

ファインバブル生成用ベンチュリ管内の流動解析

安信 強, 蔣 欣, 島津公紀

Analysis of Flowfield in Venturi Tube Generating Fine-bubble

Tsuyoshi YASUNOBU, Xin JIANG and Masaki SHIMAZU

Abstract

The fine bubble has a lot of useful effects and is used for some industrial equipment. To extend the use of fine-bubble, the low price and a simple equipment to generate the fine-bubble must be invented. This paper aims to clear the influence of wall angle of venturi tube for the formation of fine-bubble by the experiment. In this experiment, the venturi tube is used as generation method of fine-bubble and the influence of wall angle is discussed. The pressure distribution on tube wall is measured by the transducer and the bubble area ratio is measured by digital camera. From the experiment results, it is concluded that the generation of fine-bubble strongly depends on the wall angle.

Keywords : Fine-bubble, Venturi tube, Bernoulli's equation, Steady flow

1. 緒 論

ファインバブルは、内部の圧力が高く、水中に長時間滞留し、ゆっくりと上昇しながら収縮して最終的に溶解もしくは崩壊する性質を有する。その性質に着目して、これまでに水質浄化を始め、船体抵抗の低減、汚染土壌の改質、野菜の生育向上など幅広く利用され、医療分野でも研究も進められており、一層の利活用が見込まれる⁽¹⁾。一方で、用途に適したファインバブルの生成方法の確立が課題であり、これまでに加圧溶解法や気泡崩壊法、せん断流法⁽²⁾などが実用化されているが、ファインバブルの利活用の拡大に合わせ、既存の生成方法の性能向上や改良が求められる。

本研究室では、従来からベンチュリ管方式のファインバブルの生成に関する研究⁽³⁾を行っているが、ベンチュリ管方式の最大の特徴は、構造が簡単で大量生産が可能であり、せん断などのための動力が不要で、配管に接続するだけでファインバブルを生成できることである。しかし、用途や流量などの作動条件に合わせた最適なベンチュリ管の設計条件については、まだ確立されていない。この原因として、ベンチュリ管の最小断面積部分（以下、スロートと呼称）より下流で気泡の微細化と気液二相流の生成が起こり、解析が容易でないことが挙げられる。ファインバブルの生成機構については、これまでに実験や数値シミュレーションにより、気泡を伴う気液二相流では気泡の影響で音速が低下するため、比較的低い速度で超音速の流れ場と同等の性質を有し、流れの減速の際に衝撃波が形成されて気泡の微細化が促進させるとの解析^{(4) (5)}や、スロート下流で境界層はく離して気泡と干渉し、気泡の微細化が促進される^{(6) - (8)}などの解析が論文で述べられているが、計測や可視化の限界や広範な条件での解析など、課題も多い。また、ファインバブルの生成に及ぼすパラメータについては、ベンチュリ管のスロート出口の断面積比、スロート下流のベンチュリ管壁面の広がり角、スロート下流の長さ^{(6) - (8)}が

影響し、適正值が明らかになりつつあるが、生成機構と同様に、広範な条件での解析など課題も多い。したがって、本研究室では、ファインバブルを生成するベンチュリ管の設計条件の明確化のために、継続的に研究に取り組んでいる。本報では、今後も利活用のニーズの高い、スロート径の小さな小型のベンチュリ管を対象とし、スロート下流のベンチュリ管壁面の広がり角に注目して、その影響を実験的に調査することを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

本研究で用いた実験装置の系統図をFig.1に示す。本研究では、作動流体として水道水を使用し、水槽に水道水を溜め、水槽の下面にベンチュリ管を取り付けてポンプでベンチュリ管に水道水を供給し、水槽内にファインバブルを発生させる。水槽内の水はポンプにより吸い込まれてベンチュリ管に供給され、水を循環使用している。また、インバータ装置によりポンプの回転数を変化させることが可能であり、ポンプの吐出圧力 p_w もしくは供給流量 Q_w をパラメータとした実験を行うことができる。今回の実験ではポンプの吐出圧力 p_w をパラメータとし、 $p_w=110, 130$ [kPa] の2種類の場合について実験した。なお、供給流量 Q_w は後述する供試ベンチュリ管によって差が生じ、 $Q_w=7.2\sim 8.3$ [L/min]であった。スロート下流のベンチュリ管壁面の広がり角の相違による圧力損失と、気泡の微細化の程度による影響と考えられる。

次に計測については、ベンチュリ管の壁面圧力の計測と、水槽内のファインバブルの撮影を行った。本研究で製作したノズルの大きさは比較的小さいため、直径 $d=2$ [mm] の静圧孔をらせん状に12ヶ所設置し、チューブを差し込んでスロートの壁面圧力を計測した。このため、3 [mm] 間隔でスロート下流の壁面圧力の測定が可能である。また、形成されるバブル直径の計測については、計測対象の大きさが

非常に小さいため、本研究ではデジタルカメラを使用して撮影し、その画像をパーソナルコンピュータに取り込み、二値化処理によりバブルの総面積を計測した。

本研究で使用したベンチュリ管の代表的な写真を Fig.2 に、具体的な数値を Table 1 にそれぞれ示す。ベンチュリ管では、ノズル内の断面積変化に伴う圧力変化を利用してファインバブルを生成する⁽¹⁾。本研究では、ベンチュリ管内部の可視化のため、アクリル製のベンチュリ管を使用し、スロート径を $d^*=3$ [mm] に固定し、スロート下流のベンチュリ管壁面の広がり角が $\theta=5, 11, 15, 20, 25$ [°] の5種類の管を製作し、供試ベンチュリ管として実験に使用した。

3. 実験結果と考察

3. 1 ベンチュリ管の壁面圧力の分布

ポンプの吐出圧力が $p_w=110$ [kPa] のときのベンチュリ管の壁面圧力の測定結果を Fig.3 に示す。図の横軸は、スロートより下流のベンチュリ管の長さ L で無次元化している。損失のない定常流に対するベルヌーイの定理と連続の式に従えば、いずれの供試ベンチュリ管もスロート下流よりベンチュリ管壁面の広がり角 θ が一定の元でベンチュリ管の断面積が増加するため、流れは減速され、圧力は回復（増加）するが、いずれの広がり角 θ においてもスロート下流で

圧力はほぼ一定となり、その後、急激に増加しており、特に $\theta=5$ [°] のベンチュリ管ではその傾向が顕著に現れている。ベンチュリ管内を撮影した画像ではスロート下流で白濁し、その下流で微細化された気泡が観察されるので、スロート下流の圧力が一定の領域で気泡が微細化されると考えられる。さらに一定圧力のあとの圧力回復も広がり角 θ によって差異があり、特に $\theta=5$ [°] の場合を除き、広がり角 θ の増加によってスロート下流の圧力が一定となる領域の長さは減少し、一定圧力のあとの圧力回復は急峻になる傾向にある。これらの結果から、広がり角 θ はベンチュリ管壁面の圧力分布に影響を与えることがわかる。さらに、今回の実験では広がり角 $\theta=5$ [°] の場合が一定圧力後の圧力回復が最も急峻となり、広がり角 $\theta=11$ [°] の場合が一定圧力領域の長さが最も長くなるが、これはスロート下流のベンチュリ管の長さ、もしくはスロートとベンチュリ管出口の断面積比の影響が大きいと考えられ、今後、調査を継続する必要がある。

ポンプの吐出圧力 p_w を増加させ、供給流量を $Q_w=8$ [L/min] としたときのベンチュリ管の壁面圧力の測定結果を Fig.4 に示す。広がり角は、図 (a) が $\theta=11$ [°]、図 (b) は $\theta=15$ [°] である。これらの結果から、供給流量 Q_w が増加するとスロート下流の圧力が一定となる領域の長さが増加するが、ベンチュリ管の出口圧力（大気圧）となる位置はそれほど変わらないことがわかる。

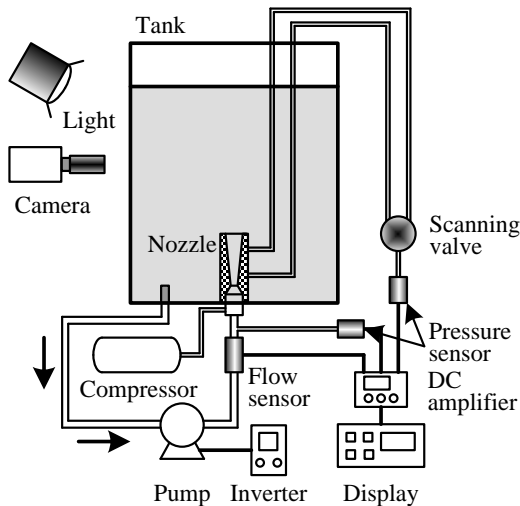


Fig.1 Schematic layout of experimental apparatus

Table 1 Nozzle parameters

	ベンチュリ管				
	a	b	d	e	f
スロート部の 直径 d^* [mm]	3				
スロート角 θ [°]	5	11	15	20	25
下流部長さ L [mm]	97. 8	15	40	25. 5	20.3



Fig.2 Nozzle photograph used in experiment ($\theta=11$ [°])

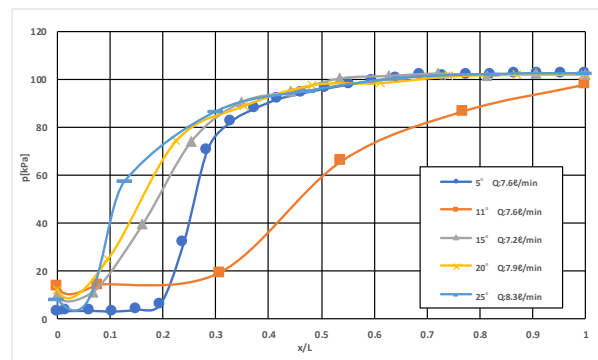


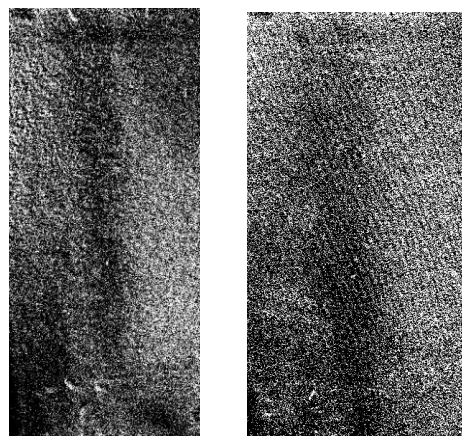
Fig.3 Pressure distribution on venturi tube wall

以上の結果から、広がり角 θ が増加するとスロート下流の圧力が一定となる領域も増加することがわかる。

3. 2 バブルの面積比の測定

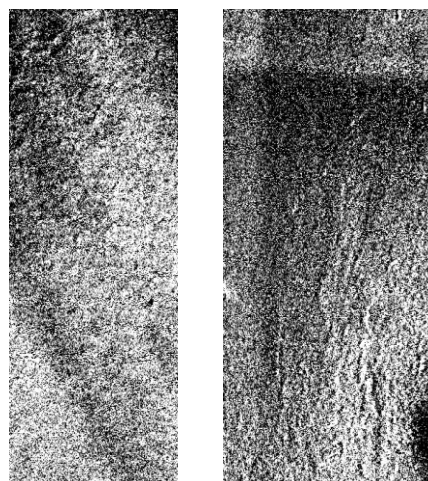
水槽内の撮影画像を二値化処理した結果をFig.5に示す。図 (a) から順に広がり角が $\theta=11, 15, 20, 25[^\circ]$ の結果を示し、ベンチュリ管出口から下流の領域を撮影し、画像処理した。いずれの結果も白色部分が気泡を示し、撮影エリア内で気泡が分布していることがわかる。さらに広がり角 θ によって白色部分、すなわち気泡の分布に差があり、広がり角 θ が気泡の生成に影響することがわかる。

ベンチュリ管壁面の広がり角 θ と気泡の面積比との関係をFig.6に示す。Fig.5の二値化画像の白色部分(気泡)の面積比を気泡の面積比として算出している。Fig.6より、今回の実験では、広がり角 $\theta=20[^\circ]$ のベンチュリ管が最も気泡の生成量が多く、広がり角 θ が増加もしくは減少すると、いずれも気泡の生成量も減少する。Fig.3より、気泡の生成量が多く、広がり角 θ が増加もしくは減少広がり角 θ によってベンチュリ管壁面の圧力分布に差が生じ、さらに気泡の生成量にも影響することがわかる。



(a) $\theta=11[^\circ]$

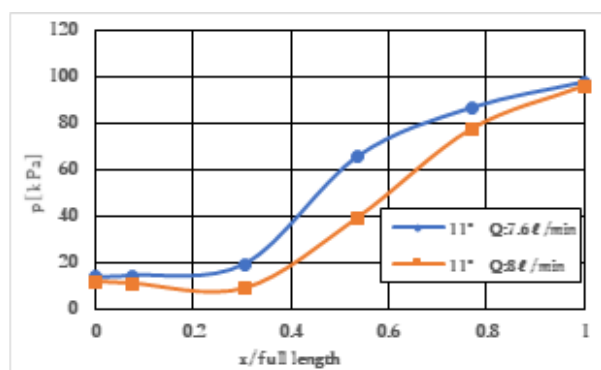
(b) $\theta=15[^\circ]$



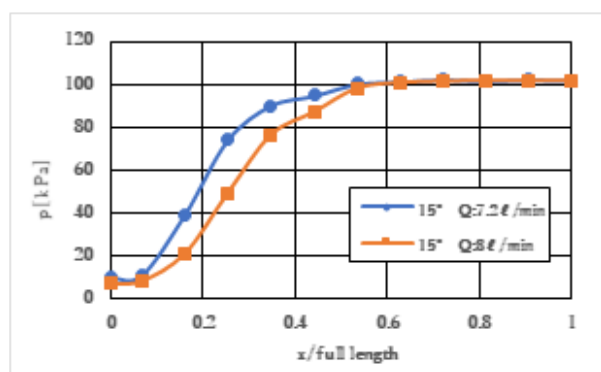
(c) $\theta=20[^\circ]$

(d) $\theta=25[^\circ]$

Fig.5 Binary image of fine-bubble



(a) $\theta=11[^\circ]$



(b) $\theta=15[^\circ]$

Fig.4 Effect of wall angle for pressure distribution on venturi tube wall

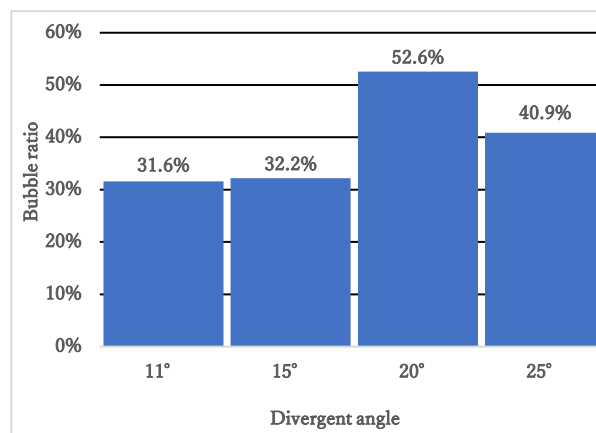


Fig.6 Bubble ratio in aquarium

以上の結果から、広がり角 θ が増加するとスロート下流のベンチュリ管壁面の圧力分布に変化が生じ、さらに気泡の生成量にも影響することがわかる。

4. 結 論

本研究では、ベンチュリ管を用いたファインバブルの生成において、バブルの生成に影響する、ベンチュリ管の広がり角 θ の影響について実験的に調査した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) ファインバブルが生成される場合、ベンチュリ管スロートより下流の管の断面積が増加しても圧力が回復せず、圧力が一定となる領域が生成され、その後、急激に圧力が回復する。
- (2) ベンチュリ管スロート下流の一定圧力領域の長さはベンチュリ管スロート下流の壁面の広がり角 θ の影響を受け、広がり角 θ が減少すると一定圧力領域の長さは増加し、圧力回復が遅くなる。
- (3) 本実験で使用したベンチュリ管で生成されるファインバブルの生成量はスロート下流の壁面の広がり角 θ の影響を受け、広がり角 $\theta=20$ [°] のベンチュリ管が最も気泡の生成量が多くなった。広がり角 θ が増加するとスロート下流のベンチュリ管壁面の圧力分布に変化が生じ、さらに気泡の生成量にも影響する。

参考文献

- (1) 経済産業省九州経済局資源エネルギー環境部, 「ファインバブル活用事例集」.
- (2) 芹澤昭示他1名, マイクロバブル・ノズルとその性能評価, 第20回混相流シンポジウム講演論文集, (2001), pp.139-140.
- (3) Xin JIANG, Tsuyoshi YASUNOBU et.al, Miniaturization of Bubbles by Shock Waves in Gas-Liquid Two-phase Flow in the Venturi Tube, Journal of Thermal Science, Vol.30, (2021), pp.1068-1076.
- (4) 上澤信一郎他, ベンチュリ管内気泡微細化現象における気泡挙動と流動特性, 混相流, 26巻, 5号, (2013), pp.567-575.
- (5) 金子暁子, 野村康通, ベンチュリ管内における気泡崩壊現象, 日本機械学会論文集(B編), 78巻786号 (2012), pp.207-217.
- (6) Zhao, E. (ed.), Effects of the divergent angle on bubble transportation in a rectangular Venturi channel and its performance in producing fine bubbles, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 114, (2019), pp. 192-206.
- (7) Huang, J., Sun, L., Du, M., Mo, Z., and Zhao, L., A visualized study of interfacial behavior of air-water two-phase flow in a rectangular Venturi channel, Theoretical and Applied Mechanics Letters, Vol. 8, No. 5, (2018), pp. 334-344.
- (8) Reichmann, F., Tollkötter, A., Körner, S., Kockmann, N., Gas-liquid dispersion in micronozzles and microreactor design for high interfacial area, Chemical Engineering Science, Vol. 169, 21 September, (2017), pp.151-163.

(2021年11月 1日 受理)