

## 鉛直急縮小管内を流れる気液二相振動流に関する研究\*

Alexandros VOUTSINAS<sup>\*1</sup>, 社河内 敏彦<sup>\*1</sup>  
辻 本 公 一<sup>\*2</sup>, 安 藤 俊 剛<sup>\*2</sup>Gas-Liquid Two-Phase Oscillating, Fluctuating Flow through  
Vertical Sudden Contraction PipeAlexandros VOUTSINAS, Toshihiko SHAKOUCI<sup>\*3</sup>,  
Koichi TSUJIMOTO and Toshitake ANDO<sup>\*3</sup> Faculty of Engineering, Mie University,  
1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

A gas-liquid two-phase flow through vertical sudden contraction pipe is an area that still little is known, although its application can be seen in many industrial and hydraulic components. In this study, the mean and fluctuating flow characteristics of a vertical upward gas-liquid two-phase flow through sudden contraction pipe is studied experimentally and visually, while a new simple method of controlling the flow in order to reduce the flow fluctuation is shown. The bubbly flow upstream the contraction changes to an intermittent and fluctuating flow downstream the contraction, depending on a formation of thick and thin bubble swarms. When mounting a ring-shaped obstacle before the contraction, the vortex generation at the contraction area is reduced. That is, the flow is suggested by mounting a ring-shaped small step before the contraction to lead to flow control where the fluctuating amplitude can also be suppressed. The effects of Reynolds number, void fraction and ring position are examined.

**Key Words:** Gas-Liquid Two-Phase Flow, Sudden Contraction Pipe, Fluctuating Flow, Flow Control

## 1. 緒 論

円管内あるいは管群を通過する気液二相流は各種のボイラや熱交換器などでみられ, その流動特性については多くの研究がなされている<sup>(1)~(8)</sup>.

しかしながら, 急縮小管内を流れる単相流については, 縮小管前縁からの流れのはく離特性などについて詳細な研究がある<sup>(2)~(6)</sup>が, 鉛直急縮小管内を流れる気液二相流の流動特性(特に, 縮小管前縁のオリフィス効果による縮小流れの平均および変動特性)についての研究<sup>(3)</sup>は少なく不明な点も多い. 急縮小部の前後にはそれぞれ軸対称な環状のはく離渦(以後, 渦領域 I, II と呼ぶ)が生起するが, 特に後者のはく離渦は縮小管路の有効断面積を減少させるためその流動抵抗を大きく増加させる. また, 気液二相流の場合には急縮小部の下流でボイド率が局所的に大きく変化し, すなわち気泡群の分布に粗密が生じ, 流れが不規則に変動, 振動する現象が観察されている<sup>(1)</sup>が, それは十分に明らかにされていない. この種の流路および現象

は, 例えば, 次世代の沸騰水形原子炉の制御棒駆動装置などでみられ, 特に炉の起動時においては流動の不安定や装置の振動を誘起するためその対策が望まれている<sup>(1)</sup>.

本研究では, 縮小比を変え, 急縮小管内を流れる水単相流および空気-水気液二相流の流動特性, 特に, 急縮小部下流で生起する気泡群の粗密に起因する流れの変動, 振動現象について, 流れ(ボイド率, 圧力)の変動振動数および振幅などを実験的に明らかにするとともにその抑制・制御法について検討する.

振動の抑制・制御には, 比較的簡便な手法, すなわち急縮小部の手前の管壁上にリング状の小物体を設置し(後出の図 2, 3)そこからはく離流れを縮小管路の壁面上に沿うように流入させることからはく離渦の生起を制御, 抑制することを考えた. なお, その際縮小管の有効断面積の減少の抑制, および流れの変動, 振動の抑制が予期される.

## 2. 実験装置と方法

図 1 に, 実験装置の概略(全体)を示す. 貯水槽(1)内の水はポンプ(2)で加圧され, 流量調節弁(3), 流量計(4)を経て試験区間(全長  $L=2,450$  mm の鉛直管)の下部に至る. また, コンプレッサ(6)からの圧

\* 原稿受付 2005 年 8 月 18 日.

<sup>\*1</sup> 三重大学大学院工学研究科(〒514-8507 津市栗真町屋町 1577).<sup>\*2</sup> 正員, 三重大学工学部機械工学科.  
E-mail: shako@mach.mie-u.ac.jp

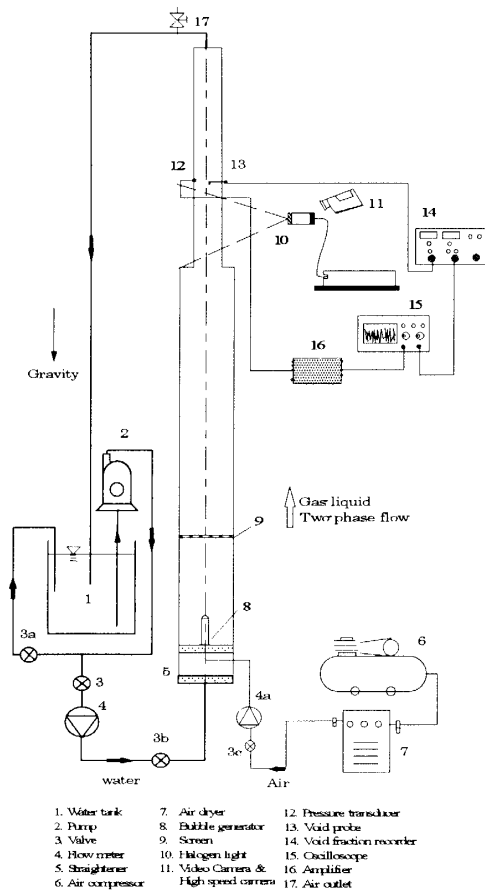


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up

縮空気は、ドライヤ(7)、流量計(4a)を通り、試験区間下部に設置したファインセラムックス製の気泡発生器(8)から気泡となって水中に混入され気液二相流が生成される。気液二相流は直径  $d_1=70$  mm のアクリル樹脂製の透明管内を助走区間を経て直径  $d_2=30$ , または  $40$  mm[縮小(面積)比, それぞれ  $A=0.18, 0.33$ ] の急縮小管部に至り、鉛直管の最上部(17)で空気を大気中に放出した後、水は再び貯水槽に戻され循環される。なお、実験中、水温を一定に保つためつねに水の一部を入れ替えるようにした。

管内に流入する気液二相流の水と空気の体積割合  $\alpha_v = Q_a / (Q_a + Q_w)$ , および代表速度(上流側管内の水の流速)  $U$  は、流量調節弁、流量計を使って  $U=0 \sim 0.51$  m/s,  $\alpha_v=0 \sim 20\%$  の範囲で任意に変えることができる。  $Q_a, Q_w$  はそれぞれ、空気、水の流入体積流量である。なお、気泡の体積流量は縮小部の  $2d_1$  上流の位置を基準位置とし(図2中の位置,  $P_1$ ), そこでの静圧をもとに算出した。

図2に、急縮小部の詳細を示す。急縮小管の壁面上には直径  $0.8$  mm の静圧孔が、急縮小前に  $10$  mm 間隔で  $10$  個、急縮小後に  $10$  mm 間隔で  $10$  個、その後

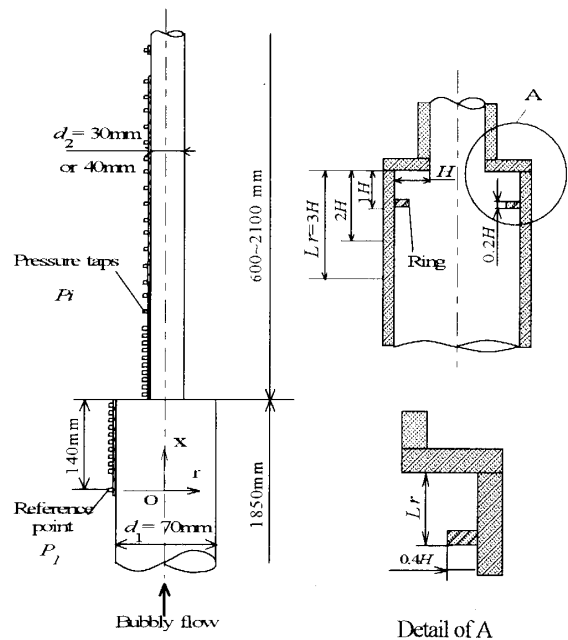


Fig. 2 Test section (Sudden contraction pipe)

$40$  mm 間隔で  $4$  個設置されている。これらの静圧孔と水柱逆 U 字管を用いて、管壁面上の流れ方向の圧力分布を測定した。

また、先に述べたように流れが安定していると思われる急縮小部から上流側  $2d_1$  の位置に基準圧力孔  $p_1$  を設けた。座標系は、管中心のその位置を原点とし管上方および半径方向にそれぞれ  $x, r$  座標をとった。

急縮小部下流には気泡群の粗密が生じし、それに対応して圧力変動が生じると考えられる。それを測定するため、急縮小部の下流  $2.5d_1$  の位置の静圧孔に半導体式の小形圧力変換器(豊田工機, PS-101)を設置し測定に供した。

また、電気抵抗形の単針式ボイド率計(KANOMAX, TDS 2002)を用いてその位置の管中心でのボイド率(時間変化)を測定した。

急縮小部下流での流れの振動を制御・抑制するため、急縮小部から  $L_r/H=1, 2$  の上流側の管壁面上に幅  $0.2H$ , 高さ  $0.4H$  のリング状の小物体(以後、リングとも呼ぶ)を設置した。ここで、 $H$  はステップ高さ  $[=(d_1-d_2)/2]$  である。

急縮小管内の流動特性および渦領域 II の非定常(振動)特性を明らかにするため、流れの可視化・観察実験を、ハイスピードカメラ、ビデオカメラ、デジタルカメラの 3 種類のカメラを用いて行った。ハイスピードカメラでの流れ場の撮影は、シャッタースピード  $1/4000$  s, 撮影速度  $240$  fps として行った。水単相流の流れの可視化には、トレーサとして直径  $0.03$  mm,

比重 1.02 のスチレンビーズを使用した。また、二相流では気泡がトレーサの役割を果たした。

基準位置  $P_1$  でのデジタルカメラによる流れの写真撮影、測定結果から気泡径分布を求め、平均気泡径 2.5 mm を得た。

実験は、レイノルズ数  $Re = U d_1 / \nu = (0.5 \sim 3) \times 10^4$  ( $U$ : 上流側管内の水の平均流速,  $\nu$ : 水の動粘度) で行った。

なお、急縮小部上流側管内の流動様式は、研究の第 1 段階としてすべて気泡流の範囲とした。

実験条件、範囲を、表 1 にまとめて示す。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 フローパターン、振動流の発生 図 3(a)

Table 1 Experimental condition and range

Parameters	
Pipe diameter (upstream)	$d_1=70\text{mm}$
Contraction area ratio	$A=(d_2/d_1)^2=0.18, 0.33$
Ring position	$L_r/H=1, 2$
Reynolds number	$Re=(0.5 \sim 3) \times 10^4$
Volumetric flow rate ratio	$\alpha_v=0 \sim 20\%$

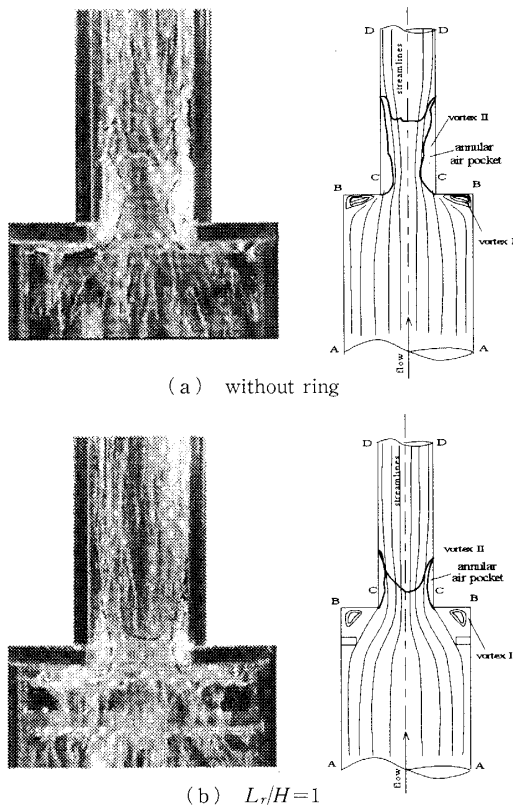


Fig. 3 Visualized flow pattern ( $A=0.18, Re=2 \times 10^4, \alpha_v=5\%$ )

に、一例として、縮小比  $A=0.18$  の急縮小管内を流れる気液二相流のある瞬間の可視化写真 ( $Re=2 \times 10^4, \alpha_v=5\%$ ) と流れのスケッチ(流跡線)を示す。図 3 の写真中、白く見えるのが気泡で、急縮小部の角部 C から流れがはく離し長さ約  $3.0d_2$ 、高さ約  $0.21d_2$  の大きな環状の渦領域(渦領域 II)、エアポケットが形成されている。すなわち、渦領域での圧力が低いため気液二相流の場合そこは水より密度の小さい空気で満たされ環状のエアポケットとなる。また、その大きさは水単相流の場合よりかなり大きく、高さで約 2 倍になる。なお、このエアポケットは一見不規則に振動し、その下流の流れも振動する状況が見られた。

気液間の干渉、スリップなどの結果、流れは非常に複雑であるが、上記振動流の発生について、流れの観察結果から以下のことが推察される。急縮小部上流での流れは気泡流であるが、BC 面に蓄積された気泡が円周方向に不均一に急縮小管に流入し非対称な環状のエアポケットが形成されそれが一見不規則に振動する。そのエアポケットから振動に従って間欠的に気泡群が放出され、その結果急縮小管の流れに気泡群の粗密が生じ、流れに振動が生起すると考えられる。振動の詳細は後述する。

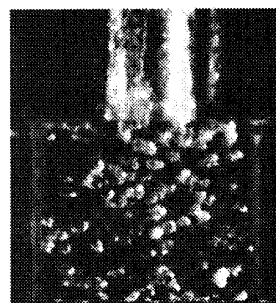


Fig. 4 Visualized flow pattern before contraction ( $A=0.18, Re=2 \times 10^4, \alpha_v=5\%$ )

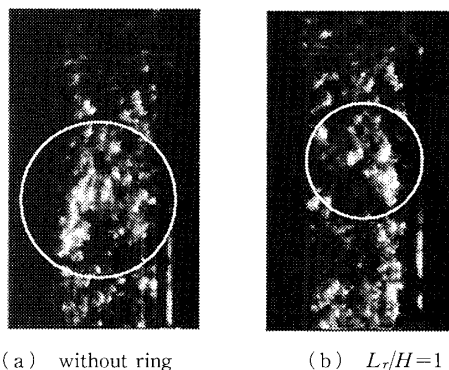


Fig. 5 Visualized flow pattern after contraction ( $A=0.18, Re=2 \times 10^4, \alpha_v=5\%$ )

また、この渦領域は急縮小管の有効通路面積を減少させ流動抵抗を大きく増加させる。それに比べ、図3(b)に示すように急縮小部の手前  $L_r/H=1$  の壁面上にリングを設置するとそこからはく離流れが急縮小管の壁面に沿うように流入し、はく離渦(渦領域II)の形成が抑制、制御される(小さくなる)。その結果、急縮小部の有効断面面積の減少が抑制され、流動抵抗が低減されると考えられる。

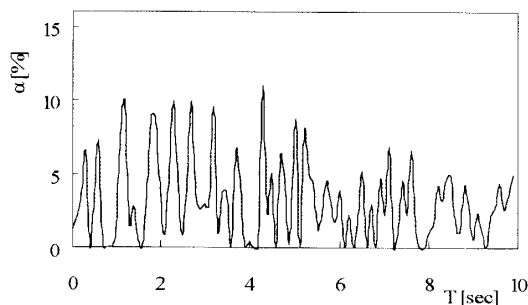
**3・2 流れおよびボイド率の変動** 図4に、図3(a)と同一条件の流れをハイスピードカメラを使って撮影した結果(可視化写真)を示す。

シャッタースピードが速いため流れている気泡の個々が識別でき、急縮小前の流れが気泡流であることがよくわかる。

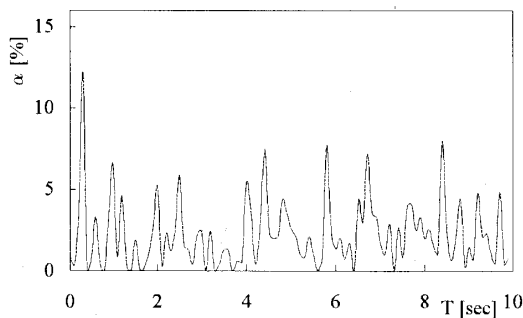
図5(a)に、 $A=0.18$ ,  $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=5\%$  の場合の急縮小部から下流  $4d_1$  近傍での流れの可視化写真を示すが、丸く囲んだ部分にボイド率の高い大きな気泡群、クラスタが存在する。実際には、このような気泡群が不規則に流れていく状況が観察された。

図5(b)に、図5(a)と同一条件下の流れにリングを  $L_r/H=1$  に設置した場合の結果を示す。丸く囲んだ部分にいくつかの気泡のクラスタがみられるが、リングを設置しない場合に比べその大きさが約  $1/3$  くらいに小さくなっている。

図6(a)に、急縮小部から下流  $4d_1$  の位置における



(a) without ring

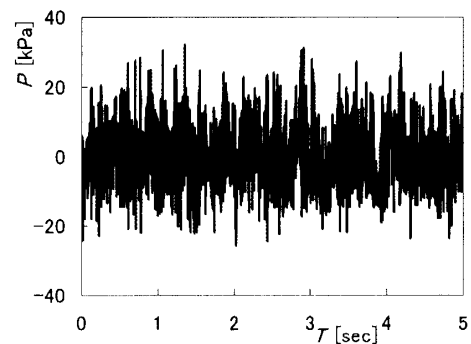


(b)  $L_r/H=1$

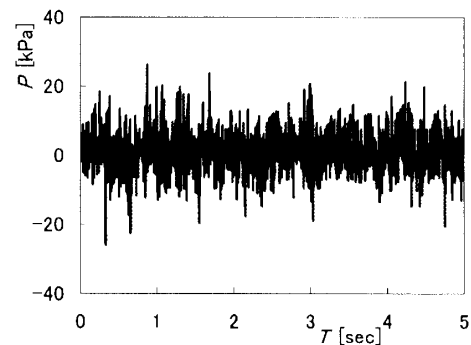
Fig. 6 Void fraction fluctuation  
( $A=0.18$ ,  $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=5\%$ )

管中心でのボイド率  $\alpha$  の時間変化の測定例を示す。 $A=0.18$ ,  $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=5\%$  で、上流での流れは気泡流であるが急縮小後の流れが変動、振動しているのがわかる。図6(b)に、 $L_r/H=1$  にリングを設置した場合の測定結果を示す。この場合も流れは振動するが、 $\alpha$  はリングの影響を受け減少する。これより、気泡群が小さくなっていると推測される。

**3・3 圧力の変動** 図7(a)に、急縮小部から下流  $4d_1$  での圧力変動波形の測定例を示す。圧力が、ある程度規則的に変動するようすが見てとれる。それに比べ、図7(b)に示すように  $L_r/H=1$  にリングを設置す



(a) without ring



(b)  $L_r/H=1$

Fig. 7 Pressure fluctuation  
( $A=0.18$ ,  $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=5\%$ )

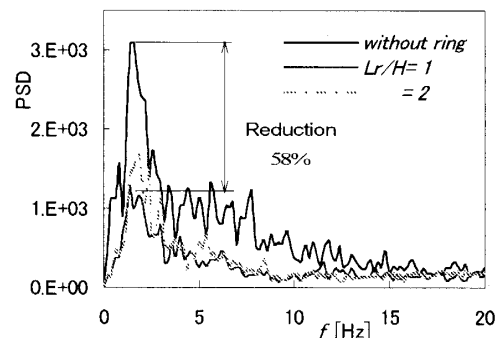


Fig. 8 PSD of pressure fluctuation  
( $A=0.18$ ,  $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=5\%$ )

るとリングの影響を受け圧力変動波形が異なり、変動振幅が全体的に減少している。

図8に、図7の結果などを波形解析(FET)し縦軸にPSD(power spectrum density)をとって示す。この際、一つの条件に対し5秒ごとに圧力変動データを5秒間サンプリング(サンプリング周波数:1000 Hz)、それを波形解析し、その20回分を平均した。図8より、卓越周波数が $f_D \approx 1.6$  Hzの、かなり複雑な振動流となっているのがわかる。なお、図8には $L_r/H = 1, 2$ の結果も示す。 $f_D$ 値はリングの影響をほとんど受けずそれがない場合とほぼ同様( $f_D \approx 1.6$  Hz)であるが、振動振幅(PSD値)はリングの影響を大きく受け $L_r/H = 1, 2$ の場合それぞれ約0.42, 0.54倍までに減少する。このことは、急縮小部下流での大きな気泡群、クラスタの形成がリングの設置によって抑制されることを示している。

(1)  $Re$ 数の影響 図9に、 $Re = 1 \times 10^4$ 、面積比と体積割合はそれぞれ同様で $A = 0.18$ 、 $\alpha_v = 5\%$ の場合の結果を示す。 $f_D$ は約2.8 Hzで、それは流速が大きい $Re = 2 \times 10^4$ の場合に比べて大きく、また振幅も大きい。 $L_r/H = 1, 2$ の結果も示すが、振幅の減少率は小さく $L_r/H = 1$ で約0.8倍である。

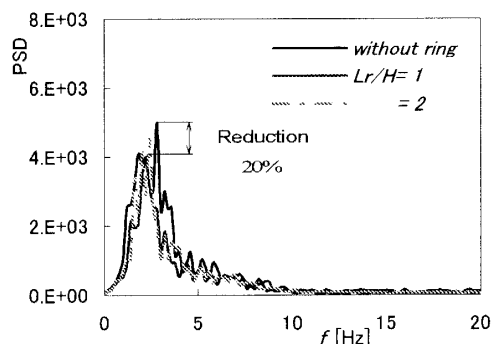


Fig. 9 PSD of pressure fluctuation  
( $A = 0.18$ ,  $Re = 1 \times 10^4$ ,  $\alpha_v = 5\%$ )

(2) 縮小比の影響 図10に、面積比 $A = 0.33$  ( $Re = 2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v = 5\%$ )の場合の圧力変動波形のFFT解析結果を示す。この場合、卓越周波数は $A = 0.18$ の場合(図8)とほぼ同様であるが、 $f_D$ での振幅は約0.42倍とかなり小さい。すなわち、面積比が大きくなると急縮小部下流で形成され $f_D \approx 2$  Hzで通過する気泡群、クラスタがかなり弱くなる(圧力変動が小さくなる)。

また、リングを設置する( $L_r/H = 2$ )とその振幅は設置しない場合の約0.5倍に減少する。

(3) 体積割合の影響 図11に、面積比 $A = 0.18$ 、 $Re = 2 \times 10^4$ 、 $\alpha_v = 10\%$ の場合の圧力変動波形のFFT解析結果を示す。 $f_D$ は、図8の場合と同様、約1.4 Hzでその振幅はリングを設置すると減少し、 $L_r/H = 1$ で最小となり、リングを設置しない場合の約0.7倍に減少する。

図12に、図11と同じ条件で $\alpha_v = 20\%$ の場合のFFT解析結果を示す。 $\alpha_v$ が増加すると、流れのパターンが乱れた気泡流(agitated bubbly flow)へと大きく変わり変動振幅(PSD値)がかなり大きくなる。また、 $\alpha_v = 10\%$ の場合と異なり、卓越振動数 $f_D$ が $f = 1.5 \sim 5$  Hzの間に二つみられる。さらに、より高い振

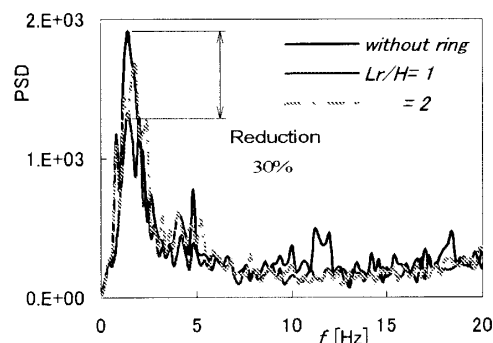


Fig. 11 PSD of pressure fluctuation  
( $A = 0.18$ ,  $Re = 2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v = 10\%$ )

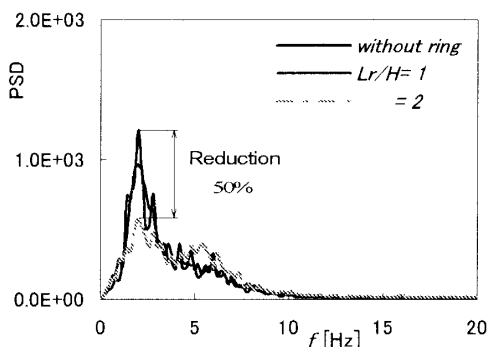


Fig. 10 PSD of pressure fluctuation  
( $A = 0.33$ ,  $Re = 2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v = 5\%$ )

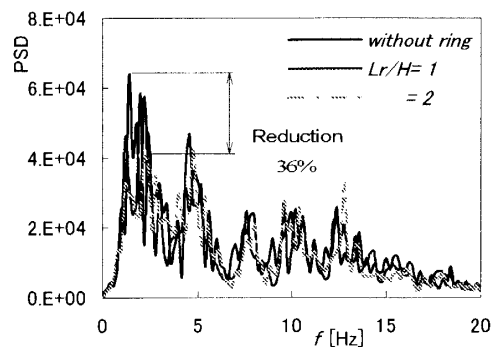
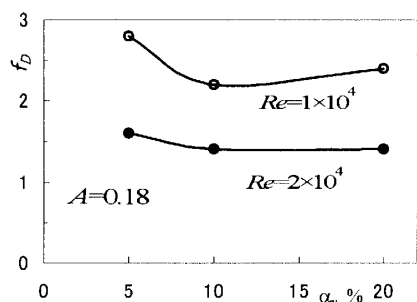


Fig. 12 PSD of pressure fluctuation  
( $A = 0.18$ ,  $Re = 2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v = 20\%$ )

Fig. 13 Dominant frequency  $f_D$ 

動数領域でかなり大きな振幅の振動が存在する。このことから、上記したように流れのパターンが変わることが理解される。また、図8~11の場合と異なり  $f_D$  の振幅が最も減少するのは  $L_r/H=2$  の場合でリングを設置しない場合の約0.64倍となる。

なお、 $f_D$  の振幅は、 $A=0.18$ ,  $0.33$ ,  $Re=1$  or  $2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=0 \sim 20\%$  の場合、 $Re$  数と  $\alpha_v$  が大きい場合 ( $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=20\%$ ) を除き、いずれの場合も  $L_r/H=1$  にリングを設置すると最小となる。これは、 $Re$  数と  $\alpha_v$  が大きい場合 ( $Re=2 \times 10^4$ ,  $\alpha_v=20\%$ )、急縮小後の流れのパターンが前記したように他のものと異なり乱れた気泡流 (agitated bubbly flow) へと大きく変わることによる。

図13に、以上の結果をもとに、 $A=0.18$  の場合の  $f_D$  に対する  $Re$  数と  $\alpha_v$  の影響をまとめて示す。 $f_D$  はいずれの場合も  $Re$  数が小さいと大きい。これは、 $Re$  数が大きくなると流れが安定化され振動の発生が抑制されることを示している。なお、 $\alpha_v < 10\%$  では振動振幅 (PSD 値) も抑制される (図8, 9) が、 $\alpha_v=20\%$  ( $Re=2 \times 10^4$ ) では振動振幅がかなり大きくなる。

また、 $f_D$  は  $\alpha_v$  の増加とともに減少しほぼ定値 ( $Re=1 \times 10^4$ ,  $2 \times 10^4$  の場合それぞれ、 $f_D \approx 2.2 \sim 2.4$ ,  $1.4$ ) となる。また、 $f_D$  値はいずれの場合もリングを設置してもその影響をほとんど受けない (変わらない)。

#### 4. 結 論

鉛直急縮小管内を流れる気液二相流について、本研究では特に、急縮小後の流れに生起する気泡群の粗密に起因する流れの振動現象について実験的に検討した。

おもな結果は、以下のようである。

(1) 急縮小管内を流れる気液二相流では、急縮小部の角部 C (図2) から流れがはく離し (上流での流れは気泡流) 大きな環状の渦領域、エアポケットが形成

される。また、急縮小部の BC 面に気泡が蓄積されそれが円周方向に不均一に間欠的に急縮小管に向かって放出され、それが急縮小管での気泡群の粗密、クラスタを生起させ流れに振動を生じさせる。

(2) 急縮小後の流路における気泡群、クラスタは、本実験範囲内では  $f_D \approx 1.4 \sim 2.8$  Hz の卓越周波数で振動する。 $f_D$  は  $A=0.18$  の場合、いずれの  $Re$  数の場合も  $Re$  数が大きいと小さくなり、 $\alpha_v$  の増加とともに減少しほぼ定値 ( $Re=1 \times 10^4$ ,  $2 \times 10^4$  の場合それぞれ、 $f_D \approx 2.2 \sim 2.4$ ,  $1.4$ ) となる。なお、 $f_D$  は縮小比  $A$  およびリングの影響をほとんど受けない。

また、 $\alpha_v < 10\%$  では振動振幅 (PSD 値) は  $Re$  数および  $A$  の増加とともに減少する。

(3) リング状の小物体を急縮小部手前の管内壁面上に設置するという極めて簡便な手法により、気泡群の振動振幅を大きく減少させることができる。このことは、流動の安定化、管路の振動の抑制にとって極めて有為であるばかりでなく、急縮小管の流動抵抗の低減を示唆する。

本研究に協力された卒業研究生・高村純一君に感謝の意を表す。

#### 文 献

- (1) Morimoto, Y. et al., Fluctuation Phenomenon of Two-Phase Flow through a Vertical Pipe with Contraction, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), CD-ROM.
- (2) Ando, T. et al., Drag Reduction of Abrupt Contraction Pipe (Control of Flow Separation by Small Obstacle), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 70, No. 691 (2004), pp. 650-656.
- (3) Geiger, G. E., Sudden Contraction Losses in Single and Two-Phase Flow, PhD dissertation, Univ. of Pittsburgh, (1964).
- (4) Durst, F. et al., Experimental and Numerical Investigations of Plane Duct Flows with Sudden Contraction, *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 42, (1999), pp. 3019-3035.
- (5) Chiang, T. P. et al., Bifurcations of Flow Through Plane Symmetric Channel Contraction, *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 42, (1999), pp. 3019-3035.
- (6) Cheremisinoff, N. P., *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 3, Gas-Liquid Flows, (1986), pp. 401-908, Gulf Pub.
- (7) Ishii, M., *Thermo and fluid dynamic theory of two-phase flow*, (1975), pp. 10-265, Eyrolles, Paris.
- (8) Ulbrich, R. and Newes, D., Vertical, Upward Gas-Liquid Two-Phase Flow Across a Tube Bundle, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 20, No. 2 (1994), pp. 249-272.