

鉛直急縮小管内を流れる気液二相流の挙動とその制御,
抵抗低減に関する研究*Alexandros VOUTSINAS^{*1}, 社河内 敏彦^{*1}
辻 本 公 一^{*2}, 安 藤 俊 剛^{*2}Flow Characteristics and Drag Reduction of Vertical Upward Gas-Liquid
Two-Phase Flow through Sudden Contraction PipeAlexandros VOUTSINAS, Toshihiko SHAKOUCI^{*3},
Koich TSUJIMOTO and Toshitake ANDO^{*3} Graduate School 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 and has been studied experimentally, visually and numerically. In this study, the flow characteristics of vertical upward gas-liquid two phase flow through a sudden contraction pipe are examined experimentally and numerically, and a new simple method of flow control to reduce the flow fluctuation and resistance is shown. When mounting a ring shaped step before the contraction, vortex formation at the contraction was reduced. That is, the flow is suggested by mounting a ring-shaped small obstacle before the contraction to lead to stabilized flow and drag reduction. The effects of Reynolds number, volumetric flow rate ratio of air to water and the ring position were examined. Numerical analysis using an incompressible two fluid model was conducted in order to understand the flow pattern well.

Key Words: Gas-Liquid Two Phase Flow, Sudden Contraction Pipe, Flow Control, Drag Reduction

1. ま え が き

円管内を流れる気液二相流は各種のボイラや熱交換器などで見られ, その流動特性については数多くの研究によってかなりのことが明らかにされている。

しかしながら, 急縮小鉛直管内を流れる気液二相流の流動特性に関する研究, 特に, 流動制御・抵抗低減に関する研究は, ほとんど見られないようである。

ところで, 急縮小部の前後にはそれぞれ軸対称な環状のはく離渦が生起するが, 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⁽¹⁾⁽²⁾。また, 気液二相流の場合には急縮小後, ボイド率が局所的に大きく増加し流動が不安定になり不規則な振動現象が生起する⁽³⁾⁽⁴⁾。

本研究では, まず, 先の急縮小部における水単相流の研究⁽⁵⁾に引き続き, 特にあまり明らかになっていない空気-水, 気液二相流の流動特性を実験的, 数値解析(二次元, 非圧縮性, 二流体モデルによる)的に明らかにし, 次いで, 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, はく離渦の生起を抑制, 制御し縮小管路の有効断面積の減少を防ぎ流動抵抗を低減すること(図2~4, 6, 7, 10, 11), および変動, 振動流の生起を抑制することを新たに提示しその有効性を示す。一般に, 急縮小管では, 曲率あるいはテーパをもった接続管を使って流れのはく離, 渦領域の形成を防ぎ流動抵抗の低減を図っているが, 小物体による本流動制御法は, その簡便さから特に急縮小部を有する大きな配管, ダクト系に対して有効であると考えられる。

2. 実験装置と方法

図1に, 実験装置の概略を示す。貯水槽(1)内の水はポンプ(2)で加圧され, 流量調節弁, 流量計(4)を経て試験区間(全長 $L=2450$ mm の鉛直管)の下部に至る。また, コンプレッサ(12)からの圧縮空気は, ドライヤ(13), 流量計(4a)を通り, 試験区間下部に設置したファインセラミックス製の気泡発生器(6)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。気液二相流は助走区間を経て急縮小部に至り, 鉛直管の最上部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

* 原稿受付 2005年9月20日。

^{*1} 正員, 三重大学大学院工学研究科(〒514-8507 津市栗真町屋町1577)。^{*2} 正員, 三重大学工学部機械工学科。

E-mail: shako@mach.mie-u.ac.jp

ここで,

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

下付き添字 k は気相 g または液相 l を, λ_k は気液界面(相間)の摩擦力の係数を, τ_k は粘性応力を, f_k は流体抵抗の界面張力, 例えば仮想質量や揚力による力, を示す.

式(1), (2)を時間 t で離散化し上流形有限要素法を使って⁽⁶⁾, 下記の条件のもとに急縮小管内の気液二相気泡流の流動特性を解析した.

なお, f_k は簡単のために無視し λ_k は気液界面積濃度 a と抵抗係数 C_D を用いた次式で与えた.

$$\lambda_k = (1/8)(a\rho_1 C_D / a_g \rho_g) |U_g - U_l| \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda_l = -(1/8)(a\rho_1 C_D / a_l) |U_g - U_l| \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで,

$$a = 6\alpha_g/d, \quad C_D = 24(1 + 0.15Re_b^{0.078})/Re_b,$$

$$Re_b = \rho_1 d |u_g - u_l| \mu_l$$

μ_l は液相の粘性係数で気泡群の影響を考慮した値 μ_{up} で与えた.

$$\mu_{up} = (1 + 2.5\alpha_g)\mu_l \quad \dots\dots\dots (6)$$

また, 急縮小部から上流および下流側への管路長はそれぞれ $3d_1$, $5d_1$ とし, 流路入口(上流境界)では, 気相速度, 液相速度およびボイド率 α は一様で気液間相対速度は $(u_g - u_l)/u_l = 0.278$ とした. また, 流路出口(下流境界)では応力零の条件を, 流路側壁面では滑り条件を課した.

なお, 気泡は本実験での平均気泡径 $d = 2.5$ mm の球形気泡を仮定した.

計算に際し, 領域を四角形要素(要素数: 49×94 , 節点数: 3106)に分割した.

4. 結果と考察

4.1 フローパターン 図3(a), (b)にそれぞれ, 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 ($Re = 1 \times 10^4$, $\alpha_v = 0.05$) の流れの可視化写真, および流れのスケッチ(流跡線)を示す. 図3(a)中, 白く見えるのが気泡で, 急縮小部の角部 B から流れがはく離しその概略を破線で示す大きな環状の渦領域(以後, 渦領域 II と呼ぶ), エアポケットが形成される. 渦領域 II の大きさは, 長さ約 $2.1d_2$, 高さ約 $0.25d_2$ である. 前述したように, 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原因になる.

それに比べ, 図4(a), (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)の形成がかなり抑制, 制御さ

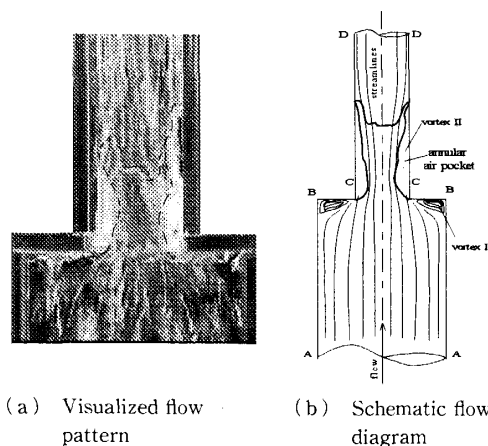


Fig. 3 Flow pattern without ring
($Re = 2 \times 10^4$, $\alpha_v = 5\%$, $A = 0.18$)

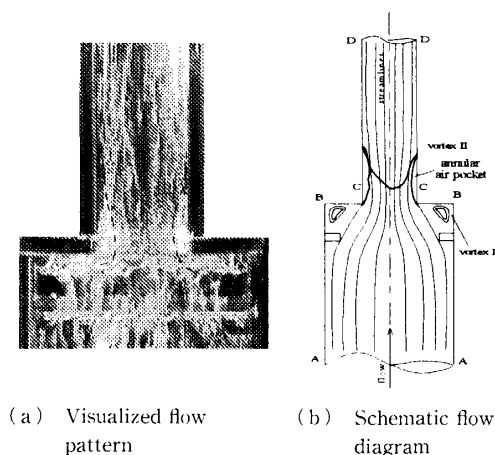


Fig. 4 Flow pattern with ring, $L_r/H = 1$
($Re = 2 \times 10^4$, $\alpha_v = 5\%$, $A = 0.18$)

れる.

水単相流の場合についても, 流れの可視化, 観察から, 定性的に上記と同様の結果を得た.

なお, 急縮小後のフローパターンに気泡群が不規則に形成され通過する振動流となる流動状態が観察された. これは, おもに, 急縮小部手前の角部 [図3(b)の B 部] にたまった気泡が不規則に縮小管に放出されることによると考えられる.

振動のようす(気泡群が通過するようす)は圧力変動に対応すると考えられるので, 急縮小後 $2.5d_1$ の位置の圧力孔に半導体式圧力変換器(豊田工機, PS-101)を取付けそこでの圧力変動を測定した.

図5(a), (b)にそれぞれ, $A = 0.18$, $Re = 2 \times 10^4$, $\alpha_v = 5\%$ の場合の圧力変動とその FFT 解析結果を縦軸に PSD(power spectrum density)をとって示す. 卓越周波数が約 1.6 Hz の, かなり複雑な振動流とな

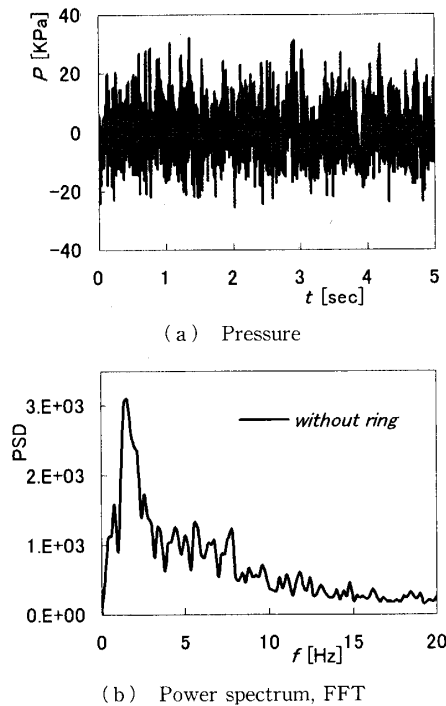


Fig. 5 Pressure fluctuation at $y=4.5d_1$
($Re=2 \times 10^4$, $\alpha_v=5\%$, $A=0.18$)

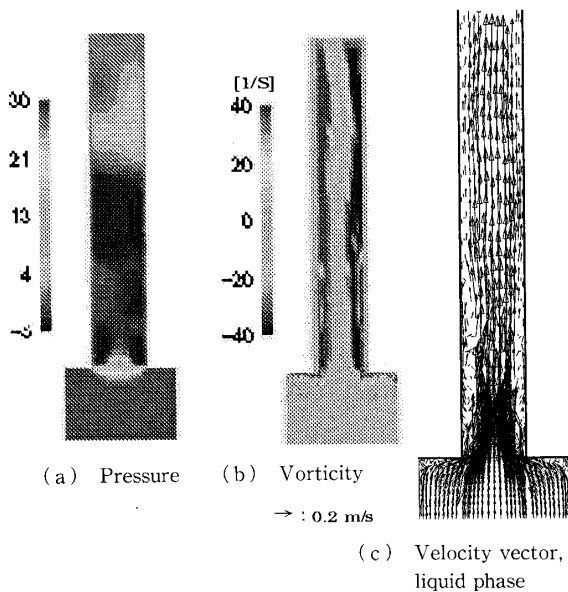


Fig. 6 Numerical analysis for liquid phase
($Re=1 \times 10^4$, $\alpha=10\%$, $A=0.18$, without ring)

っているのがわかる。この現象は流れや管の振動と関連し非常に興味深いがその詳細な検討は他⁽⁴⁾に譲り、ここではおもに平均流特性について議論する。

4・2 数値解析結果 図6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($Re=1 \times 10^4$, ボイド率 $\alpha=0.1$)のフローパターン(数値解析結

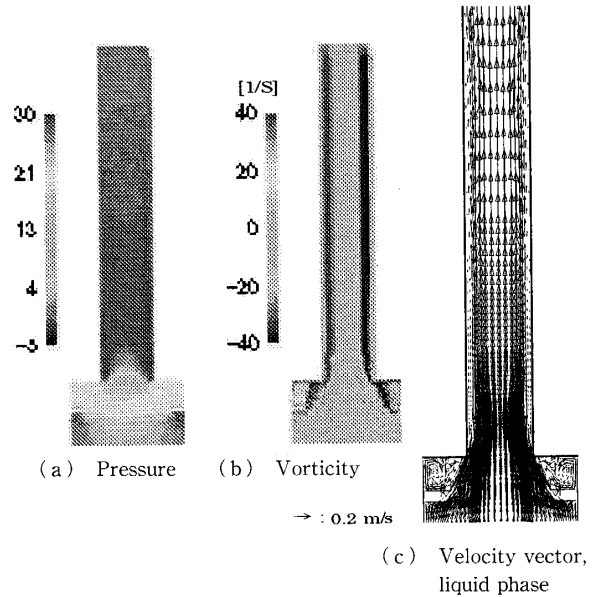


Fig. 7 Numerical analysis for liquid phase
($Re=1 \times 10^4$, $\alpha=10\%$, $A=0.18$, $L_r/H=1$)

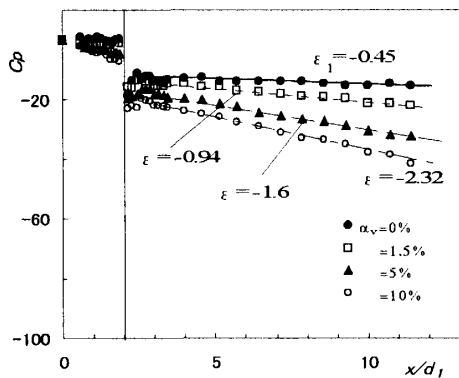
果)を示す。図6(a)~(c)はそれぞれ、等圧線図[図中の数字は動圧 $\rho_w U^2/2$, (ρ_w : 水の密度)で無次元化した無次元圧力値である)、等渦線図、速度ベクトル図である。なお、速度ベクトル図は液相に対する結果であるが気相の場合もそのフローパターンはほぼ同様であった。

計算結果からも、図3に示したように急縮小前の角部Bに小さな渦領域(渦領域I)が、また急縮小部角部Cから流れがはく離渦領域IIが形成される。流れが衝突するBC面で圧力が上昇し、はく離渦領域IIに相当する部分で圧力が減少した後、流れが再付着する領域で圧力が上昇する(急縮小後の流れに圧力変動が存在する)。渦領域IIの大きさは、長さ約 $3.0d_2$ 、高さ約 $0.21d_2$ で、前述の実験結果(それぞれ、 $2.1d_2$, $0.25d_2$)とほぼ一致している。

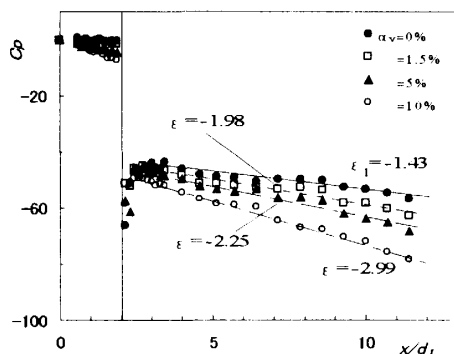
また、急縮小部角部Cから生起した渦度が下流へ移動するようすや速度ベクトル図から、急縮小後の流れは非対称であるとともに、その流れは時間経過とともに左右へ変動、振動して流れるのが知れた。

このように、本数値解析結果から、二次元急縮小管路においても急縮小後の気液二相流に振動、変動流が生起することが予測される。

図7に、リングを $L_r/H=1$ に設置した場合の結果を図6と同様に示す。速度ベクトル図から、リングからはく離した流れが急縮小管の壁面に沿うように流入し渦領域IIがほとんど消滅すること、および流れが対称に安定して流れることがよくわかる。また、それに



(a) $A=0.33$



(b) $A=0.18$

Fig. 8 Pressure distribution without ring
($Re=1 \times 10^4$, uncertainty in $C_p \pm 2$)

対応して圧力分布, 渦度分布も流れ方向へほとんど変動しない。

このように, リングを設置すると急縮小管を流れる気液二相流の流動を安定化することができるのがわかる。また, 二次元急縮小管路内の気液二相流に対する本解析結果は, 軸対称(準二次元)管路内のそれを定性的には比較的良好に表し流動特性を理解するのに有用である。

4.3 圧力分布 管路壁面上の流れ方向への圧力分布を, 任意の位置 x での圧力 p_i と基準位置(急縮小部より $2d_1$ 上流) $x=0$ での圧力 p_1 との差として圧力係数 C_p で表記した。

$$C_p = 2(P_1 - P_i - P_e) / (\rho_t U_m^2) \quad (7)$$

ここで,

P_e : P_1 と P_i 間(距離: H_h)の位置水頭(= $\rho_t g H_h$),

ρ_t : 気液二相流の平均密度 [$= \rho_w(100 - \alpha_v)/100$],

ρ_w : 水の密度, U_m : 気液二相流の上流管での平均流速 [$= U(100 - \alpha_v)/100$]

図8(a)に, 面積比 $A=0.33$, $Re=1 \times 10^4$ の場合の

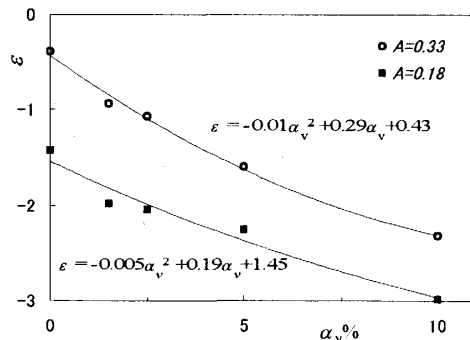


Fig. 9 Pressure gradient
($Re=1 \times 10^4$, uncertainty in $\alpha_v \pm 0.5$)

圧力分布を示す。横軸の $x/d_1=0, 2$ の位置がそれぞれ基準および急縮小断面位置に相当する。水単相流の場合, C_p は急縮小部で流れの急加速による圧力の低下, および流動(急縮小)損失のため急減するが, その後 $x/d_1 > 4$ でほぼ一定のこう配で減少する。そのこう配は, 以下の式で与えられる Blasius の摩擦抵抗による圧力損失の式と一致する。

$$\partial C_p / \partial(x/d_1) = -\lambda(d_1/d_2)^5 \quad (8)$$

ここで,

$$\lambda = 0.3164 [(d_1/d_2)Re]^{-1/4} \quad (9)$$

式(8)で計算される値 $\partial C_p / \partial(x/d_1) = -0.45$ を図8中, 実線で示すが, 実験結果とよく一致する。

気液二相流の場合も, 下流 $x/d_1 > 4$ での圧力 C_p はほぼ直線的に減少するが, そのこう配は空気の体積割合 α_v の増加とともに減少する。これは, α_v が増加すると気液二相流と管壁間の摩擦損失の増加および気液間の混合損失の増加によると考えられる。

図8(b)に, $A=0.18$ の結果を示す。 A が減少すると急縮小部での圧力損失は大きく増加するがその下流でのようすはほぼ同様である。

図9に, 急縮小部下流 $x/d_1 > 4$ での圧力こう配 $\partial C_p / \partial(x/d_1) = \epsilon$ を示す。 ϵ は α_v の増加とともに減少しその関係は次式で表される。

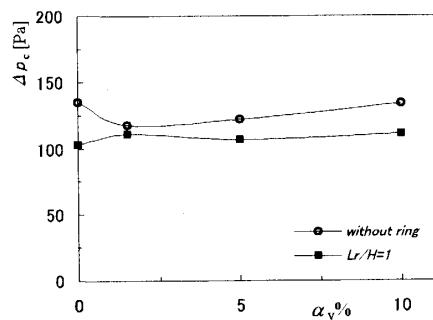
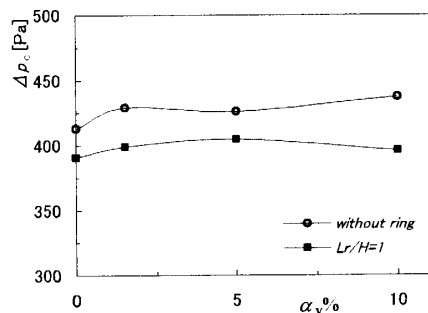
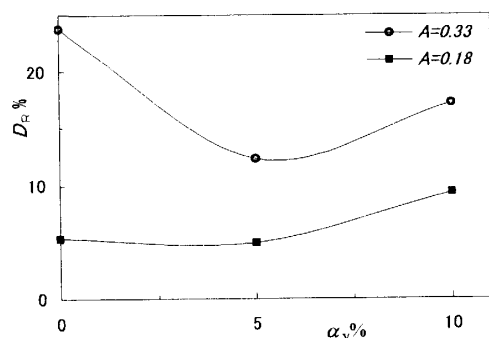
$A=0.33$ の場合:

$$\epsilon = -0.01\alpha_v^2 + 0.29\alpha_v + 0.43 \quad (10)$$

$A=0.18$ の場合:

$$\epsilon = -0.005\alpha_v^2 + 0.19\alpha_v + 1.45 \quad (11)$$

4.4 急縮小部の圧力損失 急縮小部の圧力損失(急縮小損失) Δp_c は, 流れの急加速による圧力の低下, および流動(急縮小)損失のため急減するが, ここでは, 基準位置 $x/d_1=0$ からほぼ一定のこう配で減少する圧力こう配線の外挿線が急縮小部 $x/d_1=2$ に至るときの値と, 下流 $x/d_1 > 4$ で一定こう配で減少する圧力こう配線を上流側に外挿した線が $x/d_1=2$ に至るときの値

(a) $A=0.33$ (b) $A=0.18$ Fig. 10 Pressure loss at sudden contraction
($Re=1 \times 10^4$, uncertainty in $\Delta p_c \pm 5 \text{ Pa}$)Fig. 11 Drag reduction rate
($Re=1 \times 10^4$, $L_r/H=1$, uncertainty in $D_R \pm 0.5$)

との差として求めた。したがって、 Δp_c にはリングの影響も含まれる。なお、上記の圧力こう配の外挿線は急縮小部からリングの上流側近傍までを除き基準位置より上流の圧力こう配線とほぼ一致した。

図10に、図8などの結果から求めた Δp_c を示す。また、図10には前記のリングを $L_r/H=1$ の位置に設置した場合の結果も示すがこれについてはつぎの4・5節で述べる。

図10(a)に、 $A=0.33$ の場合の結果(図中、○印)を示すが、 Δp_c は α_v が増加すると $\alpha_v=1.5\%$ で最小となった後、緩やかに増加する。それに比べ、 $A=0.18$ の場合の Δp_c は $A=0.33$ のそれよりかなり大きく、

α_v の増加とともに増加し $\alpha_v > 1.5\%$ ではほぼ一定となる。

4・5 圧力損失 Δp_c の抑制, 制御 前記したように図10には、リングを $L_r/H=1$ に設置した場合の結果(図中、●印)も示した。 Δp_c は、いずれの A の場合もリングを設置するとそれを設置しない場合より減少する。これは、前記したように、リング先端からはく離れた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)の形成がかなり抑制、制御されることによる。

図11に、 Δp_c に対するリングの効果を抵抗減少率 $D_R[(\Delta p_c - \Delta p_c'')/\Delta p_c]$ 、 $\Delta p_c'$ 、 $\Delta p_c''$:それぞれ、リングを設置した場合および設置しない場合の Δp_c]で示す。 D_R は、 A の大きな0.33の場合のほうが大きく、例えば $\alpha_v=0, 10\%$ ではそれぞれ23, 17%になる。

すなわち、リングの設置は急縮小管を通過する水単相流および気液二相流の流動損失を減少させるのに簡便な方法として有効である。

また、前記したようにリングの設置は急縮小管を流れる気液二相流に生じる振動、変動流を抑制、制御するのにも有効である。

5. 結 論

鉛直急縮小管内を流れる気液二相流の流動特性とリング状の小物体を用いた流動抵抗の低減について実験的、数値解析的な検討をした。

おもな結果は、以下のようである。

(1) 水単相流の場合、圧力は急縮小部直後で急減少したのち下流に向かって比較的是やく回復し、その後 $x/d_1 > 4$ で滑管の摩擦抵抗による圧力損失の結果(Blasiusの式)と一致した一定こう配で減少する。

(2) 急縮小後の気液二相流に、気泡群の疎密に起因する振動が生起する。例えば、縮小比 $A=0.18$, $Re=2 \times 10^4$, $\alpha_v=10\%$ の場合、卓越周波数が約1.6 Hzのかかなり複雑な振動流が生起する。

(3) リングを急縮小部の手前に設置すると、急縮小部の流動抵抗を低減することができる。これは、リング先端からはく離れた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)の形成がかなり抑制、制御されることによる。

抵抗減少率 D_R は、 $Re=1 \times 10^4$ の場合、 A の大きな0.33の場合のほうが大きく、例えば $\alpha_v=0, 10\%$ ではそれぞれ23, 17%になる。

また、リングの設置は急縮小管を流れる気液二相流に生じる振動、変動流を抑制、制御するのにも有効である。

本研究の数値解析では, 名古屋大学 内山知実助教授から種々のご教示をいただいた。また, 実験に際しては卒業研究生高村純一君に協力いただいた。記して, 謝意を表す。

文 献

- (1) Geiger, G. E., Sudden Contraction Losses in Single and Two-Phase Flow, *PhD dissertation*, Univ. of Pittsburgh, (1964).
- (2) Durst, F., Schierholz, W. and Wunderlich, A. M., Experimental and Numerical Investigations of Plane Duct Flows with Sudden Contraction, *Trans. of ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 109 (1987), pp. 376-383.
- (3) Morimoto, Y. et al., "Fluctuation Phenomenon of Two-Phase Flow through a Vertical Pipe with Contraction", *Proc. of Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, (2004), CD-ROM.
- (4) Voutsinas, A. et al., Gas-Liquid Two-Phase Oscillating, Fluctuating Flow through Vertical Sudden Contraction Pipe, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, in press.
- (5) Ando, T. et al., Drag Reduction of Abrupt Contraction Pipe (Control of Flow Separation by Small Obstacle), *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 70, No. 691 (2004), pp. 650-656.
- (6) Uchiyama, T. and Minemura, Y., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 64, No. 618 (1998), pp. 420-427.