壁に寄った付近では 9% 近いズレを示している。この位置でのボイド速度にはかなりのバラツキが認められる。また、20% の場合、管中央から壁面の方に 4 mm 寄った付近では SDT も大きく、速度のバラツキも相当あって 14.5% 近い A と TR の差が出ている。

ボイド速度のバラツキの状態の例として Table 1 に示した 5% の場合の P1-0, P2-0, 10% の場合の P2-1, 20% の場合の P1-2, P2-1 を Fig. 8 に示した。

横軸はボイド速度で、縦軸は各ボイド速度を持った

Fig. 8 Experimental results, (V)

ボイドの頻度を表わす。5% で P1-0 の場合は A と TR のズレは 0.5%, P2-1 の場合は 3.8% 程度である。

いずれの場合もボイド速度の分布状態は大体同じで、 A と TR の 4.0% 程度までのズレは測定誤差と考えられる。しかし、10% P2-1 および 20% P1-2 の場合は、 A と TR のズレが 9% にも達し、Fig. 8 のボイド速度分布を見てもかなり速度の分布範囲が広く、しかも異状分布をしている。20% P2-1 の場合はさらに異状な分布を示し、前にも記したように A と TR の差が 14.5% と大きな値を示している。

IV. 結 言

以上の結果より、次のようなことがいえる。

- (1) 垂直チャンネル(内径 28mm ϕ) 静止水中に平均気泡径 3~4 mm の空気泡を発生させた場合、ボイド発生器より 25 cm 上方の位置 (P1) においては、ボイド平均上昇速度の半径方向の分布に変化が大きい。
- (2) P1 の位置においては、平均ボイド比 A_0 が 5, 10% の場合は、チャンネルの中央と管壁に近いところでボイド平均上昇速度が速く、20% の場合は管壁からチャンネル中央に近づくほど速度が速くなる。
- (3) P1 の位置におけるボイド平均上昇速度は、平均ボイド比 A_0 が小さいほど速くなる。
- (4) ボイド発生器より 75 cm 上方の位置 (P2) では、P1 の位置における半径方向のボイド平均上昇速度分布と反対の傾向を示し、平均ボイド比 A_0 が大きい場合の方が小さい場合より平均して上昇速度が大きくなる。
- (5) P1 の位置において、平均ボイド比 A_0 が小さい場合、すなわちきれいな気泡流の場合は、(6) 式で提案した A の値と、従来から用いられてきたボイド比 TR (7) 式との間にはほとんど差異がない。しかし、 A_0 が 10% で P1, P2 で垂直チャンネル中央から 4 mm 管壁寄りの位置においては、 A と TR の間に 7~8%, A_0 が 20% で P1 でチャンネル中央から 4 mm 管壁寄りの位置では約 10%, A_0 が 20% で P2 でチャンネル中央から 4 mm 管壁寄りの位置では A と TR の間に 14~15% の差を生ずる。

この原因として考えられることは、Fig. 8 に示したように、前者の場合は気泡速度のスペクトラムがほぼ正規分布を示し、また広がりもないが、後者の場合はいずれも異常分布を示し、特に A_0

が20%でP2-1における分布は極端に異常であることによるものと考えられる。

以上のことより、ボイドの存在時間が主に支配しているような現象を解析する場合のボイド比の考え方としては、従来からの気体時間率的なものでよいとしても、現象が気泡の大きさによって主に支配されているような場合には、本報で述べた気液容積比的な考え方のボイド比を用いないと、明確に現象を解析できない場合があるものと思える。

本報を終るにあたり、有意義なご助言をいただいた
 広工大工学部 鈴木重夫教授、静岡大工学部 小林清志教授
 に対し心から謝意を表します。

また、実験に際して多大のご協力をいただいた今

本、門田、国安、村上、加藤の諸氏、および研究室の学生
 諸君にもあわせて感謝の意を表します。

— 参 考 文 献 —

- (1) 赤川浩爾：日本機械学会論文集，29[201]，924（昭38.5）。
- (2) 飯田嘉宏，小林清志，他：本誌，9[1]，2～7（1967）。
- (3) 里見昌洸，遊佐英夫，他：計測自動制御学会論文集，3[3]，229～235（1967）。
- (4) 北山正文，川畑敬志：本誌，11[5]，267～271（1969）。
- (5) 同上：同上，11[11]，676～678（1969）。
- (6) 北山正文，川手理：同上，12[12]，715～717（1970）。

研究論文

552. 自己帰還性を有する原子炉の最適出力変更

秋本 正*，小川 雄一*

（1970年 8月31日 受理）

（1971年 3月18日 再受理）

Optimal Power Change of a Reactor Having Internal Feedback

By Tadashi AKIMOTO and Yuichi OGAWA

State space-constrained time optimal control having internal feedback can be obtained by two alternative modes of control. One is that which brings the system from the initial equilibrium state to the objective equilibrium state in minimum time, and the other raises the reactor power to the objective level with maximum rapidity in order to follow the load change immediately.

In the former mode, the controllability of the nonlinear system is rigorously satisfied if the delayed neutrons are ignored, and even with the delayed neutrons taken into account the system can be optimally controlled for practical purposes.

In the latter mode, a system of control must be provided to apply after the objective power level is reached, in order to bring the reactor system to the final equilibrium state while keeping the power level constant.

The choice between the two modes of control would depend on the purpose of reactor operation.

* 北海道大学工学部 (Faculty of Eng., Hokkaido Univ.)