急拡大を伴う鉛直円管内を上昇する気液二相流の流動様式*

近藤 宏一^{*1}, 吉田 憲司^{*2}, 松本 忠義^{*2}
大川 富雄^{*2}, 片岡 勲^{*2}Flow Regimes of Upward Gas-liquid Two-Phase Flow
in a Vertical Pipe with an Axisymmetric Sudden ExpansionKoichi KONDO^{*3}, Kenji YOSHIDA, Tadayoshi MATSUMOTO,
Tomio OKAWA and Isao KATAOKA^{*3} Department of Marine Engineering, Marine Technical College,
12-24 Nishikura-cho, Ashiya-shi, Hyogo, 659-0026 Japan

Experimental study was made on the multi-dimensional behavior of upward air-water two-phase flow through a vertical pipe with an axisymmetric sudden expansion, which is one of the typical multi-dimensional channel geometry. The aims of this study are to clarify the multidimensional behavior of bubbly flow or slug flow affected by sudden expansion channel geometry, and to accumulate the experimental data for two-phase flow analysis, which is applicable to predict the multi-dimensional behavior with appropriate accuracy. The observation using a high-speed video camera was performed to clarify the multi-dimensional dynamic flow behavior with the sudden expansion. It revealed the characteristic phenomena such as gas-slug breakup and bubble deformation and bubble size below and above the sudden expansion point. Furthermore the effect of the sudden expansion channel on the flow regime map can be also described by using these experimental result.

Key Words: Pipe Flow, Gas-Slug, Bubble, Sudden Expansion, Flow Visualization, Flow Regime

1. 緒 言

沸騰二相流の流動特性を正確に把握することは、様々な沸騰伝熱機器の性能評価や安全解析を行う際に極めて重要である。特に近年では、エネルギー関連機器の効率向上が CO₂ 排出削減、環境保全の観点から強く要望されている。実際のプラントにおける配管、流体機械や熱交換器などにおいても、流路内に障害物が存在したり管路が曲率を有したり、また断面積が急変するような多次元的な流路が多く存在し、それらにおける二相流動は主流方向の成分だけではなく半径方向や主流とは逆方向成分を持つ多次元的な流動構造を有する。したがって、二相流挙動のより詳細かつ多次元的な情報が必要不可欠となってきた。

このような観点から二相流の多次元挙動に対する関心が非常に高まっており、多次元流路における二相流動の多次元挙動に関する調査が実験的ならびに解析的に行われている。代表的な研究としては気泡の吹込

みにより生じる自然循環流を予測することを目的に円管容器内、矩形流路あるいは障害物のある流路に関して松本ら^①、五福ら^②、富山ら^③による実験と数値解析が行われており、また実用的なものとしては原子炉内の二相流動に関して湊ら^④、村瀬ら^⑤による二流体モデルを用いた解析などが挙げられる。さらに最近では、Aloui ら^{⑥⑦}、Rinne ら^⑧により急拡大平板あるいは円管流路内における二相流動に対して様々な定量的測定がなされ、多次元二相流動解析のための実験データを蓄積し二相流動現象が明らかにされつつある。しかしながら、これらの研究を通してある程度の知見は得られているものの数値解析により気液二相流の多次元挙動を一般的に予測するための実験データは未だ十分ではない。また、多次元現象のメカニズムが解明されていないため現象を的確に記述できるような数理モデルが構築されておらず、結果として気液二相流の多次元挙動を正確に捉えるには至っていないのが現状である。

このような状況に鑑み本研究では、実験室レベルの比較的簡単な体系下において正確かつ一般的に二相流挙動を予測することを目的に、多次元的流動現象の典型的な形態でありかつ流体力学的にも重要と考えられる急拡大流円管路内を上昇する非加熱空気-水系鉛

* 原稿受付 2004年3月29日。

^{*1} 正員、(独)海技大学校(☎659-0026 芦屋市西蔵町12-24)。^{*2} 正員、大阪大学大学院工学研究科(☎565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: kondou@mail.mtc.ac.jp

直上昇気液二相流を対象として実験を行う。本論文では、デジタルビデオカメラおよび高速度ビデオカメラを用いて急拡大を伴う流路における気液二相流動の観察を行い、急拡大流路により引き起こされる多次的な二相流動現象、急拡大部付近における気泡サイズ、気体スラグの崩壊や気泡の変形・分裂といった特徴的な現象を明らかにし、さらには急拡大を伴う鉛直上昇円管流路における流動様式判定および流動様式の遷移を実験的に明らかにした。

主 な 記 号

C_0	: 分布定数	[-]
D	: 管径	[mm]
d_b	: 気泡径	[mm]
d_s	: 気泡の短径	[mm]
d_l	: 気泡の長径	[mm]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
j	: 体積流速	[m/s]
L	: 気泡発生部あるいは急拡大部からの軸方向長さ	[mm]
Re	: レイノルズ数	[-]
R	: 管半径	[mm]
r	: 管中心からの距離	[mm]
u	: 速度	[m/s]
α	: 気相体積率	[-]
ν	: 動粘性係数	[m ² /s]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
$\Delta\rho$	: 相間密度差	[kg/m ³]
σ	: 表面張力	[N/m]
添 字		
G	: 気相	
L	: 液相	
20	: 20 mm 管	
50	: 50 mm 管	

2. 実験装置と実験方法

図1に実験装置の概略を示す。実験対象は、急拡大部を伴う鉛直円管内を上向きに流動する空気/水系の気液二相流である。供試管(図1中の11)は透明アクリル樹脂製で、内径20.0 mm、長さ2400 mmの上流側の円管(以下、20 mm管という)と、内径50.0 mm、長さ3500 mmの下流側の円管(以下、50 mm管という)を鉛直同軸に結合したものであり、その結合部で急拡大流路を構成する。

液相である水は、水道水をろ過精度が $5\mu\text{m}$ のろ過フィルター(1)によりろ過したものを、貯蔵タ

ンク(2)へ貯蔵する。貯蔵タンク内の水を遠心式ポンプ(3)により加圧し、流量調整弁(4)および流量計(5)を用いて規定の流量に調節して供試管下端部へ導入する。気相である空気は、空気圧縮機(6)で加圧し、ドライヤー、压力容器(7)を経て、流量調整弁(8)および流量計(9)を用いて規定の流量に調節し、供試管最下端部に設置される気泡発生器(10)へ導入する。この気泡発生器部において液相に気相を混入することにより鉛直上向き気液二相流を実現する。本実験では気泡発生器として直径10 mm、高さ38 mm、ろ過精度 $1\mu\text{m}$ のステンレス製焼結金属を用いており、これが管断面中心に設置されている。供試管を上昇した気液二相流は、供試管最上部に設置している気液分離器(12)により気相と液相を分離し、気相は大気へ開放し、液相は前出の貯蔵タンクへ還流させる構造となっている。気液分離器と貯蔵タンクの間には冷却器(13)を設置しており、実験中における水温変化が 1°C 以内になるように配慮している。

本実験では、流れ方向の圧力変化による気相の体積変化を考慮して、各観察位置における気相体積流速の補正を行っている。このために観察位置には圧力セ

1. Filter	8. Air flow Regulator
2. Storage tank	9. Air flow meter
3. Water pump	10. Bubble generator
4. Water flow control valve	11. Test channel
5. Water flow meter	12. Air-water separator
6. Air compressor & Dryer	13. Water cooler
7. Pressurized air tank	

Fig.1 Experimental apparatus

ンサ (PT) と熱電対 (TC) を設置し、圧力と温度を計測している (図 1)．さらに急拡大部における流動の観察では、急拡大部から上流側 90 mm での圧力を採用しそれを代表圧力とし気相体積流速の補正を行う。したがって、後述の急拡大部での考察には 20 mm 管の気液体積流速に基づいて検討がなされている。

急拡大流路における気液二相流の流動挙動の観察を行うために、急拡大部は長さ 200 mm、外辺 70 mm×70 mm の矩形透明アクリル製ブロックの内部を、内径 20.0 mm および内径 50.0 mm で同軸にくり貫いて加工したものを使用する (図 2)．撮影部の管外壁を平面とすることで、管外壁と外側の空気との屈折率の差異による管内の画像の歪みを極力少なくしている。しかしながら、アクリル管と水との屈折率の差異によるレンズ効果による画像の歪みは不可避であり、また遠近による撮影画像の歪みが生じることが考えられることから、実験に先立ち予備実験として、図 2 に示すように水を満たした管内に画像補正用ピースを挿入し、画像の歪みを評価した。この補正ピースは外径 50 mm の透明アクリル製の円柱であり、管軸および撮影方向に対して 45 度の角度を持ったスケール面に、鉛直および水平方向に等間隔目盛りを施したものである。このテストピースを管内に挿入し撮影した画像を図 3 に示す。図 3 をもとにして、屈折ならびに遠近による画像の歪みを定量的に評価した結果、長さ比は管中心軸上を基準として手前側、奥側、側壁近傍でそれぞれ 123.9%、83.9%、89.2% となった。ここで定量的に得られた管断面各点における画像の歪み率は、後述の撮影画像から気泡サイズを算出する際の誤差評価に用いる。

実験条件として、急拡大部上流側の 20 mm 管における液相の体積流速 j_{L20} を 0 から 5.31 m/s、および気相の体積流速 j_{G20} を 0.05 から 0.7 m/s 程度の範囲でそれぞれ変化させて実験を行った。なお、本実験条件は流動様式がスラグ流あるいは気泡流領域に相当する。

3. 実験結果と考察

3.1 流動パターンおよび気泡径 急拡大部における二相流動現象を把握するために、はじめにデジタルビデオカメラにより急拡大部における流動の観察を行った。急拡大部での流動は、はく離、せん断、再付着および循環などの特徴が見られる多次元構造を有しており (図 4)、そこでの二相流は特徴的な多次元的現象を示し、これらは気液流速の条件や気泡サイズなどによって変化した。図 5 に本実験で得られた急拡大部における二相流動の観察結果を示す。図 5 (a) は、静

Fig. 2 Viewing section and standard subject

Fig. 3 Image of standard subject

Fig. 4 Typical flow patterns in sudden expansion

止水中を上昇する気体スラグが急拡大部に突入した直後の画像である。気体スラグは急拡大部においていくつかに分断され、気体スラグの崩壊現象が確認された。これについての詳細は後述する。図 5 (b) および (c) は、急拡大部上流側の液流速 j_{L20} が約 1.0 m/s 以下の比較的低流速の気泡流域のものである。図より、比較的大きいサイズの気泡が急拡大部を通過した後、減速しながら半径方向に拡散し、急拡大部から 40～100 mm 程度の下流壁面付近において気泡が停滞するような現象が確認された。これは気泡が急拡大部下流に見られる逆流による現象である。さらに気泡はこの後停滞域から少しずつ放出されるような挙動を示す。一方、図 5 (d) および (e) は、液流速 j_{L20} が 1.0 m/s を超える中流

Fig.5 Multi-dimensional behavior of two-phase flow in sudden expansion

東域および高流東域のものであり、気泡は急拡大部において見られるせん断流と壁面との間に形成される逆流の影響を受け多次元的な流動を示すことが確認された。この傾向は気液流束の増加に伴い顕著となり、さらに複雑な流動様式を呈するようになる。

次に、上記の流動パターンを踏まえた上で急拡大部における気泡サイズを確認するためビデオカメラにより撮影した画像から気泡サイズを算出した。得られた画像から気泡の短径 d_x と長径 d_y を測定することで、ここでは気泡を球体あるいは回転楕円体と仮定し式 (1) により等価気泡径を求めた。なお、気泡サイズの算出には任意に気泡を 30 個程度選びこれを追跡することで得られた等価気泡径を平均化することで気泡サイズとしている。

$$d_b = \sqrt[3]{d_x^2 \cdot d_y} \quad (1)$$

しかしながら、急拡大部において複雑な流動現象が引き起こされていることおよび撮影が一方のみであることから管断面内での気泡位置を同定することができず、結果として気泡サイズを正確に見積もることは非常に困難である。そこで、補正ピースを用いた予備実験により気泡サイズを算出する際の誤差を評価した。前述のように画像から求めた気泡サイズは管中心位置に対して $\pm 20\%$ 程度の歪み率を有することが予備実験の結果からわかっており、したがって本実験による気泡サイズの算出にはこの誤差を含んでいることになる。図 6 に算出された気泡サイズの結果を示す。図 6 (a) は急拡大部直前での気泡サイズを、図 6 (b) は急拡大部から 3D (150 mm) 位置での気泡サイズをそれぞれ表している。ここで、横軸は 20 mm 管における液レイノルズ数であり次式で表される。

$$Re_{20} = \frac{u_{L20} D_{L20}}{\nu_L} \quad (2)$$

ここで、 u_{L20} は急拡大部上流側の液速度、 D_{L20} は急拡大部上流側の直径、 ν_L は液相の粘性係数を示す。これら 2 つの図より、液流速が 1.0 m/s を超えると急拡大部において気泡の分裂現象が引き起こされることから、その液流速に相当する $Re_{20} > 26,500$ の領域において気泡サイズが 20 mm 管 (図 6 (a)) と比較して小さくなる傾向が見られる。また、この傾向は気泡が強い液相

(a) Bubble size in 20-mm tube

(b) Bubble size in 50-mm tube

Fig. 6 Bubble size below and above sudden expansion point

Fig.7 Gas-slug breakup in sudden expansion ($j_{L20} = 0.0$ m/s, $j_{G20} = 0.0534$ m/s)

せん断層によって引きちぎられるほど、すなわち液相流束が増加するほど顕著になっていることも確認された。

3.2 特徴的な二相流現象 さらに、急拡大部で起こされる二相流動現象を詳細に調べるために、高速ビデオカメラを用いた流動の観察を行った。その結果、次のような2つの特徴的な二相流動現象が明らかになった。ここでは、急拡大部において気体スラグが崩壊する現象（気体スラグ崩壊現象）ならびに気泡が引き伸ばされる現象（気泡変形現象）について考察する。

図7は、急拡大部上流側の20 mm管から気体スラグが急拡大部へ突入した際の様子を示している。写真の下端は急拡大部から20 mm下流位置に相当する。図の下部に示している写真は、一番左の図が撮影されてからの時間経過を示している。スラグは急拡大部に突入した際、その直後にいくつかの小さなスラグに分断される（図5(a)参照）。このときに気体スラグ下部において生成された細い空気柱が引きちぎられ、その部分の界面が表面張力により急激かつ高速でスラグ内部に引き戻される。これによりスラグ内に水のマイクロジェット（水柱）が生成される。このジェットの先端が気体スラグ上部界面に衝突し（ $t = 1.5$ msec）、その衝突で空気の突起を形成する（ $t = 13.5$ msec）。やがて時間経過とともに気体スラグはいくつかの気泡に分裂し、崩壊する。この空気突起物が形成される過程では、突起物内部において小さな水滴が形成されていることならびにこの水滴が突起先端部に衝突することで節を形成することなどの興味深い現象も観察されている。このような現象は液マイクロジェットや界面張力波などによるものと推測される。

図8に、気泡が急拡大部において変形する様子を示す。気泡が20 mm管より急拡大部に突入すると、急

Fig.8 Deformation of bubbles in sudden expansion

拡大部直後において生成されるこの流路特有の液相せん断層において気泡は流れ方向に扁平な形状に変形する。さらにこの変形した気泡はせん断層によって引きちぎられ、微細化される。本実験における観察結果から、液流束の増加に伴い液相せん断層の影響が大きくなり、20 mm管での液流束が1.0 m/sを超えると気泡の変形現象が顕著となることが確認された。このことは図6に示したように、急拡大部下流域の気泡サイズが上流側のものより小さくなる実験結果と一致している。

3.3 流動様式判定 前述のような特徴的な二相流動現象が急拡大部では生じており、急拡大を伴う円管における鉛直上昇気液二相流の流動様式はこれらに大きく影響されると考えられる。そこで従来の単円管における流動様式と比較をするために、急拡大を伴う円管流路における流動様式をビデオカメラによる撮影により判別し、これを実験的に示した。この流動様式判定では、急拡大部上流および下流における二相流の流動様式を示し、急拡大を伴わない場合の50

mm 管における判定結果についても示すことで急拡大部の影響を比較した。デジタルビデオカメラを急拡大部上流側すなわち気泡発生部から 2000 mm (管内径の 100 倍に相当) 下流の 20 mm 管と、急拡大部下流側すなわち急拡大部から 2500 mm (管内径の 50 倍に相当) 下流の 50 mm 管とのそれぞれ 2 箇所に設置し、この位置における観察結果から流動様式を判定した。流動様式の判別では、気泡が分散する領域は気泡流領域とし、管内径の 1/2 以上の幅をもつ大気泡やテ일러気泡が存在する場合についてはスラグ流領域として判別した。また、上記以外の領域については遷移領域とみなしている。

流動様式の判定結果を図 9～図 11 に示す。図 9 は 20 mm 管における流動様式判定結果、図 10 は急拡大を伴わない 50 mm 単円管における流動様式判定結果、図 11 は急拡大流路を伴う場合の 50 mm 管における判定結果をそれぞれ示す。また、従来の単円管における流動様式に関する研究では Taitel-Dukler 線図⁽¹⁰⁾あるいは Mishima-Ishii 線図⁽¹¹⁾などにより流動様式遷移境界が示されていることから、本実験で得られた流動様式判定結果とそれらと比較するために気泡流とスラグ流の境界を式 (3) を用いて図中にそれぞれ示した⁽¹¹⁾。ここで遷移ガイド率として $\alpha_c = 0.25$ を使用している。

$$\frac{j_G}{\alpha} = C_0 j + \sqrt{2} \left(\frac{og \Delta \rho}{\rho_L^2} \right)^{1/4} \quad (3)$$

ここで、

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (4)$$

$$j = j_L + j_G \quad (5)$$

得られた流動様式判定線図から、まずは 20 mm 管ならびに 50 mm 管の単円管の場合に関して考察する。図 9 に示す 20 mm 管における判定結果では、気泡流領域とスラグ流領域の境界が式 (3) によりよく整理されており、従来の判定結果と実験結果が一致することがわかる。しかしながら、図 10 に示すとおり急拡大を伴わない場合の 50 mm 単円管における流動様式判定結果では、気泡流～スラグ流領域の境界線と実験結果が一致せず、実験結果の方がスラグ流領域の割合が大きくなっている。これは世古口線図⁽¹²⁾などによる流動様式判定結果にも示されているように、一般に各流動様式間の境界、特に気泡流からスラグ流への遷移域

Fig.9 Flow regime map in 20-mm tube

Fig.10 Flow regime map in 50-mm tube without sudden expansion

Fig.11 Flow regime map in 50-mm tube with sudden expansion

における境界が極めて大きな幅を持つこと、気液の混合方法や管径あるいは流動様式判定位置などにより結果に影響を及ぼすことからこのような傾向のずれを生じたものと思われる。

次に、急拡大部が及ぼす流動様式への影響について考察する。図 10 と図 11 は気泡発生条件や発生方法が異なることから単純に比較できるものではないが、急拡大部から 2500 mm ($L/D=50$) 離れた十分下流での流動様式判定結果に基づき両者を比較してみた。この比較から急拡大を伴う場合の流動様式判定結果は従来の単円管におけるそれと著しく異なる傾向を示していることがわかる。急拡大を伴う円管の場合、低液流束領域ではスラグ流へ遷移する領域が広がり、高液流束領域ではいかなる気相流束の場合にも気泡流の状態が維持されている。低液流束領域では、前述のように 4~6 mm 程度の気泡が減速しながら半径方向へ拡散しこれらが急拡大部下流の逆流域において停滞するが、これにより気泡が下流で合体しやすくなると推測され、結果としてスラグ流領域側に遷移領域が広がるものと考えられる。一方、高液流束領域では、急拡大部直後で生成される液相せん断層により気泡が変形し、分裂、微細化される現象が生じることから気泡流域が広範囲となったものと考えられる。したがって、急拡大を伴う場合の気液二相流の流動様式判定では、急拡大部で引き起こされる特徴的な二相流動現象が判定結果に大きく影響するとともに、急拡大部上流側の流動様式についても把握しておく必要がある。すなわち、急拡大を伴うような多次元流路を持つ二相流動予測に対しては多次元流路上流側の流動様式ならびに多次元的流路内で引き起こされる現象についても十分考慮して流動様式の判別を行う必要があるということを意味するものである。

4. 結 言

本研究では、実験室レベルの比較的簡単な体系下において正確かつ一般的に二相流挙動を予測することを目的に、多次元流路の典型的な形態でありかつ流体力学的にも重要である急拡大を伴う円管流路内を流動する非加熱空気/水系鉛直上昇気液二相流を対象として流動様式に関する実験を行った。デジタルビデオカメラおよび高速度ビデオカメラを用いた急拡大流路における二相流動の観察結果より次のことを明らかにした。

1. 急拡大部において形成されるはく離、再付着、せん断あるいは逆流などの流れ場の影響により二相流動は多次元的挙動を呈する。この多次元的な気泡挙動や流動構造は気液体積流束や気泡サイズによって変化する。
2. 急拡大部では気泡の停滞や気体スラグの崩壊あるいは気泡の変形・分裂といった特徴的な二相流動現象が引き起こされる。
3. 急拡大を伴う流路における流動様式線図は、上記 2 で記した単管流路におけるものとは異なる特徴的な二相流動現象の影響を受け、急拡大を伴う流路における二相流動の予測では、上流側の流動様式や急拡大部で引き起こされる多次元挙動や特徴的な現象を考慮する必要がある。

参 考 文 献

- (1) Matsumoto, Y., Murai, Y., *Proc. Jpn-U.S. Seminar Two-Phase Flow Dynamics*, (1992), 105.
- (2) Gofuku, A., Toi, T., Kataoka, I., Serizawa, A., Kojima, K., Morikawa, T., 混相流, 7-3 (1993), 232.
- (3) 富山明男・上箒伸一・南川久人・福田匠・坂口忠司, 機論, 60-580, B (1994), 3987.
- (4) Minato, A., Takamori, K., Ishida, N., *Proc. 8th Int. Conf. on Nucl. Eng.* (2000), ICONE8-8045 (CD-ROM).
- (5) Murase, M., Yagi, Y., Nakamura, A., Fujii, Y., Kataoka, I., Okawa, T., *Proc. Int. 3rd Korea-Jpn Symposium on Nucl. Thermal Hydraulics and Safety*, (2002), 457.
- (6) Aloui, F. and Souhar, M., *Int. J. Multiphase Flow*, 22-4 (1996), 651.
- (7) Aloui, F. and Souhar, M., *Int. J. Multiphase Flow*, 22-5 (1996), 849.
- (8) Rinne, A., Loth, R., *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 13-2 (1996), 152.
- (9) Aloui, F., Doublier, L., legrand, J. and Souhar, M., *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 19-2 (1999), 118.
- (10) Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E., *AIChE J.*, 26-3 (1980), 345.
- (11) Mishima, K. and Ishii, M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27-5 (1984), 723.
- (12) 藤井哲・上原春男・佐野川好母・世古口, 伝熱工学の進展, 1 (1973), 180, 養賢堂.