ベンチュリ管内気泡流における気泡崩壊と流動特性*

Bubble Collapse and Flow Characteristics in Bubble Flow in a Venturi Tube

藤井 啓太** 金子 暁子** 阿部 豊** 池 昌俊†
FUJII Keita KANEKO Akiko ABE Yutaka IKE Masatoshi

Abstract This paper shows bubbly flow characteristics measured of standing flow and unsteady flow in a Venturi tube. As for the standing flow characteristics, the distribution of pressure and void fraction are measured. Using the equation of sound velocity in adiabatic isentropic, the shock waves occurs at the point of transition from supersonic flow to subsonic flow, and the bubbles are collapsed at the same area. As a non-steady phenomena, by performing visualization and synchronous measurement of pressure, the presence of propagating pressure wave caused by bubble collapse. The bubble diameters generated by using this device showed a tendency to be further miniaturized under both condition that a shock wave is generated and a pressure wave is generated.

Keywords: Bubbly flow, Microbubble, Venturi tube, Bubble collapse, Pressure wave, Shock wave

1. 緒言

近年、工業技術や省エネ技術、医療技術といった幅広い分野において、マイクロバブルと呼ばれる数 100 μm オーダーの微細気泡が注目を集めている。微細気泡は単位体積あたりの表面積が大きく、液中溶解性が高いなどの特徴を有しており、高効率な生成手法が必要とされ、様々な方法が開発されている。加圧溶解式や旋回流式といった手法が提案されているが、本研究ではベンチュリ管を用いた手法に着目する[1]。

ベンチュリ管とは収縮し拡大するだけの単純な構造となっており、メンテナンスが容易であるといった特徴がある。Ivany らは管内で生じるキャビテーション気泡の崩壊の可視化ならびに圧力計測を行い、気泡が扁平状になることを示している[2]。Thang and Davis は管内の気液二相流での静圧計測を行い、拡大部で気液二相流における衝撃波由来の圧力回復を確認した[3]。Wang and Ethan は二流体モデルを用いた数値計算により、管内に衝撃波が存在すると予測した[4]。Fujiwara

らは、これら圧力回復が気泡微細化現象を引き起こしていることを示唆した[5]。Uesawa らは、定電流法を用いてボイド率を計測し、等温物質流モデルを用いてマッハ数を算出し、超音速流から亜音速へと遷移することによって二相流衝撃波が生じることを示唆している[6]。

本研究で対象としているベンチュリ管式マイクロバブル発生装置において、管内で伝播する圧力波が確認されている[6]。流動の可視化計測において、圧力波によって管内の気泡が収縮し輝度が高い部分として検出されている。これら圧力波は、Tamura らによってベンチュリ管式マイクロバブル生成装置を用いた脱脂洗浄において重要な役割を果たすとされている[7]。

しかしながら、ベンチュリ管内を流れる気泡流の流動は極めて複雑である。管内で発生する二相流衝撃波と圧力波の発生と、気泡の微細化および生成する微細気泡の関係は明らかとなっていない。そこで本研究では、ベンチュリ管内の可視化、気泡流の圧力分布とボイド率分布、可視化と圧力

* 2018.11.11 受付

** 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
TEL: (029)853-5498 FAX: (029)853-5498 E-mail: s1720966@s.tsukuba.ac.jp

† 合同会社アプテックス

の時間変化の同期計測を行うことで、これらの関係について明らかにする。

2. 実験装置と実験条件

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。液相は $5\mu\text{m}$ のフィルターを通した水道水をタンクにためたものを、ポンプを用いてベンチュリ管下部から供給した。コンプレッサーにためた空気を、ベンチュリ形状の注入部を用いることで安定供給したものを気相とした。ベンチュリ管は、入り口と出口の直径が 16 mm の喉部径 6 mm 、開き角 6° となっている円形の断面を有する Fig. 1 に示すような形状のものを使用した。

実験条件は液相入り口見かけ流速は $j_{Lin} = 1.5, 2.5, 3.5\text{ m/s}$ の3条件にて行い、気相体積流量比 β は $\beta = 0, 0.004, 0.016, 0.06, 0.12$ の5条件にて行った。

Fig. 1 A schematic of an experimental apparatus.

2.2 可視化実験

Fig. 2 に可視化測定の概略図を示す。アクリル製のベンチュリ管を用いて、バックライト法により可視化撮影を行った。可視化計測は、高速度カメラ (Vision Research 社製、Phantom V12.1) で撮影速度は $47,019\text{ fps}$ で露光時間は $1\mu\text{s}$ として撮影した。

生成した気泡の径について画像処理を用いて算出した。画像処理手順を Fig. 3 に示す。背景差分と二値化処理を行った後に、閾値ピクセル以下の気泡を除去し、

$$\gamma = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (1)$$

で示される真円度について $\gamma < 1.1$ となるように

直径を算出した。この際、算出される気泡径の分解能は 0.057 mm であり、それ以上のものを検出した。ここで、 S は気泡の面積、 L は周囲長である。

気泡が収縮し崩壊する様子が確認されたので、得られた画像について目視にて気泡が最も収縮した位置を気泡崩壊位置として10回測定し、その平均値を測定値とした。

Fig. 2 Visualization device.

Fig. 3 Bubble diameter calculation process.

2.3 流動の分布計測

Fig. 4 にベンチュリ管内の物理量測定装置の概略図を示す。Fig. 4 (a) では、圧力計測装置を示している。管内の定常的な圧力については各計測位置からシリコンチューブを通して差圧変換器 (KYOUWA、PD-2KA) を用いて測定した。Fig. 4 (c) には同じく圧力測定装置を示しているが、シリコンチューブを用いた場合、圧力の詳細な時間変化については減衰してしまうため、管内壁面に直接取り付けしたシリコンチューブに圧力計 (Kulite、XTL-190-100SG) を取り付け計測した。

Fig. 4 (b) にボイド率計測方法を示す。ボイド率の測定では、定電流法[8]を用いて計測した。本手法では、定電流を印加し、液相電圧 V と気液混合電圧 V_G を測定し、電圧比 v を

$$v = \frac{V_G}{V} \quad (2)$$

と算出した。 v を用いて Maxwell の理論[9]より

$$\alpha = \frac{v-1}{v+0.5} \quad (\alpha < 1) \quad (3)$$

とボイド率を算出した。算出した α と測定圧力 P を用いて、断熱等エントロピーモデルによる音速を

$$c_m = \sqrt{\frac{(1+\alpha)\kappa P}{\alpha(1-\alpha)\rho_L}} \quad (4)$$

と算出し、PIV によって得られた液相速度と相関が示されている[6]気液混合速度

$$U_m = \frac{Q_L}{(1-\alpha)A} \quad (5)$$

との速度比によりマッハ数を

$$Ma = \frac{U_m}{c_m} \quad (6)$$

と算出した。管内の圧力分布では、Fig. 4 (a)に示すように差圧計を用いることで大気圧との差圧を各点で測定した。

2.4 気泡崩壊現象の時間変化

ベンチュリ管内に生じる流動特性として、定常現象の他に非定常的な現象が確認された。そこで、可視化計測および圧力の時間変化について同期計測を行った。実験装置を Fig. 4 (c)に示す。圧力の測定は 10 kHz にて $z = 27, 37, 47, 57$ の 4 点で行った。可視化は可視化実験におけるものと同じものを使用し、撮影条件は 32000 fps、露光時間は $3 \mu\text{s}$ にて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ベンチュリ管内の流動分布

可視化とボイド率の測定結果を Fig. 6 に示す。管内に均質に分散している気泡流の可視化に成功した。 $j_{Lin} = 1.5 \text{ m/s}$ の条件では、気泡が喉部下流において分裂しながら微細化する様子が確認された。更に、 $j_{Lin} = 2.5, 3.5 \text{ m/s}$ では、 $\beta = 0$ の条件でキャビテーションが発生している様子が確認された。また、 β の低い条件では、気泡が収縮しながら崩壊し、微細化していることがわかった。ボイド率の計測結果では、Fig. 6 (a)の条件では、ボイド率の上昇はあまり見られなかった。Fig. 6 (b)と(c)では、ボイド率は喉部付近で大きく増加し、その後急激に減少した。なお、 $j_{Lin} = 3.5 \text{ m/s}$ 、 $\beta = 0.12$ の条件では、定電流場を実現することができず、ボイド率の測定は行えなかった。2.2 節に述べた手法により測定した気泡崩壊位置を Fig. 5 に示す。 β の増加に伴い崩壊位置が下流へと遷移していく様子が確認された。また、液相流量が多い方がより下流側で崩壊していることがわかった。

Fig. 5 Bubble collapse position.

Fig. 4 Measurement system of the physical quantity in a Venturi tube.

Fig. 7 に圧力の分布の測定結果を示す。Fig. 7 (a)の条件では、喉部で圧力が最も低下し、その後には上昇する様子が確認できた。しかし、Fig. 7 (b)や(c)といった条件では圧力が喉部から下流にかけて更に低下しその後には急激に上昇する様子が確認できた。また、 β の大きい条件の方がより下流側で圧力が上昇し、その上昇も緩やかである傾向が見られた。

測定したボイド率と圧力を式(4)に代入することでマッハ数を算出した結果を Fig.8 に示す。圧力の急激な上昇が確認できた Fig.6 (b)と(c)の条件で喉部下流域にてマッハ数が1を超え、超音速流へと遷移する様子が確認できた。また、超音速流から亜音速流へと遷移する位置と、圧力の急激な上昇の発生位置は概ね一致しており、これらは二相流衝撃波であると考えられる。

Fig. 6 Measurement results of visualization and void fraction distribution.

Fig. 7 Measurement results of pressure distribution.

Fig. 8 Calculation results of Mach number by an adiabatic homogeneous flow model.

3.2 気泡崩壊現象と圧力現象の時間変化

前節で述べた定在する衝撃波の他に、可視化結果ではベンチュリ管内で輝度が高い部分が下流へと伝播する様子が観察された。気泡の収縮崩壊を含め、このような非定常な現象を把握するべく、可視化と圧力の同期計測を行った結果を Fig. 9、Fig. 10、Fig. 11、Fig. 12 に示す。亜音速流れの Fig. 9 (a)、Fig. 10 (a)、Fig. 11 (a)、Fig. 12 (a) の条件では、圧力の急激な上昇は確認されなかった。しかし、超音速流へと遷移した Fig. 9 (b)、(c)、Fig. 10 (b)、(c)、Fig. 11 (b) の条件ではグラフにあるような圧力の急激な上昇が下流へと伝播する様子が確認された。先に述べた定在的な衝撃波と区別するためにこれを今後圧力波と呼ぶ。Fig. 9 (b) および Fig. 10 (b) を比較すると、 β の増加に伴い、圧力波のピークが強くなっている。また、Fig. 10 (b) と Fig. 11 (b)、Fig. 9 (c) と Fig. 10 (c) とを比較すると、 β の増加に伴い、圧力波の発生頻度が低下する。Fig. 11 (b) と Fig. 12 (b)、Fig. 10 (c) と Fig. 11 (c) で比較すると、 β の増加に伴い、圧力波が最終的には検出できなくなることがわかる。これらは、気泡が収縮により崩壊しなくなったことや、圧力波の減衰が著しくなったことなどが原因として考察される。

Fig. 9、Fig. 10、Fig. 11、Fig. 12 で測定した圧力波の伝播速度を計測した。可視化計測で得られた気泡の収縮崩壊時間を T_1 とし、圧力波検出時間を T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 とし、気泡崩壊位置と圧力計測位置との差を l とし

$$u_m = \frac{l}{T_{n+1} - T_n} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

$$c_m = u_m - U_m \quad (8)$$

を用いて音速を算出した。その結果を Fig. 13 に示す。グラフ横軸はボイド率 α 、縦軸を音速 c_m とする。 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 で算出した音速は青のプロットを、 T_1 、 T_2 で算出した音速は赤のプロットで示している。また、後者については圧力波が検出されている領域での α を用いた。コンター図で示しているのは、式(4)で示している理論値である。これら実験値と理論値は誤差の範囲内で一致している。これらより、超音速流から亜音速流へと遷移する際に生じる衝撃波が気泡崩壊を引き起こし、それらにより圧力波が生じていることが示唆される。

Fig. 9 Measurement result of visualization and pressure synchronization ($\beta = 0.004$).

Fig. 10 Measurement result of visualization and pressure synchronization ($\beta = 0.016$).

Fig. 11 Measurement result of visualization and pressure synchronization ($\beta = 0.0625$).

Fig. 12 Measurement result of visualization and pressure synchronization.

3.3 流動現象と生成気泡径

前節で述べた定在する衝撃波および伝播する圧力波の発生条件と生成気泡径について考察を行う。Fig. 3 のような手順で算出した気泡径について、Sauter 平均径を

$$d = \frac{\sum d^3}{\sum d^2} \quad (9)$$

と算出した。その結果を Fig. 14 に示す。ミリスケールとマイクロスケールの境界として、1 mm より小さいか否かで分類するべく、青のプロットは $d < 0.9$ を、緑のプロットは $0.9 < d < 1.0$ を赤のプロットは $1.0 < d$ を示している。実線で示しているのは、ベンチュリ管の喉部において音速に達する条件

$$\frac{1}{2} \rho_L u_{in}^2 \left\{ 1 - \left[(1 - \alpha_{in}) \frac{A_{in}}{A_{th}} + \alpha_{in} \frac{c_{in}}{u_{in}} \right]^2 \right\} + p_{in} \left(1 - \frac{u_{in} A_{in}}{c_{in} A_{th}} \right) + \frac{\alpha_{in} p_{in}}{1 - \alpha_{in}} \ln \left(\frac{c_{in} A_{th}}{u_{in} A_{in}} \right) = 0 \quad (10)$$

を示している。どの条件においても実線より上側においてより小さい気泡が生成している傾向が

見られる。また、前節の圧力波の発生条件と比較すると、圧力波がより発生している条件ほど生成している気泡径が小さい傾向が見られた。これらより、気泡の微細化には、定在する衝撃波と、伝播する圧力波の両方が生じる条件が必要であることが示唆される。

4. 結 言

ベンチュリ管内を流れる気泡流の流動特性を解明することを目的として以下の知見を得た。

- 気泡流中で音速は低下し、喉部で音速に達する条件において、圧力の急激な上昇および超音速流から亜音速流へと遷移の様子が確認され、これら定在する衝撃波の発生が確認された。
- 定在する衝撃波発生位置において気泡の収縮崩壊が起き、下流位置において圧力波が検出され、伝播の様子が確認された。
- 定在する衝撃波の発生条件かつ、圧力波が発生するような気泡の収縮崩壊が起きる条件において気泡はより微細化する傾向にあることがわかった。

Fig. 13 Comparison of pressure wave passing speed and sound velocity in homogeneous flow model.

Fig. 14 The bubble diameter generated under each experimental condition.

Nomenclature

A	: cross-sectional area	$[\text{m}^2]$
c_m	: sound speed	$[\text{m/s}]$
j	: superficial velocity	$[\text{m/s}]$
M	: Mach number	$[-]$
P	: pressure	$[\text{Pa}]$
Q	: volume flow rate	$[\text{L/min}]$
u	: cross-sectional average velocity	$[\text{m/s}]$
U_m	: gas-liquid mixture velocity	$[\text{m/s}]$
v	: electric voltage ratio	$[-]$
z	: vertical coordinate in the venturi tube	$[\text{mm}]$

Greek letters

α	: void fraction	$[-]$
β	: gas volumetric flow ratio	$[-]$
ρ	: mass density	$[\text{kg/m}^3]$

Subscripts

G	: gas phase
L	: liquid phase
in	: inlet of a venturi tube

参考文献

- [1] Onari, H., All of the Micro-Bubbles (in Japanese), Nippon Jitsugyo Publishing (2006).
 - [2] Ivany, R. D., Hammit, F. G. and Mitchell, T. M., Cavitation Bubble Collapse Observations in a Venturi, J. Basic Eng., Vol. 88(3), 649-657 (1966).
 - [3] Thang, N.T. and Davis, M.R., Pressure Distribution in Bubbly Flow Through Venturis, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 7(2), 191-210 (1981).
 - [4] Wang, Y. and Chen, E., Effects of Phase Relative Motion on Critical Bubbly Flows through a Converging-diverging Nozzle, Phys. Fluids, Vol. 14(9), 3215-3223 (2002).
 - [5] Kaneko, A., Nomura, Y., Takagi, S., Matsumoto, Y. and Abe, Y., Bubble Break-up Phenomena in a Venturi Tube, Trans. JSME Ser. B, Vol. 78(786), 207-217 (2012).
 - [6] Uesawa, S., Kaneko, A. and Abe, Y., Measurement of Void Fraction in Dispersed Bubbly Flow Containing Micro-Bubbles with Constant Electric Current Method, Flow Meas. Instrum., Vol. 24, 50-62 (2012).
 - [7] Tamura, N., Kaneko, A., Uesawa, S., Abe, Y. and Ike, M., Development of Non-chemical Micro-bubble Washing Technology Using a Venturi Tube, Japanese Society for Multiphase Flow, Vol. 27(5), 577-584 (2014).
 - [8] Uesawa, S., Kaneko, A. and Abe, Y., Electrical Void Fraction Measurement of Bubbly Flow with Microbubbles, Trans. JSME Ser. B, Vol. 77(779), 1493-1508 (2011).
 - [9] Maxwell, J. C., A Treatise on Electricity & Magnetism. Vol. 1, 435-441, Dover Publications, New York (1954).
-